



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA**

ANÁLISIS DE FALLAS EN MAQUINARIA MINERA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

MÁXIMO RODRIGO GÓMEZ HIDALGO

**PROFESOR GUÍA:
MARCOS ORCHARD CONCHA**

**MIEMBROS DE LA COMISION
HECTOR AGUSTO ALEGRÍA
FRANCISCO JARAMILLO MONTOYA**

**SANTIAGO DE CHILE
JUNIO 2013**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: MÁXIMO RODRIGO GÓMEZ HIDALGO
FECHA: JUNIO 2013
PROF. GUÍA: MARCOS ORCHARD CONCHA

“ANÁLISIS DE FALLAS EN MAQUINARIA MINERA”

La minería del cobre en Chile ha crecido sostenidamente desde los años 90 y, actualmente, a nivel nacional, es la actividad económica más importante, y a nivel internacional, lidera la producción de este metal. En este contexto, para la industria nacional del cobre es fundamental aumentar la productividad; disminuir costos; y reducir los perjuicios a las personas, al entorno, y a las unidades productivas. En consecuencia, aumentar la continuidad operacional y disminuir los costos de falla de las correas transportadoras en los procesos de conminución contribuye a conseguir las metas establecidas. Por último, a fin de alcanzar las metas relacionadas a las correas transportadoras en estos procesos es necesario estudiar sus modos de falla, con el propósito de generar medidas compensatorias como esquemas de detección y aislación temprana apropiados.

El presente trabajo tiene como propósito realizar un análisis de fallas en los equipos y componentes mecánicos más importantes de las correas transportadoras CV-005, CV-006, y CV-007 de Minera Los Pelambres (transporte de mineral grueso del chancado primario a la molienda), con la finalidad de proponer esquemas de detección y aislación temprana destinados a dichos equipos y componentes (el desarrollo de medidas compensatorias se excluye de este trabajo). Particularmente en este análisis, se presentan las principales características de las correas transportadoras. En seguida, se identifican y describen los sub-sistemas de las correas transportadoras, se identifica su instrumentación, y se describen sus modos de operación normal, tanto de forma general como particular. Luego, a partir de la información entregada por CONTAC Ingenieros Ltda., se seleccionan los equipos y componentes mecánicos más importantes de las correas transportadoras escogidas, considerando la frecuencia y duración promedio de las paradas no planificadas (evento relacionado a fallas) de los sub-sistemas identificados. Posteriormente, en base a la información facilitada por Minera Los Pelambres se identifican y describen tanto los modos de falla en los equipos y componentes determinados como sus causas, efectos, y procedimientos de detección. Finalmente, a partir de este análisis y de la investigación centrada en ingeniería, se proponen esquemas de detección y aislación temprana para los modos de falla establecidos.

Los esquemas de detección y aislación temprana propuestos para los equipos y componentes determinados presentan diferentes niveles de desarrollo. En el caso de los polines, generalmente se basan en la captura de termografías; pero en las correas transportadoras escogidas, este esquema de inspección es impracticable, a causa de la distribución espacial de los polines (en otros sistemas distribuidos se han usado vehículos aéreos no tripulados para este fin). En el caso de la banda, generalmente se sustentan en la captura de imágenes superficiales y de rayos X. En el caso de los motores eléctricos, se basan en la medición de vibraciones y de la corriente en el estator. En el caso de los frenos de disco, no se encontraron esquemas específicos para la liberación fallida de las pastillas de freno; pero se podrían desarrollar a partir del procesamiento digital de imágenes y, por otra parte, la pérdida de eficiencia del resorte del sistema hidráulico cuenta con medidas compensatorias a implementar por parte de la empresa. Por último, en el caso de los reductores, se sustentan en la medición de vibraciones y en el análisis de aceites.

Como trabajo futuro se sugiere principalmente estudiar la (pre)factibilidad técnica y económica de los esquemas de detección y aislación temprana propuestos.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivo general.....	2
1.3	Objetivos específicos	2
1.4	Alcances.....	2
1.5	Estructura.....	3
2.	Revisión bibliográfica	4
2.1	Conceptos básicos.....	4
2.1.1	Estados de los procesos industriales.....	4
2.1.2	Propiedades de los procesos industriales.....	5
2.1.3	Modos de operación.....	6
2.1.4	Estrategias de mantenimiento.....	7
2.2	Esquema base del diagnóstico y pronóstico de fallas	9
2.3	Recolección de datos.....	10
2.3.1	Sensores de temperatura	10
2.3.2	Sensores de vibración	11
2.3.3	Sensores de análisis de aceites y lubricantes	11
2.4	Extracción de características.....	12
2.4.1	Métodos basados en modelos empíricos	12
2.4.1.1	Métodos basados en modelos de señal.....	13
2.4.1.2	Métodos basados en el análisis de datos multi-variantes	14
2.4.2	Métodos basados en modelos fenomenológicos.....	15
2.5	Detección de fallas.....	16
2.5.1	Métodos basados en umbrales de decisión.....	17
2.5.2	Métodos basados en la lógica difusa	17
2.5.3	Métodos basados en redes neuronales	18
2.6	Aislación de fallas.....	19
2.6.1	Métodos de clasificación	19
2.6.2	Métodos de inferencia	20
2.7	Fusión sensorial	20
2.7.1	Arquitectura centralizada.....	21
2.7.2	Arquitectura autónoma	21
2.7.3	Arquitectura híbrida.....	21
3.	Metodología de análisis de fallas en maquinaria minera	23
3.1	Paso 1: Introducción	25
3.2	Paso 2: Definición general del sistema	25
3.3	Paso 3: Definición particular del sistema.....	26

3.4	Paso 4: Selección de equipos y componentes	26
3.5	Paso 5: Información de fallas.....	27
3.6	Paso 6: Propuestas de esquemas de detección y aislamiento temprana	27
4.	Correas transportadoras.....	28
4.1	Paso 1: Introducción	28
4.2	Paso 2: Definición general del sistema	29
4.2.1	Sub-sistemas de las correas transportadoras.....	29
4.2.2	Instrumentación de las correas transportadoras.....	33
4.2.3	Modos de operación de las correas transportadoras	34
4.3	Paso 3: Definición particular del sistema.....	34
4.3.1	Sub-sistemas de las correas transportadoras escogidas	34
4.3.2	Instrumentación de las correas transportadoras escogidas	37
4.3.3	Modos de operación de las correas transportadoras escogidas.....	38
4.4	Paso 4: Selección de equipos y componentes	39
4.5	Paso 5: Información de fallas.....	42
4.6	Paso 6: Propuestas de esquemas de detección y aislamiento temprana	45
5.	Conclusiones	53
5.1	Trabajo futuro	54
6.	Bibliografía.....	56
7.	Anexos.....	62
7.1	Anexo A: Minera Los Pelambres.....	62
7.1.1	Información relevante.....	62
7.1.2	Mapa	63

Índice de tablas

Tabla 4.1 – Comparación entre correas transportadoras y camiones mineros	28
Tabla 4.2 – Correas transportadoras de Minera Los Pelambres	34
Tabla 4.3 – Características de las correas transportadoras escogidas.....	35
Tabla 4.4 – Instrumentación de las correas transportadoras escogidas	37
Tabla 4.5 – Secuencias de detención de las correas transportadoras escogidas	38
Tabla 4.6 – Estadísticas de las paradas planificadas consideradas.....	39
Tabla 4.7 – Grupos de fallas.....	41
Tabla 4.8 – Paradas no planificadas de las correas transportadoras.....	41
Tabla 4.9 – Frecuencias o bandas de frecuencias relacionadas a los modos de falla de reductores.....	50
Tabla 7.1 – Información relevante de Minera Los Pelambres.....	62

Índice de figuras

Figura 1.1 – Etapas del proceso de producción de cobre	1
Figura 2.1 – Clasificación de los estados de los procesos industriales.....	5
Figura 2.2 – Modos de operación	7
Figura 2.3 – Costos de las estrategias de mantenimiento	8
Figura 2.4 – Esquema base del diagnóstico y pronóstico de fallas	9
Figura 2.5 – Principio del funcionamiento de las termocuplas (efecto Seebeck).....	11
Figura 2.6 – Influencia de la elección de sensores en la detección de fallas	12
Figura 2.7 – Esquema general de la extracción de características de los métodos basados en modelos empíricos.....	12
Figura 2.8 – Esquema general de la extracción de características de los métodos basados en modelos fenomenológicos	15
Figura 2.9 – Métodos basados en modelos empíricos v/s métodos basados en modelos fenomenológicos.....	16
Figura 2.10 – Detección de fallas	17
Figura 2.11 – Umbrales de decisión	17
Figura 2.12 – Lógica difusa.....	18
Figura 2.13 – Redes neuronales.....	18
Figura 2.14 – Aislación de fallas	19
Figura 2.15 – Métodos de clasificación.....	19
Figura 2.16 – Métodos de inferencia	20
Figura 2.17 – Arquitectura centralizada	21
Figura 2.18 – Arquitectura autónoma.....	21
Figura 2.19 – Arquitectura híbrida	22
Figura 3.1 – Diagrama de bloques del cargador frontal de bajo perfil (semi-automático)...	23
Figura 3.2 – Influencia del modo de operación en la incidencia de fallas de dos LHD operados de forma distinta, considerando un periodo de 4 años y 10 meses. Gráficos obtenidos y traducidos de [49].....	24
Figura 3.3 – Influencia del enfoque de la estrategia de mantenimiento en la incidencia de fallas de un LHD. Gráficos obtenidos y traducidos de [49].	24
Figura 3.4 – Pasos de la metodología de trabajo	25
Figura 4.1 – Esquema de una correa transportadora convencional	30
Figura 4.2 – Esquema de la banda.....	31
Figura 4.3 – Esquema del sistema de potencia.....	32
Figura 4.4 – Diagrama de bloques de la correa transportadora	33
Figura 4.5 – Distribución de poleas de las correas transportadoras escogidas.....	36
Figura 4.6 – Sistema de potencia de las correas transportadoras escogidas	37
Figura 4.7 – Obtención de imágenes	46
Figura 4.8 – Imagen segmentada (pre-procesada) de un corte longitudinal. Imagen obtenida de [59].....	47
Figura 4.9 – Captura de imágenes de rayos X.....	47
Figura 4.10 – Imágenes de rayos X de: a) un corte, b) de un corte con corrosión, y c) de la condición normal. Imágenes obtenidas de [64]	48
Figura 4.11 – Medición de las vibraciones.....	50

Figura 7.1 – Mapa de la mina y planta, Minera Los Pelambres 63

Abreviaciones

A/D	(Conversión) análoga-digital
ARMA	(Modelo de) media móvil auto-regresiva (del inglés: Auto-Regressive Moving Average)
BPFI	Frecuencia de paso de bola en el anillo interior (del inglés: Ball Pass Frequency Inner race)
BPFO	Frecuencia de giro de bola en el anillo exterior (del inglés: Ball Pass Frequency Outer race)
BSF	Frecuencia de giro de bola (del inglés: Ball Spin Frequency)
CUSUM	Suma acumulativa (del inglés: CUmulative SUM)
EKF	Filtro de Kalman Extendido (del inglés: Extended Kalman Filter)
FMECA	Análisis de modos de falla, efectos, y criticalidad (del inglés: Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis)
GMF	Frecuencia de malla del engranaje (del inglés: Gear Mesh Frequency)
gpt	Gramos por tonelada
ICA	Análisis de componentes independientes (del inglés: Independent Component Analysis)
LKF	Filtro de Kalman Linealizado (del inglés: Linearized Kalman Filter)
LHD	Cargador frontal de bajo perfil (del inglés: Load Haul Dump)
IEEE	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (del inglés: Institute of Electrical and Electronics Engineers)
MIMO	(Sistema de) múltiples entradas y múltiples salidas (del inglés: Multiple Input Multiple Output)
MTBF	Tiempo medio entre fallas (del inglés: Mean Time Between Failure)
MTTF	Tiempo medio para falla (del inglés: Mean Time To Failure)
MTTR	Tiempo medio de reparación (del inglés: Mean Time To Repair)

NTC	(Termistor de) coeficiente negativo de temperatura (del inglés: Negative Temperature Coefficient)
PCA	Análisis de componentes principales (del inglés: Principal Component Analysis)
PIB	Producto Interno Bruto
PLS	(Regresión) parcial de mínimos cuadrados (del inglés: Partial Least Squares)
pmm	Partes Por Millón
PTC	(Termistor de) coeficiente positivo de temperatura (del inglés: Positive Temperature Coefficient)
RAM	Confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad (del inglés: Reliability, Availability, Maintainability)
RLS	(Regresión) recursiva de mínimos cuadrados (del inglés: Recursive Least Squares)
rms	Raíz del (valor) cuadrático medio (del inglés: Root Mean Square)
RTD	Detector de temperatura resistivo (del inglés: Resistance Temperature Detector)
RUL	Vida útil remanente (del inglés: Remaining Useful Life)
SAG	Semi-AutóGena (de la etapa del proceso productivo del cobre, molienda SAG)
SISO	(Sistema de) una entrada y una salida (del inglés: Single Input Single Output)
SPRT	Test de razón de probabilidad secuencial (del inglés: Sequential Probability Ratio Test)
TAN	Número ácido total (del inglés: Total Acid Number)
TBN	Número básico total (del inglés: Total Base Number)
tpd	Toneladas por día
tph	Toneladas por hora
TSA	Promedio de tiempo sincrónico (del inglés: Time Synchronous Avarage)

1. Introducción

1.1 Motivación

La minería del cobre en Chile ha crecido sostenidamente desde los años 90, a causa de la fuerte inversión extranjera (entre 1990 y 2002 la producción se triplicó) [1] y, actualmente, a nivel nacional, es la actividad económica más importante, representando el 13,2 % del PIB¹ (Producto Interno Bruto) [2] así como el 52,9% de las exportaciones del país [3] el año 2011, y a nivel internacional, lidera la producción de este metal; participando del 32,4% del mercado mundial [4], con 5.257.195 toneladas producidas [5] el año 2011. En este contexto, para la industria nacional del cobre es fundamental aumentar la productividad; disminuir costos; y reducir los perjuicios a las personas, al entorno, y a las unidades operativas.

En relación con la Figura 1.1., el proceso de producción de cobre se caracteriza por la extracción y traslado de mineral a planta, por la conminución de mineral fragmentado (chancado, en minerales oxidados; chancado y molienda, minerales sulfurados), por la concentración de minerales de cobre (aglomeración y lixiviación, en minerales oxidados; flotación, en minerales sulfurados), y por la obtención de cobre (extracción por solventes y electro-obtención, en minerales oxidados; fundición y electro-refinación, en minerales sulfurados). Particularmente en los procesos de conminución, el traslado de mineral fragmentado se efectúa mediante correas transportadoras, debido a sus menores costos operacionales y de mantenimiento como a su mayor rendimiento en comparación a los camiones mineros (sistema de transporte alternativo). En consecuencia, aumentar la continuidad operacional y disminuir los costos de falla de las correas transportadoras en estos procesos contribuye a conseguir las metas planteadas.

Por último, a fin de alcanzar las metas relacionadas a las correas transportadoras en estos procesos es necesario estudiar sus modos de falla, con el propósito de generar medidas compensatorias como esquemas de detección y aislación temprana apropiados.

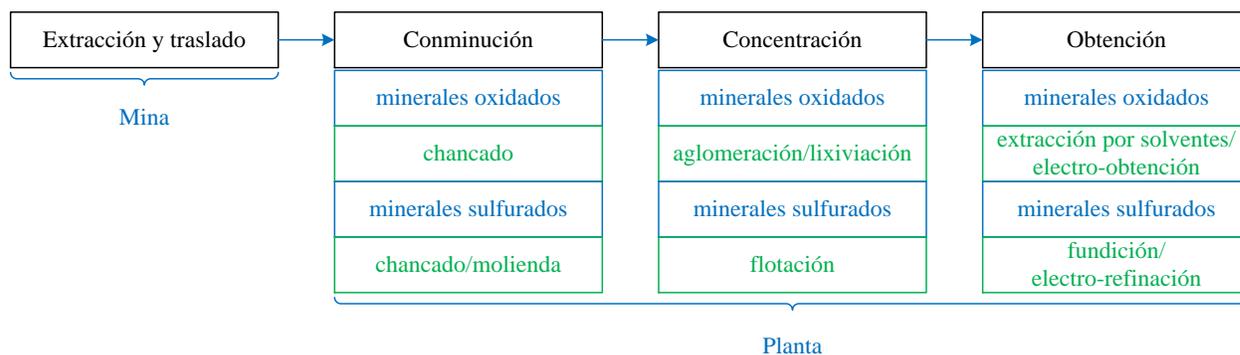


Figura 1.1 – Etapas del proceso de producción de cobre

¹ PIB a precio corriente.

1.2 Objetivo general

El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis de fallas en los equipos y componentes mecánicos más importantes de las correas transportadoras escogidas de Minera Los Pelambres. A partir de este análisis, se proponen esquemas de detección y aislación temprana para los modos de falla establecidos.

1.3 Objetivos específicos

- Presentar las principales características de las correas transportadoras.
- Definir el sistema (correa transportadora), identificar su instrumentación, y describir sus modos de operación normal, tanto de forma general como particular (con respecto a las correas transportadoras escogidas).
- Seleccionar los equipos y componentes mecánicos más importantes de las correas transportadoras escogidas, considerando la frecuencia y la duración promedio de sus paradas no planificadas (evento relacionado a fallas) de los sub-sistemas identificados.
- Identificar y describir tanto los modos de falla en los equipos y componentes determinados como sus causas, sus efectos, y sus procedimientos de detección.
- Proponer esquemas de detección y aislación temprana para los modos de falla establecidos.

1.4 Alcances

El presente trabajo cuenta con el apoyo de CONTAC Ingenieros Ltda. y Minera Los Pelambres. En particular, CONTAC Ingenieros Ltda. facilitó información cuantitativa (registro de detenciones de las correas transportadoras escogidas), mientras que Minera Los Pelambres proporcionó información cualitativa (datos técnicos e información de fallas en los equipos y componentes determinados).

Por otra parte, este trabajo sólo implica el análisis de los modos de falla en los equipos y componentes determinados a partir de la información facilitada por Minera Los Pelambres, y el planteamiento de propuestas de esquemas de detección y aislación temprana en base a este análisis y la investigación centrada en ingeniería. En consecuencia, la generación de medidas compensatorias y la evaluación de los esquemas de detección y aislación temprana propuestos se excluye de este trabajo (la generación de medidas compensatorias forma parte de los actividades propias de Minera Los Pelambres y la evaluación de los esquemas de detección y aislación temprana propuestos puede formar parte del trabajo futuro entre la Facultad de Ciencias y Matemáticas de la Universidad de Chile, CONTAC Ingenieros Ltda. y/o Minera Los Pelambres).

1.5 Estructura

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se presentan los conceptos necesarios para explicar las propuestas de esquemas de detección y aislación temprana. En el Capítulo 3 se detallan los pasos de la metodología de análisis de fallas en maquinaria minera. En el Capítulo 4 se implementa la metodología descrita en las correas transportadoras escogidas, con la finalidad de proponer esquemas de detección y aislación temprana para los equipos y componentes determinados. Finalmente, en el Capítulo 5, a partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se exponen las conclusiones finales y se establecen las actividades relacionadas al trabajo futuro.

2. Revisión bibliográfica

Cada proceso industrial está sujeto a diversas detenciones imprevistas durante su vida útil. Estas detenciones suceden, entre otros motivos, a causa de desviaciones no permitidas de las propiedades del sistema². Para disminuir este tipo de detenciones, sus costos, y sus efectos, es necesario generar medidas compensatorias³ y esquemas de detección y aislación temprana. Las medidas de compensación apuntan a eliminar este tipo de detenciones (en el mejor caso) o a reducir sus efectos. Por otra parte, los esquemas de detección y aislación temprana buscan disminuir la cantidad de este tipo de detenciones y, eventualmente, cambiar sus puntos de operación, o reconfigurar su entrada. Adicionalmente, los esquemas de detección y aislación temprana, y en algunos casos, las medidas compensatorias, pueden contribuir a disminuir las reparaciones o sustituciones programadas innecesarias.

El presente capítulo tiene el propósito de entregar los conceptos utilizados en el planteamiento de las propuestas de esquemas de detección y aislación temprana para los componentes determinados de las correas transportadoras CV-005, CV-006, y CV-007. Particularmente en la Sección 2.1, se definen los conceptos básicos al análisis de fallas en procesos industriales (estados, propiedades, modos de operación, y estrategias de mantenimiento), en la Sección 2.2, se introducen las etapas del esquema base del diagnóstico y pronóstico de fallas (los esquemas de detección y aislación temprana propuestos se sustentan en éste), en la Sección 2.3, se describen los sensores usados para la recolección de datos, en las Secciones 2.4, 2.5, y 2.6 se presentan los principales métodos de extracción de características, de detección, y aislación de fallas y, finalmente, en la Sección 2.7 se introduce el concepto de fusión sensorial.

2.1 Conceptos básicos

Los conceptos básicos del análisis de fallas en procesos industriales han sido definidos en diferentes publicaciones y estándares, pero sin consenso mayoritario, a causa de la gran diversidad de áreas de la ingeniería [6]. En consecuencia, para que se maneje un vocabulario común en las secciones y capítulos que vienen, se definen los estados, propiedades, modos de operación, y estrategias de mantenimiento de los procesos industriales.

2.1.1 Estados de los procesos industriales

Los estados que presentan los procesos industriales durante su vida útil se clasifican en la Figura 2.1 y se definen a continuación [7], [8]:

² En este contexto, los sistemas industriales (o simplemente sistemas) corresponden a las unidades productivas, en donde se ejecutan procesos industriales. Por otra parte, los sub-sistemas industriales (o simplemente sub-sistemas) corresponden a los equipos y componentes que forman parte de la unidad productiva.

³ Cambios operacionales, de equipos y componentes, y de diseño (inclusión en la operación tanto de equipos redundantes o en espera como de dispositivos de seguridad o de alivio).

