

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO – CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Diagnóstico de equipamiento electromecánico para su mantenimiento óptimo
en PLANTA LX-SX-EW CODELCO CHILE DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC**

Héctor Miguel Pizarro Villalobos

**INFORME FINAL DEL PROYECTO
PRESENTADO EN CUMPLIMIENTO DE
LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL
TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO**

JULIO DE 2016

**Diagnóstico de equipamiento electromecánico para su mantenimiento óptimo
en PLANTA LX-SX-EW CODELCO CHILE DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC**

INFORME FINAL

Presentado en cumplimiento de los requisitos
para optar al título profesional de
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO
otorgado por la
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
de la
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

Héctor Miguel Pizarro Villalobos

Profesor Guía: Sr. Héctor Vargas Oyarzún
Profesor Correferente Sr. Gonzalo Farías Castro

JULIO DE 2016

ACTA DE APROBACIÓN

La Comisión Calificadora designada por la Escuela de Ingeniería Eléctrica ha aprobado el texto del Informe Final de Proyecto de Titulación, desarrollado entre el Primer Semestre de 2014 y el Segundo Semestre de 2014 y denominado

**Diagnóstico de equipamiento electromecánico para su mantenimiento óptimo
en PLANTA LX-SX-EW CODELCO CHILE DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC**

Presentado por el Señor
Héctor Miguel Pizarro Villalobos

Sr. Héctor Vargas Oyarzun
Profesor Guía

SR. Gonzalo Farías Castro
Segundo Revisor

Valparaíso, AGOSTO DE 2016

*Para mis padres, Minerva Villalobos y Héctor Pizarro
Quienes durante todo momento me han apoyado incondicionalmente*

*Para mis amigos y familiares
Quienes han estado siempre presentes en los momentos más difíciles de mi carrera*

*Para mi profesor guía Héctor Vargas
Quién creyó en mí y me ayudó a concretar este momento*

*Para mi mejor amigo Giovanni Díaz
Quién ha estado siempre en los buenos y malos momentos*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco plenamente el apoyo de todas las personas que han influido en mi vida durante este proceso, especialmente a mis padres Minerva, Héctor, quienes junto a toda mi familia siempre han estado presentes y han entregado un gran apoyo dentro de mi desarrollo profesional y personal.

Agradezco también a todas las personas que han entrado en mi vida, ya sea para quedarse y algunas que ya no están, gracias por sus enseñanzas y entrega, ya que en todo momento he aprendido de ustedes.

Especial agradecimiento a mi amigo Giovani Díaz, quien ha estado presente en los buenos y malos momentos, siempre apoyando y empujando a que se llegue a un buen resultado en general, gracias por todos esos malos ratos que te hice pasar.

DIAGNÓSTICO DE EQUIPAMIENTO ELECTROMECAÁNICO PARA SU
MANTENIMIENTO ÓPTIMO EN PLANTA LX-SX-EW CODELCO CHILE
DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC

HÉCTOR MIGUEL PIZARRO VILLALOBOS

Profesor Guía Sr. Héctor Vargas Oyarzún

RESUMEN

Los motores eléctricos desempeñan un papel esencial en prácticamente todo producto elaborado, siendo los elementos más comunes de la maquinaria eléctrica dentro de una planta típica en cualquier parte del mundo. Además, representan generalmente el mayor porcentaje del gasto en energía eléctrica para las empresas. Por lo anterior, el buen funcionamiento de los motores adquiere una relevancia trascendental a la hora de considerar la disponibilidad productiva de las plantas, su relación con la eficiencia energética y el impacto sobre los costos operacionales y el medioambiente.

Los temas tratados a continuación están enfocados a la implementación del proyecto y el tratamiento de las variables medidas en los equipos seleccionados para el estudio. Teniendo en cuenta que los equipos son dispositivos sopladores encargados principalmente de ingresar aire a la nave de electro-obtención con la finalidad de enviar la nube ácida hacia el centro de la estructura para que esta sea expulsada al exterior por los extractores, proporcionando así un ambiente apropiado para realizar las actividades necesarias a la hora de producir los cátodos de cobre.

Cabe mencionar que cada uno de los equipos dispuestos en la planta corresponden a equipos críticos para la producción, esto quiere decir que la implementación del proyecto se basa en una necesidad real de mantener los equipos con una disponibilidad y calidad aceptables, ya que en caso de ocurrir una falla considerable en estos, la productividad se puede ver afectada de manera inmediata.

Los sensores y monitores definidos para la implementación, corresponden a sensores de vibración y variables eléctricas y un monitor de vibraciones. Estos sensores entregan las variables a analizar por el software PI, que será encargado analizar la información y entregar las gráficas y resultados correspondientes para la toma de decisiones.

A través del análisis de las variables críticas de los equipos se determinará cuando es necesario intervenir un equipo y qué tipo de mantención es la adecuada realizar para garantizar la disponibilidad de la planta.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO 1	6
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO	6
1.1 Descripción del lugar de trabajo	6
1.2 Descripción del proceso de producción	7
1.2.1 Proceso de Lixiviación (LX)	7
1.2.2 Extracción por solventes (SX)	8
1.2.3 Proceso de electroobtención (EW)	10
CAPÍTULO 2	13
DEFINICIÓN DEL EQUIPO PARA EL ESTUDIO DE SU MANTENIMIENTO ÓPTIMO	13
2.1 Información de los equipos disponibles para el piloto en EW y SX	13
2.1.1 Decantadores (SX)	13
2.1.2 Calentadores de agua.	15
2.1.3 Bombas Patio de estanques.	16
2.1.4 Intercambiadores de calor.	18
2.1.5 Filtros.	19
2.1.6 Sopladores (EW).	20
2.2 Definición del equipo	21
2.3 Plan de mantenimiento de los sopladores	22
CAPÍTULO 3	24
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E INSTALACIÓN DE SENSORES	24
3.1 Factibilidad técnica.	24
3.1.1 Monitor y sensores de vibraciones.	24
3.1.2 Sensores de variables eléctricas.	25
3.1.3 Pre-factibilidad económica.	29
CAPÍTULO 4	31
ANÁLISIS DE VARIABLES ELÉCTRICAS PROPORCIONADOS POR LOS SENSORES	31
4.1 Análisis de datos proporcionados por los sensores	31
4.1.1 Análisis de variables eléctricas.	31
CAPÍTULO 5	36
ANÁLISIS DE VARIABLES MECÁNICAS PROPORCIONADAS POR SENSORES DE VIBRACIÓN	36
5.1 Análisis de vibraciones.	36
5.1.1 Vibración simple.	36
5.1.2 Vibración compuesta.	38
5.1.3 Vibración aleatoria y golpeteos intermitentes:	38
5.1.4 Transformada de Fourier	39
5.1.5 Frecuencia natural y resonancias.	41
5.1.6 Análisis espectral.	41
5.2 Categorías de patologías clasificadas.	42
5.2.1 Desbalanceo.	42
5.2.2 Desalineación.	44
5.2.3 Holgura mecánica eje-agujero.	45
5.2.4 Soltura estructural:	46

5.2.5	Excentricidad	47
5.2.6	Rotor o eje pandeado	47
5.2.7	Resonancias y pulsaciones.	48
5.2.8	Fallas en engranajes.	49
5.2.9	Bandas	51
5.2.10	Flujo de líquidos	53
5.2.11	Flujo de gases	54
5.2.12	Fallas en rodamientos.	55
5.3	Desplazamiento, velocidad y aceleración de vibración.	57
5.4	Alarmas de nivel y tendencia	58
5.4.1	Alarmas de nivel.	58
5.4.2	Niveles de tendencia.	61
CAPÍTULO 6		63
MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO		63
6.1	Aspectos constructivos.	63
6.2	Modelo físico del motor de inducción.	63
6.2.1	Ecuaciones de las tensiones.	66
6.2.2	Ecuación del par electromecánico.	67
6.2.3	Ecuación mecánica.	67
6.2.4	Modelo físico completo.	68
6.2.5	Sistema de coordenadas arbitrario.	68
6.2.6	Ecuación de los flujos.	71
6.2.7	Ecuaciones de las tensiones.	72
6.2.8	Ecuación del par electromecánico.	73
6.3	Diferentes modelos.	73
6.3.1	Modelo del motor de inducción en varios sistemas de coordenadas.	73
6.3.2	Modelo del motor de inducción en variables de estado.	74
6.3.3	Modelo del motor de inducción en variable de estado considerando la saturación magnética.	75
CAPÍTULO 7		77
TRABAJO REALIZADO Y RESULTADOS OBTENIDOS		77
7.1	Descripción general del problema	77
7.2	Resumen del trabajo realizado	78
7.3	Electrónica de medición	80
7.4	Software utilizado para la implementación del sistema	82
7.5	Resultados obtenidos	84
7.6	Beneficios acarreados	85
7.7	Trabajo futuro	86
CAPÍTULO 8		87
EVALUACIÓN ECONÓMICA		87
CONCLUSIONES		92
BIBLIOGRAFÍA		94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Piscina acumuladora de electrolitos (PLS)	8
Figura 1-2 Vista aerea de la planta de extracción por solventes faena Radomiro Tomic	10
Figura 1-3 Nave de electroobtención Radomiro Tomic	12
Figura 2-1 Decantadores de SX	13
Figura 2-2 Calentadores de agua SX	15
Figura 2-3 Bombas patio de estanques	16
Figura 2-4 Intercambiadores de calor	18
Figura 2-5 Filtros de orgánico SX	19
Figura 2-6 Sopladores de EW	20
Figura 2-7 Gráficorepresentativo de soplador 525	22
Figura 2-8 Gráfico representativo de soplador 523	23
Figura 2-9 Gráfico tendencia global de componentes armónicas soplador 523	23
Figura 3-1 Ilustración de problemas en motores	24
Figura 3-2 Interfaz de supervisión monitor de variables eléctricas	27
Figura 4-1 Problemas en las barras del motor	31
Figura 4-2 Defectos en el entrehierro del motor	32
Figura 4-3 Estator en mal estado	33
Figura 5-1 Masa suspendida de un resorte	36
Figura 5-2 Papel en movimiento a velocidad constante	37
Figura 5-3 Vibración simple	37
Figura 5-4 Fase	38
Figura 5-6Vibración compuesta periódica	38
Figura 5-6 Vibración aleatoria detectada debido a cavitación de una bomba	39
Figura 5-7 Golpe intermitente que se amortigua con el medio	39
Figura 5-8 Señal compleja capturada de una máquina	40
Figura 5-9 Señal en el dominio del tiempo y su espectro en el dominio de la frecuencia	40
Figura 5-10 Rotor que gira a velocidad similar a la frecuencia natural	41
Figura 5-11 Esquema de captura de señales para su posterior análisis	42
Figura 5-12 Desbalanceo estático de rotor	43
Figura 5-13 Desbalanceo dinámico de rotor	43
Figura 5-14 Desbalanceo de rotor colgante	44
Figura 5-15 Desalineación angular	44
Figura 5-16 Desalineación paralela	45
Figura 5-17 Desalineación entre chavetas	45
Figura 5-18 Holgura mecánica entre eje-agujero a	46
Figura 5-19 Holgura mecánica entre eje-agujero b	46
Figura 5-20 Soltura estructural	47
Figura 5-21 Rotor excéntrico	47
Figura 5-22 Rotor o eje pandeado	48
Figura 5-23 Resonancia	48
Figura 5-24 Pulsaciones	49
Figura 5-25 Fallas en engranajes	49
Figura 5-26 Sobrecarga en engranaje	50
Figura 5-27 Excentricidad o backlash	50
Figura 5-28 Engranaje desalineado	51
Figura 5-29 Distensión de bandas	51
Figura 5-30 Desalineación de poleas	52
Figura 5-31 Excentricidad de poleas	52
Figura 5-32 Resonancia de banda	53
Figura 5-33 Frecuencia de paso de aspas en bombas	53
Figura 5-34 Cavitación	54
Figura 5-35 Frecuencia de aspas	54

Figura 5-36 Turbulencia anómala	55
Figura 5-37 Fallas en pista interna de rodamientos	55
Figura 5-38 Falla en pista externa de rodamientos	56
Figura 5-39 Fallas en elementos rodantes	56
Figura 5-40 Deterioro de jaula de rodamiento	57
Figura 5-41 Esquema de señal vista en los tres espectros	58
Figura 5-42 Tabla de valor de servicio	59
Figura 5-43 Rangos de severidad de vibración	60
Figura 5-44 Tendencia de un soplador en planta Radomiro Tomis	62
Figura 6-1 Sistemas de coordenadas arbitrarios y trifásico	69
Figura 6-2 Diagrama del modelo de medición de variables eléctricas	76
Figura 7-1 Diagrama de bloques general del proceso de obtención de datos	79
Figura 7-2 Monitor de variables eléctricas	81
Figura 7-3 Monitor y analizador de vibraciones Shädler	81
Figura 7-4 Acelerómetro (utilizado para la detección de vibraciones)	82
Figura 7-5 Interfaz de usuario PI	83

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico de los equipos de un proceso es de vital importancia, ya que a través del análisis de los datos nos permite detectar tendencias que podrían derivar en una falla de éste, falla que se traduce en la detención del proceso que se está realizando, lo que se traduce en una reducción de la producción. O bien nos podría indicar que el equipo no necesita un mantenimiento ya que sus características críticas medidas y analizadas nos indican que el equipo puede seguir funcionando sin problemas por un periodo de tiempo más amplio que el estimado para el mantenimiento preventivo, esto quiere decir que no sólo nos permite realizar una intervención anticipada del equipo, sino que también es posible posponer un mantenimiento no requerido, que podría significar la detención del proceso que puede llegar a ser crítico para la producción.

El proyecto apunta a reestructurar el concepto de mantenimiento clásico utilizado actualmente, debido a ciertas deficiencias dentro de las cuales muchas veces en el proceso se producen fallas inesperadas de algún equipo que se traduce en una reducción de la producción. También es posible observar que se realizan mantenimientos en equipos que no lo necesitan, esto significa un gasto de recursos ya sea tiempo o dinero innecesarios.

El sistema de mantenimiento utilizado actualmente en la Planta LX-SX-EW de Radomiro Tomic, es un sistema de mantenimiento planificado, esto quiere decir que cualquier tarea de mantenimiento que tiene un procedimiento de trabajo predeterminado, donde está documentado el trabajo, está estimada la mano de obra, los materiales, servicios, las herramientas y los equipos necesarios para llevarla a cabo.

Las órdenes planificadas pasan por el proceso de programación. Considerando la buena planificación de los tiempos muertos, improductivos, durante la ejecución del trabajo, mejorando el tiempo medio para reparar (TMPR).

Este mantenimiento corresponde a tres tipos distintos, los cuales se describen a continuación:

- i) Mantenimiento preventivo sistemático: Comprende lubricaciones, calibraciones, inspecciones.
- ii) Mantenimiento preventivo predictivo: Considera actividades de mantenimiento derivadas del monitoreo de la condición de los equipos o instalaciones.
- iii) Mantenimiento correctivo planificado: este tipo de mantenimiento incluye fallas detectadas en inspecciones previas, cuya corrección ha sido planificada y programada. A su vez incluye actividades en las que, simplemente se deja que falle el equipo.

El mantenimiento preventivo sistemático y el predictivo se encuentran en el plan matriz. Así también dentro del mantenimiento de la planta está considerado el mantenimiento correctivo no planificado, que corresponde a fallas, sin constituir emergencias, que son corregidas sin pasar por un proceso de planificación detallado ni de programación.

Existen también las llamadas “emergencias” que corresponden a fallas en equipos e instalaciones que involucran pérdidas de producción, afectan a la seguridad de las personas o gravemente al medio ambiente. Su ejecución no admite demora alguna.

Es posible evitar estas fallas realizando un monitoreo a los parámetros críticos del equipo o maquinaria. Así será posible reducir los costos asociados a una falla inesperada en un proceso crítico para la producción.

Adicionalmente se dispone de un software que constituye una plataforma de información que entrega datos relacionados con el proceso que se está llevando a cabo, este software es llamado PI (Process Information System), ésta herramienta es utilizada principalmente por el área de operaciones, desde dónde se obtiene la información para realizar el control de la planta.

La propuesta de proyecto consiste en la implementación de un sistema de monitoreo de las variables críticas de funcionamiento de algún equipo y en consecuencia de éste monitoreo realizar la implementación de un sistema de mantenimiento óptimo de equipos en funcionamiento. Todo esto se llevará a cabo en un equipo o bien en un grupo de equipos pertenecientes a la planta LX-SX-EW de la división Radomiro Tomic ubicada a 40 [Km.] de la ciudad de Calama en la región de Antofagasta.

Se encuentran disponibles en la planta LX-RX-EW de la división Radomiro Tomic, un área y equipos asociados a esta, la cual es SX (extracción por solventes), pero también existen equipos disponibles en las líneas de cosecha EW. En el caso del sector de SX existe información técnica de los equipos, también una cierta cantidad de equipos sin sensores y la estrategia de mantenimiento es por frecuencia de mantenimiento (según plan) y en otros por inspección sintomática (manual). En esta área se puede definir como subsistema, un sector de “decantadores de SX” y un sector de “patio estanque”, el cual se subdivide en filtros, columnas y sistema de calentamiento de soluciones (Calentadores de agua, bombas, cañerías, intercambiadores de calor, etc.)

La superintendencia de planta de Radomiro Tomic, está interesada en la implementación del proyecto en cualquiera de las áreas antes mencionadas, manteniendo siempre en mente que el proyecto sea aplicable en el resto de la planta, y además, ser recomendada su implementación en otras plantas de la industria, como por ejemplo Minera Gaby y área de Oxido de Chuquicamata, que cuentan con procesos similares.

Para llevar a cabo esta propuesta se pretende partir considerando las teorías de la confiabilidad que incorporan la incertidumbre en ingeniería. Se podría decir que la certeza de un hecho (en el contexto “falla de máquina”), es un acontecimiento determinista con un resultado finito. En cambio la incertidumbre de un hecho es un acontecimiento indeterminista con un resultado probabilístico.

La confiabilidad es la probabilidad de que un aparato, dispositivo o persona desarrolle una determinada función bajo condiciones establecidas durante un periodo de tiempo determinado. La confiabilidad de un elemento puede ser caracterizada a través de distintos modelos de probabilidades.

Se podrían describir varias distribuciones de fallas comunes y observar qué se puede extraer de ellas para gestionar los recursos de mantenimiento. Convirtiendo así el conocimiento obtenido de ellas en acciones proactivas de mantenimiento.