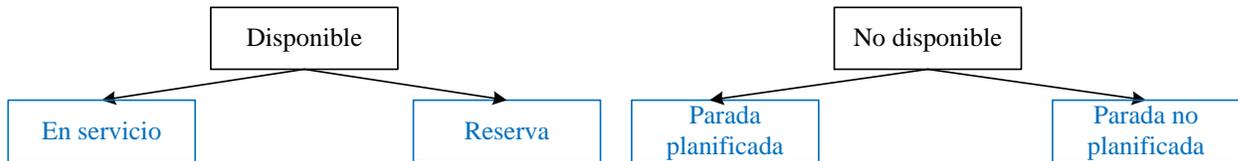


Figura 2.1 – Clasificación de los estados de los procesos industriales

Disponible: (*Available*) El sistema está capacitado para operar.

No disponible: (*Unavailable*) El sistema no está capacitado para operar, o en otras palabras, está detenido, a causa de paradas (planificadas o no planificadas), restricciones externas, accidentes, y conflictos laborales.

En servicio: (*In service*) El sistema está disponible y funcionando.

Reserva: (*Reserve*) El sistema está disponible, pero detenido por decisión operativa (en muchos casos de corte económico) o por la operación de otros sistemas.

Parada planificada: (*Planned outage*) El sistema no está disponible, debido a reparaciones o sustituciones programadas, revisiones, inspecciones, y pruebas (eventos planificados).

Parada no planificada: (*Unplanned outage*) El sistema no está disponible, a causa de reparaciones o sustituciones no programadas suscitadas por fallas o eventos críticos (eventos no planificados, ver Sección 2.1.3).

2.1.2 Propiedades de los procesos industriales

La clasificación y la definición de los estados que presentan los procesos industriales permiten definir las propiedades RAM (*Reliability, Availability, Maintainability*):

Mantenibilidad: (*Maintainability*) Esta propiedad cuantifica la eficiencia de las reparaciones o sustituciones no programadas en el sistema y se puede medir con el MTTR (*Mean Time To Repair*, tiempo medio en que el proceso permanece en el estado de parada no planificada, dado un periodo definido). El MTTR se puede estimar de la siguiente manera:

$$MTTR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{o_i} - t_{t_i})$$

en donde, n es el número de detenciones, t_{o_i} es el momento en que se inicia la detención i , y el t_{t_i} es el momento en que termina la detención i .

Confiabilidad: (*Reliability*) Esta propiedad cuantifica la capacidad del sistema de funcionar (o de no estar detenido) y se puede medir con el MTTF o vida media (*Mean Time To Failure*, tiempo medio en que el proceso permanece en el estado de en servicio, dado un periodo de tiempo definido o el inverso de la tasa de paradas no planificadas). El MTTF se puede estimar de la siguiente manera:

$$MTTF = \frac{1}{n} \left(t_{o1} + \sum_{i=1}^{n-1} (t_{oi+1} - t_{ti}) \right)$$

Este índice sólo es aplicable a sistemas no reparables⁴. En el caso que el sistema sea reparable (como la mayoría de los sistemas industriales), se puede utilizar el MTBF (*Mean Time Between Failure*, tiempo medio entre el término y el inicio de dos paradas no planificadas consecutivas). Por consiguiente, de su definición, el MTBF satisface:

$$MTBF = MTTF + MTTR$$

Pero en general el $MTTF \gg MTTR$, por lo tanto:

$$MTBF \approx MTTF$$

Disponibilidad: (*Availability*) Probabilidad de que el sistema opere en cualquier momento. En sistemas reparables, la disponibilidad se puede estimar de la siguiente manera:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{1}{1 + \frac{MTTR}{MTTF}}$$

Mientras que en sistemas reparables:

$$A \approx \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \approx \frac{1}{1 + \frac{MTTR}{MTBF}}$$

En consecuencia, la disponibilidad depende de la cantidad (MTTF o MTBF) y la duración media (MTTR) de las paradas no planificadas.

2.1.3 Modos de operación

Cuando el proceso industrial está funcionando (estado en servicio), aparte de los modos de operación normal, puede presentar modos de operación definidos por la presencia de los siguientes eventos [9], [10]:

Anomalía: (*Anomaly*) Discrepancia del comportamiento de una medición del proceso, con respecto a su comportamiento esperado o deseado.

Falla: (*Fault*) Desviación no permitida de al menos una propiedad característica del sistema, en comparación a sus límites pre-establecidos. De acuerdo a su naturaleza, se clasifican en:

⁴ Sistema que sólo se sustituye y no se repara, en caso de una falla o evento crítico, o en otras palabras, se usa sólo una vez.

Falla aditiva/multiplicativa: (*Additive/multiplicative fault*) En los modelos de los modos de operación de normal del sistema, las fallas aditivas o multiplicativas se representan como la suma o multiplicación de la “falla” con la entrada, los estados, o la salida respectivamente. Las fallas aditivas corresponden a perturbaciones, mientras que las fallas multiplicativas corresponden a variaciones de parámetros o dinámica no modelada.

Falla abrupta: (*Abrupt fault*) Este tipo de falla surge de forma instantánea, por ejemplo, la desconexión o bloqueo imprevisto de un sistema.

Falla incipiente: (*Incipient fault*) Este tipo de falla se produce de forma lenta, por ejemplo, el cambio de un parámetro físico de un sistema.

Falla intermitente: (*Intermittent fault*) Este tipo de falla surge y luego desaparece continuamente, por ejemplo, la desconexión y reconexión o el bloqueo y desbloqueo continuo de un sistema.

Mal función: (*Malfunction*) Interrupción intermitente del cumplimiento de una función pre-establecida del sistema, a causa de la existencia uno o más modos de falla.

Evento crítico: (*Failure*) Interrupción permanente de la capacidad del sistema de ejecutar una función pre-establecida, debido a la existencia uno o más modos de falla.

La detección de anomalías en el proceso no necesariamente implica la existencia de fallas en el sistema (las anomalías pueden ser producto de errores operativos o de mediciones ruidosas).

Por otra parte, cuando aparece una falla (ver Figura 2.2), el sistema opera de forma degradada. Luego, si el sistema continúa funcionando y la falla evoluciona a un evento crítico, el sistema puede dañar a otros sistemas (efectos secundarios). Finalmente, si el sistema sigue operando, el sistema puede terminar completamente destruido (evento crítico catastrófico, *catastrophic failure*).



Figura 2.2 – Modos de operación

2.1.4 Estrategias de mantenimiento

Las reparaciones o sustituciones efectuadas en el sistema pueden ser el resultado de las siguientes estrategias de mantenimiento [11], [12], [13]:

Mantenimiento correctivo: (*Corrective maintenance*) En esta estrategia de mantenimiento, las reparaciones o sustituciones se realizan después de que las fallas o eventos críticos sucedan, o en otras palabras, cuando son evidentes y, en consecuencia,

detectables (producto de dichos eventos, el proceso pasa al estado de parada no planificada). A diferencia de los eventos críticos, el inicio de las reparaciones o sustituciones en el sistema (o transición al estado de parada no planificada) se pueden postergar, a causa de que el sistema puede continuar operando, aunque en una condición degradada.

Mantenimiento preventivo: (*Preventive maintenance*) En esta estrategia de mantenimiento, las reparaciones o sustituciones se realizan antes de que las fallas o eventos críticos sucedan a partir de un programa pre-establecido. Las inspecciones, revisiones, y pruebas también se consideran como parte de las actividades de esta estrategia de mantenimiento (como resultado de las actividades mencionadas, el proceso está en el estado de parada planificada, aunque algunas inspecciones, revisiones, y pruebas se pueden realizar mientras el sistema está funcionando).

Mantenimiento predictivo: (*Predictive maintenance*) En esta estrategia se utilizan mediciones del sistema, con la finalidad de determinar su condición (modo de operación), estando en funcionamiento (en servicio). A partir de esta información, se pueden programar los trabajos de mantenimiento, antes de que ocurran fallas o eventos críticos evidentes, evitando paradas no planificadas.

En la actualidad, las empresas apuntan a aumentar la disponibilidad y a disminuir el costo de falla⁵ de las unidades que disponen. Para conseguir los objetivos planteados, la elección de la estrategia de mantenimiento es relevante (ver Figura 2.3). En caso que se oriente al mantenimiento preventivo, aumentan los costos de mantenimiento (aumentan las reparaciones o sustituciones), disminuyen las fallas o eventos críticos y, en consecuencia, disminuyen los costos de operación (suponiendo que la duración de las paradas planificadas es menor que las paradas no planificadas). Por el contrario, en caso que se oriente al mantenimiento correctivo, disminuyen los costos de mantenimiento (disminuyen las reparaciones o sustituciones), aumentan las fallas o eventos críticos y, por consiguiente, aumentan los costos de operación. Finalmente, en caso que se oriente al mantenimiento predictivo, se puede conseguir teóricamente el costo de falla óptimo, debido a que se puede reducir la cantidad de reparaciones o sustituciones programadas como la cantidad de fallas y eventos críticos mediante la determinación de la condición del sistema.

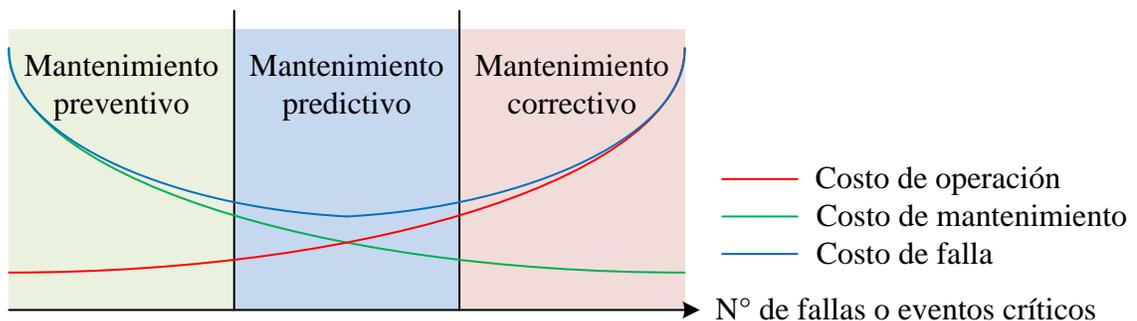


Figura 2.3 – Costos de las estrategias de mantenimiento

⁵ Costo correspondiente al costo de mantenimiento y al costo de operación de cada falla o evento crítico. El costo de mantenimiento corresponde a los ingresos perdidos, a causa de la reducción en la tasa de producción. El costo de operación corresponde a los recursos gastados en reparaciones o sustituciones.

2.2 Esquema base del diagnóstico y pronóstico de fallas

La condición actual del sistema se puede determinar a partir de la obtención de datos (mediciones) sistema. Luego, la manipulación de estos datos permite obtener propiedades características relacionadas al estado de salud del sistema. En seguida, la evaluación de estas propiedades permite generar información relevante para la programación de las reparaciones y sustituciones. Las etapas del esquema base que reúnen los conceptos mencionados se presentan en la Figura 2.4 y se definen a continuación [14]:

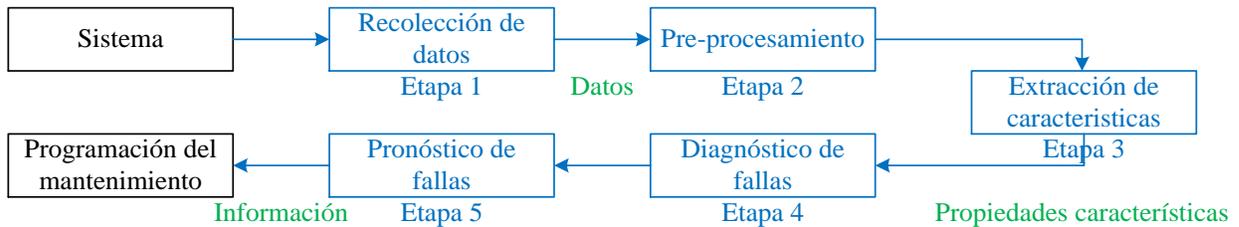


Figura 2.4 – Esquema base del diagnóstico y pronóstico de fallas

Recolección de datos: (*Data collecting*) En esta etapa, se utilizan sensores, con la finalidad de obtener datos del sistema. El principio de funcionamiento de los sensores (o técnicamente, dispositivos de medición) se basa en el sensado de la magnitud física de interés y en la transducción de la señal sensada a voltaje o corriente (señal eléctrica o dato).

Pre-procesamiento: (*Pre-processing*) En esta etapa, las señales eléctricas son pre-procesadas con el propósito de atenuar inconvenientes como el ruido, la baja amplitud, el sesgo, y la dependencia de variables como la temperatura mediante técnicas análogas (filtros activos, puentes de Wheatstone) o digitales (filtros digitales, *wavelets*), previa conversión A/D (Análoga-Digital).

Extracción de características: (*Feature extraction*), En esta etapa, los datos pre-procesados son manipulados (o procesados), con el propósito de obtener propiedades características relacionadas al estado de salud del sistema.

Diagnóstico de fallas: (*Fault diagnosis*) En esta etapa, se detectan, aíslan e identifican fallas en el sistema. La detección de fallas consiste en determinar la existencia de fallas en el sistema, mientras que la aislación de fallas consiste en delimitar los sub-sistemas que presenten fallas y, por último, la identificación de fallas consiste en establecer el tipo y la magnitud de las fallas.

Pronóstico de fallas: (*Fault prognosis*) En esta etapa, se estima la vida útil remanente (RUL, *Remaining Useful Life*) del sistema (o de un subsistema).

Cabe destacar, que el esquema base planteado también es válido para el diagnóstico y pronóstico de eventos críticos.

Los esquema de diagnóstico y pronóstico de fallas pueden presentar variaciones en cuanto su forma, dependiendo del autor. Particularmente en [15], la etapa de extracción de características y la sub-etapa de detección de fallas forman parte de la detección de fallas (en este caso, la sub-

etapa de detección de fallas es llamada detección del cambio). En consecuencia, las sub-etapas de aislamiento e identificación de fallas conforman el diagnóstico de fallas.

Actualmente, los esquemas de diagnóstico y pronóstico de fallas están en fase de investigación, por consiguiente, en los procesos industriales predominan las estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo. Entre los principales problemas a resolver, para la implementación a gran escala estos esquemas, se encuentran: desarrollar sensores que permitan detectar fallas tempranamente, entender la transición de falla a eventos críticos, desarrollar modelos fenomenológicos y empíricos para la predicción de la vida útil remanente y mejorar los modelos que determinan los efectos de los eventos críticos en los sub-sistemas.

A continuación se profundiza en las etapas de recolección de datos (especialmente en las tecnologías de sensores aplicadas al diagnóstico y pronóstico de fallas), de extracción de características, y en las sub-etapas de detección y aislamiento de fallas (de la etapa de diagnóstico de fallas), con la finalidad de respaldar teóricamente las propuestas de esquemas de detección y aislamiento temprana.

2.3 Recolección de datos

La recolección de datos mediante múltiples sensores, es la base fundamental del esquema base del diagnóstico y pronóstico de fallas (si no se capturan mediciones que contengan información de la condición del sistema, es imposible determinar su estado de salud). Los sensores más utilizados para determinar la condición del sistema son los siguientes [16]:

2.3.1 Sensores de temperatura

La temperatura es un excelente indicador de eventos críticos inminentes, debido a que las propiedades térmicas de sólidos, líquidos, gases revelan la condición de dichos elementos. Los sensores de temperatura más comunes son [17]:

RTD: (*Resistance Temperature Detector*) El principio de funcionamiento de los RTDs se basa en la variación que experimenta la resistencia eléctrica con la temperatura, en metales como el platino y el níquel. Las ventajas que presentan los RTDs son: alta linealidad, precisión, y estabilidad, mientras que las desventajas que presentan son: alto costo, en caso que sean de platino, y rango de medición reducido (-200 – 600°C para RTDs de platino y -150 – 300°C para RTDs de níquel).

Termistor: Al igual que los RTDs, el principio de funcionamiento de los termistores también se basa en la variación de la resistencia eléctrica con la temperatura, pero a diferencia de éstos, son cerámicas semiconductoras. Las ventajas que presentan los termistores son: alta sensibilidad, bajo costo, y tiempo de respuesta reducido, mientras que las desventajas que presentan son: alta no linealidad (la relación entre la resistencia y la temperatura es de orden exponencial), baja precisión y estabilidad, y rango de medición reducido (-200 – 1000°C para termistores NTC, *Negative Temperature Coefficient*, y 60 – 180°C para termistores PTC, *Positive Temperature Coefficient*).

Termocupla: El principio de funcionamiento de la termocuplas se basa en el efecto Seebeck (si en los extremos de dos alambres de metal unidos, hay una diferencia de temperatura, se produce una corriente, en seguida, si el circuito es abierto, el voltaje de circuito abierto e , voltaje de Seebeck, es función del tipo de metales y de la temperatura de la juntura, como se observa en la Figura 2.5). Las ventajas que presentan las termocuplas son: alto rango de medición ($-270 - 2495^{\circ}\text{C}$) y bajo costo, mientras que las desventajas que presentan son: alta no-linealidad, baja precisión, estabilidad, y sensibilidad, y tiempo de respuesta elevado.

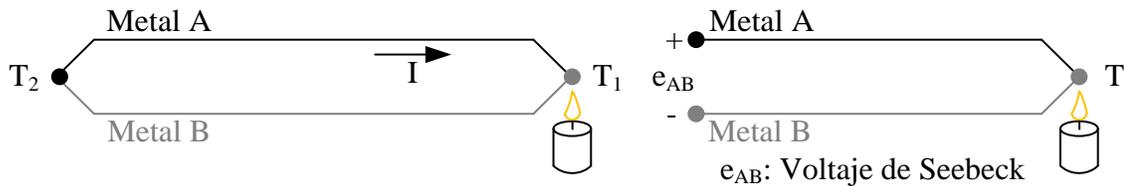


Figura 2.5 – Principio del funcionamiento de las termocuplas (efecto Seebeck)

2.3.2 Sensores de vibración

Las vibraciones pueden reflejar la presencia de fallas en máquinas sometidas a fuerzas vibratorias, por lo tanto, son la base de los esquemas de diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias. Los sensores de vibración más utilizados son: los acelerómetros piezoeléctricos y las galgas extensiométricas [18].

Acelerómetro piezoeléctrico: El principio de funcionamiento de los acelerómetros piezoeléctricos se basa en la variación del voltaje generado en el material piezoeléctrico por la compresión o expansión de éste en una dirección particular.

Galgas extensiométricas: El principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas se sustenta en la variación de la resistencia eléctrica por las fuerzas vibratorias que deforman al elemento resistivo en una dirección particular (la resistencia eléctrica depende del largo y área transversal del elemento resistivo).

2.3.3 Sensores de análisis de aceites y lubricantes

En los sistemas mecánicos, los aceites y lubricantes captan información de la mayoría de la fallas mediante el estudio del color, de la temperatura, de la viscosidad, de la densidad, del contenido de agua, de la basicidad (TBN, *Total Base Number*), de la acidez (TAN, *Total Acid Number*), de la conductividad, de la constante dieléctrica, y de escombros (ferrosos, metálicos, y no-metálicos) [19].

La detección temprana de fallas depende de los sensores elegidos en la estrategia de mantenimiento predictivo. Por ejemplo, si la presencia de humedad causa eventos críticos en una caja de cambios (rotura de engranajes, rodamientos, o ejes), con sensores de temperatura, vibración, corrosión, y ppm (partes por millón) de agua, se podrían detectar anticipadamente fallas relacionadas a estos eventos críticos, como se observa en la Figura 2.6:

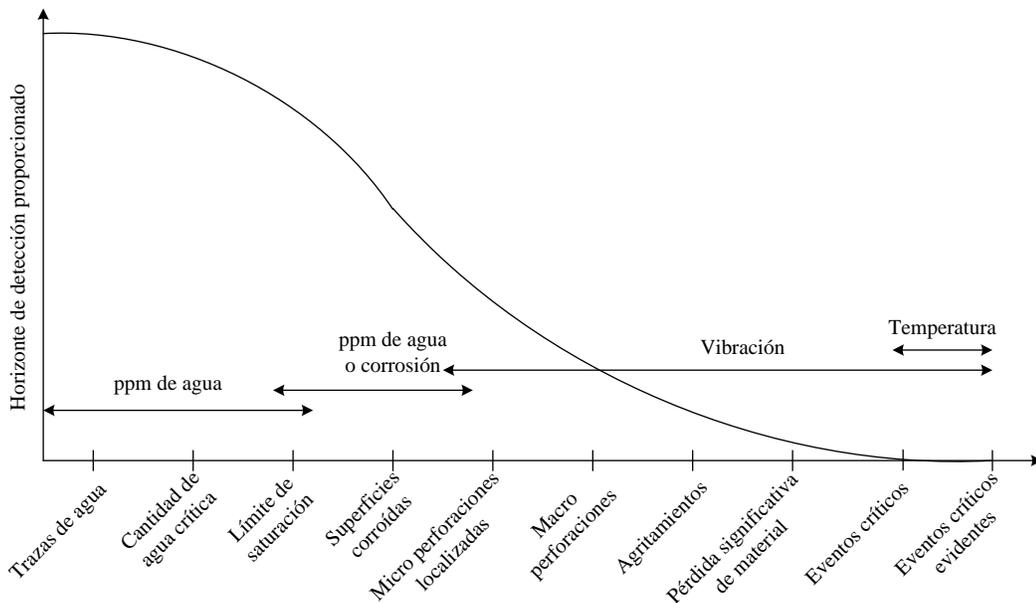


Figura 2.6 – Influencia de la elección de sensores en la detección de fallas

2.4 Extracción de características

La extracción de características permite conseguir propiedades relevantes (vector de características) de los datos pre-procesados para determinar la condición del sistema. Las técnicas de extracción de características se pueden clasificar en métodos basados en modelos empíricos y en métodos basados en modelos fenomenológicos [20].