Es debido a esto que se determina partir el proyecto estudiando las distintas áreas disponibles para trabajar, considerando los equipos críticos ubicados en cada una de ellas, la cantidad de información que existe de cada uno de ellos, la filosofía de control utilizada, la instrumentación instalada, etc. Con la finalidad de identificar un piloto adecuado para el desarrollo práctico del proyecto.

Luego se continúa con la evaluación o factibilidad de la instalación de la planta piloto sobre la cual se realizarán las pruebas, mediciones y obtención de datos del funcionamiento.

Una vez determinada la planta piloto se comenzará con la instalación de los sensores que sean necesarios y que sean factibles de instalar bajo las condiciones de funcionamiento en las que se encuentre el equipo seleccionado, del cual se obtendrán la mayor cantidad de datos y mediciones, con el objetivo de realizar un estudio de las variables relacionadas a su funcionamiento y detección de una falla de manera oportuna, optimizando la decisión de su mantención preventiva.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

1.1 Descripción del lugar de trabajo

Codelco es el primer productor de cobre del mundo y posee, además, cerca del diez por ciento de las reservas mundiales del metal rojo. El nombre Codelco representa a la Corporación Nacional del Cobre de Chile, una empresa autónoma propiedad del Estado chileno, cuyo negocio principal es la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, su procesamiento hasta convertirlos en cobre refinado, y su posterior comercialización.

Codelco posee activos propios por más de US 20.835 millones y un patrimonio que en 2011 ascendió a US\$6.065 millones. En el 2011, produjo 1,79 millón de toneladas métricas de cobre refinado (incluida su participación en el yacimiento “El Abra”). Esta cifra equivale al 10% de la producción mundial. Su principal producto comercial es el cátodo de cobre grado A.

La compañía ejecuta sus operaciones a través de seis divisiones mineras más la Fundición y Refinería Ventanas, que pertenece a Codelco desde mayo de 2005. Su estrategia corporativa es coordinada desde la Casa Matriz ubicada en Santiago de Chile.

La Corporación participa además en la propiedad de importantes empresas mineras, como Minera Gaby SA (Ubicada en la región de Antofagasta, comuna de Sierra Gorda, a 120 [Km] al suroeste de Calama), donde posee el 100% de la propiedad, y como El Abra (Ubicada en la región de Antofagasta, a 75 [Km] al Noroeste de Calama), en la que posee el 49%; y otras asociaciones mineras orientadas a la explotación geológica, tanto en Chile como en el exterior.

El proyecto se llevará a cabo en la planta LX-SX-EW ubicada en la división Radomiro Tomic, que está ubicada a 1.670 kilómetros de Santiago, a 3.000 metros sobre el nivel del mar en la cordillera de Los Andes.

Se trata de un yacimiento donde el tipo de explotación es a rajo abierto para la obtención de minerales oxidados. Aunque fue descubierto en la década de 1950, sus operaciones comenzaron en 1995, después de que Codelco actualizó los estudios sobre la factibilidad de su explotación y contó con la tecnología necesaria para explotarlo de manera económicamente rentable. A partir de abril de 1998 comenzó su operación en régimen.

Su planta está diseñada para un nivel de producción anual de 300 mil toneladas de cátodos de cobre.

Cabe destacar que en el 2011 Radomiro Tomic se convirtió en la División más productiva y eficiente de Codelco Chile, aportando el 32% de los excedentes que la corporación entrega al estado.

1.2 Descripción del proceso de producción

El proceso de producción en planta de Radomiro Tomic se subdivide en tres sectores, los cuales son:

- Lixiviación (LX).
- Extracción por solventes (SX).
- Electroobtención (EW).

1.2.1 Proceso de Lixiviación (LX)

Para realizar el proceso de lixiviación se requiere disponer de un patio, o superficie de apoyo de la pila, en la que se coloca la impermeabilización. Cuando el patio es recuperado para reutilizarlo con nuevo material se trata de lixiviación en depósitos. Si el patio no es recuperado y el mineral agotado queda en la pila como vertedero que se restaura, se trata de lixiviación en pilas.

Una vez preparado el mineral, se coloca en montones de sección trapezoidal y altura calculada (pilas) para proceder a su riego con una solución preparada. Tras percolar la solución a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos en las piscinas acumuladoras de electrolito como muestra la figura 1.2.1, éstos se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (sal o metal).

Para la lixiviación en pilas se requiere de ciertos elementos, condiciones y consideraciones tales como:

- Disponer de amplias superficies de terreno, relativamente llanas, con menos de 10% de pendiente.
- Calcular los flujos de aporte y evaporación para mantener un balance equilibrado de líquidos efluentes.
- Disponer de represas de líquidos intermedios y finales.
- Considerar un margen de sobrecapacidad del sistema para absorber situaciones de exceso por tormentas lluvias en el área en explotación.
- Capacidad y flexibilidad para admitir grandes variaciones de leyes de mineral y tiempos de lixiviación.
- Utilizar láminas impermeables sencillas para evitar pérdidas por infiltración y la contaminación del subsuelo.
- Realizar un estudio geomecánico del material depositado para alcanzar la máxima altura posible y evitar el derrumbe de la pila.
- Preparar el material para llevarlo al tamaño adecuado, de manera de lograr una permeabilidad mínima suficiente, que libere el mineral en la superficie y percole adecuadamente.

- Organizar un conjunto de pilas de manera de ordenar el flujo de líquidos en forma seriada, para lograr un enriquecimiento progresivo de la solución al pasar de una pila en otra.



Figura 1-1 Piscina acumuladora de electrolitos (PLS)

1.2.2 Extracción por solventes (SX)

La extracción por solventes (SX), es uno de los procesos más efectivos y económicos para purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones enriquecidas, provenientes de procesos de lixiviación. Este proceso encuentra su principal aplicación en la producción de cobre, específicamente en la separación selectiva de metales, que luego se recuperan mediante el proceso de electroobtención, a través de soluciones de sulfato de cobre. También se utiliza para la recuperación de uranio, vanadio, molibdeno, zirconio, tungsteno, renio, elementos de tierras raras, metales preciosos, cadmio, germanio, berilio y boro, entre otros.

Básicamente, la extracción por solventes es una operación de transferencia de masas en un sistema de dos fases líquidas. Se llama también intercambio iónico líquido y se fundamenta en el principio por el cual un soluto o ion metálico puede distribuirse en cierta proporción entre dos solventes inmiscibles, uno de los cuales es usualmente acuoso y el otro un solvente orgánico como benceno, kerosene, cloroformo o cualquier solvente inmiscible al agua.

Lo anterior es posible debido a que ciertos reactivos químicos orgánicos, tienen un alto grado de afinidad selectiva con determinados iones metálicos, formando compuestos organometálicos y a su vez, no tienen casi ninguna afinidad con iones contaminantes tales como iones de hierro, calcio, magnesio, aluminio, etc.

Por esta razón, la principal aplicación de la extracción por solventes es la separación selectiva de metales. La posterior obtención de dichos metales se realiza mediante un proceso de electroobtención aplicado a soluciones de sulfato de cobre.

El proceso de extracción por solventes (SX), se incorpora como parte de un sistema integral de recuperación de hidrometalurgia. En la mayoría de los casos, al integrar el proceso de SX en un círculo metalúrgico se busca cumplir los siguientes objetivos:

- La separación y purificación de uno o más metales de interés de las soluciones que los contienen, las que suelen tener impurezas. La separación consiste en extraer el o los metales deseados desde soluciones o a la inversa, extraer las impurezas de la solución, dejando el o los metales deseados en ella.
- Concentración de los metales disueltos para disminuir los volúmenes a procesar y así reducir los costos del proceso siguiente (EW para el caso del cobre).
- Transferencia de los metales disueltos desde una solución acuosa compleja a otra solución acuosa diferente, que simplifique el proceso siguiente.

La incorporación de la extracción por solventes dentro de la metalurgia es de gran interés para el desarrollo de las siguientes operaciones específicas:

- La recuperación selectiva de un solo metal desde una solución de lixiviación, liberándolo de sus impurezas y concentrándolo de manera que facilite su posterior recuperación. Por ejemplo, en la lixiviación del cobre, la extracción por solventes se realiza en las soluciones de lixivaciones diluidas e impuras, con el fin de traspasar el cobre a una solución de electrolito puro y concentrado, que permita realizar la electroobtención.
- La separación conjunta de varios metales desde una solución, ya que ciertos elementos químicos como el Cu/Ni/Co, o del V/U/Ti, presentan una similitud de propiedades químicas. Mediante la extracción por solventes se separan conjuntamente para su posterior separación diferencial.
- La purificación de soluciones: la extracción por solventes permite extraer las impurezas dañinas o contaminantes de una solución para dejarla limpia como solución de partida. Por ejemplo, este método se aplica en la purificación de los descartes de electrolitos de refinera de cobre, al eliminar el Fe, As y otras impurezas, lo que limpia la solución y la devuelve al círculo principal.

Dado que en la lixiviación ocurre la disolución de otros componentes minerales que se encuentran en la pila, es indispensable realizar la purificación de las soluciones como una etapa previa a la electroobtención del metal. En la figura 1.2.2 se muestra el proceso de extracción por solventes que se realiza en la planta.

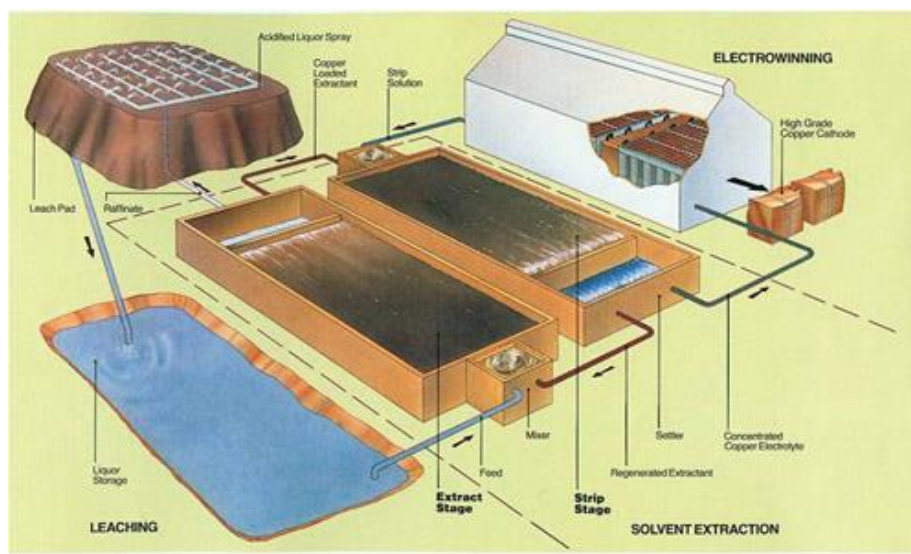


Figura 1-2 Vista aérea de la planta de extracción por solventes faena Radomiro Tomic

1.2.3 Proceso de electroobtención (EW)

La precipitación por reducción electrolítica, comúnmente conocida como electroobtención o electrodeposición, es uno de los procedimientos actuales más sencillos para recuperar, en forma pura y selectiva, metales que se encuentren en solución.

La electroobtención es particularmente interesante en el proceso de producción de cobre, ya que prácticamente todo el cobre de uso industrial a nivel mundial, requiere del grado de pureza establecido por los estándares del cobre electrolítico.

Básicamente, este proceso consiste en recuperar el metal desde una solución de lixiviación debidamente acondicionada (solución electrolito), y depositarlo en un cátodo, utilizando un proceso de electrólisis.

Para ello se hace circular a través de la solución electrolito, una corriente eléctrica continua de baja intensidad entre un ánodo (la solución misma) y un cátodo. De esta manera, los iones del metal de interés (cationes) son atraídos por el cátodo (polo de carga negativa) depositándose en él, y las impurezas quedan disueltas en el electrolito y también precipitan en residuos o barros anódicos.

La electroobtención es un proceso de una gran importancia económica, ya que permite recuperar metales como cobre, oro y plata- a partir de recursos lixiviables que de otra forma serían inviables.

Los nuevos procesos de purificación y concentración de soluciones lixiviadas, como la extracción por solventes (SX) en el caso del cobre y el carbón activado (CA) para el oro, han permitido ampliar el ámbito de aplicación de la electroobtención a la recuperación de estos metales. Tanto es así que algunos metales como el Zinc, dependen casi exclusivamente de la electroobtención para lograr una recuperación que sea económicamente viable.

A su vez, esta tecnología también es una alternativa muy competitiva para tratar minerales combinados de cobre-cobalto y níquel-cobalto.

Para realizar el proceso de electroobtención se requiere de instalaciones especializadas llamadas celdas electrolíticas, mostradas en la Figura 1-3 dentro de la nave de electroobtención, equipadas con sistema de circuitos eléctricos para hacer circular una corriente eléctrica continua de baja intensidad.

Para que el proceso se realice eficientemente se requiere considerar los siguientes aspectos:

i) Configuración de circuitos:

Para proveer de la corriente continua que requiere el proceso de electrólisis, se utilizan equipos rectificadores de corriente que mantienen constantes las características del flujo eléctrico. La tecnología de los rectificadores ha evolucionado siendo actualmente la norma el uso de trafo-rectificadores tiristorizados, lo que ha hecho a estos equipos más accesibles y económicos. Los requerimientos de filtros para el control de corrientes armónicas constituyen en la actualidad los mayores factores del aumento de costos de estos rectificadores. Los filtros se utilizan para lograr un mejor efecto con dos unidades (celdas de electroobtención), en vez de una sola.

ii) Características de las conexiones eléctricas:

Normalmente, las conexiones eléctricas de las celdas de electroobtención son muy sencillas, ya que se intenta disminuir los trayectos, en corriente continua y alta tensión, desde los rectificadores de corriente hasta los bancos de celdas electrolíticas.

Barras conductoras de cobre de sección rectangular: En general, la conexión se hace con paquetes de estas barras, apernadas y con distanciadores que permitan la circulación interna de aire para la mejor refrigeración. Estas son conocidas con su nombre en inglés: bus-bars.

Al poner las celdas en serie, se requiere sólo una conexión en los extremos del banco de celdas. Si al término del primer banco, éstas se conectan con un solo conductor a otro banco paralelo a su lado, el recorrido desde el rectificador disminuye aún más. Este tipo de conexiones es la más usada en la mayoría de las instalaciones recientes para electroobtención de cobre.

De esta forma, varias unidades similares constituyen las diversas secciones de una operación más grande, por ejemplo:

Dos secciones separadas por un patio central de trabajo, como es el caso en las plantas de EW de Quebrada Blanca, Mantoverde, Lince y Santa Bárbara (con una capacidad de producción entre 45.000 y 80.000 ton de cátodos de cobre al año).

Sólo una sección, como en las operaciones de EW de Lo Aguirre, Dos Amigos, Biocobre y El Teniente, diseñadas para menos de 25.000 ton/año de cobre fino.

Cuatro secciones, como en las plantas de operación de El Abra y Radomiro Tomic, diseñadas para hacer EW de más de 200.000 ton/año de cátodos de cobre.

- Barra triangular: En este caso la conexión eléctrica es en serie, con una barra triangular (de 2 a 2,5 cm de arista) que sirve de apoyo y contacto en su eje

afilado, para los ánodos de una celda y los cátodos de la celda contigua. Este es el sistema más utilizado.

- Otros perfiles: Recientemente, se han incorporado otros perfiles para la barra de contacto, tipo "hueso para perro" o dogbone, pero la más usada sigue siendo la de perfil triangular. Los aisladores interceldas, que separan y apoyan los ánodos y cátodos, se conocen como camping-boards.

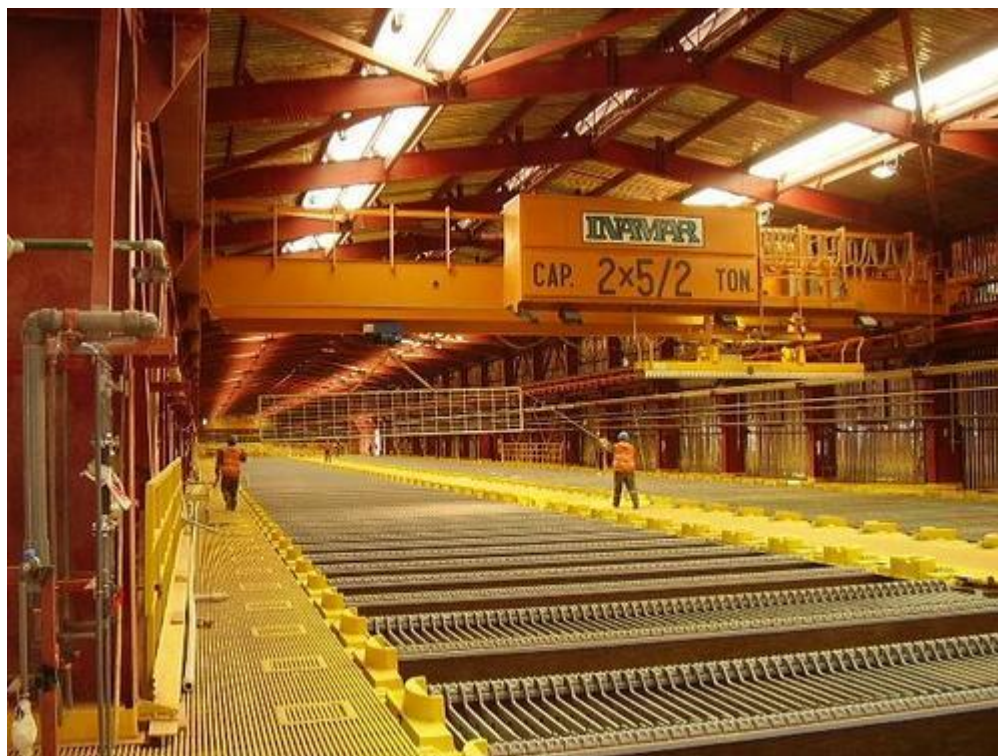


Figura 1-3 Nave de electroobtención Radomiro Tomic

CAPÍTULO 2

DEFINICIÓN DEL EQUIPO PARA EL ESTUDIO DE SU MANTENIMIENTO ÓPTIMO

2.1 Información de los equipos disponibles para el piloto en EW y SX

A continuación se presentan algunos de los equipos a disposición en áreas SX y EW para la implementación del piloto del proyecto. Estos equipos cuentan con ciertas características propias del área en la que se encuentran y todos se caracterizan por cumplir funciones importantes dentro del proceso.

Equipos:

- Decantadores de SX.
- Calentadores de agua.
- Bombas patio de estanques.
- Intercambiadores de calor.
- Filtros.
- Sopladores (EW).

2.1.1 Decantadores (SX)



Figura 2-1 Decantadores de SX

En el área de los decantadores de SX (Trenes), se encuentran disponibles 2 tipos de equipos, los cuales se presentan a continuación:

- DOP: Es el encargado de hacer circular los flujos presentes en los trenes de SX. Su función principal es impulsar los fluidos.

- **SPIROK:** Es el encargado de agitar las soluciones en SX antes de ingresar al sector de decantadores.

Las características de los equipos anteriormente mencionados se presentan a continuación:

Tabla 2.1.1. Descripción de los equipos propuestos área SX.

Tren A	Cant./Terreno	Voltaje	Potencia	R.P.M	Frame	Marca	Código SAP
DOP	4	575	60 HP	1480	364 TC		1147820
SPIROK	7	575	40 HP	1475	324 TC	US Electrical Motors	
Tren B							
DOP	4	575	60 HP	1480	364 TC		1147820
SPIROK	7	575	40 HP	1475	324 TC	US Electrical Motors	
Tren C							
DOP	4	575	60 HP	1480	364 TC		1147820
SPIROK	7	575	40 HP	1475	324 TC	US Electrical Motors	
Tren D							
DOP	5	575	50 HP	1490	364 TC		1147820
SPIROK	9	575	40 HP	1475	324 TC		

Instrumentos Instalados en el área de los trenes de SX.

- **Flujómetros:** Encargados de medir caudales de los fluidos presentes en los trenes.
- **Sensores de Nivel:** Monitorean estado de los decantadores.
- **Conductivímetros:** Mide el estado del orgánico y electrolito, instalados en los SPIROK.

2.1.2 Calentadores de agua.

Los calentadores de agua están ubicados a un costado de los trenes en SX, cumplen la función de calentar el agua que se utilizará en los intercambiadores de calor, actualmente la planta dispone de 6 en total de los cuales 4 son antiguos y 2 son nuevos. Estos calentadores funcionan con gas y petróleo.

Estos equipos se encuentran normalmente en funcionamiento sin fallas o intervenciones mayores que podrían indicar que requieren de un seguimiento agudo a sus variables críticas para su mantenimiento.

A su vez en este sector se encuentran 4 bombas, cuyo funcionamiento es necesario para hacer circular el agua en las calderas o calentadores de agua.



Figura 2-2 Calentadores de agua SX

2.1.3 Bombas Patio de estanques.

Las bombas ubicadas en el sector de patio de estanques son utilizadas para la circulación de fluidos entre los diferentes equipos que se encuentran en este sector, ya sean las columnas, los filtros, intercambiadores de calor, etc.

Dentro de este sector se pueden distinguir distintos tipos de bombas cuyas características se muestran a continuación.



Figura 2-3 Bombas patio de estanques

Tabla 2.1.2a. Cantidad de equipos disponibles y sus características.

Utilización	Cant./terreno	Voltaje	Potencia	R.P.M	Frame	Código SAP
TK 408						
Recirculación	2	575	125 HP	985	504/ST	
Aliment. Celdas	6	4160	400 HP	990	58/1S	1156440
Electrolito pobre	4	575	150 HP	1485	447 T	1162477
TK 401						
Orgánico Cargado	4	575	200 HP	990	449 T	1156442
TK412						
Electrolito Rico	4	575	200 HP	1485	449 T	1156446
Recup. De orgánico	1	575	1 HP	1460	145 TC	1181633
TK 406						

Tabla 2.1.2b. Cantidad de equipos disponibles y sus características.

Utilización	Cant./terreno	Voltaje	Potencia	R.P.M	Frame	Código SAP
Alimentación filtros	4	575	100 HP	740	447 T	1184511
Traslado de orgánico	1	575	1.5 HP	965	184 T	
TK ampliación						
Orgánico Cargado	2	575	125 HP	980	504/ST	1184307
TK 430						
Drenaje	2	575	25 HP	975	326 T	1156443
Sumidero	2	575	20 HP	1475	256 TC	
Bombas Verticales	2	575	20 HP	1475	256 TC	

Los instrumentos de medición dispuestos en las bombas de SX, son transmisores de presión a la salida de las bombas.

Algunos tipos de fallas en bombas:

- a) Fuga por sello – sistema sucio
 - La acumulación de contaminantes desgasta rápidamente el sello.
 - Causa probable: Contaminación del sistema de enfriamiento
- b) Rotura del eje
 - Una rotura limpia indica una fractura instantánea causada por una sobrecarga repentina o fuera de balance.
 - Causa probable: sobrecarga del balero.
- c) Fractura del casco
 - Fractura debida a vibración.
 - Causa probable: vibración excesiva.
- d) Fuga por sello.
 - Agregar refrigerante frío en un sistema caliente puede dañar el sello de cerámica.
 - Causa probable: choque térmico.
- e) No bombea líquido.
- f) No se bombea bastante agua.
- g) No hay suficiente presión.

- h) La bomba funciona por un momento y luego pierde succión.
- i) La bomba toma demasiado poder.

2.1.4 Intercambiadores de calor.

Los intercambiadores de calor son utilizados para realizar transferencia de calor de un fluido a otro, debido a esto es que en SX se utilizan de tres tipos, estos son intercambiadores de calor agua-agua, intercambiadores de calor agua-electrolito y los intercambiadores de calor electrolito-electrolito. Estos son utilizados para mantener a un cierto nivel de temperatura los fluidos utilizados en el proceso de electroobtención.

Actualmente en el área SX existen 6 intercambiadores de calor de electrolito-electrolito, los cuales son de titanio debido a la corrosión a la que están expuestos, por los cuales ingresa electrolito a 38°C por un lado y por el otro a 48°C calentando el electrolito con menor temperatura y dejándolo en una temperatura final entre 42 a 44°C.

También se encuentran 3 intercambiadores agua-electrolito, que cumplen con la misma función que los que son electrolito-electrolito.

Finalmente también existen 4 intercambiadores de calor agua-agua, que se encargan de temperar el agua utilizada en las máquinas despegadoras. El sistema de estos últimos consta de una válvula On/Off y una válvula de control con lazo de temperatura, temperatura medida por una RTD.

Cabe destacar que el sistema de sensores instalado en cada equipo consta de 4 transmisores de presión In/Out, 4 transmisores de temperatura In/Out, 2 flujómetros y en el caso de los intercambiadores de calor agua-electrolito se dispone de conductivímetros, para detectar alguna fuga de electrolito hacia el agua o viceversa.



Figura 2-4 Intercambiadores de calor

2.1.5 Filtros.

En el patio de estanques se encuentran los filtros, estos corresponden a 10 unidades de las cuales normalmente se encuentran 9 en funcionamiento y una en lavado. Estos equipos cuentan con válvulas controladas por sensores de nivel que se activan dentro de ciertos rangos, ya sea para llenar o bien para drenar la solución.

Para el filtrado se insertan burbujas de aire, con el objetivo de hacer flotar los restos de orgánico presentes en la solución.

Los sensores instalados en los filtros son:

- Sensores de nivel.
- Flujómetros

Las fallas posibles en estos equipos son producto de la corrosión, afectando los sellos de los equipos. Lo que debido al constante mantenimiento, es detectado e intervenido tempranamente, evitando que el equipo pase a falla.



Figura 2-5 Filtros de orgánico SX

2.1.6 Sopladores (EW).

Los sopladores son un conjunto de equipos dedicados a ingresar un flujo de aire a la nave de electroobtención con el objetivo de enviar la nube ácida hacia el centro de ésta, así la nube pueda ser expulsada al exterior de la nave por los extractores ubicados en la zona central de la nave.

Variables:

- Válvula de alivio.
- Caudal de aire.
- Vibración.
- Desgaste.
- Aislación.

Existen actualmente disponibles 14 sopladores cuyas características se presentan a continuación:



Figura 2-6 Sopladores de EW

Tabla 2.1.3. Descripción de sopladores disponibles en terreno.

Cantidad/Terreno	Voltaje	Potencia	R.P.M	Frame	Código SAP	Observaciones
10	575	125	2975	445TS		Bancos 1-2-3-4
4	575	75	2975	405TS	1161261	Bancos 5-6

VARIABLES A MEDIR PARA SU MANTENIMIENTO:

- Temperatura del motor.
- Temperatura de los rodamientos.
- Vibración del motor.
- Caudal.
- Corriente Over Load (Sobre carga).

SÍNTOMAS A MEDIR:

- Pérdida de aceite: Medir mediante inspección del equipo
- Desgaste excesivo de los rodamientos o engranajes: Medir mediante sensor de temperatura o por inspección.
- Pérdida de volumen de aire: Medir mediante sensor de flujo de aire (anemómetro)
- Golpeteo: Medir mediante inspección o bien mediante sensor de vibración.
- Temperatura excesiva en el soplador: Medir mediante sensor de temperatura y corriente.
- Rozamiento del extremo o punta del rotor: Medir mediante inspección.
- Vibración: Medir mediante sensor de vibración.

Actualmente los sopladores cuentan con sensores de vibración instalados, además de poseer antecedentes históricos útiles para su mantenimiento.

2.2 Definición del equipo

Debido a la cantidad de información reunida de los equipos anteriormente mencionados, se proponen los equipos sopladores para realizar el proyecto, puesto que poseen mayor cantidad de información y tienen instalados sensores de vibración, lo que es un gran avance en el proyecto.

De todas maneras es necesario medir variables adicionales, por lo tanto hay que hacer un análisis de factibilidad técnica.

Bureau Veritas, entidad encargada de llevar un seguimiento a los equipos sopladores, quien califica el estado de éstos mismos como: Buena, Satisfactorio, Insatisfactorio e inaceptable, acorde a los datos obtenidos de los sensores de vibración.

Según Bureau Veritas, normalmente los equipos están constantemente funcionando en un nivel satisfactorio con un promedio de 2 insatisfactorios o inaceptables al mes, otra razón para determinar que estos equipos son una buena alternativa a la hora de la implementación del piloto.

La cantidad de equipos disponibles de características idénticas es mucho mayor a la disponible en el resto de los equipos.

2.3 Plan de mantenimiento de los sopladores

El plan de mantenimiento instaurado actualmente en los sopladores se basa en un mantenimiento preventivo por frecuencia de ciclo mensual.

Adicionalmente la empresa colaboradora Bureau Veritas, lleva un registro de vibraciones mensual en los equipos sopladores, con los que se realiza actualmente un mantenimiento sintomático.

A modo de ejemplo a continuación se muestra el espectro de frecuencias del soplador 525 y el soplador 523 del mes de marzo 2012.

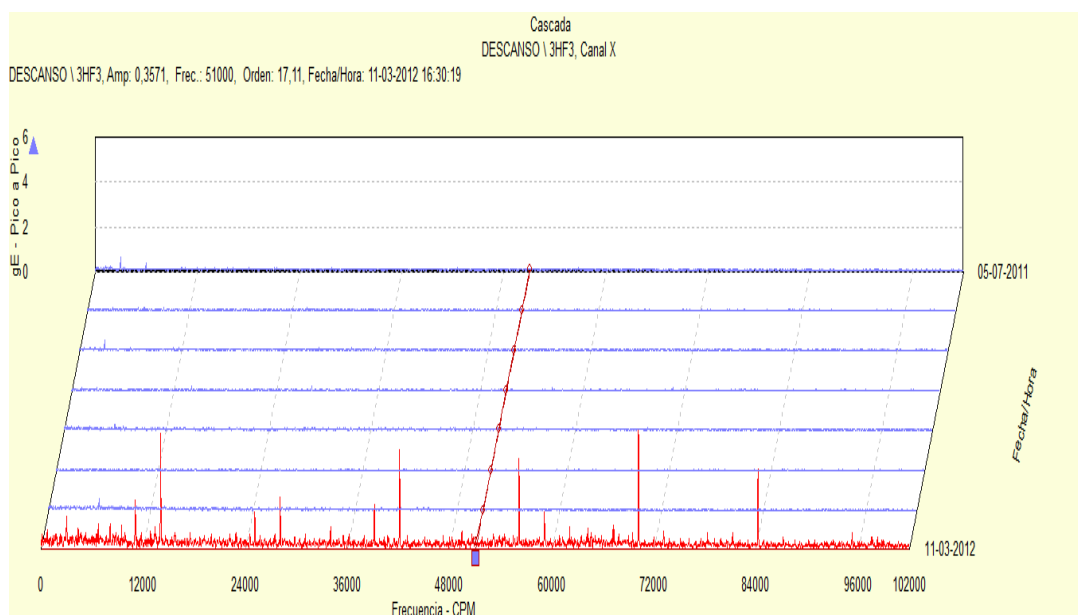


Figura 2-7 Gráfico representativo de soplador 525

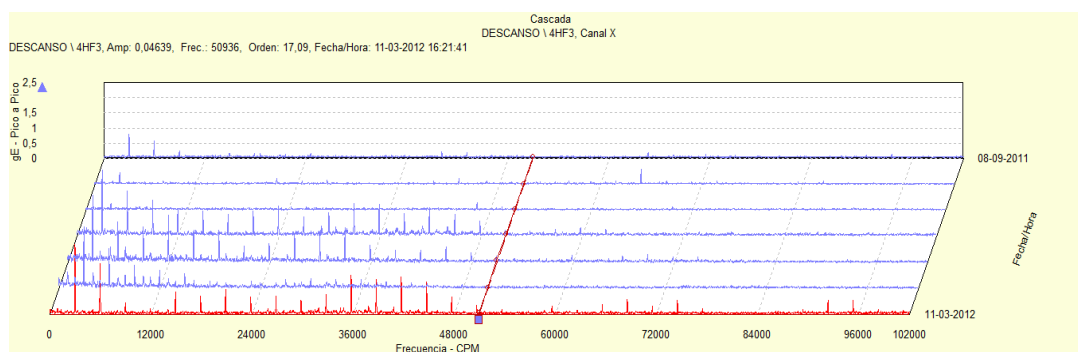


Figura 2-8 Gráfico representativo de soplador 523

El diagnóstico correspondiente al gráfico anterior es que en el descanso del lado rodete se presentan en forma estable sus componentes armónicos derivados de una soltura.

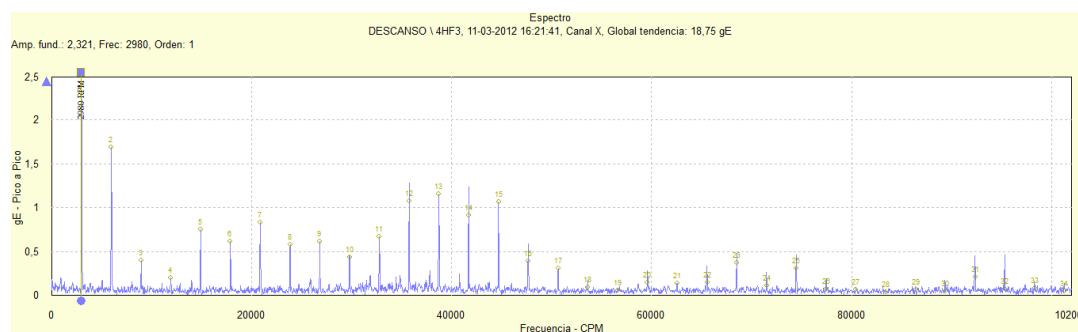


Figura 2-9 Gráfico tendencia global de componentes armónicas soplador 523

A raíz de los resultados obtenidos se recomienda chequear el ajuste del rodamiento en eje de descanso del lado del ventilador, en el soplador 523.

El soplador 525 registra un comportamiento normal a diferencia del soplador 523 que registra un comportamiento errático, por lo que su estado es considerado insatisfactorio.

Los resultados mostrados anteriormente son contrastables con los informes de Bureau Veritas, de los meses posteriores.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E INSTALACIÓN DE SENSORES

Al proyectar los costos anuales asociados al consumo eléctrico del parque de motores de mayor potencia dentro de una instalación industrial cualquiera, multiplicados por sus horas de trabajo y su vida útil, podemos cuantificar el impacto económico que dichos sistemas motrices implicarán dentro de los costos operacionales de cada compañía, situación que permitirá analizar la importancia de trabajar con motores operando sin anomalías o fallas existentes, evitando demandas de consumos eléctricos adicionales (kWh), con los respectivos efectos sobre el medioambiente asociados. En relación a lo anterior, la Figura 1 especifica las principales variables asociadas a motores de inducción que deberían monitorearse permanentemente a fin de evitar fallas y/o anomalías que generen consumos adicionales de energía eléctrica.

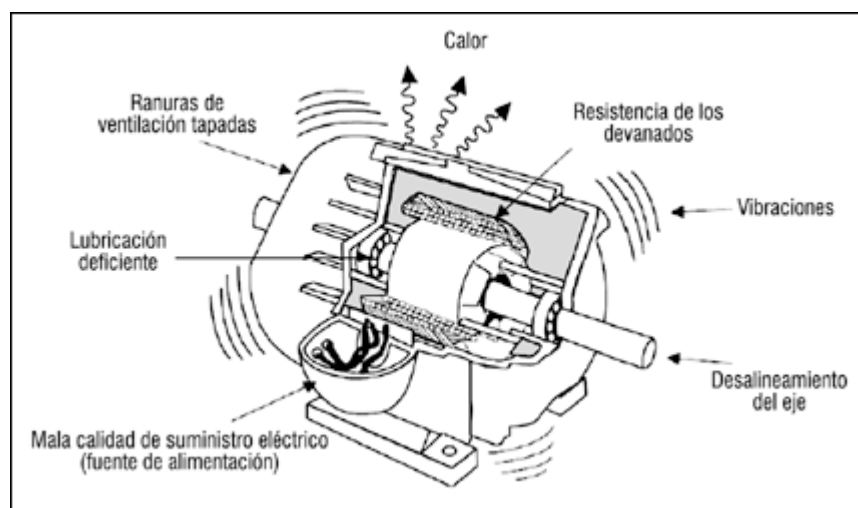


Figura 3-1 Ilustración de problemas en motores

3.1 Factibilidad técnica.

3.1.1 Monitor y sensores de vibraciones.

- a) Schädler VSE002K7: El monitor de vibraciones de Schädler tiene la característica de procesar señales de vibración y entregar un análisis de las variables adquiridas, mediante el uso de FFT y H-FFT.

A través de la transformada rápida de Fourier (FFT) permite la evaluación de armónicos como; desbalances, resonancia, alineamiento defectuoso, soltura de anclaje, entre otros.