2.4.1 Métodos basados en modelos empíricos

Los métodos basados en modelos empíricos (o métodos basados en minería de datos) obtienen propiedades del sistema a partir de modelos de señal o el análisis de datos multi-variantes, como se observa en la Figura 2.7 [21]:

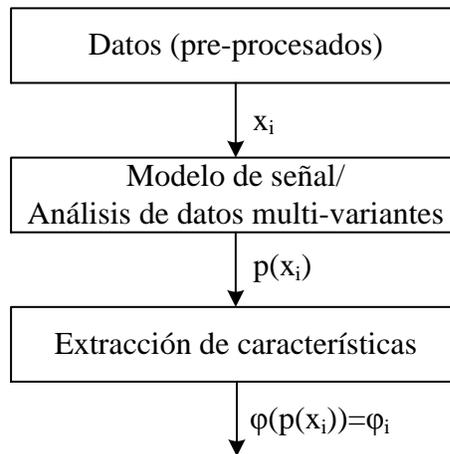


Figura 2.7 – Esquema general de la extracción de características de los métodos basados en modelos empíricos

2.4.1.1 Métodos basados en modelos de señal

Los modelos de señal se basan en el procesamiento en el tiempo o en la frecuencia de las mediciones x_i y se utilizan dependiendo de si las mediciones x_i son estacionarias (de sentido amplio) o no estacionarias, o en otras palabras, de las propiedades estocásticas de las mediciones x_i . En consecuencia, para las mediciones x_i estocásticas y estacionarias, se tienen los siguientes modelos de señal [22], [23]:

Momentos:

$$\text{media: } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\text{valor cuadrático medio: } x_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right)^{1/2} \quad 6$$

$$\text{valor peak: } x_{peak} = \max_{i=1, \dots, n} x_i$$

$$\text{factor cresta: } c_f = (x_{rms} - x_{peak})/x_{rms}$$

Momentos centrales:

$$\text{varianza insesgada}^7: \sigma_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

$$\text{asimetría (skewness): } \gamma_1 = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3$$

$$\text{curtosis (kurtosis): } g_2 = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4 - 3$$

Correlación
y covarianza:

$$\text{auto-correlación: } R_{xx}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_{i+n}$$

$$\text{auto-covarianza: } P_{xx}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(x_{i+n} - \bar{x})$$

$$\text{correlación cruzada: } R_{xy}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_{i+n}$$

$$\text{covarianza cruzada: } P_{xy}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_{i+n} - \bar{x})$$

Análisis espectral

$$\text{auto-espectro de potencia: } S_{xx}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} P_{xx}(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

$$\text{espectro de potencia cruzado: } S_{xy}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} P_{xy}(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

$$\text{transformada de Fourier}^8: X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$\text{cepstrum (complejo)}^6: C_{xx}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \log X(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$

Adicionalmente, se puede emplear la estimación de parámetros del modelo ARMA (*Auto-Regressive Moving Average*) de las mediciones.

⁶ rms: *root mean squares*.

⁷ $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$, varianza sesgada.

⁸ El modelo de señal no está definido para mediciones estocásticas, pero de todos modos, se puede aplicar en dicho caso (en su versión de tiempo discreto).

Por otra parte, para las mediciones x_i estocásticas y no estacionarias como las observaciones variantes en el tiempo, se tienen los siguientes modelos de señal:

Análisis espectral: transformada de Fourier de tiempo corto:

$$X_{ST}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)f(t - \tau)e^{-j\omega t} dt$$

$f(t - \tau)$: función de corta duración, τ : parámetro de diseño

wavelets:

$$\psi_{\alpha,\beta}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi\left(\frac{t - \beta}{\alpha}\right) \rightarrow W_{\psi}(\alpha, \beta) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi'\left(\frac{t - \beta}{\alpha}\right) dt$$

Como características φ_i , en el caso de los modelos de señal basados en la estimación de momentos, se pueden utilizar las mismas estimaciones. Por otra parte, en el caso de los modelos basados en el análisis espectral, se pueden emplear las mismas funciones (o muestras de ellas) o coeficientes calculados en determinadas bandas del dominio de las funciones (como la energía en bandas de frecuencia definidas, en el caso de la transformada de Fourier). Finalmente, en el caso de la estimación de parámetros del modelo ARMA de las mediciones, se pueden utilizar los mismos parámetros estimados.

Los métodos descritos son ampliamente empleados en máquinas rotatorias y en circuitos eléctricos [24], por ejemplo, en [25] se utilizan diferentes momentos para la estimación de la RUL de una caja de cambio.

2.4.1.2 Métodos basados en el análisis de datos multi-variantes

El análisis de datos multi-variantes se basa en la proyección de cada componente j del vector de mediciones x_i , en las bases ortogonales s_j , en cada instante de tiempo i (bajo el supuesto de que el vector de mediciones se puede representar por una combinación lineal de bases ortogonales). La matriz de transformación $W = A^{-1}$ ($s_i = Wx_i = A^{-1}x_i$) usualmente se debe estimar (\hat{W}) a partir de las mediciones históricas del sistema [26].

Como vector de características φ_i se pueden utilizar las proyecciones s_i (o parte de ellas, si se hace reducción de dimensionalidad).

En caso que cada componente j del vector de mediciones x_i tenga una distribución gaussiana (y que cada vector de mediciones sea independiente estadísticamente), se puede emplear PCA (*Principal Component Analysis*) o PLS (*Partial Least Squares*) (a diferencia de PCA, en PLS se separa el vector de mediciones x_i , en mediciones de entrada u_i y en mediciones de salida y_i). Por el contrario, en caso que tenga una distribución no gaussiana se puede utilizar ICA (*Independent Component Analysis*).

En general, estos métodos se emplean en sistemas complejos y de muchas variables, por ejemplo, en [27] se utiliza PCA para la detección de fallas de centrales eléctricas, en [28] se emplea PLS,

para la detección y aislación de fallas de manipuladores robóticos y en [29] se utiliza ICA para la detección de fallas de motores de inducción.

2.4.2 Métodos basados en modelos fenomenológicos

A diferencia del caso anterior, los métodos basados en modelos fenomenológicos obtienen propiedades del sistema (residuo⁹, parámetros estimados) a partir de modelos fenomenológicos, como se observa en la Figura 2.8 [30], [31]:

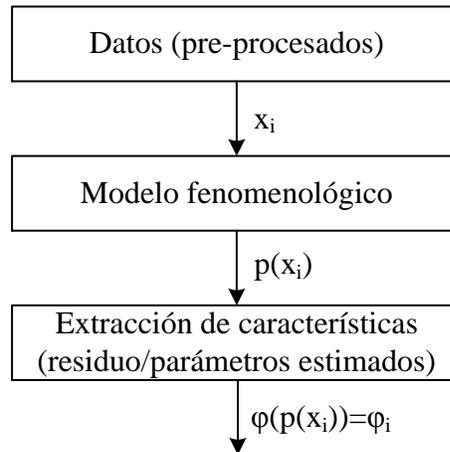


Figura 2.8 – Esquema general de la extracción de características de los métodos basados en modelos fenomenológicos

En caso que el modelo fenomenológico sea MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), lineal, e invariante se pueden utilizar observadores de estado como el observador de Luenberger, o ecuaciones de paridad, para estimar los estados del modelo fenomenológico (a diferencia del observador de Luenberger, las ecuaciones de paridad sólo requieren la entrada y las mediciones para calcular el residuo, o en otras palabras, no necesitan la ecuación diferencial del proceso, aunque es necesario que exista redundancia temporal). En caso que el modelo sea MIMO, lineal, invariante y estocástico, se pueden emplear estimadores de estado como el filtro de Kalman o el filtro de partículas, para estimar los estados del modelo fenomenológico (en comparación al filtro de partículas, en el filtro de Kalman, los ruidos de proceso y observación deben ser blancos, aditivos y Gaussianos)¹⁰.

Por otra parte, en caso que el modelo sea SISO (*Single Input Single Output*), lineal, invariante y estocástico (con ruido de observación blanco, aditivo, y Gaussiano), se puede utilizar RLS (*Recursive Least Squares*, método basado en mínimos cuadrados) para estimar los parámetros del modelo fenomenológico¹¹.

⁹ Función de la diferencia entre las mediciones y la predicción del modelo (estimación del estado).

¹⁰ El filtro de Kalman también se puede utilizar en sistemas variantes en el tiempo. Adicionalmente, existen versiones para sistemas MIMO, no-lineales, y variantes en el tiempo (LKF, *Linearized Kalman Filter*, y EKF, *Extended Kalman Filter*). El filtro de partículas también se puede emplear en sistemas MIMO, variantes en el tiempo y no-lineales.

¹¹ RLS también se puede emplear tanto en sistemas SISO, no-lineales, pero lineales en sus parámetros, e invariantes como en sistemas SISO, lineales, y variantes en el tiempo (RLS con factor de olvido).

Como vector de características φ_i , en el caso de los observadores y estimadores de estado, se puede emplear la misma estimación del estado o calcular el residuo, y por otro lado, en el caso de las ecuaciones de paridad y de la estimación de parámetros, se puede utilizar el mismo residuo o los mismos parámetros estimados respectivamente.

Los métodos descritos se emplean en sistemas que son sencillos de modelar fenomenológicamente como en [32] (observador de Luenberger) y en [33] (filtro de Kalman).

Como comentario final, cuando el sistema presenta muchos datos de diferentes tipos de fallas, pero es complejo, se pueden utilizar métodos basados en modelos empíricos (ver Figura 2.9). En cambio, cuando el sistema tiene pocos datos, pero es simple, se pueden emplear métodos basados en modelos fenomenológicos. Finalmente, cuando el sistema presenta muchos datos de diferentes tipos de fallas y es simple, ambos enfoques se pueden potenciar mutuamente y, en caso contrario, ningún enfoque es confiable.

A diferencia de los métodos basados en modelos empíricos, los métodos basados en modelos fenomenológicos pueden manejar fallas no previstas (sin registros históricos), no obstante, si el sistema es complejo su implementación se dificulta [34].

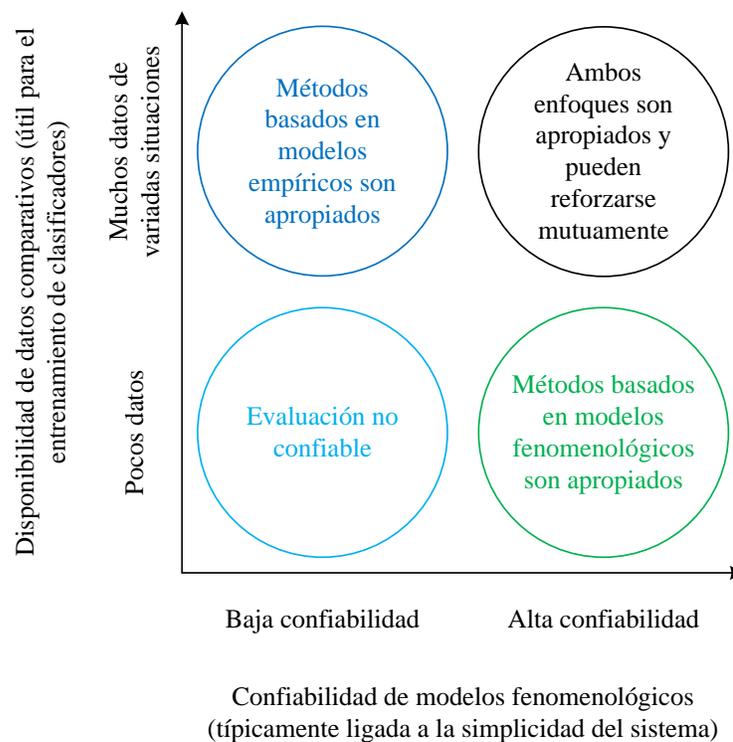


Figura 2.9 – Métodos basados en modelos empíricos v/s métodos basados en modelos fenomenológicos

2.5 Detección de fallas

El vector de características φ_i se puede comparar o procesar a partir del comportamiento normal de éste (detección de cambio), con el propósito de determinar la existencia de fallas, generando

un síntoma analítico (ver Figura 2.10). Los métodos de detección de fallas pueden estar sustentados en umbrales de decisión, la lógica difusa, o redes neuronales [35].

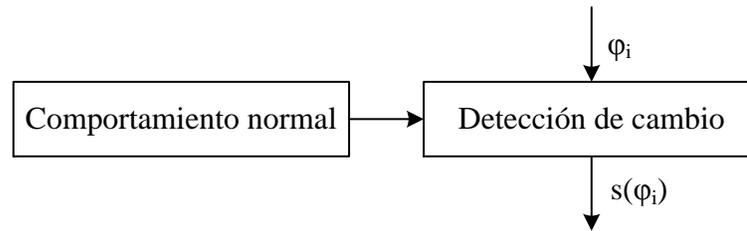


Figura 2.10 – Detección de fallas

2.5.1 Métodos basados en umbrales de decisión

En los algoritmos basados en umbrales de decisión, el vector de características φ_i es comparado con los límites de la región definida para la operación normal, con la finalidad de establecer el valor del síntoma analítico ($s_i = 0$ operación normal y $s_i = 1$ operación en falla o viceversa).

Los límites de las regiones se pueden determinar a partir del conocimiento experto (experiencia de los operarios) o de la estadística mediante métodos como el clasificador Bayesiano, el test de hipótesis, la carta de Shewhart, SPRT (*Sequential Probability Ratio Test*), CUSUM (*CUMulative SUM*), y el test de Hotelling (ver Figura 2.11). Particularmente en el clasificador Bayesiano, se requiere el conocimiento de las probabilidades a priori y la verosimilitud de cada región, mientras que en el test de hipótesis sólo se necesita el conocimiento de la verosimilitud de la región relacionada a la operación normal, dada una probabilidad de falsa alarma. Por otra parte, a diferencia de la carta de Shewhart, SPRT, y CUSUM, el test de Hotelling se puede utilizar cuando el vector de características es multi-variable.

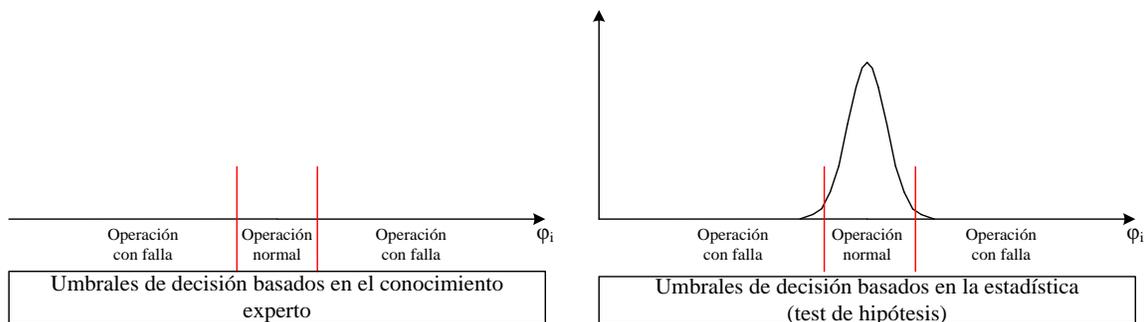


Figura 2.11 – Umbrales de decisión

Los umbrales de decisión se emplean en diversas aplicaciones, por ejemplo, en [36] se emplea CUSUM para detectar las fallas en sensores en un separador de vapor.

2.5.2 Métodos basados en la lógica difusa

En los algoritmos basados en lógica difusa, el vector de características se relaciona de forma no-lineal a un escalar relacionado con la condición del sistema mediante conjuntos difusos de entrada y salida (síntoma analítico), reglas e inferencia difusa (conocimiento experto traducido a una formulación matemática), como se observa en la Figura 2.12:

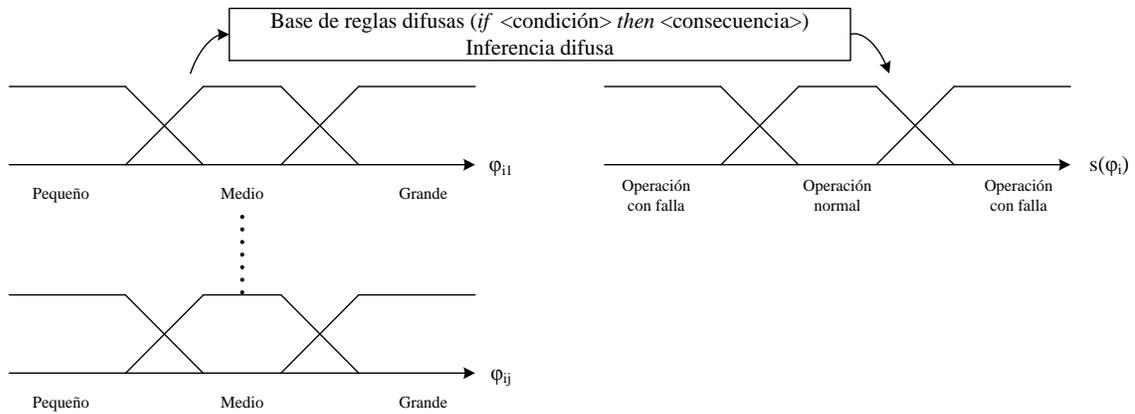


Figura 2.12 – Lógica difusa

La lógica difusa se utiliza en variados campos, por ejemplo, en [37] se emplea para la detección de fallas de motores síncrono de magnetización permanente bajo fluctuaciones de carga.

2.5.3 Métodos basados en redes neuronales

En los algoritmos basados en redes neuronales (ver Figura 2.13), el vector de características es ponderado por pesos (representados mediante flechas en la Figura 2.13) en la capa de entrada, para luego pasar por las neuronas (funciones de activación no-lineales) de la capa oculta. Posteriormente, este mismo procedimiento se repite con respecto a la capa oculta y la capa de salida (configuración más típica). Finalmente la capa de salida indica la condición del sistema. Matemáticamente:

$$f(x(t)) = \sigma \left(\sum_{j=1}^m z_j \sigma \left(\sum_{i=1}^n w_{ji} \varphi_i(x(t)) + w_{j0} \right) + z_0 \right)$$

en donde, $\sigma(\cdot)$ es la función de activación no lineal, z_j y w_{ji} son los pesos relacionados a la capa oculta y de salida, y z_0 y w_{j0} son los sesgos de la capa oculta y de salida.

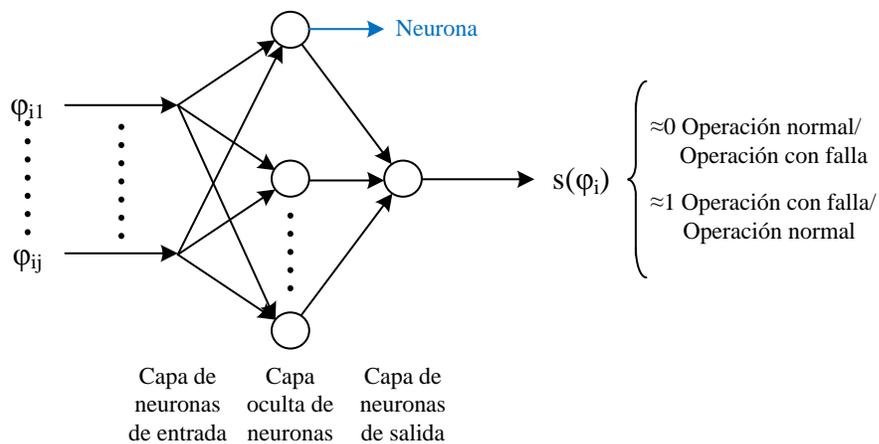


Figura 2.13 – Redes neuronales

Al igual que la lógica difusa, las redes neuronales se utilizan en diversas aplicaciones, por ejemplo, en [38] se emplea para detectar fallas en sistemas de distribución compensados (específicamente se utiliza una red neuronal derivada de algoritmos genéticos).

2.6 Aislación de fallas

En general, las fallas dan origen a otras fallas, y éstas al vector de síntomas analíticos s^{12} , por lo tanto, el vector de síntomas analíticos se puede comparar o procesar a partir de la información de fallas disponible, con la finalidad de delimitar los sub-sistemas que presenten fallas (ver Figura 2.14), determinando el vector de indicadores de fallas f^{13} . Las técnicas de aislación de fallas se pueden clasificar en métodos de clasificación y en métodos de inferencia [39].

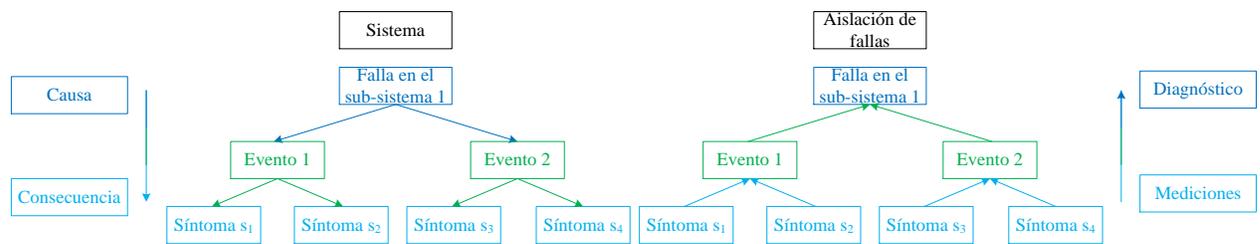


Figura 2.14 – Aislación de fallas

2.6.1 Métodos de clasificación

Los métodos de clasificación se basan en comparar los síntomas analíticos s_k con la región de referencia relacionada a cada sub-sistema (ver Figura 2.15) o procesar los síntomas analíticos s_k a partir de la información de fallas disponible.

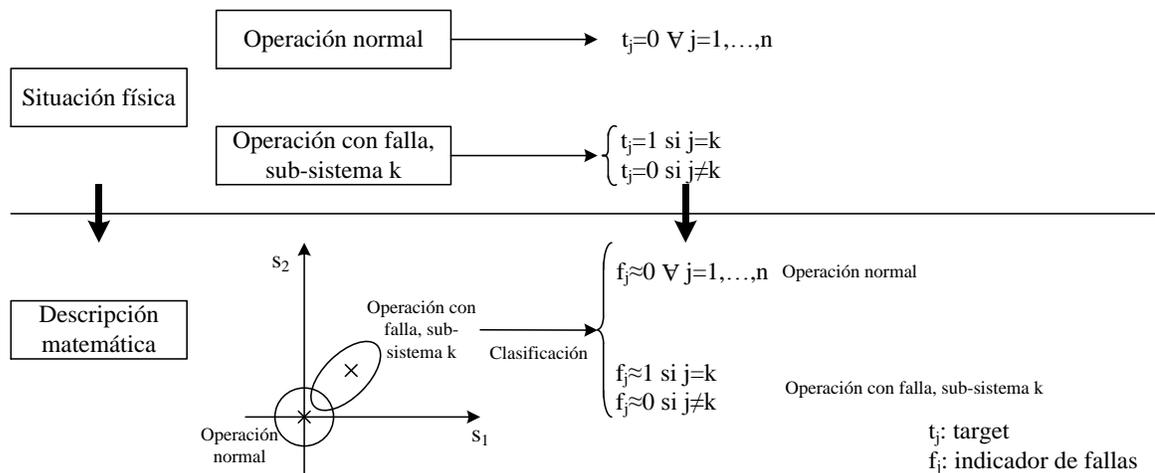


Figura 2.15 – Métodos de clasificación

¹² $s = [s_1, \dots, s_j, \dots, s_m]$ con $j = 1, \dots, m$ y $s_j = s(\varphi_{ij})$.