En conectividad el equipo tiene una capacidad de hasta cuatro sensores, dos a ocho entradas y salidas digitales, dos entradas de corriente o pulsos, una salida analógica configurable y comunicación Ethernet TCP/IP y/o Serial RS485.

También es posible realizar una evaluación de señales de alta frecuencia peak (H-FFT), como cavitaciones y rodamientos.

En resumen el equipo cuenta con las características presentadas a continuación:

- Alarmas preventivas de fallas en línea.
- Alarmas por contadores de eventos.
- Alarmas por tiempos de fallas. (ej: cavitaciones en bombas).
- Incluir otras variables preventivas.
- Crear passwords por nivel de uso.
- Revisar curva de calibración en línea y alarma.
- Mantiene histórico de variables (33000 valores).
- Incluye software que muestra espectro y barras de análisis.
- Incluye software con OPC server al DCS.

b) Sensor de vibraciones EGE877P: Este dispositivo es un transmisor de vibración con base magnética y cable de 30 [m].

El sensor de vibraciones detecta vibraciones de hasta +/- 25 mg. Con un rango de 0-6000 Hz, con una salida analógica de 4-20 [mA].

3.1.2 Sensores de variables eléctricas.

a) Schneider Tesys T: Las características técnicas de este equipo parten de la base de ser un relé de protección de motores, por lo que monitorea corrientes, voltajes, potencia, fugas a tierra, etc.

Al ser un equipo robusto también posee otras características, como la comunicación con módulos PLC, mediante cinco tipos distintos de protocolos, que son: Modbus, CanOpen, DeviceNet, Profibus y Ethernet.

Las funciones de protección de motor dependen de la configuración del controlador, y se detallan a continuación.

Protecciones de corriente:

- Sobrecarga térmica (tiempo inverso & definido).
- Corrientes de fases (desbalance, pérdida, etc).
- Baja/Sobre corriente.
- Arranque largo, rotor bloqueado.
- Falla a tierra.
- Sensor de temperatura motor (PTC).
- Bloqueo de ciclos rápidos.

Protecciones de Voltaje:

- Voltajes de fase (desbalance, pérdida, secuencia).
- Bajo/Sobre voltaje.
- Deslastrado de cargas si hay bajo voltaje.

Protecciones de potencia:

- Bajo/Sobre potencia.
- Bajo/Sobre factor de potencia.

El equipo también es capaz de realizar algunas mediciones mediante sus capacidades de supervisión.

Mediciones:

- Capacidad térmica & temperatura del motor.
- Corriente (fases, media, tierra, desbalance de fases).
- Voltaje (fase-fase, desbalance, frecuencia).
- Potencia (activa/reactiva, factor de potencia)

Adicionalmente el equipo es capaz de llevar una estadística de ciertas variables medidas.

Estadística:

- Contador de fallas de protección.
- Contador de fallas de diagnóstico.
- Histórico Operaciones motor.
- Histórico de fallas.

Consecuentemente con las características mencionadas anteriormente el equipo puede realizar un diagnóstico de las condiciones del motor.

Diagnóstico:

- Watchdog fallas internas, temperatura interna.

- Comandos de control.
- Conexionado (TTCC, PTC, comunicación).

Además el equipo es capaz de monitorear el estado del equipo.

Estados del equipo:

- Estado control motor, tiempo de operación.
- Máxima corriente y tiempo de último arranque.
- Tiempo antes de trip & tiempo antes de reset.

El equipo cuenta con interfases de supervisión como la que se muestra a continuación:

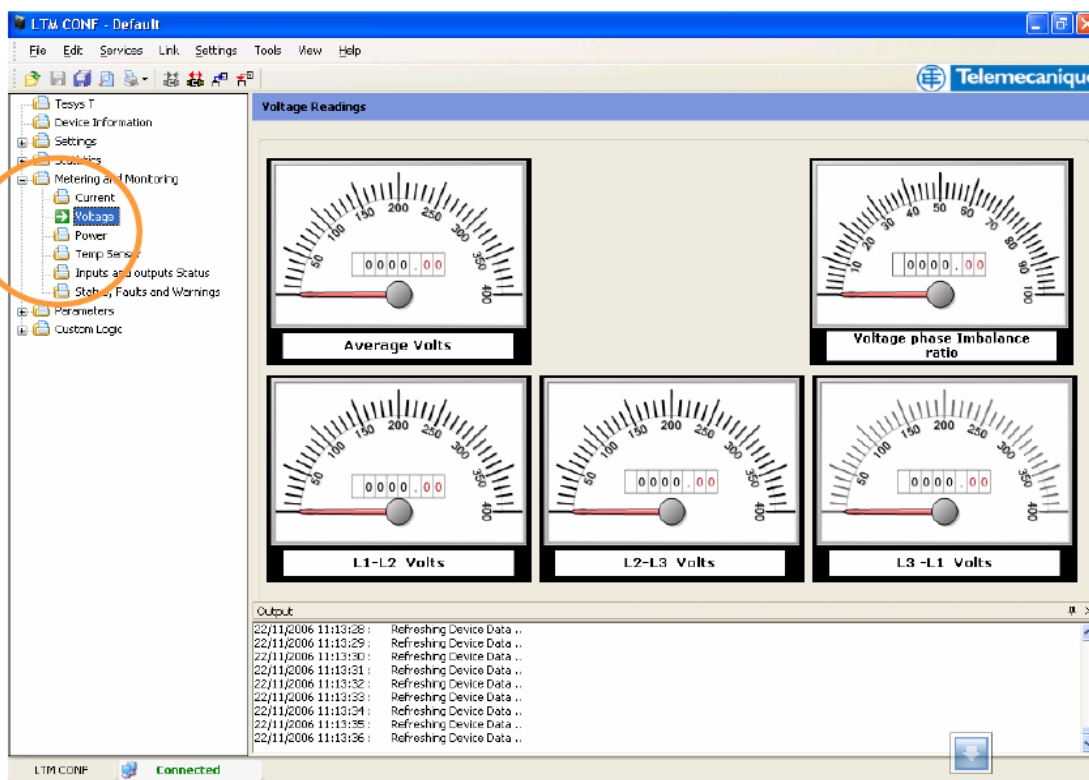


Figura 3-2 Interfaz de supervisión monitor de variables eléctricas

Para llevar las estadísticas, el equipo posee algunas herramientas detalladas a continuación:

Contador para cada tipo de falla:

- Fallas de protección: Sobrecarga, sobre corriente, etc.
- Fallas de diagnóstico: Pérdida comunicación puerta HMI, falla interna, etc.

Como se mencionaba recientemente es posible llevar un registro de historial de control de motor, cuyas características se detallan a continuación:

- Contador de arranques y tiempos operación.
- Arranques de motor por hora.
- Contador de deslastrado de carga.
- Registro del último arranque.

Y también es posible llevar un registro de variables de las últimas cinco fallas, registrando:

- Código de falla.
- Fecha y hora.
- Valor de parámetros y medidas.

Al hablar de diagnóstico de fallas en el Tesys T, se pueden realizar ciertas distinciones.

i) Fallas internas:

- Watchdog: Stack over/under flow.
- Temperatura interna.

ii) Chequeo de comandos de control:

- Partir/Parar (chequeo de corriente después del comando)
- Partir/ Parar check back.

iii) Fallas de conexión:

- Conexión TTCC.
- Conexión de voltaje.
- Conexión del sensor de temperatura.

iv) Pérdidas de comunicación:

- Conexión terminal local.
- Pérdida de comunicación: HMI, Red, Módulo de expansión.

v) Estados de operación:

- Preparado (Ready).
- Inicio (Start).
- Corriendo (Run).

- No preparado (not ready).

vi) Estados de sobrecarga térmica:

- Tiempo antes de falla (antes de que ocurra la falla).
- Tiempo antes de reset (después de ocurrida la falla).

En general el equipo es abierto a los principales protocolos de comunicación, proporciona un alto nivel de adaptabilidad en cualquier tipo de aplicación.

Las más importantes características de control y protección requeridas están disponibles en el controlador sin módulos adicionales, posee funciones de potencia, control y de supervisión de variables críticas en un elemento.

3.1.3 Pre-factibilidad económica.

Los costos asociados a los equipos se presentan a continuación:

Costos asociados a los monitores de vibración:

Tabla 3.1.1. Precio de equipos asociados al monitoreo de vibraciones.

Equipo	Precio unitario (USD)
Monitor VSE002K7	3639.75
Acelerómetro EGE877P	700

Para el monitoreo de dos sopladores se necesita instalar cuatro acelerómetros y un monitor de vibraciones, por lo que el costo asociado al análisis vibracional es de USD\$6439,75.

Costos asociados a los sensores de variables eléctricas:

Tabla 3.1.2. Precio del equipo monitor de variables eléctricas.

Equipo	Precio unitario (USD)
Tesys T Multifunción	677
Transformador de corriente (Toroide)	42.87

Para realizar el monitoreo de las variables eléctricas de dos equipos sopladores se necesitan dos equipos TesysT con sus correspondientes transformadores de corriente, por lo tanto es necesaria una inversión de USD\$1439.74.

El costo total de la adquisición de los equipos para la implementación del piloto es de USD\$7879.49

A estos costos es necesario adicionar los costos asociados a la instalación de la empresa externa que incluyen una cantidad de 16 horas hombre por máquina, y cada hora hombre tiene un costo de USD\$40 lo que tiene un costo total de USD\$1280 con material de fijación y cableado incluidos.

Por lo tanto los costos totales de instalación ascienden a un monto de USD\$9159.49. Adicionalmente se puede mencionar que el presupuesto asignado para la implementación de la planta piloto es de USD\$35.000, por lo que es factible económicamente la implementación de los sensores en los equipos seleccionados.

Esto sumado a que las características técnicas de los equipos cubren las necesidades del proyecto, nos entrega como resultado que es completamente factible la implementación del proyecto.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE VARIABLES ELÉCTRICAS PROPORCIONADOS POR LOS SENSORES

4.1 Análisis de datos proporcionados por los sensores

El análisis de datos proporcionados por los sensores, parte de la base del análisis de las distintas señales obtenidas, por lo tanto es importante realizar un análisis de variables eléctricas, como se presenta a continuación y un análisis de vibraciones como se mostrará en el capítulo 5.

4.1.1 Análisis de variables eléctricas.

Existen algunos tipos de problemas muy comunes en motores eléctricos que no pueden diagnosticarse completamente mediante el análisis tradicional de la vibración entre los que se encuentran:

- Problemas en barras y anillos de cierre del rotor.
- Porosidades en la fundición de rotores fundidos.
- Irregularidades en el entrehierro estáticas y dinámicas
- Desequilibrio en el campo magnético.

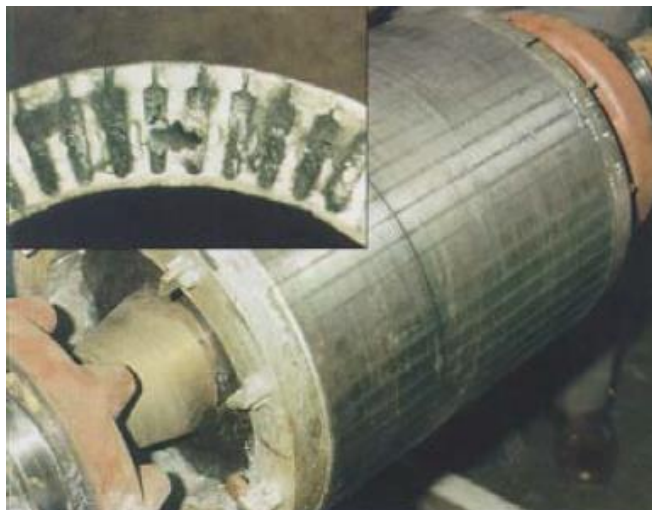


Figura 4-1 Problemas en las barras del motor

La idea de monitorear las variables eléctricas es detectar y evaluar los daños, para poder realizar las acciones adecuadas tendentes a corregir los defectos mencionados anteriormente.

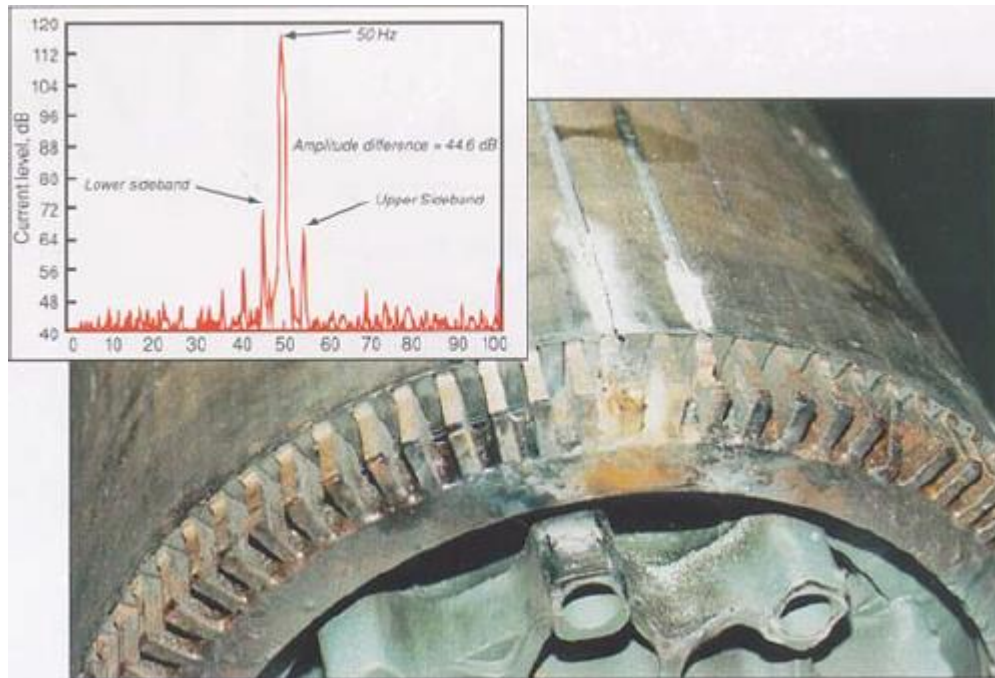


Figura 4-2 Defectos en el entrehierro del motor

También es posible detectar defectos en el entrehierro que dan lugar a elevados niveles de excentricidad dinámica o estática. Esto se consigue analizando la presencia en la zona de alta frecuencia en el espectro de corriente.

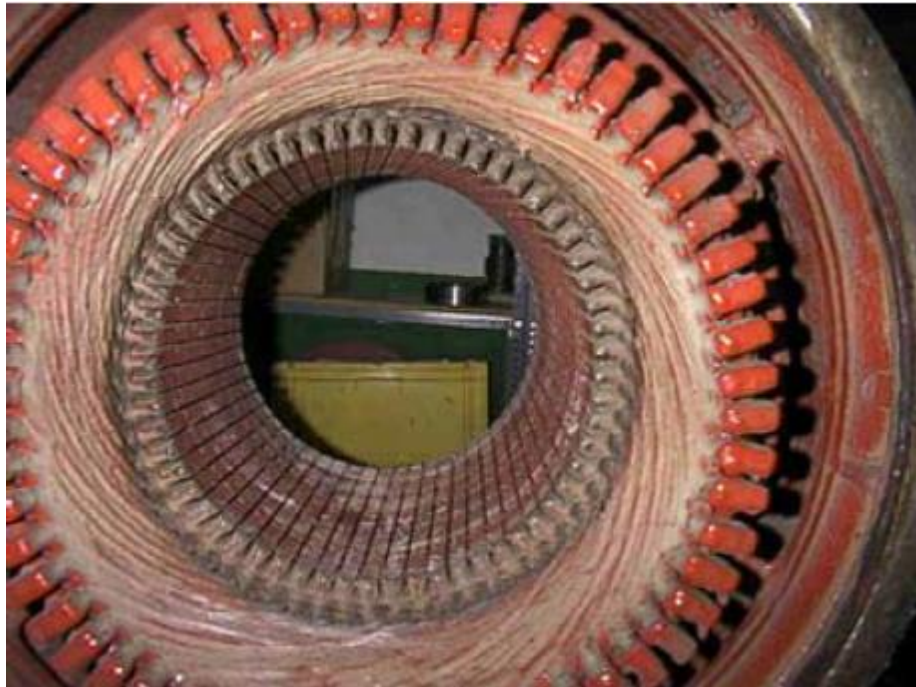


Figura 4-3 Estator en mal estado

Las zonas de falla del motor se describen a continuación:

- Rotor.
- Estator.
- Entrehierro.
- Circuito de potencia.
- Calidad de alimentación.
- Aislamiento.

Existen dos tipos de ensayo para determinar el estado del motor:

- Estáticos: Motor detenido.
- Dinámicos: Motor en marcha.

A raíz de esto se presentan los siguientes ensayos generales:

- Asegurar que las condiciones están bien colocadas.
- Calcular la resistencia a tierra (RTG).
- Calcular la capacidad de tierra (CTG).
- Calcular la resistencia entre fases y su desequilibrio.
- Calcular la inductancia entre fases y su desequilibrio

- Volver a asegurar que las conexiones están bien colocadas para dar el análisis por bueno.

A continuación se presenta una tabla con los ensayos generales mencionados anteriormente

Tabla 4.1.1. Ensayos para determinar fallas en motores.

Cuando...	Y...	Hay...
CTG Aumenta	RTG disminuye	Humedad y contaminación en el sistema de aislamiento.
CTG Aumenta	RTG permanece	Contaminación de la superficie del aislamiento.
Desequilibrio resistivo es bajo	Desequilibrio de inductancia alto.	Problemas con rotor o eje torcido, barras rotas, porosidad; Fallas de estator y/o excentricidad.
Desequilibrio resistivo alto	Desequilibrio inductancia alto.	Problemas del estator.
Desequilibrio resistivo alto	Desequilibrio inductancia bajo.	Problemas en el circuito de potencias como conexiones corroídas, contaminadas o desconexiones.

a) Ensayo de arranque de motor.

Este ensayo consiste en la captura en valor eficaz de la señal de intensidad de corriente en el arranque (desde 15 hasta 60 segundos). El valor peak debe estar entre 7 a 10 veces el valor del régimen permanente, se ha de analizar las tendencias para establecer diagnósticos del estado del rotor y el estator.

b) Ensayo de frecuencia.

Cundo hay presencia de barras rotas aparecen a la izquierda de la 5ta armónica (250Hz) tres peaks separados, la misma distancia que las bandas laterales con respecto a la frecuencia de red.

c) Ensayo de excentricidad.