¹³ $f = [f_1, \dots, f_k, \dots, f_n]$ con $i = 1, \dots, n$ y $f_k \approx 0$ (si no o si hay fallas en el sub-sistema k) $f_i \approx 1$ (si o si no hay fallas en el sub-sistema k).

Los métodos más utilizados en la clasificación de síntomas analíticos son: el clasificador Bayesiano y, particularmente, el test de hipótesis; los clasificadores geométricos como el clasificador “el vecino más cercano”; los clasificadores inteligentes como las redes neuronales, el clustering difuso, los mapas auto-organizativos; y los árboles de decisión.

Los métodos de clasificación son los más empleados y se utilizan en variados campos, por ejemplo, en [40] se emplea la norma extendida de Frobenius (clasificador geométrico) para la aislación de fallas de trenes de levitación magnética.

2.6.2 Métodos de inferencia

En algunos sistemas, las relaciones entre fallas, eventos, y síntomas analíticos son parcialmente conocidas y se pueden expresar en forma de reglas:

$$if \langle \text{condición} \rangle \text{ then } \langle \text{consecuencia} \rangle$$

En la parte de la condición (premisa) va la información de los síntomas analíticos o eventos (por ejemplo, $\langle s_1 \text{ and } s_2 \rangle$ y $\langle e_1 \text{ or } e_2 \rangle$) y en la consecuencia va el evento o la falla resultante (con respecto a los ejemplos anteriores, $\langle e_1 \rangle$ y $\langle f_1 \rangle$ respectivamente), como se observa en la Figura 2.16:

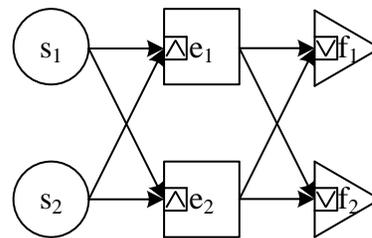


Figura 2.16 – Métodos de inferencia

Los métodos utilizados en la inferencia de fallas se basan en el razonamiento binario (árboles de fallas) como en el razonamiento aproximado (lógica difusa).

Los métodos de inferencia se utilizan en diversas aplicaciones, por ejemplo, en [41] se emplea la lógica difusa para la aislación fallas de calentadores de aire.

2.7 Fusión sensorial

Este método consiste en combinar datos pre-procesados o características provenientes de múltiples sensores, con la finalidad de crear características o nuevas características que contengan más información de la condición del sistema que los datos pre-procesados o las características originales, permitiendo mejorar los esquemas de diagnóstico y el pronóstico de fallas o eventos críticos. Las principales arquitecturas de fusión sensorial se pueden clasificar en [42]:

2.7.1 Arquitectura centralizada

Los datos pre-procesados son evaluados (en cuanto a su naturaleza competitiva o colaborativa) y fusionados inmediatamente (ver Figura 2.17) para la posterior extracción de características. Este enfoque proporciona la mayor exactitud, pero maneja de gran cantidad de información, en consecuencia, es impracticable si se cuentan con muchos sensores.

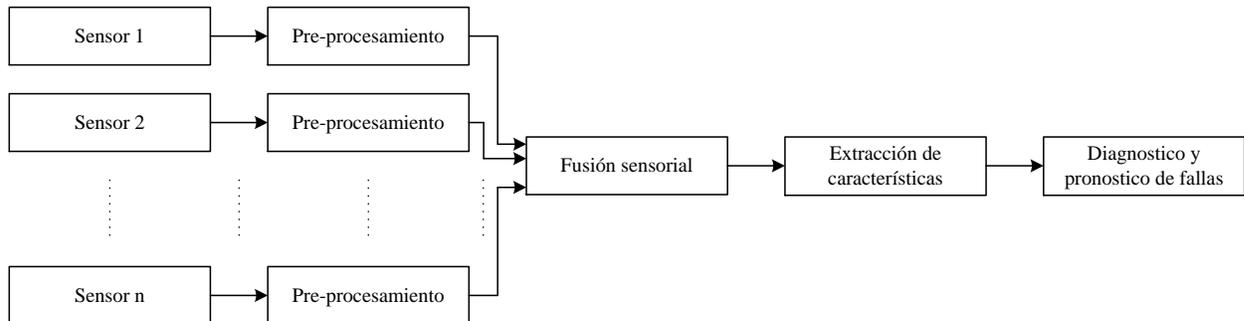


Figura 2.17 – Arquitectura centralizada

2.7.2 Arquitectura autónoma

Al contrario del enfoque anterior, la fusión sensorial maneja menos información, a causa de que los datos pre-procesados presentan menor dimensionalidad por la extracción de características (ver Figura 2.18); pero puede carecer de exactitud, debido a la gran cantidad de información eliminada de los datos pre-procesados en la extracción de características.

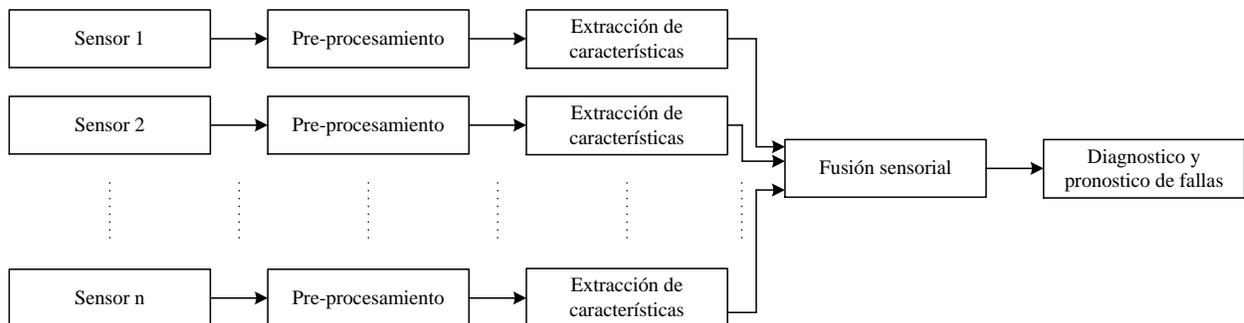


Figura 2.18 – Arquitectura autónoma

2.7.3 Arquitectura híbrida

Este enfoque toma lo mejor de los anteriores. Las características y los datos pre-procesados seleccionados se pueden fusionar y evaluar (ver Figura 2.19), de acuerdo a los requerimientos de la fusión sensorial.

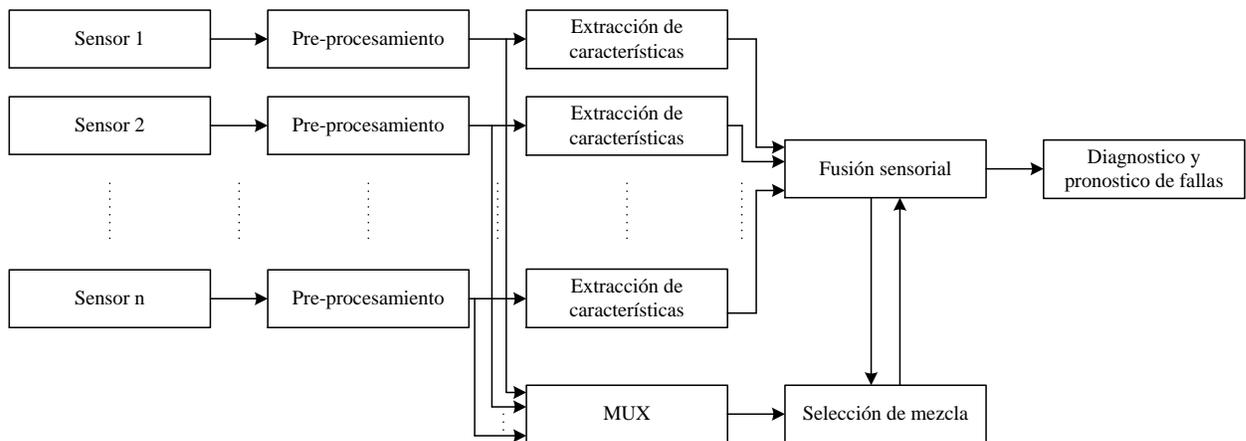


Figura 2.19 – Arquitectura híbrida

Cabe destacar que la fusión sensorial se puede aplicar varias veces con la finalidad de mejorar la exactitud de los resultados.

Los métodos más utilizados son: la ponderación o votación, la inferencia Bayesiana, la fusión de Dempster-Shafter, las redes neuronales y la lógica difusa.

La fusión sensorial es ampliamente empleada, por ejemplo, en [43] se utilizan diferentes momentos y métodos de fusión sensorial (ponderación, inferencia Bayesiana, y fusión de Dempster-Shafter), además de información empírica (observaciones de operarios), con el propósito de estimar la RUL de una caja de cambio con la máxima probabilidad de detección.

3. Metodología de análisis de fallas en maquinaria minera

El análisis de fallas se puede definir como el procedimiento sistemático de identificación y evaluación de fallas en los procesos industriales, con el propósito de maximizar su disponibilidad, minimizar sus costos de fallas, y sus riesgos (perjuicios a las personas, al medioambiente, o a las unidades productivas).

Los factores más importantes en la incidencia de fallas y, por consiguiente, en el análisis de fallas, son [44]:

- El diseño y el montaje
- Las condiciones de operación y mantenimiento
- Las condiciones ambientales (clima, altitud, cercanía o lejanía del mar, etc.)

Para ilustrar la influencia de estos factores en el análisis de fallas, se puede tomar como ejemplo al cargador frontal de bajo perfil o LHD (*Load Haul Dump*).

A modo de introducción, el LHD es un sistema de carguío, carga – transporte mínimo o acarreo – descarga, de materiales fragmentados en minas subterráneas. Los cargadores frontales de bajo perfil se utilizan para trasladar mínimamente las colpas de mineral desde el punto de extracción (tras la perforación y la tronadura de la roca) al punto de acopio, donde camiones mineros de bajo perfil o trenes toman las colpas de mineral para trasladarlas a la planta. A nivel nacional, las principales empresas proveedoras de LHDs son: Atlas Copco, Caterpillar, y Sandvick [45].

La complejidad del diseño limita el alcance del análisis de fallas e inclusive su factibilidad. Por ejemplo, en diversos estudios centrados en el análisis de fallas de LHDs, éstas máquinas se definen de forma general, considerando sólo los equipos y componentes críticos. Particularmente en [46], [47], y [48], se definen como en la Figura 3.1:

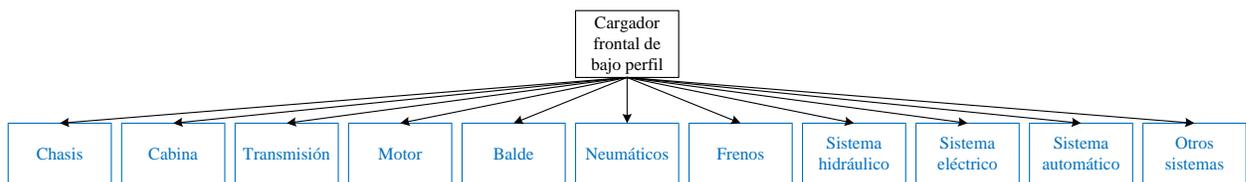


Figura 3.1 – Diagrama de bloques del cargador frontal de bajo perfil (semi-automático)

Por otra parte, las condiciones de operación influyen directamente en los resultados del análisis de fallas. En [49] se expone como la forma en que operan los LHDs considerados (manual o semi-automática) influye en la cantidad de fallas, como se observa en la Figura 3.2:

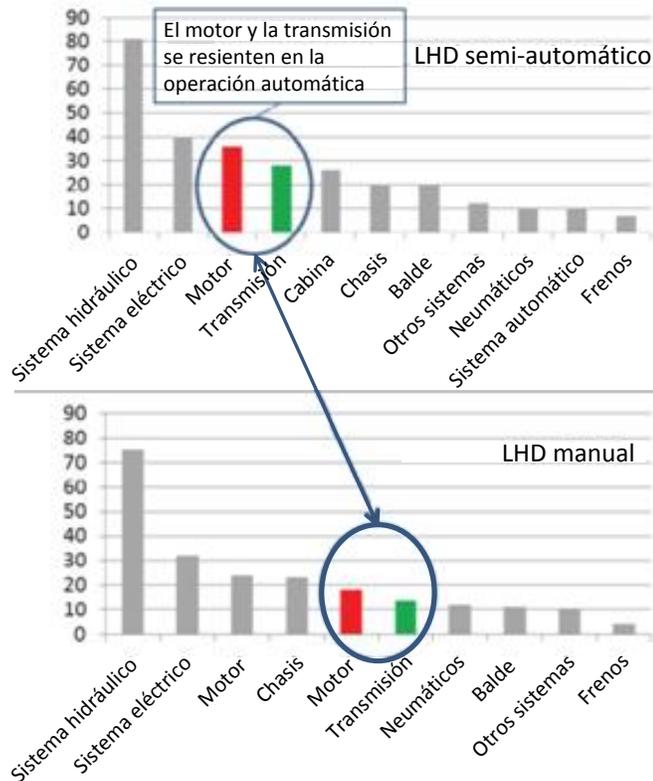


Figura 3.2 – Influencia del modo de operación en la incidencia de fallas de dos LHD operados de forma distinta, considerando un periodo de 4 años y 10 meses. Gráficos obtenidos y traducidos de [49].

En comparación al LHD operado en modo manual, el número de fallas es mayor en el LHD operado en modo semi-automático y, por otro lado, el orden en la importancia de fallas (desde el punto de vista de la frecuencia de incidencia) cambia, pasando a ser más relevantes las fallas de motores y transmisión.

Finalmente, las condiciones de mantenimiento también influyen directamente en los resultados del análisis de fallas. En [49] se muestra cómo la estrategia de mantenimiento (correctiva o preventiva) aplicada al LHD considerado influiría en la cantidad y duración de sus fallas, como se observa en la Figura 3.3:

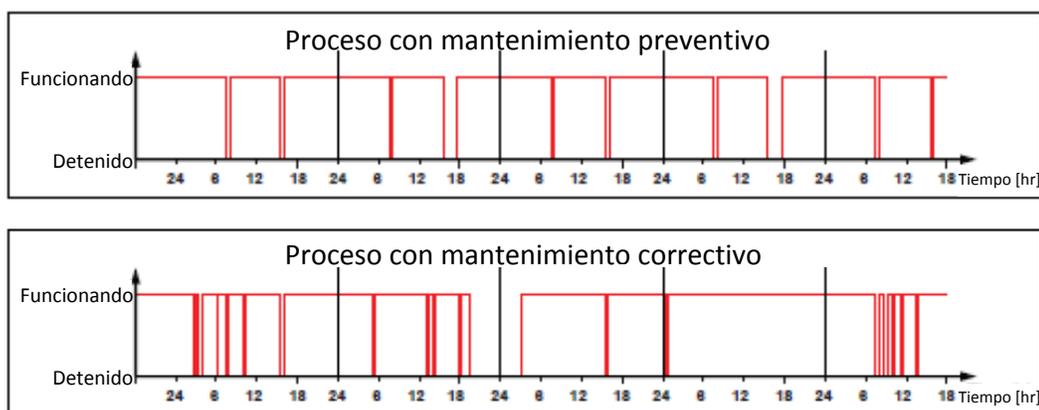


Figura 3.3 – Influencia del enfoque de la estrategia de mantenimiento en la incidencia de fallas de un LHD. Gráficos obtenidos y traducidos de [49].

Actualmente, los LHDs operados en modo automático presentan una gran cantidad de mantenimientos no programados (segundo gráfico de la Figura 3.3), por consiguiente, es fundamental optimizar el mantenimiento preventivo para tener mantenimientos programados a intervalos regulares (primer gráfico de la Figura 3.3).

En el presente trabajo, la metodología de análisis de fallas en maquinaria minera, se basa en el método FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*)¹⁴ [50] y sus pasos se presentan en la Figura 3.4 y se detallan a continuación:

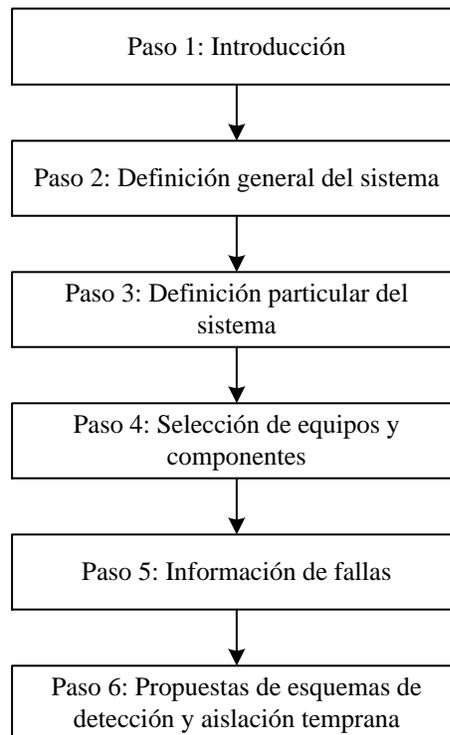


Figura 3.4 – Pasos de la metodología de trabajo

3.1 Paso 1: Introducción

En el Paso 1, se presentan las principales características de la unidad en el contexto de la minería del cobre.

3.2 Paso 2: Definición general del sistema

En el Paso 2, se identifican y se describen de forma general los sub-sistemas de la unidad en cada nivel de desagregación.

¹⁴ El estudio FMECA estudia tanto las fallas o los eventos críticos del sistema escogido como sus efectos y su criticidad, con el propósito de mejorar el diseño de aplicaciones comerciales y apoyar estudios de mantenibilidad y seguridad.

La definición de niveles de desagregación se basa en la información que entreguen. En función de la complejidad de la unidad, la identificación de sub-sistemas se puede realizar mediante los siguientes enfoques:

Enfoque físico: Los equipos y componentes de la unidad se enlistan desde el nivel de desagregación más alto al más bajo (de abajo hacia arriba). Este enfoque se utiliza cuando se pueden identificar claramente los equipos y componentes físicos de la unidad a partir de planos y manuales, entre otros documentos de ingeniería.

Enfoque funcional: A diferencia del enfoque anterior, las variables de entradas y salidas de la unidad se enlistan desde el nivel de desagregación más bajo al más alto (de arriba hacia abajo). Este enfoque se emplea cuando la unidad es compleja, o en otras palabras, no se pueden identificar claramente sus equipos y componentes.

La cantidad de niveles de desagregación depende de los sub-sistemas que contengan equipos y componentes que presenten modos de falla.

En unidades complejas se pueden combinar ambos enfoques, empleando el enfoque funcional en niveles bajos de desagregación y el enfoque físico en niveles altos.

En seguida, en base a la identificación y descripción de los sub-sistemas de la unidad, se construye el diagrama de bloques del sistema.

El diagrama de bloques ilustra secuencialmente las relaciones de dependencia entre los equipos y componentes o las funciones de la unidad (sub-sistemas), con la finalidad de establecer cómo influyen los modos de falla en los diferentes niveles de desagregación.

Finalmente, se identifica la instrumentación y se describen los modos de operación normal de la unidad de forma general.

3.3 Paso 3: Definición particular del sistema

En el Paso 3, a partir de la definición general del sistema, se identifica y describen los sub-sistemas, se identifica la instrumentación, y se describen los modos de operación normal de forma particular (con respecto a la unidad o al conjunto de unidades escogidas).

3.4 Paso 4: Selección de equipos y componentes

En el Paso 4, se seleccionan los equipos y componentes más importantes (o críticos), considerando la frecuencia y la duración promedio de las paradas no planificadas de los sub-sistemas identificados en el periodo definido. Particularmente en este análisis, se excluyen las fallas relacionadas a sistemas eléctricos, instrumentación, y sistemas de control, o en otras palabras, sólo se incluyen las fallas relacionadas a sistemas mecánicos, a causa de la mayor cantidad de investigación en estos sistemas en comparación a los demás.

3.5 Paso 5: Información de fallas

En el Paso 5, se identifican y describen los modos de falla en los equipos y componentes determinados.

En seguida, se determinan las posibles causas de los modos de falla establecidos.

Luego, se identifican los efectos secundarios (consecuencias sobre la condición o la operación de otros equipos o componentes) de los modos de falla establecidos. Los efectos secundarios se consideran en el mismo nivel desagregación (efectos locales), en el nivel posterior (hacia abajo), y en el nivel más alto (efectos finales).

Finalmente, se describen los procedimientos de detección de los modos de falla establecidos que se emplean actualmente (por inspección o por lógicas basadas en variables provenientes de mediciones análogas o digitales).

3.6 Paso 6: Propuestas de esquemas de detección y aislación temprana

En el Paso 6, se proponen esquemas de detección y aislación temprana de fallas; determinando los sensores requeridos para este propósito a partir del análisis desarrollado y de la investigación centrada en ingeniería

4. Correas transportadoras

4.1 Paso 1: Introducción

Las correas transportadoras (o cintas transportadoras) se definen como un sistema de transporte continuo de mineral fragmentado. En el contexto de la minería del cobre, las correas transportadoras se utilizan principalmente en planta.

Las ventajas y desventajas que presentan las correas transportadoras, en comparación a los camiones mineros (sistema de transporte sustituto), se resumen en la Tabla 4.1 [51]:

Tabla 4.1 – Comparación entre correas transportadoras y camiones mineros

Ventajas	<ul style="list-style-type: none">-Mayor vida útil.-Menor costo operacional y mantenimiento (las correas transportadoras requieren menos trabajadores y calificación profesional).-Mayor eficiencia energética (la eficiencia de las correas transportadoras es cercana al 75 %, mientras que en los camiones es cercana al 45% y, además se acentúa al aumentar el desnivel en el perfil de transporte).-Menor emisión de ruido y de polvo.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none">-Mayor inversión inicial.-Menor flexibilidad, en consecuencia, la planificación del emplazamiento debe ser cuidadosa.

En el mercado nacional, las principales empresas proveedoras de correas transportadoras son: Contitech Continental, TTM, Fenner Dunlop, Conveyor Belt, y Simma Trans [52].