Para identificar la existencia de excentricidad se analizan 4 peaks (separados $2 \cdot FI$) y que no sean armónicos de la frecuencia de la red. Para ello se coloca el cursor en el 2º peak a la izquierda sospechoso y se pide al programa que indique los peaks.

d) Ensayo de potencia.

Este ensayo se realiza en torno a los siguientes valores:

- Valores de voltaje y corrientes.
- Desequilibrio de voltaje y corriente.
- Distorsión armónica total (THD).

- Factor de peak del voltaje y la corriente.
- Sistema de armónicos.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE VARIABLES MECÁNICAS PROPORCIONADAS POR SENSORES DE VIBRACIÓN

5.1 Análisis de vibraciones.

En términos muy simples una vibración es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud.

Todos los cuerpos presentan una señal de vibración en la cual plasman cada una de sus características. De acuerdo a esto, las máquinas presentan su propia señal de vibración capturada de una máquina significa la suma vectorial de la vibración de cada uno de sus componentes.

5.1.1 Vibración simple.

La base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales. Estas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras. Una oscilación pura puede ser representada físicamente con el siguiente experimento: Imagínese una masa suspendida de un resorte como el de la (Figura. 5-1). Si esta masa es soltada desde una distancia X_0 , en condiciones ideales, se efectuará un movimiento armónico simple que tendrá una amplitud X_0 . Ahora a la masa parte posterior vibrante le adicionamos un lápiz y una hoja de papel en su parte posterior, de manera que pueda marcar su posición. Si jalamos el papel con velocidad constante hacia el lado izquierdo se formará una gráfica parecida a la Figura 5-2. El tiempo que tarda la masa para ir y regresar al punto X_0 siempre es constante. Este tiempo recibe el nombre de período de oscilación (medido generalmente en segundos o milisegundos) y significa que el resorte completó un ciclo.

El recíproco del período es la frecuencia (es decir $F=1/P$) la cual generalmente es dada en Hz (ciclos por segundos) o también ciclos por minuto (CPM). Estos conceptos pueden verse más claramente en la Figura 5-3. De esta onda sinusoidal también es importante definir amplitud y fase.

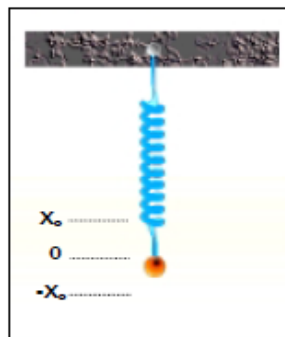


Figura 5-1 Masa suspendida de un resorte



Figura 5-2 Papel en movimiento a velocidad constante

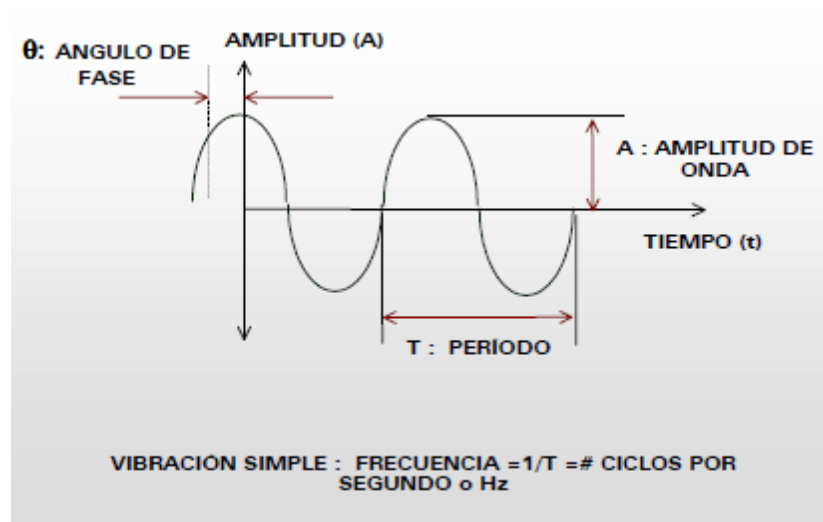


Figura 5-3 Vibración simple

La fase realmente es una medida de tiempo entre la separación de dos señales, la cual puede ser relativa o absoluta. Generalmente es encontrada en grados. La Figura 5-4 muestra dos señales sinusoidales de igual amplitud y período, pero separadas 90 grados, lo cual indica que ambas curvas están desfasadas 90 grados.

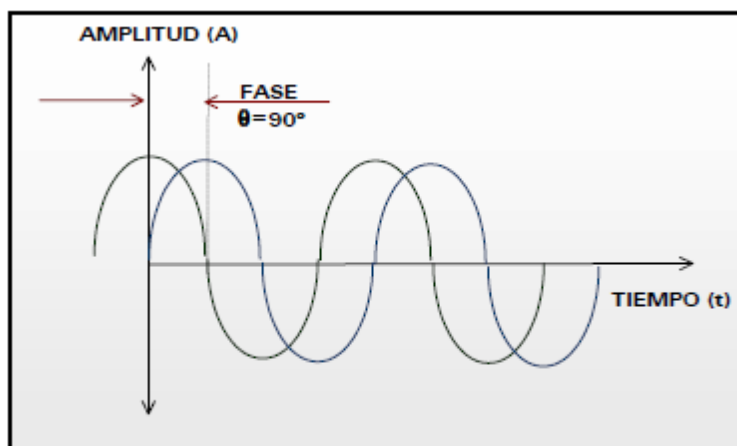


Figura 5-4 Fase

5.1.2 Vibración compuesta.

Una señal compuesta es una sumatoria de varias señales sinusoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina, más todos los golpeteos y vibraciones aleatorias. El resultado es una señal como la ilustrada en la Figura 5-6.

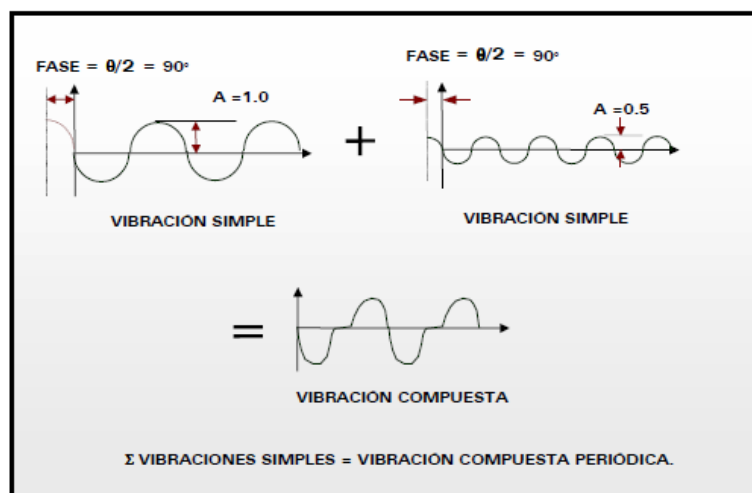


Figura 5-5 Vibración compuesta periódica

5.1.3 Vibración aleatoria y golpeteos intermitentes:

Además de las vibraciones simples, también existen otros tipos de vibraciones como son la vibración aleatoria y los golpeteos intermitentes. La vibración aleatoria no cumple con patrones especiales que se repiten constantemente o es demasiado difícil detectar donde comienza un ciclo y donde termina. Estas vibraciones están asociadas generalmente a

turbulencia en sopladores y bombas, a problemas de lubricación y contacto metal-metal en elementos rodantes o a cavitación en bombas (VER FIGURA 6a). Este tipo de patrones es mejor interpretarlos en el espectro y no en la onda en el tiempo. Los golpeteos intermitentes están asociados a golpes de las aspas de un impulsor o ventilador, etc. Este tipo de señales tiende a morir debido a la amortiguación del medio. En la FIGURA 6b se muestra claramente este fenómeno: un golpe intermitente que se amortigua con el medio.

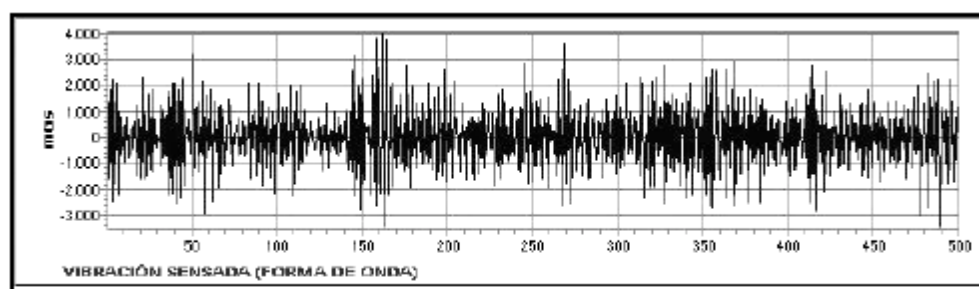


Figura 5-6 Vibración aleatoria detectada debido a cavitación de una bomba

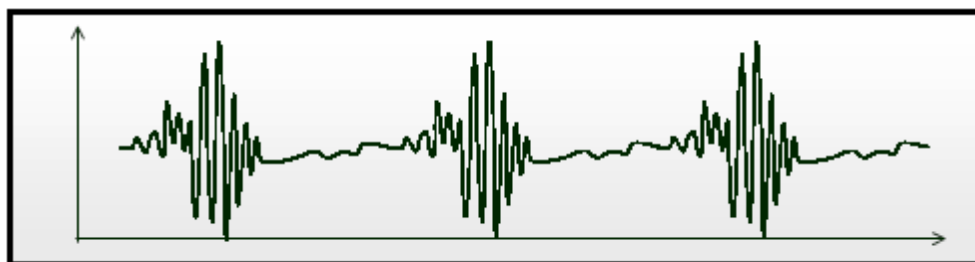


Figura 5-7 Golpe intermitente que se amortigua con el medio

5.1.4 Transformada de Fourier

Hasta ahora sólo se han visualizado vibraciones en el dominio del tiempo, que son señales directas de la máquina. Como ya dijimos antes, en estas señales se encuentra plasmada toda la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina. Pero hay un problema a la hora de realizar un diagnóstico: estas señales están cargadas de mucha información en forma muy compleja, la cual prácticamente queda imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos.

Existen otras formas para realizar un estudio de vibraciones, entre las cuales se encuentra mirar esta señal en el dominio de la frecuencia. Esta es la gráfica de amplitud Vs. Frecuencia y es conocida con el nombre de espectro. Esta es la mejor herramienta que se tiene actualmente para el análisis de maquinaria.

Fue precisamente el matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830) quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos.

Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal desde una máquina, luego calcula todas las series sinusoidales que contiene la señal compleja y por último la muestra en forma individual en el eje X de la frecuencia. En la siguiente ilustración de tres dimensiones (Figura 5-8) puede notarse claramente la señal compleja (en color verde), capturada desde una máquina. A dicha señal se le calculan todas las series de señales sinusoidales en el dominio del tiempo (vistas en azul) y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia (vistas en rojo). La Figura 5-9 muestra una señal en el dominio del tiempo y su correspondiente en el dominio de la frecuencia.

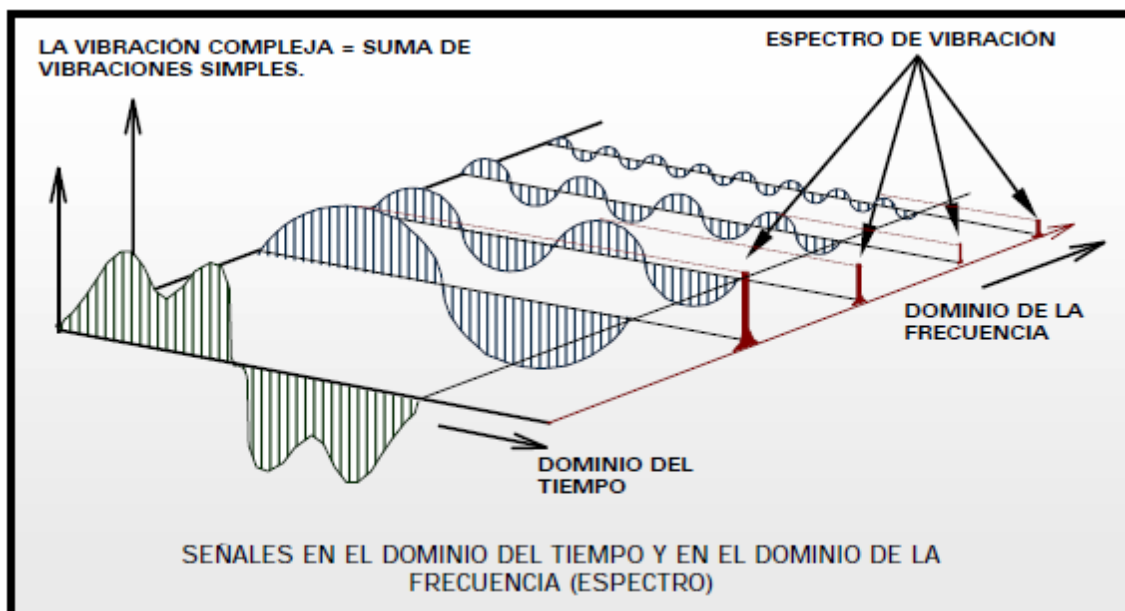


Figura 5-8 Señal compleja capturada de una máquina

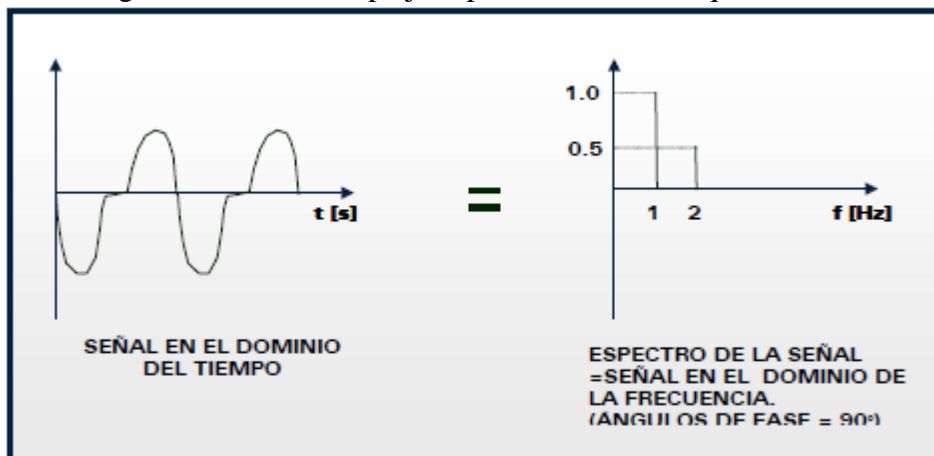


Figura 5-9 Señal en el dominio del tiempo y su espectro en el dominio de la frecuencia

En el conjunto de categorías clasificadas se presentarán los espectros características de las fallas más comunes. Estos espectros han sido el fruto de muchos estudios y se convierten en “recetas de cocina” que ayudan a descubrir los problemas que se pueden suceder en una máquina, aunque en muchos casos es necesario realizar un análisis físico de la máquina.

5.1.5 Frecuencia natural y resonancias.

La frecuencia natural presenta un carácter muy diferente a las anteriormente nombradas, debido a que depende de las características estructurales de la máquina, tales como su masa, su rigidez y su amortiguación, incluyendo los soportes y tuberías adjuntas a ella. No depende de la operación de la máquina, a no ser que la rigidez sea función de la velocidad.

Si la frecuencia natural es excitada por un agente externo, la amplitud de vibración de la máquina se incrementará enormemente causando perjuicios que a corto o mediano plazo pueden llegar a ser catastróficos. Esto es lo que se conoce con el nombre de resonancia. Cuando una resonancia es detectada, es necesario identificar el agente externo que la está produciendo e inmediatamente debe aislarse estructuralmente o cambiar su velocidad de operación. La Figura 5-10 muestra un rotor que gira a una velocidad similar a la frecuencia natural de su estructura de soporte. Lo que incrementa abruptamente los niveles de vibración de la máquina.

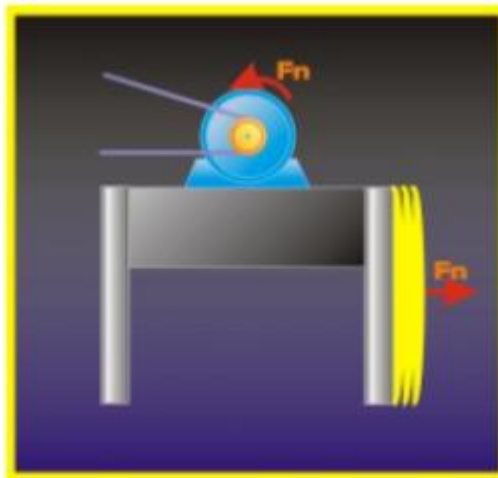


Figura 5-10 Rotor que gira a velocidad similar a la frecuencia natural

5.1.6 Análisis espectral.

Cuando se mide una máquina, se genera una información muy valiosa que es necesario analizar. El éxito de este análisis depende de la correcta interpretación que se le dé a los espectros capturados con respecto a las condiciones de operación en que se

encuentra la máquina. A continuación se muestra un esquema de cómo sería la captura de la información desde una máquina para luego ser analizada.

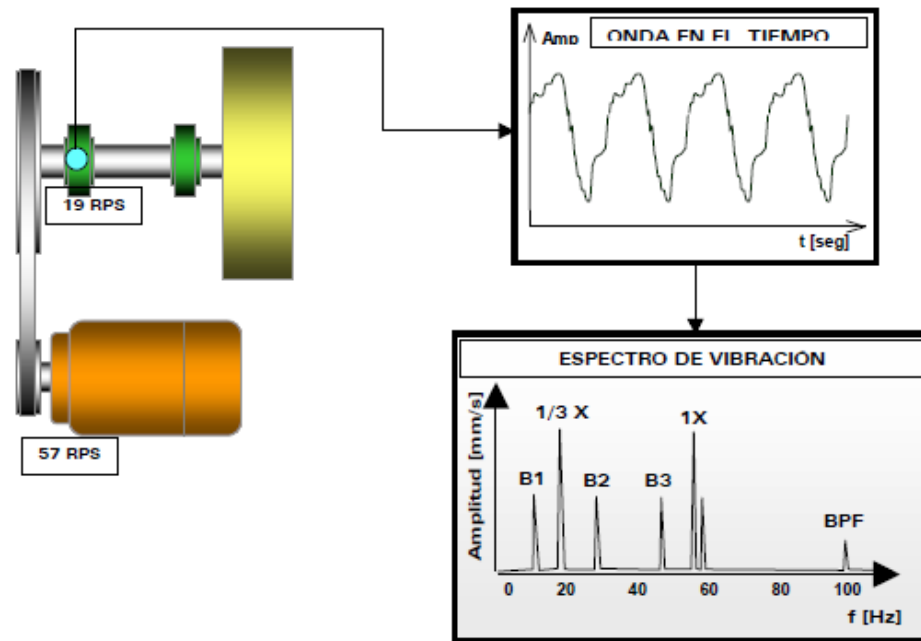


Figura 5-11 Esquema de captura de señales para su posterior análisis

En la siguiente sección se encuentran los comportamientos espectrales característicos de la mayoría de patologías que puede presentar una máquina.

5.2 Categorías de patologías clasificadas.

5.2.1 Desbalanceo.

- Estático: Producido generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro.

El espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1 x RPS del rotor.

Se recomienda para corregir la falla, balancear el rotor en un solo plano (en el centro de gravedad del rotor) con la masa adecuada y en la posición angular calculada con un equipo de balanceo. Debe consultar a un experto en balanceo de máquinas.

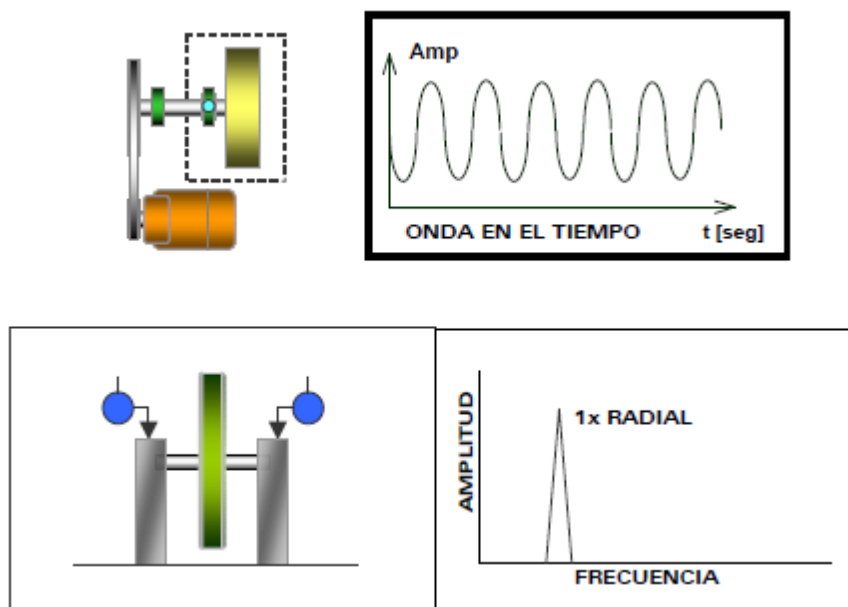


Figura 5-12 Desbalanceo estático de rotor

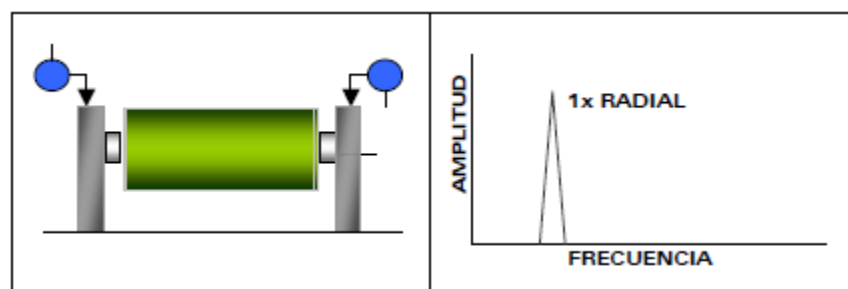


Figura 5-13 Desbalanceo dinámico de rotor

- Dinámico: El desbalanceo dinámico ocurre en rotores medianos y largos. Es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor.

El espectro presenta vibración dominante y vaivén simultáneo a frecuencia igual a 1x RPS del rotor.

Se recomienda para corregir la falla, balancear el rotor en dos planos con las masas adecuadas y en las posiciones angulares calculadas con un equipo de balanceo dinámico. Consulte a un experto en balanceo de rotores.

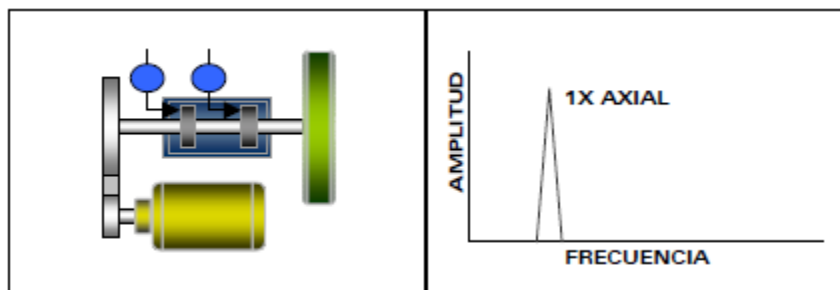


Figura 5-14 Desbalanceo de rotor colgante

- Rotor colgante: Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje.

El espectro presenta vibración dominante a 1xRPS del rotor, muy notoria en dirección axial y radial.

Para corregir la falla, primero debe verificarse que el rotor no tenga excentricidad ni que el eje esté doblado. Luego debe realizarse el balanceo adecuado. Consulte a un experto en balanceo de máquinas.

5.2.2 Desalineación.

- Angular: Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos.

Caracterizado por altas vibraciones axiales. 1xRPS y 2xRPS son las más comunes, con desfase de 180 grados a través del acople. También se presenta 3xRPS. Estos síntomas también indican problemas en el acople.

Para corregirlo, el conjunto motor-rotor deben alinearse. Debe emplearse en un equipo de alineación adecuado.

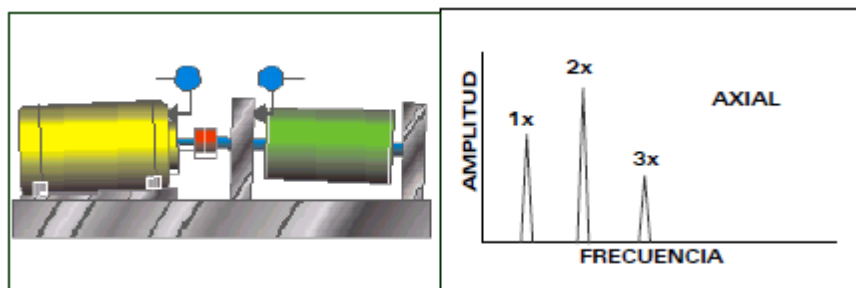


Figura 5-15 Desalineación angular

- Paralela: Los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales.

Se pueden detectar altas vibraciones radiales a $2xRPS$, predominante, y a $1xRPS$, con desfase de 180 grados a través del acople. Cuando aumenta la severidad, genera peaks en armónicos superiores ($4x$, $8x$).

Se debe alinear el conjunto para corregir el daño. Debe emplearse un equipo de alineación adecuado.

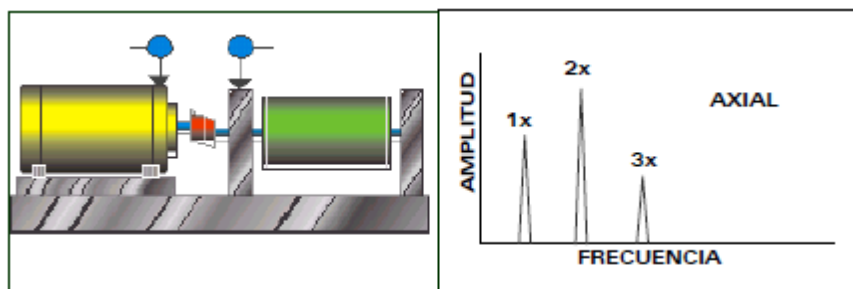


Figura 5-16 Desalineación paralela

- Entre chavetas: en una máquina con transmisión de poleas, la mala posición de las chumaceras puede evitar que el eje se acomode correctamente, lo cual genera vibraciones anormales en sentido axial y radial.

Excitación del peak representativo de la velocidad ($1xRPS$), especialmente en sentido axial.

Es necesario hacer una verificación de que las chumaceras queden completamente paralelas entre si.

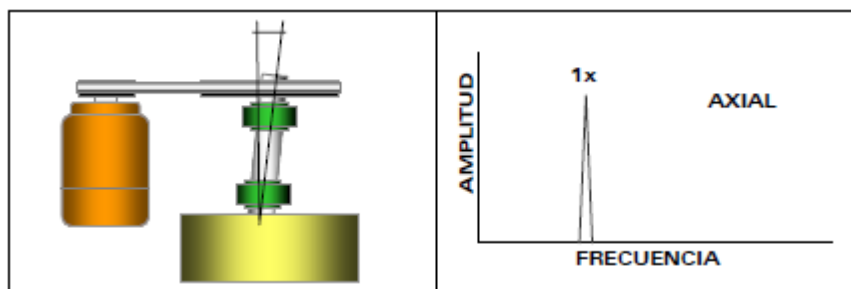


Figura 5-17 Desalineación entre chavetas

5.2.3 Holgura mecánica eje-agujero.

- Holgura eje-agujero: Aflojamiento de manguitos, tolerancias de manufactura inadecuadas (con juego), y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el dominio del tiempo.

La falla genera múltiples armónicos y subarmónicos de $1xRPS$, destacándose los armónicos fraccionarios $\frac{1}{2}x$, $\frac{1}{3}x$, $1.5x$, $2.5x$, etc. Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas radiales espaciadas 30 grados entre sí.

Se recomienda verificar la colocación de los manguitos y los juegos eje-agujero cercanos al punto de medición. Igualmente, los ajustes de rotor-eje.

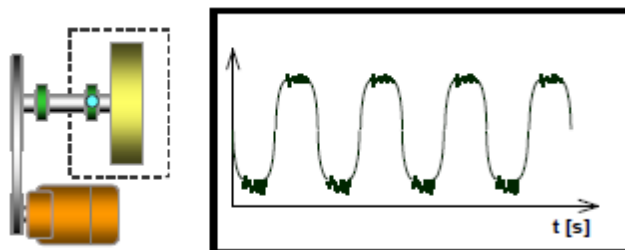


Figura 5-18 Holgura mecánica entre eje-agujero a

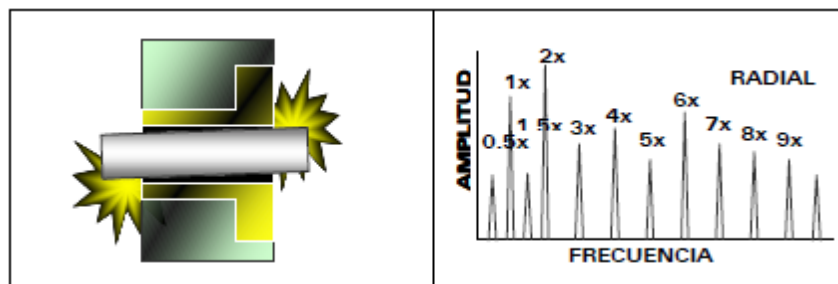


Figura 5-19 Holgura mecánica entre eje-agujero b

5.2.4 Soltura estructural:

- Soltura estructural: Ablandamiento o desplazamiento del pie de la máquina, por holgura en los pernos de la base o por deterioro de los componentes de la sujeción.

El espectro presenta vibración a $1xRPS$ en la base de la máquina con desfase a 180 grados entre los elementos sujetos en el anclaje. Altamente direccional en la dirección de la sujeción.

Se recomienda primero revisar el estado de fatiga del pie de máquina (rajaduras, corrosión). Luego debe verificarse el estado de los sujetadores y por último el estado de la cimentación.

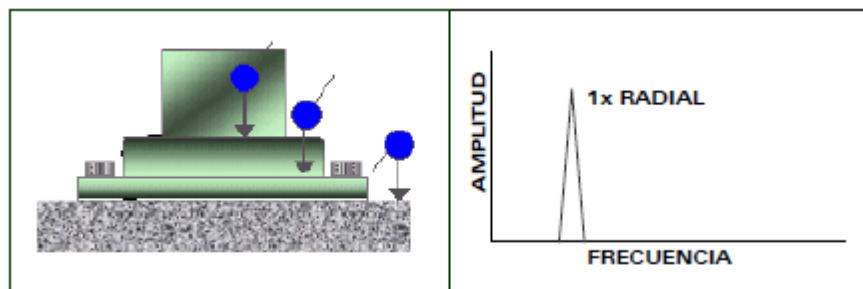


Figura 5-20 Soltura estructural

5.2.5 Excentricidad

- Rotor excéntrico: Fácilmente confundible con desbalance. Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea o engranaje.

La mayor vibración ocurre 1xRPS del elemento con excentricidad, en dirección de la línea que cruza por los centros de los dos rotores.

Para corregir la falla, el rotor debe ser reensamblado o reemplazado. (Tratar de balancear el rotor excéntrico resulta en una disminución del nivel de vibración, en una dirección, y un aumento considerable en la otra).

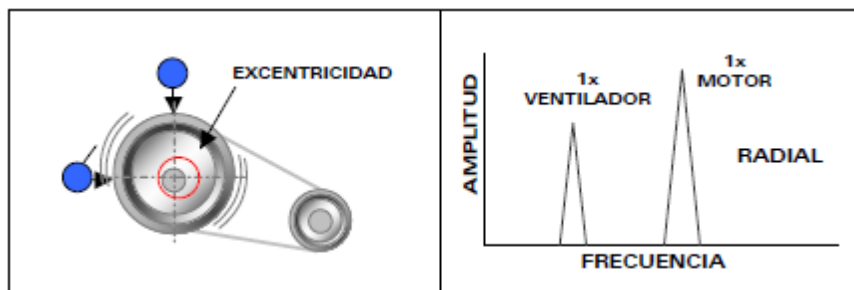


Figura 5-21 Rotor excéntrico

5.2.6 Rotor o eje pandeado

- Pandeo: Más comúnmente en ejes largos. Se produce por esfuerzos excesivos en el eje.

Genera vibración axial alta con diferencia de fase de 180 grados medida en los dos soportes del rotor. La vibración dominante es de 1xRPS si el pandeo está cercano al centro del eje, y es de 2xRPS si el pandeo está cerca del rodamiento.

Para corregir la falla, el eje debe rectificarse o cambiarse.

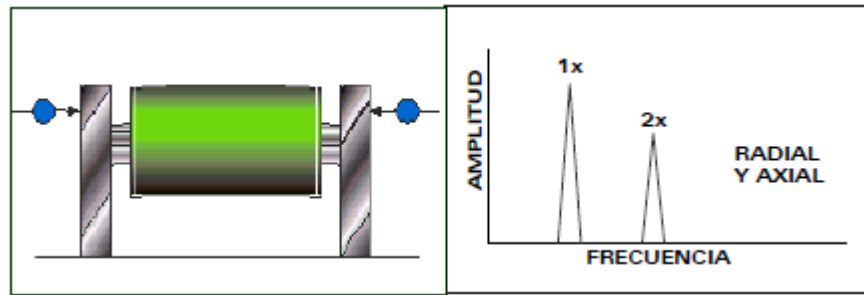


Figura 5-22 Rotor o eje pandeado

5.2.7 Resonancias y pulsaciones.

- **Resonancia:** Ocurre cuando la velocidad de una fuerza conducida iguala la frecuencia natural de una estructura o una parte de ella.

Puede causar dramáticas amplificaciones de la amplitud lo que puede terminar en fallas prematuras y posiblemente catastróficas. Presenta un cambio de fase de 90 grados por resonancia y 180 grados cuando lo sobrepasa.

Se requieren cambios periódicos de localización de la frecuencia natural.

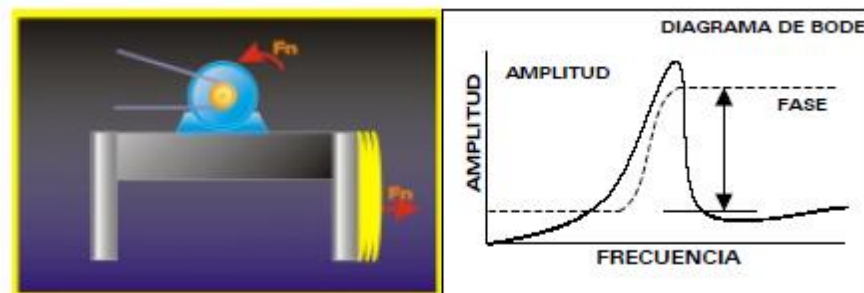


Figura 5-23 Resonancia

- **Pulsaciones:** sucede cuando una fuente de vibración interfiere con otra. Generalmente se produce por dos máquinas cercanas que trabajan casi a la misma velocidad.

El espectro muestra dos peaks con frecuencias similares. La diferencia de estas da como resultado una pulsación. La ilustración izquierda representa estas frecuencias en el dominio del tiempo y la suma de ambas.

Para solucionar el problema se deben aislar estructuralmente las máquinas en conflicto.

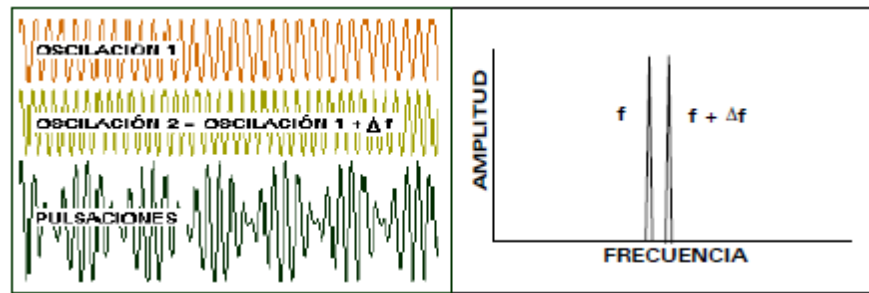


Figura 5-24 Pulsaciones

5.2.8 Fallas en engranajes.

- Estado normal: Espectro característico de un engranaje en estado normal (esta no es una patología).

Espectro característico del engranaje: el espectro mostrará armónicos 1xRPS y 2xRPS del piñón conductor y de la rueda conducida. Adicionalmente, mostrará bandas laterales alrededor de la frecuencia de engranaje GMF (Gear Mesh Frequency).

El engranaje se encuentra en buen estado si estos peaks de vibración se encuentran en niveles relativamente bajos.