En mina, las correas transportadoras se usan para trasladar colpas de mineral a la planta, dependiendo de la longitud y la pendiente del trayecto comprendido entre el punto de carga y la planta (en general, en minas a rajo abierto se emplean camiones mineros y en minas subterráneas, camiones mineros de bajo perfil o trenes; aunque el nuevo nivel del El Teniente contempla utilizar camiones mineros de bajo perfil y correas transportadoras [53]).

En planta, las correas transportadoras se usan para trasladar mineral fragmentado del chancado primario al secundario, del chancado secundario al terciario, del chancado terciario a la molienda convencional o del chancado primario a la molienda SAG (Semi-AutóGena). En general, entre el chancado primario y el secundario o entre el chancado primario y la molienda SAG se encuentran pilas de acopio y, en consecuencia, existen correas transportadoras que provienen tanto del chancado primario como de las pilas de acopio. Adicionalmente, las correas transportadoras se emplean en la recirculación de mineral fragmentado que no cumpla con la granulometría

requerida en el chancado secundario y terciario, en el traslado de bolas de acero a los molinos y en el tratamiento de pebbles y gravilla en la molienda SAG.

Finalmente, las correas transportadoras también se utilizan en las pilas de lixiviación, en el manejo de relaves, y en el traslado de concentrado de cobre en el puerto.

4.2 Paso 2: Definición general del sistema

4.2.1 Sub-sistemas de las correas transportadoras

La definición general de las correas transportadoras contiene dos niveles de desagregación: el primero sigue el esquema funcional y el segundo, el esquema físico. Adicionalmente, si en los equipos y componentes se distinguen diferentes tipos, éstos también se describen. Los sub-sistemas de las correas transportadoras se identifican en la Figura 4.1 y se describen a continuación [54], [55]:

Estructura: Sub-sistema de las correas transportadoras que tiene como función principal soportar al material fragmentado. En general, presenta los siguientes componentes:

Chute de traspaso: Embudo que sostiene y conduce al material fragmentado, por ejemplo, en las transferencias entre correas transportadoras, reduciendo su energía cinética.

Soporte: (O estructura de soporte) Perfiles metálicos (angulares o tubulares), fijados a torres estructurales, que sostienen a los polines, a las poleas (de forma directa), a la banda, y al material fragmentado (de forma indirecta).

Sistema móvil: Sub-sistema de la correa transportadora que tiene como función principal girar de forma solidaria con la banda (con bajo deslizamiento entre sus componentes y la banda y con mínimo roce en sus ejes). En general, presenta los siguientes componentes:

Polines: (O rodillos) Cilindros de acero que giran solidariamente con la banda y que contribuyen tanto a su limpieza como a su centrado. Con respecto a su función en las correas transportadoras, se distinguen los siguientes tipos de polines:

Polines de carga: Durante el trayecto de ida, los polines de carga sostienen a la banda (de forma directa) y al material transportado (indirectamente); curvando transversalmente la banda, con la finalidad de evitar derrames.

Polines de retorno: Durante el trayecto de vuelta, los polines de retorno sostienen a la banda y pueden estar recubiertos de goma (lisa, con discos, o helicoidal), con el propósito de limpiar la banda.

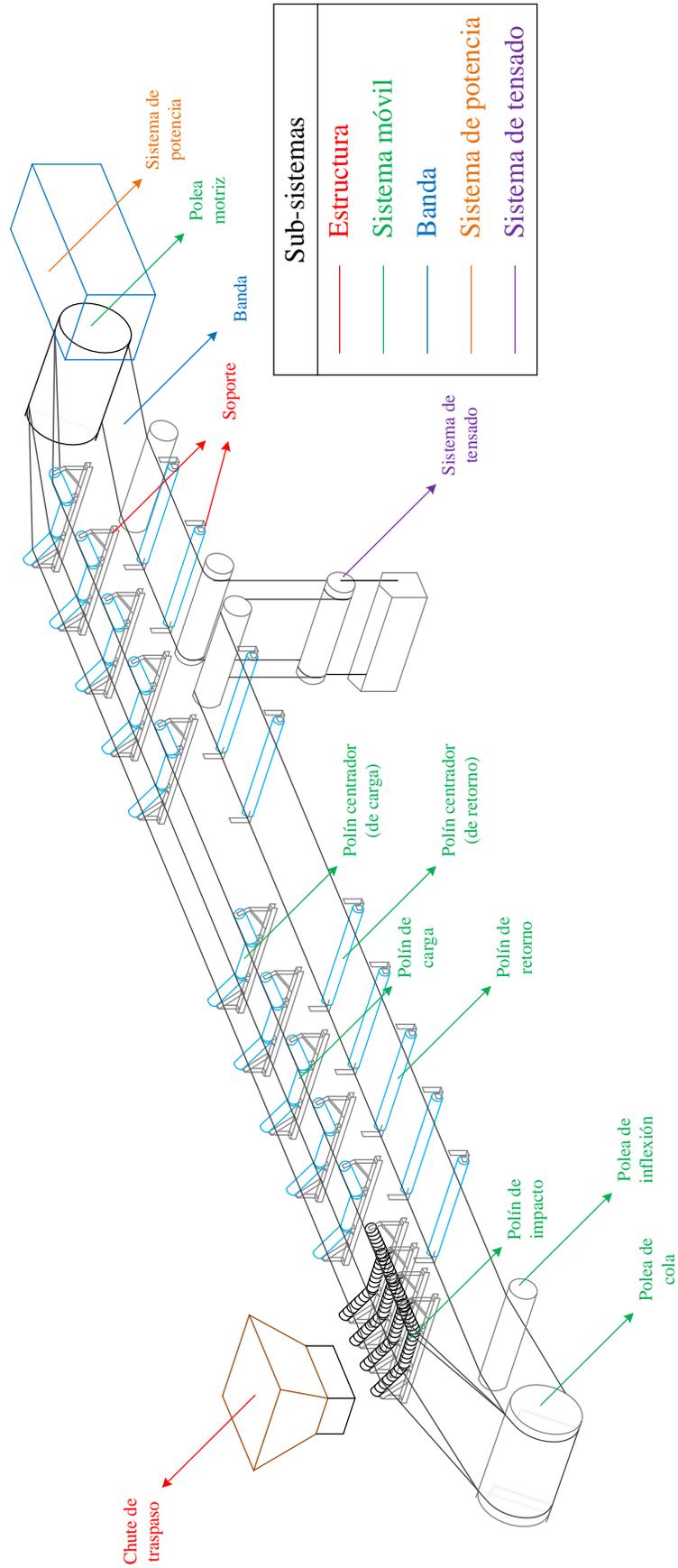


Figura 4.1 – Esquema de la correa transportadora convencional

Polines de impacto: A parte de tener las funciones de los polines de carga, los polines de impacto amortiguan los golpes provenientes de la descarga de material fragmentado a la banda, gracias a su recubierta de goma con discos.

Polines centradores: Los polines centradores alinean la banda ante diversas perturbaciones, y se usan tanto en el trayecto de ida como en el de vuelta.

Poleas: (O tambores) Cilindros de acero (de mayor diámetro en comparación a los polines) que giran solidariamente con la banda y que contribuyen a su tensado. Con respecto a su función en las correas transportadoras, se distinguen los siguientes tipos de poleas:

Polea motriz: La polea motriz entrega energía mecánica a la banda a partir del torque proporcionado por el motor eléctrico (energía cinética rotacional).

Polea de cola: La polea de cola permite el retorno de la banda (función estructural).

Poleas de inflexión: Las poleas de inflexión aumentan el área de contacto entre la banda y las dos poleas mencionadas, contribuyendo a mejorar su tensado.

Banda: Sub-sistema de las correas transportadoras que tiene como función principal soportar y trasladar al material fragmentado (con bajo deslizamiento entre banda y material). Además, debe ser flexible (tanto longitudinalmente, para el avance y retorno de la banda como transversalmente, para ser curvada por los polines) y resistente a la tensión aplicada por las poleas y el sistema de tensión. Desde el punto de vista constructivo, las partes de la banda se identifican en la Figura 4.2 y se describen a continuación:

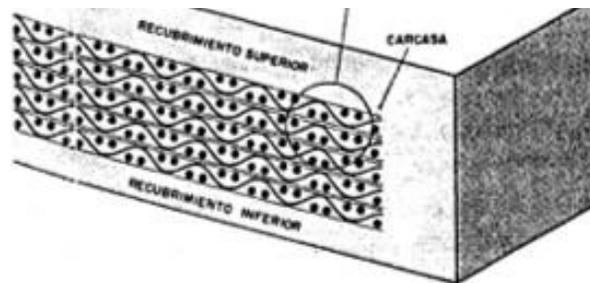


Figura 4.2 – Esquema de la banda

Carcasa: Tejido de algodón, poliéster, o poliamida que puede incluir cables de acero y que principalmente proporciona resistencia a la tensión.

Recubrimiento: Cubierta de goma de la carcasa que proporciona resistencia al desgaste y a los golpes.

Empalmes: Uniones vulcanizadas entre diferentes segmentos de banda.

Sistema de potencia: Sub-sistema de las correa transportadoras que tiene como función principal entregar energía mecánica a la polea motriz (de forma directa) y, en consecuencia, a la banda, al resto del sistema móvil, y al material fragmentado (de forma indirecta). Los equipos y componentes del sistema de potencia se identifican en la Figura 4.3 y se describen a continuación:

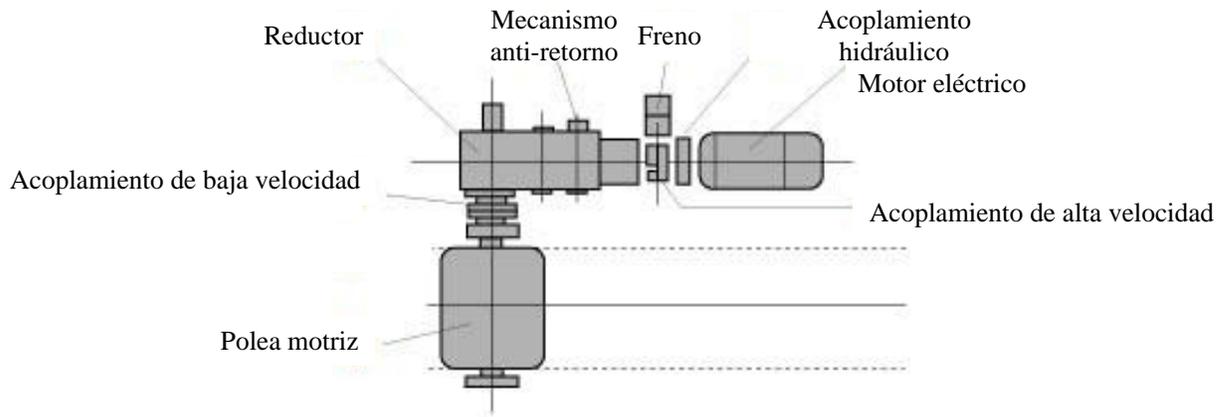


Figura 4.3 – Esquema del sistema de potencia

Acoplamientos: Componentes que reducen tanto las vibraciones como las sobrecargas, que permiten el arranque progresivo, y que separan mecánicamente al eje de la polea motriz del eje de salida del reductor (acoplamiento de baja velocidad) como al eje de entrada del reductor del eje del motor eléctrico (acoplamientos de alta velocidad e hidráulico).

Reductor: (O caja reductora de velocidad) Equipo que multiplica el torque del eje del motor eléctrico mediante engranajes, proporcionando al eje de la polea motriz el torque requerido. En esta conversión mecánica, la velocidad angular del eje del motor eléctrico disminuye o se reduce. Adicionalmente, los reductores disponen de un sistema de lubricación, con la finalidad de reducir el roce entre engranajes y refrigerarlos. El sistema de lubricación de los reductores puede ser auto-sustentado (el aceite se acumula en el fondo del reductor) o asistido (el aceite se acumula en el fondo del reductor, pero recircula y se inyecta a los engranajes).

Mecanismo anti-retorno: Equipo que retiene el material fragmentado, impidiendo que regrese. Este equipo sólo se utiliza en correas transportadoras con pendiente ascendente.

Freno: Equipo que detiene el movimiento de la correa transportadora mediante la conversión de energía cinética en energética calórica. El freno de disco corresponde al tipo de freno más usado. Este tipo de freno, se compone de un disco de freno en el equipo o componente a detener, de dos pastillas de freno, y un sistema hidráulico (cuando se activa el freno de disco, el sistema hidráulico acciona las pastillas de freno sobre el disco de freno, produciéndose en consecuencia, la detención de la correa transportadora).

Motor eléctrico: (de inducción y trifásico) Equipo que proporciona torque a la polea motriz mediante la conversión de la energía eléctrica en mecánica (energía cinética rotacional).

Sistema de tensado: Sub-sistema de las correas transportadoras que mantiene el tensado requerido entre la banda y la polea motriz y compensa las variaciones de longitud de la banda (fenómeno que afecta directamente en el tensado de la banda).

Finalmente, en base a los niveles de desagregación y a los sub-sistemas descritos, el diagrama de bloques del sistema se presenta en la Figura 4.4:

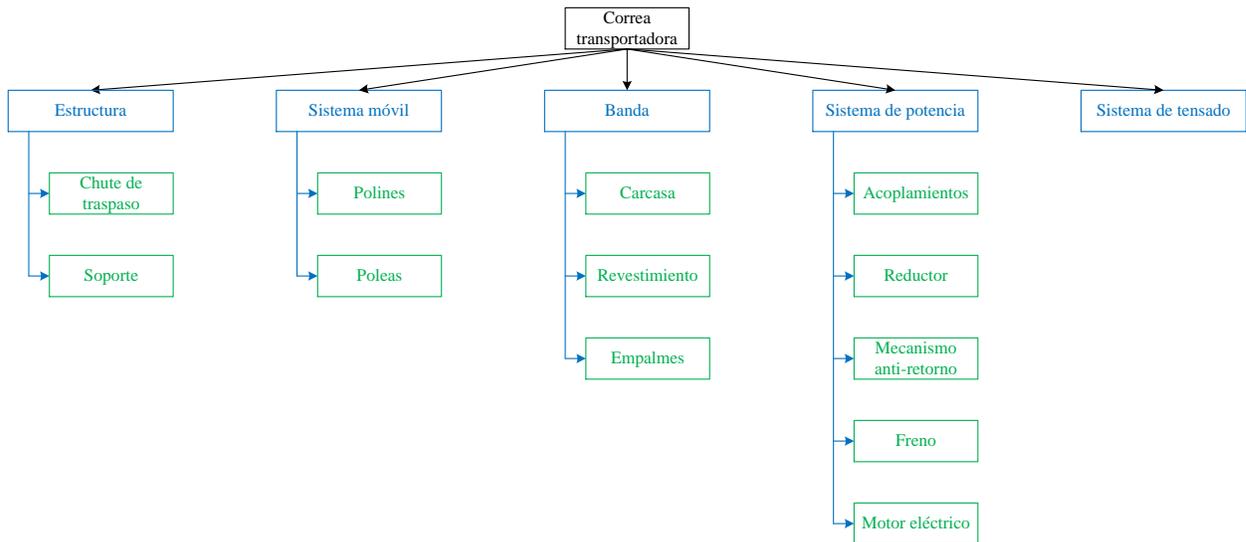


Figura 4.4 – Diagrama de bloques de la correa transportadora

4.2.2 Instrumentación de las correas transportadoras

Las correas transportadoras comúnmente presentan interruptores de atollo, en el chute de traspaso; sensores de corte longitudinal, de desalineamiento, y balanzas, en la banda; sensores de temperatura, vibración, y velocidad, en las poleas; sensores de estado (activado o desactivado) y desgaste, en el freno de disco; sensores de temperatura, vibración, y nivel, en el reductor; y sensores de temperatura, vibración, y velocidad, en el motor eléctrico. Generalmente, los sensores de temperatura se sitúan en los descansos¹⁵ de las poleas y en el motor eléctrico (en el caso del reductor, en los sellos). Adicionalmente, en el motor eléctrico, se instalan sensores de temperatura en el bobinado y en los rodamientos.

¹⁵ Componente estructural que soporta a los rodamientos.

4.2.3 Modos de operación de las correas transportadoras

En la operación normal de las correas transportadoras se distingue la partida, el régimen permanente, y el frenado. Durante la partida, la velocidad angular del motor eléctrico aumenta desde el reposo hasta que ingresa al rango asociado a su valor nominal mediante su variador de frecuencia. En el régimen permanente, la velocidad angular del motor eléctrico se regula, dada la variación de la carga (la distribución del material fragmentado no es uniforme) y, por otra parte, se supervisa el desalineamiento de la banda, la sobretensión de la banda, la sobrecarga, y el deslizamiento entre la banda y los polines. Finalmente, en el frenado, el motor eléctrico se apaga y se activa el freno, quedando la correa transportadora detenida.

4.3 Paso 3: Definición particular del sistema

4.3.1 Sub-sistemas de las correas transportadoras escogidas

Minera Los Pelambres (para más información ver Anexo 7.1) cuenta con trece correas transportadoras que trasladan material fragmentado entre diferentes etapas del proceso productivo, como se detalla en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2 – Correas transportadoras de Minera Los Pelambres

Correa(s) transportadora(s)	Función
CV001-CV701	Trasladar mineral grueso desde los dos chancadores primarios respectivamente a la pila de acopio de la planta.
CV005-CV006-CV007	Trasladar mineral grueso desde la pila de acopio de la mina a pila de acopio de la planta (las correas transportadoras van en serie, partiendo de la CV005).
CV020-CV021-CV702	Trasladar mineral grueso desde la pila de acopio de la planta a los tres molinos SAG respectivamente.
CV111	Trasladar concentrado de cobre desde la planta de flotación a la pila de acopio del puerto.
CV112-CV120-CV121-CV122	Trasladar concentrado de cobre desde la pila de acopio del puerto al embarque (las correas transportadoras van en serie, partiendo de la CV112).

De los unidades mencionadas, se escogen las correas transportadoras CV005, CV006, y CV007 debido a la importancia que tienen para la empresa (trasladan mineral grueso a largo 12,6 km) y a la alta disponibilidad de información estadística de falla en comparación a las demás correas transportadoras.

Las principales características de las correas transportadoras escogidas se resumen en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3 – Características de las correas transportadoras escogidas

Característica	CV005	CV006	CV007
Capacidad (tph ¹⁶)	9860	9890	9890
Velocidad (m/s)	6.8	6.8	6.8
N° de polines de carga ¹⁷	11871	10698	3102
N° de polines de retorno	2646	2362	726
N° de poleas motrices	2	2	2
N° de poleas de cola	1	1	1
N° de poleas de inflexión	2	2	4
Banda	ST-7800	ST-7800	ST-4000
N° de empalmes	42	37	10
Ancho (m)	1.8	1.8	1.8
Espesor (mm)	36,5	36,5	29,5
Largo entre ejes (m)	5903	5281	1540
N° de motores	4	4	2
Potencia/motor (kW)	2,5	2,5	2,5
N° de reductores	4	4	2
N° de etapas/reductor	3	3	3
Tipo de engranaje/etapa/reductor	cónica recta- recta-recta	cónica recta- recta-recta	cónica recta- recta-recta
N° de frenos de disco	6	6	3
Sistema de tensado	Gravitacional	Gravitacional	Gravitacional

¹⁶ tph, toneladas por hora.

¹⁷ En los polines de carga se consideran los polines de impacto.

El sistema móvil de cada correa transportadora escogida se compone de polines de carga, retorno, e impacto como de poleas motrices, de inflexión, y de cola. Con respecto a los polines, cada estación¹⁸ del trayecto de ida contiene tres polines carga o de impacto, mientras que cada estación del trayecto de vuelta contiene dos polines de retorno (las correas transportadoras escogidas también presentan polines de carga y de retorno centradores distribuidos de forma no uniforme). Con respecto a las poleas, las correas transportadoras escogidas presentan dos poleas motrices (a diferencia de la correa transportadora convencional definida en la Sección 4.2.1); originando diferentes distribuciones de poleas de inflexión, como se observa en la Figura 4.5:

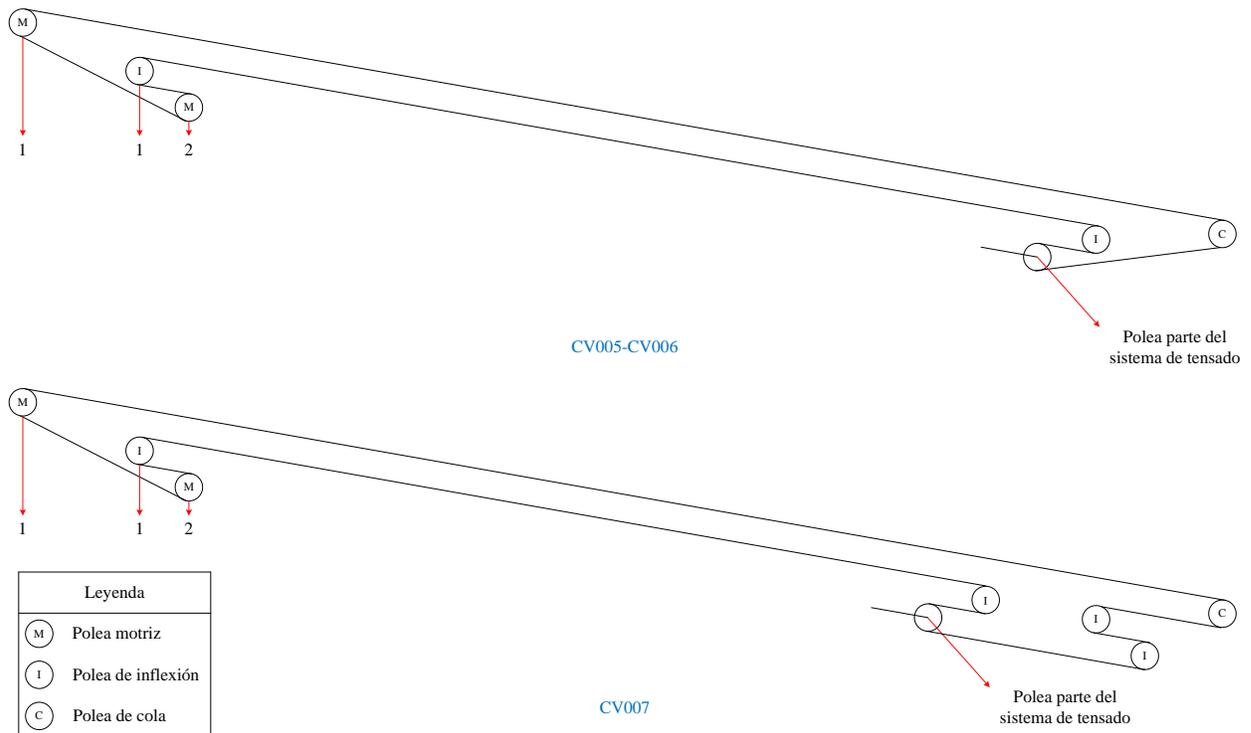


Figura 4.5 – Distribución de poleas de las correas transportadoras escogidas

El sistema de potencia de cada correa transportadora escogida (ver Figura 4.6) se compone de dos frenos de disco; dos acoplamientos de baja velocidad; dos reductores; dos acoplamientos alta velocidad; y dos motores eléctricos dispuestos en ambos lados de cada polea motriz, a excepción de la correa transportadora CV-007. Con respecto a los frenos de disco, el aceite se acumula en el reservorio, sin recirculación, y con respecto a los reductores, el aceite se acumula en el fondo del reductor y recircula impulsado por una bomba que además inyecta el aceite a los engranajes.

¹⁸ Parte específica de la estructura que sostiene a los polines.

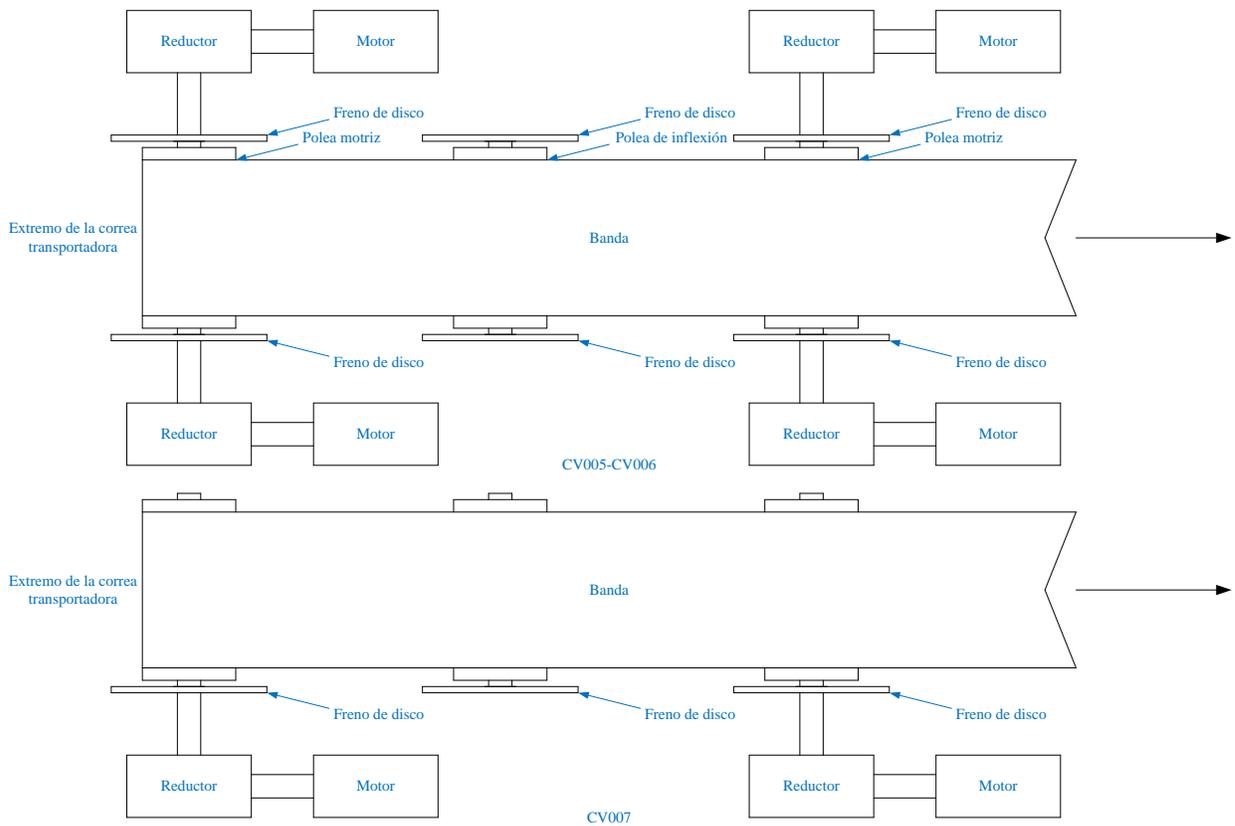


Figura 4.6 – Sistema de potencia de las correas transportadoras escogidas

4.3.2 Instrumentación de las correas transportadoras escogidas

La instrumentación que presenta cada correa transportadora escogida (enlistada por equipos o componentes) se resume en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4 – Instrumentación de las correas transportadoras escogidas

Equipos o componentes	Instrumento(s)
Chute de traspaso	Interruptor de atollo.
Banda	Balanza, sensores de desalineamiento, sensores de corte longitudinal, y monitor de empalmes.
Poleas	Sensores de velocidad (en la polea de inflexión 1, ver Figura 4.5), sensores de tensión o celda carga (en la polea motriz 1, ver Figura 4.5), y sensores de temperatura (descansos).
Polines	Sensores de velocidad (en el polín de retorno más cercano a la polea motriz 2, ver Figura 4.5) e interruptores de sobrevelocidad (en los dos polines de retorno más cercanos a la polea motriz 2).

Frenos de disco	Sensores de temperatura (disco de freno y caliper ¹⁹), sensores de presión (uno en cada equipo), y sensores de proximidad (uno en cada equipo).
Reductores	Sensores de temperatura (sellos de laberinto) y sensores de nivel (uno en cada equipo).
Motores eléctricos	Sensores de velocidad ²⁰ , sensores de temperatura, y sensores de vibración.

Con los sensores de velocidad (*encoders* ópticos) se puede determinar el deslizamiento existente (diferencia de velocidad entre las poleas y la banda). Por otra parte, el sensor de tensión protege a las correas transportadoras de sobretensiones y sobrecargas, en conjunto con la balanza.

En las correas transportadoras escogidas, los sensores de corte longitudinal corresponden al *belt rip* (mecánico y eléctrico), *coal control*, y *wire rope*. Por otro lado, con el sensor de proximidad se puede detectar el estado (activado o desactivado) de las pastillas de freno o balatas y con el sensor de temperatura en el sello de laberinto y el sensor de nivel se puede medir la temperatura y el nivel del aceite del reductor respectivamente.

4.3.3 Modos de operación de las correas transportadoras escogidas

En la operación normal de las correas transportadoras escogidas se distingue la partida, el régimen permanente, y el frenado, tal como se describe en la Sección 4.2.3. Aunque en la partida los motores eléctricos funcionan como motor, en el régimen permanente los motores eléctricos funcionan como freno regenerativo, dependiendo de la carga trasladada (si la carga trasladada supera las 1498 [tph], los motores eléctricos funcionan como freno regenerativo²¹, en caso contrario, funcionan como motor). Cabe destacar que la secuencia de detención del conjunto de correas transportadoras depende de la correa transportadora que deja de funcionar, como se detalla en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5 – Secuencias de detención de las correas transportadoras escogidas

Secuencia / Detención	CV-005	CV-006	CV-007
CV-005	-	Continúa funcionando, hasta trasladar su carga	Continúa funcionando, hasta trasladar su carga
CV-006	Deja de funcionar	-	Continúa funcionando, hasta trasladar su carga
CV-007	Deja de funcionar	Deja de funcionar	-

Nota: Cuando se reanuda el funcionamiento de las correa transportadoras escogidas, primero parte la correa transportadora CV-007, luego la CV-006 y, por último la CV-005.

¹⁹ Componente estructural con contiene a las pastillas de freno.

²⁰ Adicionalmente, cada motor eléctrico contiene otro sensor de velocidad.

²¹ En este caso, los motores eléctricos generan electricidad, aprovechando la carga trasladada en descenso.

4.4 Paso 4: Selección de equipos y componentes

Las detenciones de las correas transportadoras CV-005, CV-006, y CV-007 ingresan de forma automática al registro de detenciones²² de Minera Los Pelambres. En general, los operarios justifican cada detención, o en otras palabras, indican el estado de la correa transportadora relacionado a la detención (en reserva, no disponible, parada planificada, parada no planificada, entre otros más específicos). No obstante lo anterior, existen detenciones que no se justifican, que se justifican mal, o que se dividen, por ejemplo, si un mantenimiento no programado se desarrolla durante un cambio de turno es posible que salga dos veces en el registro.

Ante la situación expuesta, las paradas no planificadas (mecánicas) finalmente consideradas resultan de la comparación entre el registro de detenciones de Siemens²³ y el registro de detenciones de Minera Los Pelambres, entre el 01-05-2012 y el 31-12-2012 (rango de fechas disponible en el registro de detenciones de Siemens).

Con respecto a las paradas no planificadas (mecánicas) finalmente consideradas, se calculan los siguientes indicadores, en cada correa transportadora escogida:

Frecuencia f_{ij} : = [n° paradas no planificadas/periodo definido]
 f_{ij} : Número de paradas no planificadas ocurridas en la correa transportadora i , a causa del modo de falla j , en el periodo de tiempo definido

Duración promedio \bar{d}_{ij} : = d_{ij}/f_{ij} [horas/n° paradas no planificadas]
 \bar{d}_{ij} : Tiempo promedio de detención de la correa transportadora i , a causa del modo de falla j
 d_{ij} : Tiempo total de detención de la correa transportadora i , a causa del modo de falla j , en el periodo de tiempo definido (duración total [horas/periodo definido], indicador que también se incluye y que equivale a la frecuencia y duración promedio)

En consecuencia, los indicadores calculados para los modos de falla de las correas transportadoras escogidas se muestran en la Tabla 4.6:

Tabla 4.6 – Indicadores calculados para las paradas no planificadas consideradas

Correa transp. Modo de falla	Frecuencia [cantidad]			Duración promedio [horas]			Duración total [horas]		
	CV005	CV006	CV007	CV005	CV006	CV007	CV005	CV006	CV007
Bajo Nivel Aceite	4	1	0	0,19	0,28	0,00	0,76	0,28	0,00
Corte de Correa	2	0	0	0,43	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00
Daño Correa	0	0	8	0,00	0,00	1,88	0,00	0,00	15,06

²² Aplicación del sistema RtPM de CONTAC Ingenieros Ltda.

²³ Empresa que presta servicio de mantenimiento al Área de Correas y Chancado de Minera Los Pelambres.

Falla Chute Guardera	1	0	0	1,81	0,00	0,00	1,81	0,00	0,00
Falla Chute Placa Desgaste	0	0	1	0,00	0,00	1,65	0,00	0,00	1,65
Falla Correa Antena Mala	0	0	1	0,00	0,00	0,46	0,00	0,00	0,46
Falla de Contrapeso (Sistema de tensado)	1	1	0	0,75	5,36	0,00	0,75	5,36	0,00
Falla de Reductor	1	1	0	1,53	0,89	0,00	1,53	0,89	0,00
Falla de Estructura Soporte	2	1	2	0,48	1,07	0,52	0,96	1,07	1,05
Falla Polea Revestimiento	0	2	1	0,00	1,81	1,30	0,00	3,63	1,30
Falla Polin de Carga	1	0	3	0,61	0,00	1,18	0,61	0,00	3,53
Falla Polin de Impacto	2	4	0	0,70	0,47	0,00	1,41	1,90	0,00
Falla Polin de Retorno	3	8	7	1,00	0,79	0,98	3,01	6,28	6,85
Falla Polines	0	0	2	0,00	0,00	1,35	0,00	0,00	2,69
Falla Rodamientos	0	0	7	0,00	0,00	1,36	0,00	0,00	9,50
Falla Shuttle Rueda	0	0	1	0,00	0,00	1,64	0,00	0,00	1,64
Falla Sist. Frenos	1	8	5	0,55	0,82	0,31	0,55	6,59	1,57
Falla Sist. Lubricación (Mec)	11	2	0	0,27	0,15	0,00	3,00	0,29	0,00
Reductor Temperatura Alta Laberinto	1	1	0	0,21	0,45	0,00	0,21	0,45	0,00
Rotura de Chute	0	1	0	0,00	1,99	0,00	0,00	1,99	0,00

Con respecto a la tabla anterior, las paradas no planificadas de mayor duración total en cada correa transportadora escogida resultan de fallas en los polines de retorno y reductores (sistema de lubricación), en el caso de la correa transportadora CV-005; en los frenos de disco y polines de retorno, en el caso de la correa transportadora CV-006; en la banda y los motores eléctricos (rodamientos), en el caso de la correa transportadora CV-007. Entre las paradas no planificadas sobresalen las cuatro detenciones relacionadas con el sistema de lubricación de la correa transportadora CV-005, por su alta frecuencia y su baja duración total (no aparece entre los tres modos de falla de mayor duración total, pero ocurre cuatro veces) y, por el contrario, la detención relacionada con el contrapeso (sistema de tensado) de la correa transportadora CV-006, por su baja frecuencia y alta duración (aparece entre los tres modos de falla de mayor duración total, pero ocurre una vez).

Cabe destacar que en general, los modos de falla se denominan en función del componente que presenta la falla y no en función de la falla en sí (corte de correa, rotura de chute, daño correa, por ejemplo) o de mediciones (bajo nivel de aceite, reductor temperatura alta laberinto, por ejemplo).

Por otro lado, las correas transportadoras escogidas se pueden considerar como un sólo sistema, por consiguiente, la duración total se redefine de la siguiente manera:

Duración total conjunta: $d_{ci} = \sum_i d_{ij}$ [horas/periodo definido]
 d_{ci} : Tiempo total de detención de las correas transportadoras escogidas, en el equipo o componente i , en el periodo definido

Asimismo, algunos modos de falla se pueden redefinir a partir de la definición general de las correas transportadoras (ver Sección 4.2.1). En consecuencia, los modos de falla redefinidos se resumen en la Tabla 4.7:

Tabla 4.7 – Grupos de fallas

Modo de falla redefinido	Modos de falla originales
Falla de Reductor	Bajo Nivel Aceite, Falla de Reductor (original), Reductor Temperatura Alta Laberinto, y Falla Sist. Lubricación (Mec)
Falla de Banda	Corte de Correa, Daño Correa, Falla Correa Antena Mala
Falla de Chute	Falla Chute Guardera, Falla Chute Placa Desgaste, y Rotura de Chute
Falla de Polín	Falla Polín de Carga, Falla Polín de Retorno, Falla Polín de Impacto, y Falla Polines
Falla de Polea	Falla Polea Revestimiento
Falla de Motor Eléctrico (Mec)	Falla Rodamientos
Falla de Shuttle	Falla Shuttle Rueda
Falla de Freno de Disco	Falla Sist. Frenos

Por lo tanto, la duración total conjunta calculada de cada modo de falla redefinido se muestra en la Tabla 4.8:

Tabla 4.8 – Duración total conjunta de las paradas no planificadas consideradas

Equipo o componente	Duración total conjunta [horas]
Falla de Reductor	7,41
Falla de Banda	16,38
Falla de Chute	5,45
Falla de Contrapeso (Sistema de tensado)	6,11
Falla de Estructura de Soporte	3,08
Falla de Polea	4,93
Falla de Polín	26,28
Falla de Motor Eléctrico (Mec)	9,50

Falla de Shuttle ²⁴	1,64
Falla de Freno de Disco	8,72

De la tabla anterior, se desprende que los equipos y componentes críticos son: los **polines**, la **banda**, los **motores eléctricos** (rodamientos), los **frenos de disco**, y los **reductores** (las paradas no planificadas de estos equipos y componentes representan el 76,30% de la duración total conjunta de todos los modos de falla e implican 68,28 horas de detención en las correas transportadoras escogidas, en el periodo definido).

4.5 Paso 5: Información de fallas

A partir de la información recopilada de entrevistas con expertos de Minera Los Pelambres, se identifican y describen las fallas en los equipos y componentes seleccionados, se determinan sus causas, se identifican sus efectos, y describen sus procedimientos de detección, como sigue a continuación:

Modos de falla

Polines: Los modos de falla que presentan los polines son: el desgaste superficial y el trabamiento de elementos rodantes (en sus rodamientos).

Banda: Los modos de falla que presenta la banda son: el corte longitudinal (rasgadura) y transversal.

Motores eléctricos: El modo de falla (mecánico) que comúnmente presentan los motores eléctricos es el desgaste de rodamientos.

Frenos de disco: Los modos de falla que presentan los frenos de disco son: la liberación fallida de las pastillas de freno y la pérdida de eficiencia del resorte del sistema hidráulico (este modo de falla ocasiona el roce de las pastillas de freno con el disco durante la operación de la correa transportadora CV-007, única unidad que presenta este modo de falla y, en consecuencia, contribuye al aumento del desgaste de las pastillas de freno).

Reductores: Los modos de falla que comúnmente en presentan los reductores son: el desgaste, las grietas, las pérdidas mecánicas (especialmente en los dientes), y el espacio excesivo entre dientes en contacto, en el caso de los engranajes, el desgaste y el espacio excesivo entre elementos rodantes y pistas, en el caso de los rodamientos, el doblamiento, las pérdidas mecánicas (especialmente en la chaveta²⁵), el desbalance, y el desalineamiento, en el caso de los ejes. Por otra parte, los modos de falla que presentan sus sistemas de lubricación son: las fugas de aceite y la acumulación de suciedad en filtros y rejillas. Los

²⁴ Carro que distribuye los fragmentos de mineral grueso en la pila de acopio de la molienda SAG. Este equipo sólo se encuentra en la correa transportadora CV-007.

²⁵ Parte del eje que se inserta en la pista interna del rodamiento.

modos de falla que más suceden en la práctica corresponden al desgaste de rodamientos y, en menor medida, a las fugas de aceite, especialmente en los sellos de laberinto.

Causas

Polines: En el caso del desgaste superficial, las posibles causas son: las sobrecargas, la presencia de tanto polvo como de humedad, y el desgaste natural entre polín y banda. Por otra parte, en el caso del trabamamiento de elementos rodantes, la posible causa es el desgaste de los componentes del rodamiento (los factores que influyen en este fenómeno son: la lubricación; las sobrecargas; la presencia tanto de polvo como de humedad; y el desgaste natural entre los elementos rodantes y las pistas). Cabe destacar que el desarrollo del trabamamiento de elementos rodantes impacta en el desgaste superficial del polín.

Banda: En el caso del corte longitudinal, la posible causa es la incrustación de objetos metálicos externos como de fragmentos de mineral grueso en la banda (este fenómeno depende del desgaste de la banda). Por otro lado, en el caso del corte transversal, las posibles causas son: los cortes de cables de acero y la deformación de empalmes (los factores que influyen en estos fenómenos son: las sobrecargas; la presencia tanto de polvo como de humedad; el desgaste natural entre la banda, los fragmentos de mineral grueso, los polines, y las poleas; los desalineamientos²⁶; la tensión en los cables de acero; y el roce viscoso entre los cables de acero y el tejido).

Motor eléctrico: Las posibles causas del desgaste de rodamientos son: la lubricación inadecuada; las sobrecargas; la presencia tanto de polvo como de humedad, y el desgaste natural entre los elementos rodantes y las pistas.

Frenos: En el caso de la liberación fallida de la pastillas de freno, la posible causa es el trabamamiento de balatas por parte del sistema de control (el factor que influye directamente en este fenómeno es la presencia de polvo en las pastillas de freno, debido a que en la partida, el sensor de proximidad detecta que el freno de disco está activado, cuando en terreno, no está activado, producto de la suciedad acumulada). Por otra parte, en el caso de la pérdida de eficiencia del resorte del sistema hidráulico, la posible causa es el diseño inapropiado de este equipo, considerando las condiciones de operación de la correa transportadora CV-007.

Reductores: En el caso de los reductores y sus sistemas de lubricación, las posibles causas de los modos de falla que presentan son: la lubricación inadecuada, las sobrecargas, la presencia tanto de polvo como de humedad, y el desgaste natural en las superficies de contacto de los diferentes componentes. Adicionalmente, en el caso del espaciado excesivo entre dientes en contacto, otro factor que influye en este fenómeno es la excentricidad²⁷ de uno de los engranajes. Cabe destacar que el desgaste (engranajes, rodamientos) y las

²⁶ El desalineamiento corresponde al desplazamiento transversal de la banda. Este fenómeno es originado por el desbalance natural del material fragmentado en este componente; pero también se puede originar por el desacomodo de polines en su estación y, por otra parte, puede contribuir al desgaste de la banda, especialmente en sus bordes.

²⁷ La excentricidad se produce cuando el centro del engranaje no coincide con su eje de giro.

pérdidas mecánicas (engranajes y ejes) generan escombros ferrosos en el aceite que pueden agravar los modos de falla establecidos.

Efectos

Polines: El efecto de los modos de falla de polines es el aumento del desgaste natural de la banda.

Banda: El efecto de los modos de falla de banda es el impacto de objetos metálicos externos (en el caso del corte longitudinal) como de fragmentos de mineral grueso en polines, poleas y, eventualmente, en la estructura.

Motores eléctricos: El efecto del desgaste de rodamientos es el aumento de las vibraciones, especialmente en los reductores (este fenómeno puede influir en los modos de falla de reductores).

Frenos de disco: En el caso de la liberación fallida de las pastillas de freno, el efecto es la prolongación de la detención de la correa transportadora en la partida. Por otra parte, en el caso de la pérdida de eficiencia del resorte del sistema hidráulico, el efecto es la extensión de la duración del frenado, a causa del desgaste de las pastillas de freno.

Reductores: El efecto de los modos de falla de reductores y sus sistemas de lubricación es el aumento de las vibraciones especialmente en las poleas motrices (este fenómeno puede generar desgaste en el recubrimiento de las poleas motrices y, en consecuencia, en la banda), en la estructura, y en el motor eléctrico.

Nota: La detección de los modos de falla mencionados implica la inmediata detención de las correas transportadoras escogidas.

Procedimientos de detección

Polines: Los modos de falla de polines se detectan por inspección. Esta actividad se realiza durante 21 días (se revisan 11.424 estaciones), y en los días siguientes, se reemplazan los polines que presenten fallas.