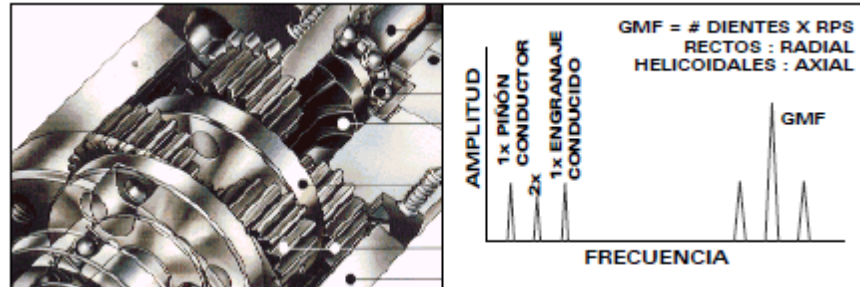


Figura 5-25 Fallas en engranajes

- Desgaste en diente: Ocurre por operación más allá del tiempo de vida del engranaje, contaminación de la grasa lubricante, elementos extraños circulando en la caja del engranaje o montaje erróneo.

Su espectro se caracteriza por la aparición de bandeamiento lateral alrededor de la frecuencia natural de vibración (f_n) del engranaje defectuoso. El espaciado de las bandas laterales es de 1xRPS del engranaje defectuoso. Si el desgaste es avanzado, hay sobreexcitación de la GMF.

Para solucionar el problema debe cambiar o rectificar el engranaje (sólo si este no está sometido a grandes cargas y la urgencia lo amerita). Si el desgaste es prematuro inspeccione desalineación en el eje o excentricidad en el engranaje.

- Sobrecarga en engranaje: Todos los dientes están recibiendo sobrecarga continua.

La amplitud de la GMF es altamente excitada, pero esto no suele representar un problema si las bandas a su alrededor se mantienen bajas. Este análisis es efectivo si se realiza siempre a la máxima carga de operación de la máquina.

Debe buscarse algún elemento que esté aumentando el torque transmitido más allá de lo normal (rodamiento o buje defectuoso, fallas en lubricación y anomalías en general en el rotor conducido que dificulten el movimiento).

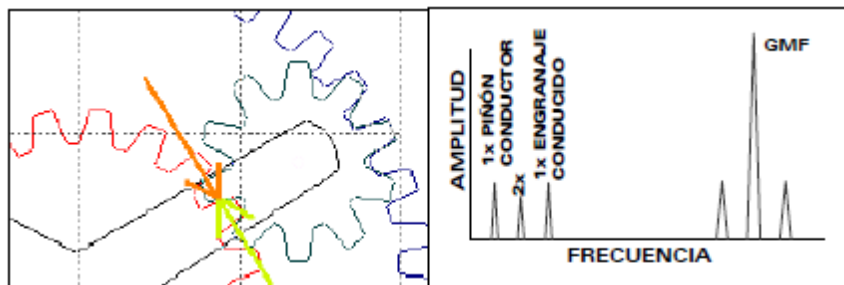


Figura 5-26 Sobrecarga en engranaje

- Excentricidad y/o Backlash: La excentricidad ocurre cuando el centro de simetría no coincide con el centro de rotación. El backlash se produce cuando, al terminar el contacto entre dos dientes, los dos siguientes no entran inmediatamente en contacto.

El espectro muestra aumento considerable de las bandas laterales alrededor de la GMF y f_n . El engranaje con problemas es indicado por el espaciado de las bandas laterales. Si el problema es backlash, la GMF debe disminuir con el aumento de la carga.

Para corregir el problema, el engranaje debe ser re-ensamblado o reemplazado si se encuentran problemas de manufactura.

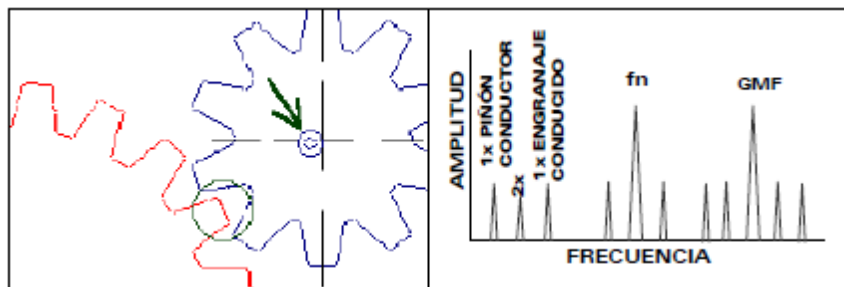


Figura 5-27 Excentricidad o backlash

- Engranaje desalineado: Se presenta cuando las ruedas dentadas fueron ensambladas con errores de alineación o cuando sus ejes no están paralelos.

Casi siempre se excitan los armónicos de segundo o mayor orden de la GMF, con bandeamientos laterales a la 1xRPS del piñón o la rueda. 2xGMF y 3xGMF dominan el espectro.

El conjunto debe ser realineado para corregir el problema.

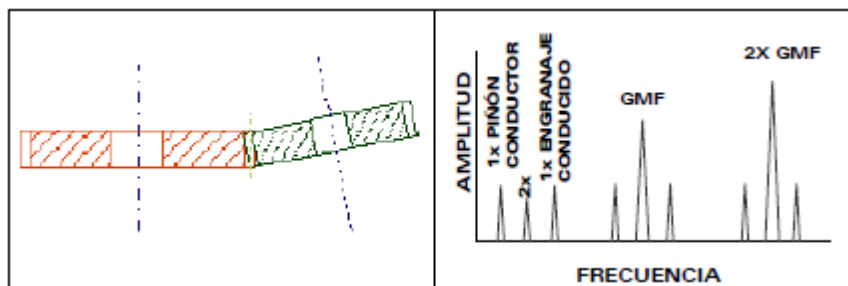


Figura 5-28 Engranaje desalineado

- Problemas de Hunting: Problemas leves en la manufactura o manipulación indebida producen que, cuando dos dientes específicos del piñón y el engranaje conducido se encuentren, generen vibraciones de choque.

Esta falla genera altas vibraciones a bajas frecuencias por debajo de los 10 Hz. La máxima vibración ocurre cada 10 o 20 revoluciones del piñón dependiendo de la fórmula de fHT(y suele escucharse como un gruñido).

Si se determina que el problema es severo, deben reemplazarse el par de engranajes y debe tenerse más precaución en la manipulación.

5.2.9 Bandas

- Distensión: Ocurre por sobrepaso de la vida útil de la banda, o por desgaste excesivo de la misma.

Las frecuencias de bandas siempre están por debajo de la frecuencia del motor o máquina conducida. Normalmente se encuentran cuatro peaks y generalmente predomina el de 2x frecuencia de banda. Tienen amplitudes inestables.

Para corregir el problema, si la banda no presenta demasiado desgaste intente tensionarla, de lo contrario reemplácela.

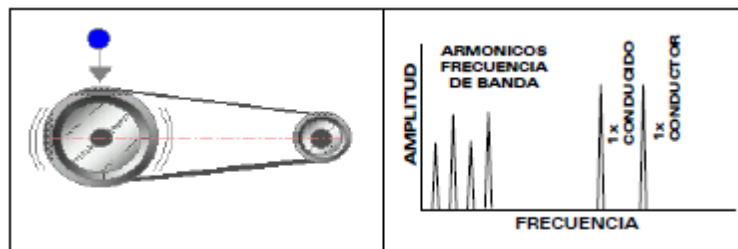


Figura 5-29 Distensión de bandas

- **Desalineación de poleas:** Puede ocurrir porque los ejes de las poleas no están alineados o porque las poleas no están paralelas. También pueden ocurrir ambos casos simultáneamente.

Produce alta vibración axial a $1xRPS$ de la conductora o la conducida, generalmente la conducida. La buena medida de las amplitudes de las vibraciones depende de donde sean tomados los datos.

Para solucionar el problema deben alinearse las poleas tanto angular como paralelamente.

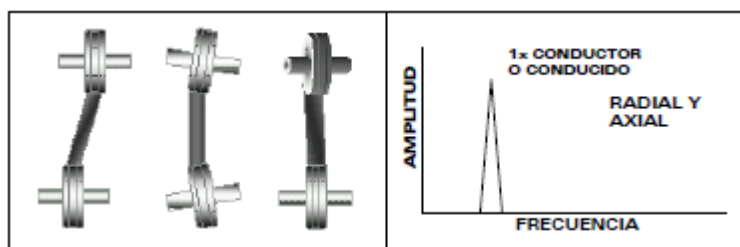


Figura 5-30 Desalineación de poleas

- **Excentricidad de poleas:** Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea.

Produce alta vibración a $1xRPS$ de la polea excéntrica. Su amplitud está por encima de las amplitudes de las frecuencias de las bandas.

Aunque es posible balancear poleas gracias a la adición de pesas, la excentricidad segura induciendo vibración y esfuerzos de fatiga reversible. Se recomienda cambiarse la polea excéntrica.

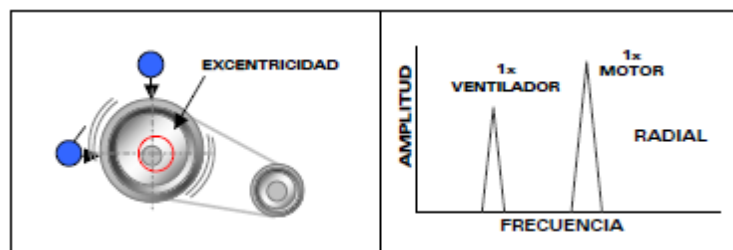


Figura 5-31 Excentricidad de poleas

- **Resonancia de banda:** Sucede si la frecuencia natural de la banda coincide o se aproxima a las RPS del motor o de la máquina conducida.

El espectro muestra altas amplitudes de la frecuencia de resonancia y la frecuencia de excitación de banda, siendo la frecuencia de resonancia la predominante.

La frecuencia natural puede ser alterada cambiando la tensión de la banda o su longitud.

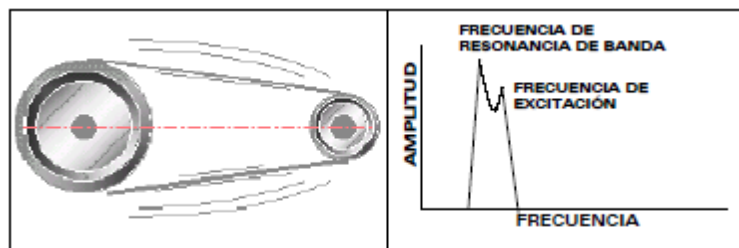


Figura 5-32 Resonancia de banda

5.2.10 Flujo de líquidos

- Frecuencia de aspas (L): Frecuencia a la cual, cada aspa pasa por un punto de la carcasa. Producida por obstrucciones, cambios abruptos de direcciones o desgastes de juntas.

La BPF (Frecuencia de paso de aspas) es excitada en sus primeros dos armónicos con bandeamientos laterales. La BPF es igual al número de aspas por la frecuencia. La BPF algunas veces coincide con la frecuencia natural lo cual causa altas vibraciones.

En caso de aumentos en la BPF deben revisarse cambios abruptos de dirección del fluido y posibles obstrucciones parciales en la descarga de la bomba.

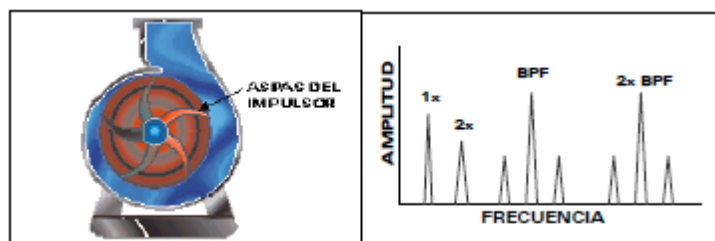


Figura 5-33 Frecuencia de paso de aspas en bombas

- Cavitación: Es la entrada de aire o vaporización de un fluido dentro de la bomba. Ocurre cuando la presión de fluido es menor que la presión de vapor a esta temperatura. La cavitación causará erosión a las partes internas de la bomba.

El espectro muestra una vibración caótica que se presenta a altas frecuencias (del orden de 2000 Hz).

Para solucionar el problema debe controlarse con más rigor la presión de succión y tenerse cuidado con el proceso para cebar la bomba.

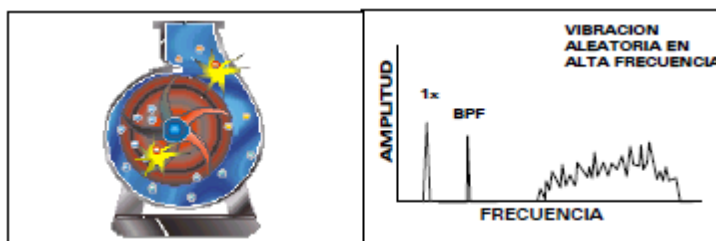


Figura 5-34 Cavitación

5.2.11 Flujo de gases

- Frecuencia de aspas (G): Frecuencia a la cual, cada aspa pasa por un punto de la cubierta. Producida por obstrucciones o cambios abruptos de direcciones.

La BPF es excitada en sus primeros dos armónicos con bandeamientos laterales. La BPF es igual al número de aspas por la frecuencia. La BPF algunas veces coincide con la frecuencia natural lo cual causa altas vibraciones.

En caso de aumentos en la BPF deben revisarse cambios abruptos de dirección del fluido y posibles obstrucciones parciales cerca del ventilador.

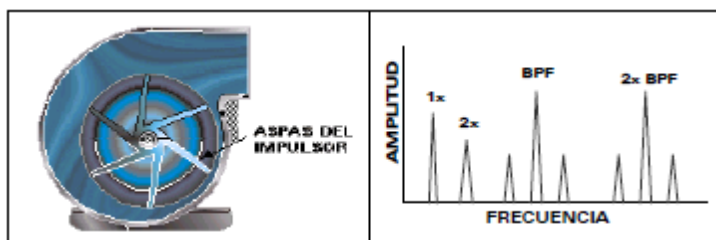


Figura 5-35 Frecuencia de aspas

- Turbulencia anómala (G): Se crea por las variaciones de velocidad o presión del aire pasando a través de un ventilador o red de ventilación.

El espectro muestra una vibración anómala a baja frecuencia que generalmente está entre 0.3 y 30 Hz, siempre por debajo de la velocidad nominal.

Debe revisarse la construcción y el ensamble de los ductos. Puede ser necesaria la instalación de rejillas o cambios de área o geometría de sección.

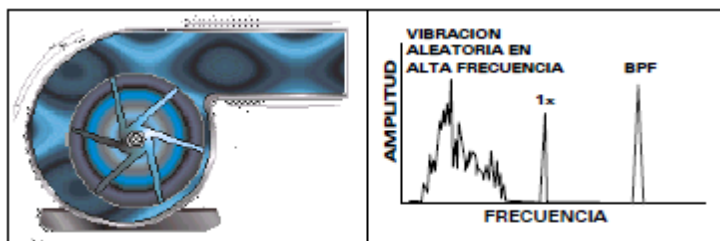


Figura 5-36 Turbulencia anómala

5.2.12 Fallas en rodamientos.

- Falla en pista interna: Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los peaks predominantes $1xRPS$ y $2xRPS$ la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además el contacto metal-metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

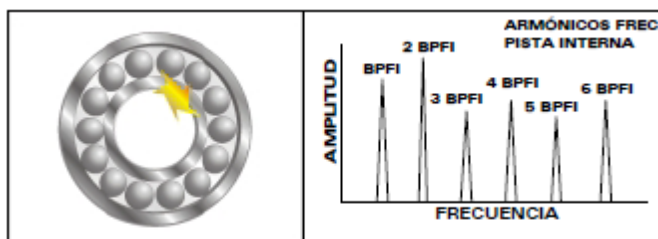


Figura 5-37 Fallas en pista interna de rodamientos

- Falla en pista externa: Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los peaks predominantes $1xRPS$ y $2xRPS$ la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además el contacto metal-metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

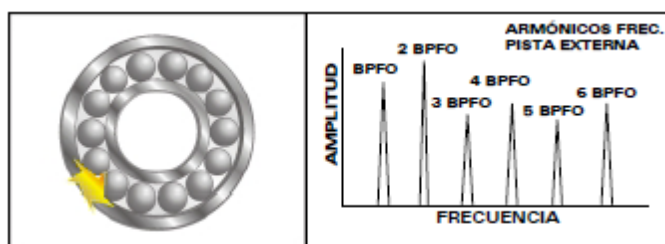


Figura 5-38 Falla en pista externa de rodamientos

- Falla en elementos rodantes: Agrietamiento o desastillamiento del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamblaje, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los peaks predominantes $1xRPS$ y $2xRPS$ la frecuencia de falla de los elementos rodantes, en dirección radial. Además el contacto metal-metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

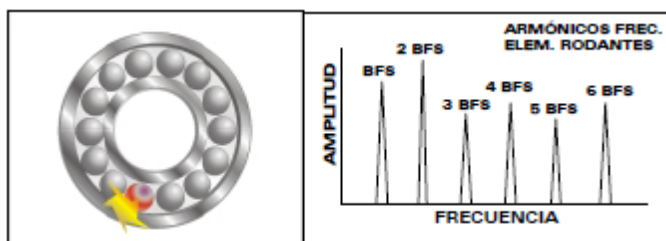


Figura 5-39 Fallas en elementos rodantes

- Deterioro de jaula: Deformación de la jaula, caja o cubierta que mantiene en su posición a los elementos rodantes.

Se produce una serie de armónicos de la frecuencia de la jaula siendo peaks predominantes $1xRPS$ y $2xRPS$ de la frecuencia de falla en jaula, en dirección radial o axial.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Revise la posible causa que está dando origen a la falla.

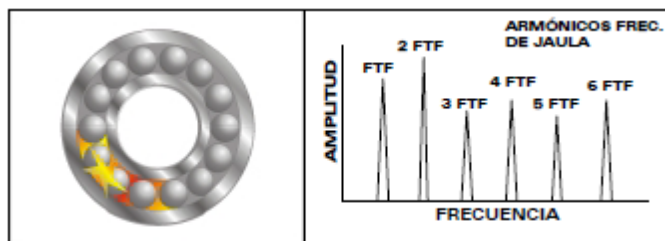


Figura 5-40 Deterioro de jaula de rodamiento

5.3 Desplazamiento, velocidad y aceleración de vibración.

Existen varias variables para medir la amplitud de vibración de un espectro. Para vibraciones mecánicas lo más común es medirlas en unidades de desplazamiento, velocidad y aceleración.

Cada una presenta ventajas respecto de las otras, por tanto es recomendable para el analista revisarlas todas. A continuación se describen sus ventajas.

La medida en desplazamiento (mm o μm en SI, mils en S. Inglés) es importante para reconocer patrones que están a muy baja frecuencia. Los peaks de vibración que están al comienzo del espectro son mejor resaltados. Esta es una medida especial para hallar anomalías en chumaceras de aceite, muy utilizadas en turbomaquinaria.