Banda: El corte longitudinal es detectado mediante sensores de corte longitudinal *belt rip*, *wire rope*, y *coal control* (los sensores de corte longitudinal *belt rip* y *wire rope* sólo pueden detectar rasgaduras causadas tanto por objetos metálicos como por fragmentos de mineral grueso que se trasladen con la banda; a diferencia del sensor de corte longitudinal *coal control*, que adicionalmente puede detectar tanto objetos metálicos como fragmentos de mineral grueso fijos con respecto al movimiento de la banda, por ejemplo, cuando un objeto metálico externo se atasca en el chute traspaso y se incrusta en la banda). Por otra parte, el corte transversal no se detecta directamente, a excepción si se produce en algún empalme (mediante el monitor de empalmes); pero se puede detectar indirectamente mediante los sensores de velocidad (cálculo del deslizamiento), del sensor de tensado, o del sensor de corte longitudinal *coal control*.

Motores eléctricos: El desgaste de rodamientos es detectado con sensores de temperatura o mediante termografías.

Frenos de disco: La liberación fallida de las pastillas de freno se detecta con el sensor de proximidad (estado del freno, activado o desactivado). Por otro lado, la pérdida de eficiencia del resorte del sistema hidráulico se detecta con el sensor de presión.

Reductores: Los modos de falla de reductores son detectados con sensores de temperatura o mediante termografías, ultrasonidos a los ejes principales, análisis de vibraciones, y análisis de aceites. Por otra parte, las fugas de aceite en el sistema de lubricación se detectan con sensores de nivel.

4.6 Paso 6: Propuestas de esquemas de detección y aislación temprana

Las propuestas de esquemas de detección y aislación temprana se basan en el análisis anterior y en publicaciones provenientes de instituciones que promueven la investigación centrada en ingeniería como el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y *Science Direct*²⁸ y son las siguientes:

Polines

En general, los esquemas de detección y aislación temprana de modos de falla de polines se basan en la obtención de imágenes infrarrojas o termografías (distribución de temperatura del objeto en estudio).

En la Etapa 1: Recolección de datos, la cámara infrarroja captura termografías del polín o del conjunto de polines en estudio. En seguida, en la Etapa 2: Pre-procesamiento de datos, las termografías obtenidas pasan por sub-etapas de pre-procesamiento digital de imágenes (filtrado de ruido). Posteriormente, en la Etapa 3: Extracción de características, se determina la temperatura de puntos conflictivos como la superficie de contacto con la banda, los rodamientos, los pasadores²⁹. Por último, en la Etapa 4: Detección y aislación de fallas, estas propiedades se comparan con umbrales de decisión pre-establecidos, con la finalidad para detectar modos de falla de polines [56]. Cabe destacar que este esquema corresponde más bien a una inspección o monitoreo discontinuo.

En las correas transportadoras escogidas, este esquema es inviable, debido a la distribución espacial de los polines (a lo largo de más de 12,5 km, en tres correas transportadoras). Por otra parte, en sistemas distribuidos como éste, los vehículos aéreos no tripulados como helicópteros (inspección de líneas de transmisión de Chilectra S.A. [57]) o cuadricópteros pueden ser una alternativa a evaluar.

²⁸ Página web: <http://www.sciencedirect.com/>

²⁹ Parte de la estación que sostiene a los polines.

Banda

En general, los esquemas de detección y aislación temprana de cortes longitudinales se sustentan en la captura de imágenes de la banda, como se observa en la Figura 4.7:

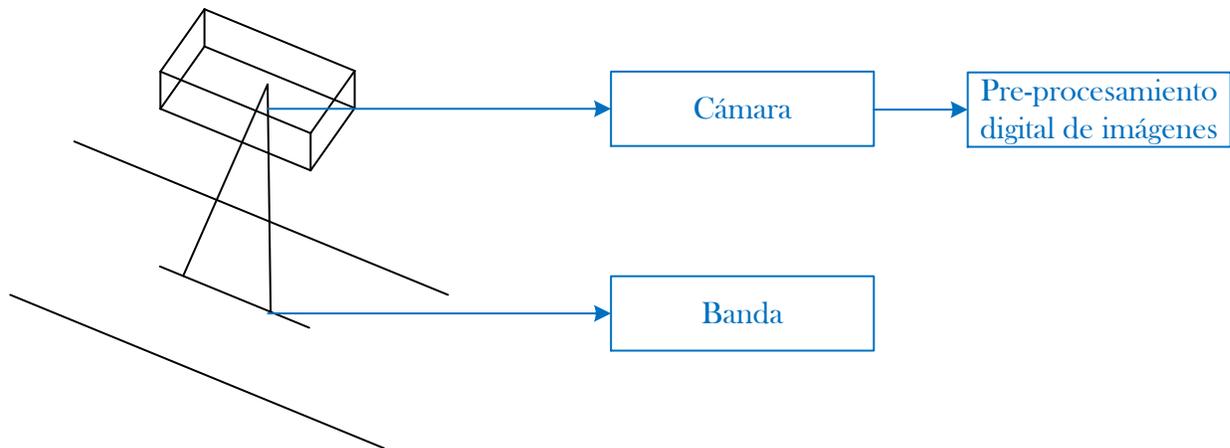


Figura 4.7 – Obtención de imágenes

En la Etapa 1: Recolección de datos, la cámara captura imágenes de la banda (en funcionamiento y en la superficie que está en contacto con los fragmentos de mineral grueso). En seguida, en la Etapa 2: Pre-procesamiento de datos, las imágenes obtenidas pasan por sub-etapas de pre-procesamiento digital de imágenes³⁰.

Particularmente en [58], se calcula la resta (a nivel de imágenes) entre la imagen pre-procesada y la imagen pre-procesada de la condición normal y se determina la continuidad de los cambios de gris de la resta de imágenes (Etapa 3: Extracción de características). Posteriormente, se compara la resta de imágenes y la continuidad de los cambios de gris con los respectivos umbrales de decisión pre-establecidos, con la finalidad de detectar cortes longitudinales (Etapa 4: Detección y aislación de fallas). Cabe destacar, que a diferencia de la Figura 4.7, la cámara se posiciona debajo de la banda.

Por otra parte, en [59], se calcula el área, la longitud, el ancho, la circunferencia, la circularidad, la rectangularidad, la abscisa del centroide, y la ordenada del centroide de los defectos de la imagen, como se observa en la Figura 4.8 (Etapa 3: Extracción de características). Posteriormente, estas propiedades se contrastan con el árbol de fallas pre-establecido, con el propósito de detectar cortes longitudinales, desgaste, y rayones (Etapa 4: Detección y aislación de fallas).

³⁰ El pre-procesamiento digital de imágenes tiene por objetivo resaltar los defectos en las imágenes atribuibles a posibles fallas e incluye el filtrado del ruido y diferentes métodos de mejoramiento de bordes y contornos.



Figura 4.8 – Imagen segmentada (pre-procesada) de un corte longitudinal. Imagen obtenida de [59]

Otro esquema de detección y aislación temprana de corte longitudinal, se sustenta en la medición de presión (específicamente se estima la tensión transversal entre polines) [60].

A diferencia de los sensores de corte longitudinal presentes en las correas transportadoras escogidas, en [58] y [59] se pueden detectar cortes longitudinales de menor tamaño, en [60] se pueden detectar cortes longitudinales sin esperar que la rasgadura llegue a un punto de detección, aunque no se puede conocer la posición del corte longitudinal, y en [59] se puede detectar desgaste y rayones en la banda (estos factores puede influir en el modo de falla).

Por otra parte, en general, los esquemas de detección y aislación temprana de cortes transversales se basan en la captura de imágenes de rayos X de los cables de acero de la banda, como se observa en la Figura 4.9:

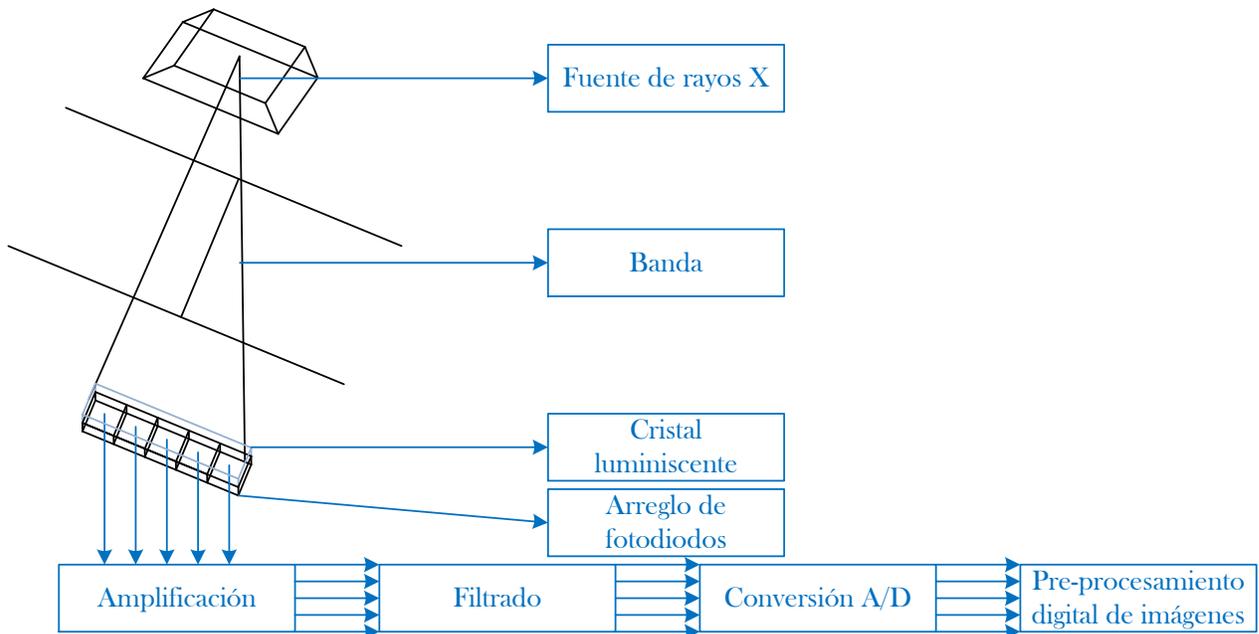


Figura 4.9 – Captura de imágenes de rayos X

La fuente de rayos X emite dicha radiación sobre la banda. En seguida, el cristal luminiscente y el arreglo de fotodiodos convierten los rayos X atenuados por el recubrimiento y la carcasa de la banda en señales eléctricas (Etapa 1: Recolección de datos). Posteriormente, las señales eléctricas

pasan por sub-etapas de amplificación, filtrado, conversión de A/D y pre-procesamiento digital de imágenes (Etapa 2: Pre-procesamiento de datos).

Particularmente en [61] y [62], sólo se inspecciona la condición de los cables de acero de la banda, o en otras palabras, en estas publicaciones no se pasa a la Etapa 3: Extracción de características.

Por otra parte, en [63], se estima la deformación de los cables de acero del empalme (Etapa 3: Extracción de características). En seguida, esta propiedad estimada se compara con el umbral de decisión pre-establecido (Etapa 4: Detección y aislamiento de fallas), con la finalidad de detectar tempranamente cortes transversales en los empalmes de la banda.

Por otro lado, en [64], se calcula la energía, la entropía, y la suavidad de las imágenes de rayos X, como se observa en la Figura 4.10 (Etapa 3: Extracción de características). En seguida, estas propiedades ingresan a la red neuronal previamente entrenada, con el propósito de determinar tempranamente cortes transversales (Etapa 4: Detección y aislamiento de fallas).

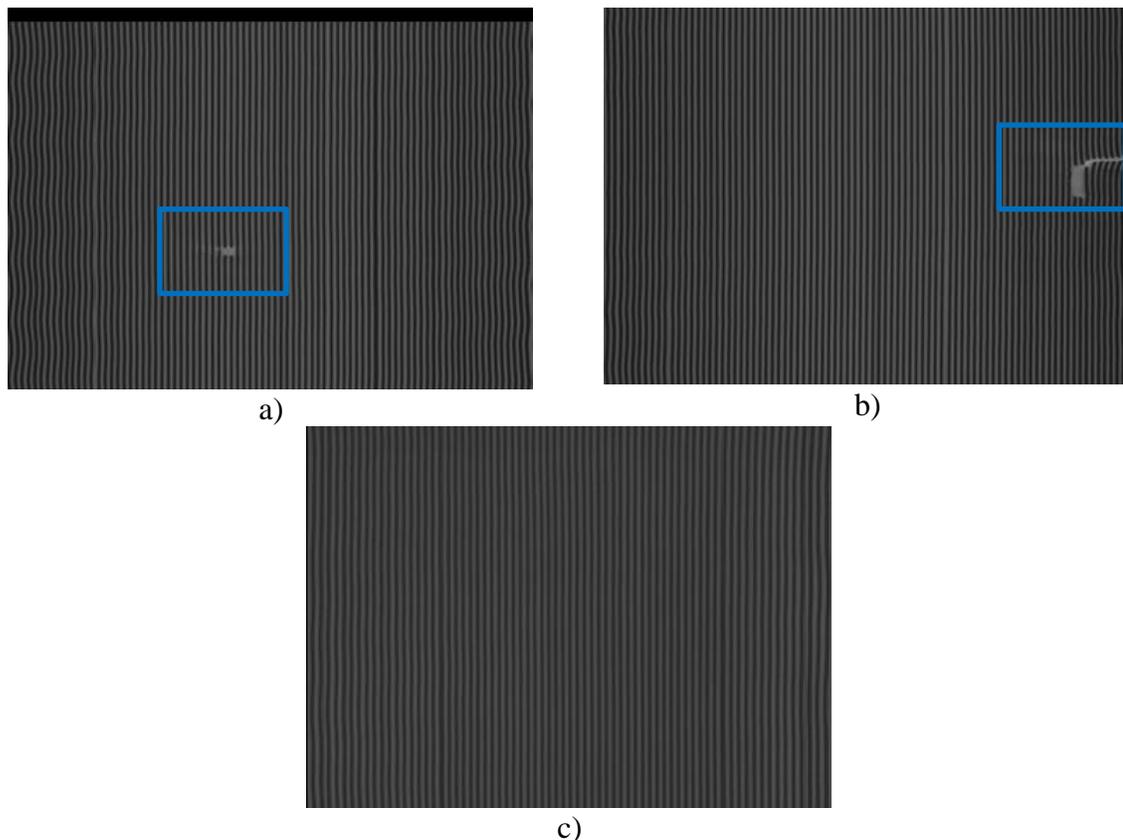


Figura 4.10 – Imágenes de rayos X de: a) un corte, b) de un corte con corrosión, y c) de la condición normal. Imágenes obtenidas de [64]

Otros esquemas de detección y aislamiento temprana de cortes transversales de banda se sustentan en la medición de diferentes variables. En [65], se basan en la medición del peso concentrado y de la longitud del empalme mediante de sensores de presión y efecto Hall respectivamente (específicamente se estima la tensión de la banda y la deformación del empalme). En [66], se sustentan en la medición de la velocidad de la banda mediante sensores de velocidad (*encoders*

fotoeléctricos) y en la determinación del sentido su desplazamiento. Por último, en [67], se basan en la medición de campos magnéticos.

En comparación al monitor de empalmes³¹ presente en las correas transportadoras escogidas, los esquemas de detección y aislación propuestos (a excepción de [65]) pueden detectar cortes transversales indistintamente, aunque es probablemente que ocurran en los empalmes.

Motores eléctricos

El esquema básico de detección y aislación temprana de desgaste de rodamientos se basan tanto en la medición de las vibraciones del motor eléctrico como en la medición de la corriente en el estator. En ambos enfoques, los esquemas de detección y aislación temprana son similares al propuesto para el desgaste de rodamientos en el reductor. Particularmente en [68], se presenta un esquema de detección y aislación temprana basado en la medición de la corriente en el estator (con respecto al esquema de detección y aislación temprana propuesto para el desgaste de rodamientos en el reductor, en esta publicación, en la Etapa 4: Detección y aislación de fallas se utilizan redes neuronales). En consecuencia, para más detalles se pueden ver las propuestas de esquemas de detección y aislación temprana de los modos de falla de reductores.

A diferencia de las termografías y la medición de temperatura, los esquemas de detección y aislación temprana propuestos pueden detectar con más anticipación el desgaste de rodamientos y en comparación a las termografías, pueden medir de forma continua.

Frenos de disco

Con respecto a la liberación fallida de las pastillas de freno, en las fuentes consultadas no se encuentran esquemas de detección y aislación temprana específicos. Eventualmente, se pueden desarrollar esquemas de detección y aislación temprana a partir del procesamiento digital de imágenes. Por ejemplo, en [69], se presenta un esquema de detección y aislación temprana del desgaste de las pastillas de freno³² basado en la estimación de la distancia entre el disco y la pastilla de freno mediante el procesamiento digital de imágenes (aunque este esquema se centra en la estimación del desgaste de las pastillas de freno; se podría adaptar para la estimación de espesor de la capa de polvo en las balatas).

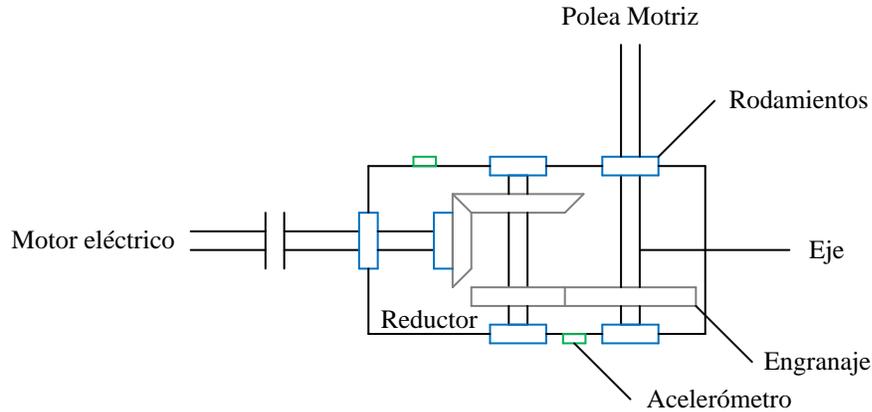
Por otra parte, con respecto a la pérdida de eficiencia del resorte del sistema hidráulico, Minera Los Pelambres cuenta con medidas compensatorias a implementar y que buscan eliminar este modo de falla, debido a que su causa reside en el diseño del equipo. En consecuencia, este modo de falla se excluye del alcance de este trabajo.

³¹ Dispositivo que calcula la deformación del empalme, considerando variables como la tensión, temperatura y presión ambiental.

³² El desgaste de las pastillas de freno es otro modo de falla de frenos de disco.

Reductores

El esquema básico de detección y aislación temprana de modos de falla de reductores se sustenta en la medición de las vibraciones del reductor mediante acelerómetros, como se observa en la Figura 4.11:



*La cantidad y la posición de los acelerómetros es referencial

Figura 4.11 – Medición de las vibraciones

En la Etapa 1: Recolección de datos, los acelerómetros miden las vibraciones del reductor en su carcasa. En seguida, en la Etapa 2: Pre-procesamiento de datos, las mediciones pasan por sub-etapas de amplificación, filtrado, y conversión A/D.

Particularmente en [70], se calculan momentos (modelos de señal en el dominio del tiempo) como el valor cuadrático medio y el factor cresta, entre otros, a causa de que varían con el nivel de vibraciones del reductor (generalmente, cuando se presentan fallas en los reductores, el nivel de vibraciones aumenta) (Etapa 3: Extracción de características). Posteriormente, estos momentos se comparan con umbrales de decisión, con la finalidad de detectar la existencia de fallas en los reductores (Etapa 4: Detección y aislación de fallas).

Por otra parte, en [71], se calcula la transformada de Fourier (modelo de señal en el dominio de la frecuencia y análisis espectral de mediciones estacionarias), se identifican las frecuencias relacionadas a los modos de falla de reductores, y se determinan propiedades (coeficientes o indicadores) asociadas a la energía de las bandas en torno a las frecuencias consideradas, como se detalla en la Tabla 4.9 (Etapa 3: Extracción de características):

Tabla 4.9 – Frecuencias o bandas de frecuencias relacionadas a los modos de falla de reductores

Componente	Modo de falla	Frecuencias o bandas
Engranajes	Grietas	Frecuencia natural del engranaje y bandas laterales alrededor de esta frecuencia
	Pérdidas mecánicas	Bandas laterales alrededor de la GMF^{33} (<i>Gear Mesh Frequency</i>)

³³ $GMF = n_d f_g [Hz]$, n_d : número de dientes del engranaje, f_g : frecuencia de giro del eje del engranaje

	Desgaste/Espacio excesivo	Espaciamiento de las bandas laterales alrededor de la <i>GMF</i>
Rodamientos	Desgaste	<i>BPFI</i> ³⁴ (<i>Ball Pass Frequency Inner race</i> – pista interior), <i>BPFO</i> ³⁵ (<i>Ball Pass Frequency Outer race</i> – pista exterior), <i>BSF</i> ³⁶ (<i>Ball Spin Frequency</i> – elementos rodantes)
	Espacio excesivo	Frecuencia sub-síncrona de giro (f_w ³⁷)
Ejes	Doblamiento	$1x, 2x$ ³⁸
	Pérdidas mecánicas	Armónicos de x
	Desbalance	$1x$
	Desalineamiento	$2x$

Posteriormente, las propiedades calculadas se comparan con umbrales de decisión o se contrastan con el árbol de fallas establecido, con el propósito de detectar modos falla en los componentes del reductor y, por ende, en el reductor (Etapa 4: Detección y aislación de fallas).

La confiabilidad (alta probabilidad de detección baja probabilidad de falsa alarma) de los momentos convencionales y la transformada de Fourier es limitada, debido al ruido que presentan las mediciones. En consecuencia, en los últimos años se han desarrollado métodos basados en el cálculo de momentos como el FM0, NA4, NA4*, FM4, M6A, M8A, y NB4 a partir del TSA³⁹ (*Time Synchronous Average*) y en la demodulación de bandas de alta frecuencia de la transformada de Fourier. En particular, los métodos basados en el cálculo de momentos permiten la detección de fallas de engranajes y ejes, mientras que los métodos basados en la demodulación de bandas de alta frecuencia permiten la detección de fallas de rodamientos, considerando las frecuencias detalladas en la Tabla 4.9 [72].

Por otra parte, cuando la velocidad o la carga varían (como en el caso de las correas transportadoras, a causa de la aleatoriedad de la carga), los esquemas de detección y aislación temprana propuestos carecen de confiabilidad (las mediciones dejan de ser estacionarias). Por consiguiente, la Etapa 3: Extracción de características se puede mejorar mediante el análisis espectral de mediciones no estacionarias (transformada de Fourier de tiempo corto, *wavelets*) [73].

³⁴ $BPFI = (n_b/2)f_g(1 + (d/D) \cos \alpha)$, n_b : número elementos rodante, d : diámetro de los elementos rodantes, D : diámetro del rodamiento, y α : ángulo de contacto.

³⁵ $BPFO = (n_b/2)f_g(1 - (d/D) \cos \alpha)$.

³⁶ $BSF = f_g((D/d - d/D) \cos^2 \alpha)$.

³⁷ $f_w = 0,35 - 0,45f_g$.

³⁸ x : frecuencia de giro del eje.

³⁹ Método basado en la medición de la velocidad angular, que permite cancelar el ruido que presentan las mediciones de vibraciones provenientes de procesos estocásticos periódicos.

Adicionalmente, con el análisis de aceites en tiempo real se puede aumentar la confiabilidad de los esquemas de detección y aislación temprana propuestos mediante la fusión sensorial. En la actualidad, se basa en sensores de cabeza magnética (medición de la cantidad de escombros ferrosos mediante su recolección), grilla colectora (medición de la cantidad de escombros ferrosos o metálico, mediante su recolección), y bobina inductiva (medición de la cantidad y el tamaño de los escombros ferrosos, metálicos, o no metálicos mediante cambios en las propiedades magnéticas del sensor) [74]. Asimismo, pueden contribuir a la detección fallas en el sistema de lubricación (específicamente, a la acumulación de escombros en filtros y rejillas).

Finalmente, los esquemas de detección y aislación temprana basados en el análisis espectral de mediciones no estacionarias y en el análisis de aceites aumentan la confiabilidad del análisis de vibraciones propuestos (cálculo de momentos a partir del TSA y demodulación de bandas de alta frecuencia), especialmente si el análisis de aceites es en tiempo real y no *off-line* (obtención de muestras de aceite para su posterior análisis en el laboratorio).

5. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó un análisis de fallas en los equipos y componentes más importantes de las correas transportadoras CV-005, CV-006, y CV-007 de Minera Los Pelambres, con la finalidad de proponer esquemas de detección y aislación temprana destinados a dichos equipos y componentes. Como resultado de la metodología de análisis de fallas planteada, se seleccionaron los equipos y componentes mecánicos más importantes de las correas transportadoras escogidas; se identificaron y describieron tanto los modos de falla en los equipos y componentes determinados como sus causas, efectos, y procedimientos de detección; y se propusieron esquemas de detección y aislación temprana para los modos de falla establecidos. En consecuencia:

- Los equipos y componentes determinados fueron los polines, la banda, los motores eléctricos, los frenos de disco, y los reductores.
- El(los) modo(s) de falla(s) establecido(s) fue(ron) el desgaste superficial y el trabamiento de elementos rodantes, en el caso de los polines; el corte longitudinal (o rasgadura) y el corte transversal, en el caso de la banda; el desgaste de rodamientos, en el caso de los motores eléctricos; la liberación fallida de las pastillas de freno y la pérdida de eficiencia del resorte del sistema hidráulico, en el caso de los frenos de disco y; por último, defectos mecánicos en engranajes, rodamientos, ejes, y el sistema de lubricación, en el caso de los reductores.
- Los esquemas de detección y aislación temprana propuestos presentan diferentes niveles de desarrollo, a causa de la complejidad y particularidad de los modos de falla establecidos. En el caso de los polines, los esquemas de detección y aislación temprana generalmente se basan en la captura de termografías; pero en las correas transportadoras escogidas, este esquema de inspección es impracticable, a causa de la distribución espacial de los polines (en otros sistemas distribuidos se han usado vehículos aéreos no tripulados para este propósito). En el caso de la banda, los esquema de detección y aislación temprana de corte longitudinal se basan en la captura de imágenes superficiales, con la finalidad de calcular propiedades relacionadas a la presencia de rasgaduras, mientras que los esquemas de detección y aislación temprana de corte transversal generalmente se sustentan en la captura de imágenes de rayos X, con el propósito de calcular propiedades asociadas a loa cables de acero de la banda, especialmente en sus empalmes. En el caso de los motores eléctricos, los esquemas de detección y aislación temprana de desgaste en rodamientos, se basan en la medición de vibraciones y de la corriente en el estator (más detalles se describen en el caso de los reductores, debido a la similitud ambos casos, con respecto a los rodamientos). En el caso de los frenos de disco, no se encontraron esquemas de detección y aislación temprana específicos para la liberación fallida de las pastillas de freno; pero eventualmente se puede desarrollar a partir del procesamiento digital de imágenes y, por otra parte, la pérdida de eficiencia del resorte del sistema hidráulico cuenta con medidas compensatorias a implementar por parte de Minera Los Pelambres. Por último, en el caso de los reductores, los esquemas de detección y aislación temprana de defectos mecánicos en engranajes, rodamientos, y ejes se sustentan en la medición de vibraciones, con la finalidad de calcular momentos a partir del TSA (detección de fallas de engranajes y ejes) y la transformada de Fourier (detección de fallas de rodamientos en base a la demodulación de bandas de alta frecuencia) y, por otra parte, con el análisis espectral de

mediciones no estacionarias (como en la medición de vibraciones en correas transportadoras, a causa de la aleatoriedad de la carga) y el análisis de aceites en tiempo real se puede aumentar la confiabilidad de los esquemas de detección y aislación propuestos mediante la fusión sensorial (adicionalmente, el análisis de aceite en tiempo real puede contribuir a la detección temprana de la acumulación de escombros en filtros y rejillas).

Cabe destacar que a diferencia de FMECA, en este análisis de fallas, se seleccionaron los equipos y componentes mecánicos más importantes y, en seguida, se identificaron y describieron tanto los modos de falla en los equipos y componentes determinados como sus causas y efectos (en FMECA se identifican y describen tanto los modos de falla en los sub-sistemas definidos como sus causas y efectos y, posteriormente, se seleccionan los modos de falla más importantes). En sistemas que presentan diversos sub-sistemas como en el caso de las correas transportadoras, este cambio permite que el análisis de fallas se centre en los sub-sistemas más importantes (al igual que FMECA, a partir de este análisis de fallas se proponen recomendaciones para los equipos y componentes determinados).

Por otra parte, en comparación a los esquemas de detección y aislación temprana que presentan las correas transportadoras escogidas en la actualidad, eventualmente los esquemas de detección y aislación temprana propuestos pueden proporcionar más anticipación (en el caso del corte longitudinal y del desgaste de rodamientos en los motores eléctricos), más confiabilidad (en el caso del desgaste de rodamientos en los motores eléctricos y de los defectos mecánicos de los reductores), monitoreo continuo (en el caso del desgaste de rodamientos en los motores eléctricos y de los defectos mecánicos de los reductores), y detección completa del modo de falla (en el caso del corte transversal).

Finalmente, se espera que este análisis de fallas pueda proporcionar a la empresa una visión general de los esquemas de detección y aislación temprana existentes para los equipos y componentes determinados, con el propósito de disminuir a futuro la cantidad de fallas o reparaciones y sustituciones programadas innecesarias que presentan, y mejorar los esquemas de detección y aislación temprana implementados en la actualidad.

5.1 Trabajo futuro

- Estudiar en conjunto con Minera Los Pelambres la (pre)factibilidad técnica de los esquemas de detección y aislación temprana propuestos, considerando otros efectos a parte de la duración como el costo de falla y los perjuicios a las personas, al medioambiente, y a las unidades productivas.
- Desarrollar los esquemas de detección y aislación temprana de los modos de falla definidos. Esta fase debiera incluir las especificaciones generales (tiempo de detección, confiabilidad o probabilidad de detección); la especificación de los métodos analíticos de cada etapa del esquema de detección y aislación temprana, considerando los requerimientos de tiempo de detección y confiabilidad; y la especificación de los instrumentos, dispositivos, y protocolos de comunicación necesarios, considerando los requisitos de los métodos analíticos seleccionados y las condiciones ambientales de las correas transportadoras escogidas. Adicionalmente, esta fase debiera incluir la evaluación precisa de la inversión estimada en

instrumentos y dispositivos en comparación a los costos de falla proyectados con los esquemas de detección y aislación temprana en funcionamiento.

6. Bibliografía

- [1] Revista Minería de Chile. **Historia del Boom Minero de Chile**
<<http://mineriachile.com/2012/01/historia-del-boom-minero-de-chile/>> [consulta 04-03-2013]
- [2] SONAMI. **PIB Minería**
<http://www.sonami.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=221&Itemid=109>
[consulta 04-03-2013]
- [3] SERNAGEOMIN. **Anuario de la Minería de Chile (2011)**
<http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/anuario/anuario_2011.pdf> [consulta 04-03-2013]
- [4] COCHILCO. **Anuario de Estadísticas del Cobre y otros minerales (1992-2011)**
<<http://www.cochilco.cl/productos/descarga/anuarios/AE2012web.pdf>> [consulta 04-03-2013]
- [5] SERNAGEOMIN. **Producción Minera 2011 cobre**
<http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/estadistica_de_produccion_minera/1_produccion_minera_cobre_2011.pdf> [consulta 04-03-2013]
- [6] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 20.
- [7] IEEE Power Engineering Society (2006). **IEEE Standard Definitions for Use in Reporting Electric Generating Unit Reliability, Availability, and Productivity**, USA: *IEEE*, pp. 8-12.
- [8] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 31-42.
- [9] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 20-22.
- [10] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. xx-xxii.
- [11] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. xv-xix.
- [12] Pascual, R. (2005). **El Arte de Mantener**, Chile: *Dpto. Ing. Mecánica, U. de Chile*, pp. 15-22, 27-32.
- [13] Byington, C. (2012). **Introduction to Improved Real-time Mechanical Systems Diagnostics and Prognostics**, USA: *2012 PHM Society Tutorial Session*, pp. 2.

- [14] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. 13-16, 59-60, 97-100, 175-176.
- [15] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 61-62.
- [16] Byington, C. (2012). **Introduction to Improved Real-time Mechanical Systems Diagnostics and Prognostics**, USA: *2012 PHM Society Tutorial Session*, pp. 15-18.
- [17] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. 70-74.
- [18] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. 60-64.
- [19] Byington, C. (2012). **Introduction to Improved Real-time Mechanical Systems Diagnostics and Prognostics**, USA: *2012 PHM Society Tutorial Session*, pp. 56-61.
- [20] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. 179-181.
- [21] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 5-6.
- [22] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. 104-128.
- [23] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp.111-134.
- [24] Iserman, R. & Ballé P. (1996). **Trends in the Application of Model Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes**, USA: *1996 IFAC 3th Triennial World Congress*.
- [25] Byington, S. & Kozlowski, D. (1997). **Transitional Data for Estimation of Gearbox Remaining Life**, USA: *Proceedings of the 51st Meeting of the MFPT*.
- [26] Hyvärinen, A. & Oja E. (2000). **Independent Component Analysis: Algorithms and Applications**, Finland: *Neural Networks Research Centre, Helsinki University of Technology*, pp. 1-3.
- [27] Niu, Z., Liu, J., Niu, Y. & Pan, Y. (2005). **A Reformative PCA-Based Fault Detection Method Suitable for Power Plant Process**, China: *Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*.
- [28] Muradore, R. & Fiorini, P. (2012). **A PLS-based Statistical Approach for Fault Detection and Isolation of Robotic Manipulators**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, N° 8.

- [29] Guney, I., Kilic, E., Ozgonenel, O., Ulutas, M. & Karadeniz, E. (2009). **Fault Detection in Induction Motors with Independent Component Analysis (ICA)**, Bulgaria: *2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference*.
- [30] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 161-252.
- [31] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. 211-227.
- [32] Trajin, B., Regnier, J., & Faucher, J. (2008). **Detection of Bearing Faults in Asynchronous Motors using Luenberger Speed Observer**, *IEEE Conference Industrial Electronics*.
- [33] Trinh, D. & Chafouk, H. (2011). **Fault detection and isolation using Kalman filter bank for a wind turbine generator**, *Mediterranean Conference on Control & Automation*.
- [34] Inman, D., Farrar, C., Lopes & V., Steffen, V. (2005). **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems**, England: *John Wiles & Sons Ltd*, pp. 6.
- [35] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 95-109.
- [36] Tadic, P., Durovic, Z., Kovacevic, B., & Papic, V. (2012). **Fault Diagnosis for Steam Separators Based on Parameter Identification and CUSUM Classification**, *IEEE*.
- [37] Quiroga, J., Liu, L., & Cartes, D. A. (2008). **Fuzzy Logic based Fault Detection of PMSM Stator Winding Short under Load Fluctuation using Negative Sequence Analysis**, USA: *2008 American Control Conference*.
- [38] Ji, T., Pang, Q., & Liu, X. (2006). **Study on Fault Line Detection Based on Genetic Artificial Neural Network in Compensated Distribution System**, China: *2006 International Conference on Information Acquisition*.
- [39] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 287-292, 295-310, 311-343.
- [40] Wei, X., Liu, H., & Qin, Y. (2011). **Fault isolation of rail vehicle suspension systems by using similarity measure**, *2011 IEEE International Conference on Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI)*.
- [41] Castillo, I., Edgar, T., & Dunia, R. (2010), **Nonlinear Model-based Fault Detection with Fuzzy Set Fault Isolation**, *2010 IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*.
- [42] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. 152-159.

- [43] Vachtsevanos, G., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). **Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems**, USA: *John Wiles & Sons Inc.*, pp. 159-162.
- [44] Isermann, R. (2006). **Fault-Diagnosis Systems, an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, Germany: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp.63.
- [45] Revista Minería Chilena (2006). **Catastro de Equipamiento Minero 2011-2012**, Chile: *Editec*.
- [46] Gustafson, A. (2011). **Dependability Assurance for Automatic Load Haul Dump Machines**, Luleå, Suecia: *Luleå University of Technology*.
- [47] Gustafson, A., Schunnesson, H., & Galar, D. (2011). **Maintenance indicators for underground mining equipment: a case study of automatically versus manually operated LHD machines**, Norway: *2011 Proceedings of the 24th international congress on Condition Monitoring and Diagnostics Engineering Management*.
- [48] Gustafson, A., Schunnesson, H., Galar, D. & Kumar, U. (2011). **Maintenance Performance Analysis; A case study of Manual and Semi-automatic LHD machines**, Submitted to Journal of Quality in Maintenance Engineering.
- [49] Gustafson, A., Schunnesson, H., Galar, D. & Kumar, U., (2011). **The Influence of the Operating Environment on Manual and Automated Load Haul Dump Machines: a Fault Tree Analysis**, Submitted to International Journal of Mining, Reclamation and Environment.
- [50] U.S. Department of Defense (1980). **Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis MIL-STD-1629A**, USA: *Department of Defense United State of America*.
- [51] Codelco Educa. **Equipos de Transporte**
<<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/extraccion/t-equipo-transporte.html>> [consulta: 05-10-2012]
- [52] Phibrand (2011). **Investigación de Marcas de Correas Transportadoras en la Minería Chilena**, Chile.
- [53] Codelco. **Nuevo Nivel Mina El Teniente**
<http://www.codelco.com/nuevo-nivel-mina-el-teniente/prontus_codelco/2011-07-06/130724.html> [consulta: 30-12-2012]
- [54] Codelco Educa. **Equipos de Transporte**
<<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/extraccion/t-equipo-transporte.html>> [consulta: 05-10-2012]
- [55] Geywitz, S. (2012). **Fundamentos del Diseño Cintas**, Chile: *Dpto. Ing. Mecánica, U. Federico Santa María*.

- [56] Revista equipo minero. **Uso de Imagen Infrarroja (IR) para Diagnosticar Problemas en Transportadores y Chancadores**
<<http://www.equipo-minero.com/index.php/contenidos/335-uso-de-imagen-infrarroja-ir-par-a-diagnosticar-problemas-en-transportadores-y-chancadores.html>> [consulta: 10-03-2013]
- [57] Chilectra. **Chilectra presentó primera cuadrilla aérea a control remoto**
<http://www.chilectra.cl/wps/wcm/connect/49983580452508b8ad3ebd048ff4b930/Hagamos_Co ntacto_Agosto_2008.pdf?MOD=AJPERES&Tipo=DOC> [consulta: 10-03-2013]
- [58] Ming, W. & Zheng, C. (2011). **Researching on the Linear X-ray Detector Application of in the Field of Steel-core Belt Conveyor Inspection System**, China.
- [59] Xiang, L., Chang, M., Ji, W. & Yan, Z. (2011). **Automatic Defect Detection Method for the Steel Cord Conveyor Belt Based on Its X-ray Images**, China.
- [60] Chun, Y. & Chang, M. (2010). **Research on an X-ray Non-destructive Testing System for Conveyor Belt with Steel Wire Ropes**, China: *2010 International Conference on Information and Automation*.
- [61] Wen, W., Chang, M., & Xian, L. (2011). **Defect Recognition of X-ray Steel Rope Cord Conveyor Belt Image Based on BP Neural Network**, China: *2011 International Symposium Science and Society*.
- [62] Min, H. (2010). **Research on the Splice Breakage Monitoring System for Steel-cord Belt Conveyor**, China: *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*.
- [63] Xi, Z., Yi, Z., Huifang, L., Dong, F., Jie, L., Hongpeng, L., & Zongyong, W. (2010). **Study on the Detection of Velocity Direction for Belt-broken**, China: *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*.
- [64] Qinghua, M., Hongwei, M., Xuhui, Z., & Dawei, Z. (2011). **Research on Magnetic Signal Extracting and Filtering of Coal Mine Wire Rope Belt Conveyor Defects**, China: *2011 Third international Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*.
- [65] Tiezu, Q. & Jiabin, Z. (2010). **A Research of Image Identification Signal Processing for Longitudinal Rip of the Transport Belt**, China: *2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing*.
- [66] Li, M., Bianjing, D., Meiqiang, Z., & Kai, Z. (2011). **Intelligent Detection System for Mine Belt Tearing Based on Machine Vision**, China.
- [67] Chunxia, Y. & Chen, S. (2011). **A New Detection Device of Belt Longitudinal Rip Based on Pressure Monitoring**, China.
- [68] Devaney, M. & Eren, L. (2004). **Detecting Motor Bearing Faults**, USA: *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*.

[69] Hwang, J., Kim, H., Baek, Y., Kim, W. (2009). **Image Analysis System for Measuring the Thickness of Train Brakes**, *2010 First IEEE Eastern European Conference on the Engineering of Computer Based Systems*.

[70] Vecer, P., Kreidl, M., & Smid, R. (2005). **Condition Indicators for Gearbox Condition Monitoring Systems**, Czech Republic.

[71] PHM Society. **Domain Fundamentals**

<<http://www.phmsociety.org/competition/PHM/09/fundamentals>> [consulta: 10-03-2013]

[72] Byington, C. (2012). **Introduction to Improved Real-time Mechanical Systems Diagnostics and Prognostics**, USA: *2012 PHM Society Tutorial Session*, pp. 49-50.

[73] Byington, C. (2012). **Introduction to Improved Real-time Mechanical Systems Diagnostics and Prognostics**, USA: *2012 PHM Society Tutorial Session*, pp. 51-55.

[74] Byington, C. (2012). **Introduction to Improved Real-time Mechanical Systems Diagnostics and Prognostics**, USA: *2012 PHM Society Tutorial Session*, pp. 72-81.

7. Anexos

7.1 Anexo A: Minera Los Pelambres

7.1.1 Información relevante

Tabla 7.1 – Información relevante de Minera Los Pelambres

Estado	En operación
Operador	Los Pelambres (Sociedad: 60% Antofagasta Minerals, 25% Nippon LP Investment, 15% MM LP Holding BV)
Ubicación	200 km al noreste de Santiago, comuna de Salamanca, provincia del Choapa, IV región de Coquimbo
Minerales (productos)	Concentrado de cobre y concentrado de molibdeno
Capacidad	130.000 tpd (toneladas por día) de mineral
Mina	Explotación a rajo abierto
Planta	Línea de flotación (minerales sulfurados)

Esta sociedad construyó el proyecto Los Pelambres en 23 meses, entre 1997 y noviembre de 1999. Desde sus inicios, Los Pelambres ha realizado trabajos de optimización en sus instalaciones, que le han permitido aumentar su capacidad de tratamiento desde las 85.000 tpd iniciales a las cerca de 130.000 tpd obtenidas como promedio de tratamiento diario actualmente. En 2002 se iniciaron los trabajos de optimización de las instalaciones para obtener una capacidad de tratamiento de 114.000 a 120.000 tpd de mineral. Por otra parte, en 2004 se obtuvo la aprobación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Integral de Desarrollo, para explotar un total de 2.100 millones de toneladas de mineral, ampliando la vida útil de 30 a casi 50 años, y para aumentar la capacidad de tratamiento hasta 175.000 tpd. A inicios de 2007 se completó el Proyecto de Repotenciamiento Fase 1 a 145.000 tpd y a fines de 2008 un nuevo depósito de relaves en el sector de El Mauro inició sus operaciones. Las reservas del yacimiento Los Pelambres actualmente alcanzan a 2.210 millones de toneladas con ley media de 0,64% de cobre, 0,02% de molibdeno, 0,03 gpt (gramos por tonelada) de oro y 0,93 gpt de plata. Los recursos (incluyendo las reservas) llegan a 3.080 millones de toneladas con ley media de 0,62% de cobre, 0,02% de molibdeno, 0,03 gpt de oro y 0,83 gpt de plata.⁴⁰

⁴⁰ Fuente: [1] Revista Minería Chilena (2009). **Compendio de la Minería Chilena 2009**, Chile: *Revista Minería Chilena*, pp. 326.

7.1.2 Mapa



Figura 7.1 – Mapa de la mina y planta, Minera Los Pelambres⁴¹

⁴¹ Fuente: Google Maps. **Salamanca**

<https://maps.google.cl/maps?hl=es-419&safe=off&q=map+salamnca&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.r_qf.&bvm=bv.41867550,d.aWc&biw=1366&bih=643&wrapid=tlif135990315388410&um=1&ie=UTF-8&sa=N&tab=wl> [Consulta: 03-02-2013]