La medida en velocidad (mm/s en SI, in/s en S. Inglés) permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en un estado evidente, como por ejemplo desbalanceo, desalineación, holgura mecánica, fricciones abrasivas, resonancias, pulsaciones, engranajes de pocos dientes, sistema de poleas, aspas de bombas y ventiladores. Esta variable de velocidad es importante para resaltar peaks de bajas y medias frecuencias.

La medida en aceleración (mG o G en ambos sistemas de medición) permite reconocer patrones asociados a contactos metal-metal y fricciones abrasivas, problemas en engranajes, cavitación, entre otros. Esta variable resalta peaks de vibración de medias y altas frecuencias, y es muy utilizada para la detección prematura de fallas en chumaceras y rodamientos, y otros componentes como engranajes.

A continuación se presenta un esquema de una señal vista en las tres variables (Figura 5-41):

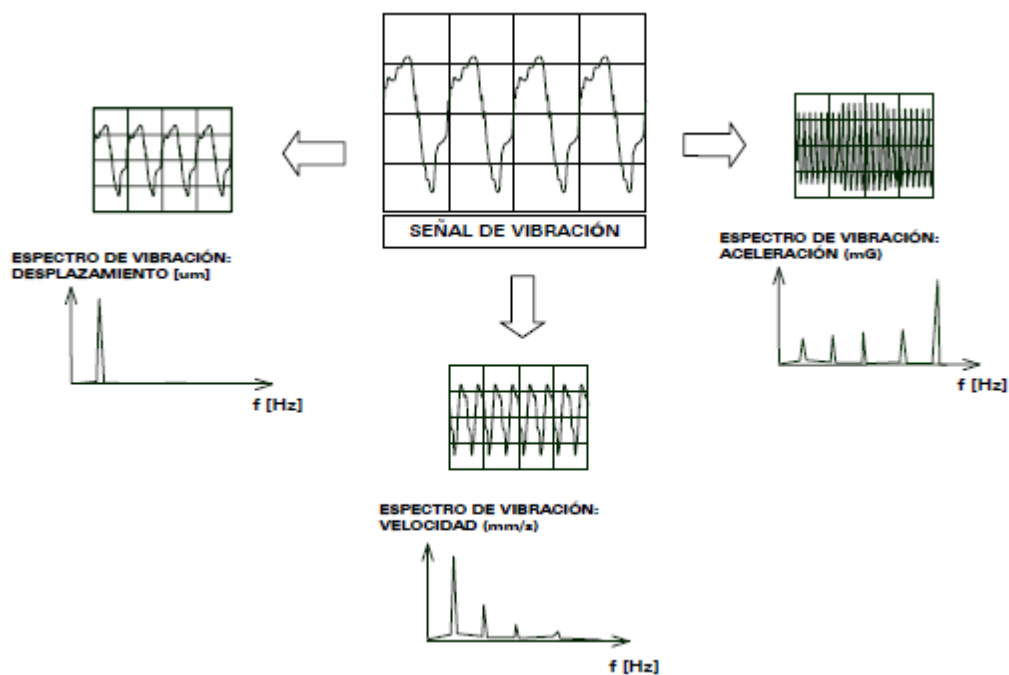


Figura 5-41 Esquema de señal vista en los tres espectros

5.4 Alarmas de nivel y tendencia

5.4.1 Alarmas de nivel.

Antes de entrar a realizar un diagnóstico con la ayuda de las patologías vistas anteriormente, es necesario observar los niveles de vibración que presenta cada uno de los puntos de la máquina. Muchas veces los espectros de vibración pueden presentar peaks especiales, pero esto no significa que haya una característica de falla, ya que la máquina puede estar operando a condiciones normales dentro de los niveles establecidos por la norma. El problema se presenta cuando estos peaks comienzan a aumentar su nivel y de esta manera incrementan el overall del punto.

Existen algunas normas internacionales que proponen unos estándares generales para varios tipos de máquinas y niveles de alarma. Estos niveles pueden aplicarse a una gran cantidad de máquinas, pero hay excepciones que exigen estudiar otras herramientas para poder llegar a una conclusión del estado de máquina.

Existe una gráfica logarítmica que encarna valores de aceleración, velocidad y desplazamiento frente a una frecuencia específica. Dicha gráfica contiene unos niveles generalizados de alarma. Para aplicarlos a diferentes máquinas, se hace necesario revisar varias características presentadas en ellas, como son su tamaño y su cimentación y de acuerdo a ello, se escoge un factor de servicio, en la tabla mostrada más adelante (Figura 5-42), se presentan unos valores tentativos de los factores de servicio de estas máquinas.

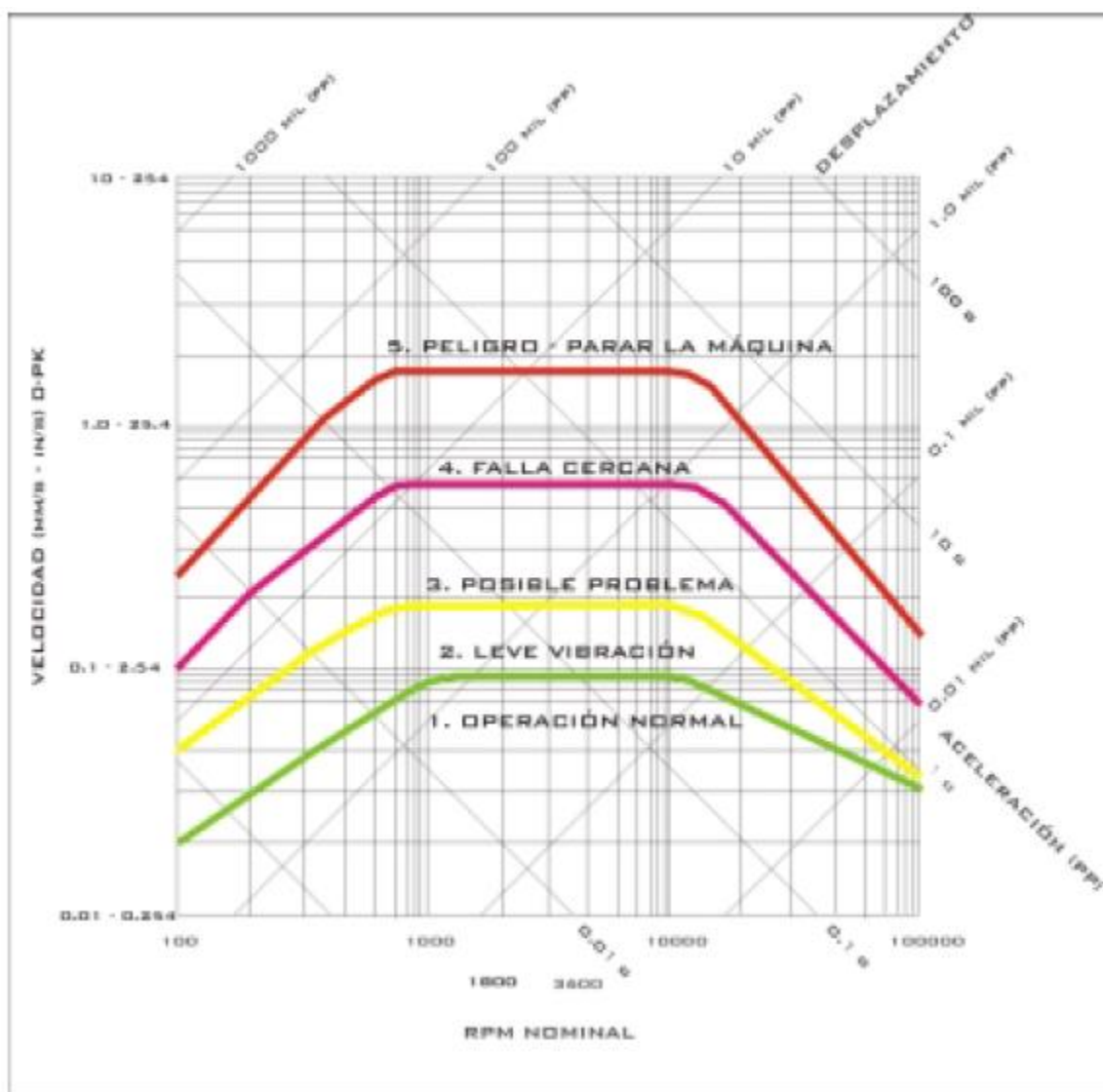


Figura 5-42 Tabla de valor de servicio

Un ejemplo de norma de rangos de severidad de vibración es la ISO 2372 la cual ejemplifica límites de los factores de servicio para cuatro tipos de máquina. Como ya se dijo anteriormente, estos límites pueden ser prácticos para muchas máquinas básicas de proceso, pero es importante considerar la individualidad inherente a cada equipo lo que hace necesario la utilización de otras herramientas tales como el seguimiento de niveles de tendencia y el respectivo historial de mantenimiento.

El valor de severidad de la vibración asociada a un rango de clasificación en particular, depende del tamaño y masa del cuerpo vibrante, las características del montaje del sistema, la salida y el uso que se le da a la máquina. De esta forma es necesario tomar cuenta de varios propósitos y circunstancias concernientes a los diferentes rangos.

RANGOS DE SEVERIDAD DE VIBRACIÓN PARA MÁQUINAS PEQUEÑAS (CLASE I), MÁQUINAS DE TAMAÑO MEDIANO (CLASE II), GRANDES MÁQUINAS (CLASE III), Y TURBOMÁQUINAS (CLASE IV).

RANGO DE SEVERIDAD DE VIBRACION		CLASES DE MÁQUINAS			
VELOCIDAD RMS (mm/s)	VELOCIDAD 0-PK (mm/s)	CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
0.28	0.3960	A	A	A	A
0.45	0.6364				
0.71	1.0041				
1.12	1.5839	B	B	B	B
1.8	2.5456				
2.8	3.9598	C	C	C	C
4.5	6.3640				
7.1	10.0409	D	D	D	D
11.2	15.8392				
18	25.4558				
28	39.5980				
45	63.6396				
71	100.4092				
FSM para las máquinas		1.57020	1	0.62608	0.39625
FSN para los niveles (1/FSM)		0.63686	1	1.59725	2.52364

Figura 5-43 Rangos de severidad de vibración

Nota:

- FSM: Factor de servicio para las clases de máquinas.
- FSN: Factor de servicio para los niveles.

La anterior es una de las clasificaciones recomendadas para escoger el factor de servicio de una máquina. Pero como se ha dicho no está dada para todas las aplicaciones y por lo tanto puede sustituirse de acuerdo a situaciones particulares que se presenten. El significado de estas clases se presenta a continuación:

- Clase I: Partes individuales que se conectan a una máquina en operación normal. (Los motores eléctricos que no pasan de 15 KW son ejemplos típicos de esta categoría).
- Clase II: Máquinas de tamaño medio (generalmente motores de 15 a 75 KW de salida), sin cimientos especiales, o máquinas rígidas (por encima de 300 KW) montadas sobre cimientos especiales.
- Clase III: Grandes motores y otras máquinas con grandes masas rotantes montadas sobre cimientos rígidos y pesados, los cuales son relativamente duros en la dirección de medida de vibración.
- Clase IV: Grandes motores y otras máquinas con grandes masas rotantes montadas sobre cimientos relativamente flexibles en la dirección de la

medida de vibración (por ejemplo, un turbogenerador, especialmente aquellos con subestructuras ligeras).

Fuera de estas clases, también existen otras dos que se dan para maquinaria extremadamente robusta o especial que necesita factores de servicio aún más grandes.

- Clase V: Máquinas y sistemas de conducción mecánica con esfuerzos de desbalanceo inerciales (debido a partes reciprocantes) montadas sobre cimientos, los cuales son relativamente rígidos en la dirección de la medida de vibración.
- Clase VI: Máquinas y sistemas de conducción mecánica con esfuerzos de desbalanceo inerciales (debido a partes reciprocantes) montadas sobre cimientos, los cuales son relativamente suaves en la dirección de la medida de vibración; también pertenecen máquinas con rotación de masas flojas acopladas, tal como golpeteo de eje en un molino; máquinas centrífugas con desbalanceo variable capaces de operar sin componentes conectados; pantallas de vibración, máquinas de prueba de fatiga dinámica y excitadores de vibración usados en plantas de proceso.

5.4.2 Niveles de tendencia.

La tendencia se puede definir como una representación gráfica de alguna variable respecto al tiempo. Para nuestro caso, la variable es el nivel general de vibración de los puntos de una máquina.

En esta gráfica puede observarse la pendiente de los puntos a través de su historia. Siempre y cuando la pendiente sea suave, la tendencia permanecerá estable. Pero se llega a presentarse un crecimiento grande, acercándose a una evaluación exponencial, en la mayoría de casos es porque se acerca una falla física de la máquina.

Los niveles de vibración a través de la historia de la máquina varían entre periodos. Esto se debe a que el nivel de vibración es inferido a través de promedios. Esto será normal siempre y cuando no haya un cambio abrupto en el nivel de vibración de manera que la pendiente se incremente considerablemente.

La Figura 5-44 presenta la tendencia de un soplador. Hasta la medición del día 330 la tendencia es estable, sin embargo a partir de esta medición los niveles de vibración se incrementan abruptamente. A través del monitoreo de vibraciones se pudo predecir el mal estado de un rodamiento en la polea conducida del soplador, lo cual podría haber producido un paro súbito de la máquina.

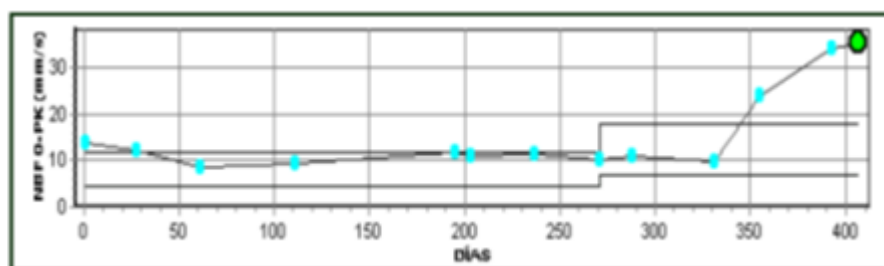


Figura 5-44 Tendencia de un soplador en planta Radomiro Tomis

CAPÍTULO 6

MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO

6.1 Aspectos constructivos.

El motor de inducción es un montaje concéntrico de estator y rotor, el estator es montado internamente a una carcasa que posee una base para su fijación. El rotor está montado sobre un eje sujeto en los laterales del motor.

El estator y el rotor, están compuestos de material magnético de alta permeabilidad relativa para formar un circuito de baja reluctancia. El espacio existente entre el estator y el rotor es llamado entrehierro, que es donde se concentra prácticamente toda la reluctancia del camino magnético.

La superficie del estator y del rotor están cubiertas de ranuras, donde están montadas las bobinas que componen los enrollados del estator y del rotor respectivamente. Estos enrollados, cuando son recorridos por una corriente eléctrica, producen un campo magnético cuya interacción produce el par del motor.

El enrollado del estator está constituido de tres conjuntos de bobinas, cada una corresponde a una fase. Cada conjunto será llamado enrollado de fase a, b y c están desfasados geoméricamente en 120 grados. Generalmente estos enrollados son iguales entre si, o sea, presentan la misma resistencia y el mismo número de espiras.

Un enrollado semejante al del estator puede estar montado sobre el rotor, caracterizando a un motor de rotor bobinado. Otra forma, más común en la práctica, es tener el enrollado del rotor constituido de barras de aluminio previamente fundidas y en cortocircuito en sus extremos. Este último caso caracteriza al motor de inducción jaula de ardilla. Y presenta varias ventajas sobre el primero en relación costo, peso, robustez, pero no permite el acceso a las variables eléctricas del rotor.

6.2 Modelo físico del motor de inducción.

Para fines de modelación, será considerado un motor de inducción trifásico de rotor bobinado, con P pares de polos, conectado en estrella, constituido de un enrollado simétrico en el estator, o sea compuesto de tres enrollados idénticos desfasados geoméricamente a 120 grados y de un enrollado semejante en el rotor.

La teoría generalizada de las máquinas eléctricas introduce una serie de consideraciones con el objetivo de simplificar el proceso de modelación y también el modelo resultante. Equivale a decir que las máquinas son consideradas ideales. Las hipótesis generalmente consideradas son:

- La saturación magnética es despreciada. Se considera válida la superposición de los flujos y todas las inductancias son consideradas independientes de la magnitud de las corrientes.

- La distribución espacial de fuerzas magnetomotrices y del flujo en el entrehierro son consideradas con el eje magnético de los enrollados.
- La distorsión en el flujo introducida por el efecto de las ranuras es ignorada. Los enrollados son considerados que están contruidos de una distribución sinusoidal de conductores de diámetros despreciables.
- Las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas en el material magnético son despreciadas.

Todas estas hipótesis introducen simplificaciones en la modelación, a través de desconsideración de algún fenómeno que ocurre en la realidad. Introduciendo, asimismo, imperfección en la modelación. La hipótesis más restrictiva es, ciertamente, la desconsideración de saturación magnética. En muchos casos su efecto no puede ser despreciado. Para éstos casos, algunas técnicas pueden ser utilizadas para introducir en el modelo final el efecto de saturación magnética, como se mostrará más adelante.

- Como el medio magnético es considerado lineal, podemos utilizar el principio de superposición para obtener las expresiones de los flujos. Y escribiendo de una forma matricial, obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr}(\theta_r) \\ L_{sr}^t & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

Donde:

$$\lambda_s = \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

$$\lambda_r = \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

$$i_s = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

$$i_r = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (6-6)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & L_{lr} + L_{mr} & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (6-7)$$

$$L_{sr}(\theta_r) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (8)$$

- L_{ls} es la inductancia de dispersión correspondiente a un enrollado de una fase dada por el estator. Como los enrollados son considerados iguales, la inductancia de dispersión es la misma para las tres fases del estator.
- L_{lr} es equivalente a L_{ls} en relación al rotor.
- L_{ms} es la inductancia de magnetización correspondiente a un enrollado de una fase dada del estator. También, por cuestiones de simetría, su valor es lo mismo para todas las fases del estator.
- L_{mr} es equivalente a L_{ms} en relación con el rotor.
- L_{sr} es el valor máximo de inductancia mutua entre el enrollado de una fase dada del estator o el enrollado de una fase dada por el estator o el enrollado dado por una fase del rotor.
- Los flujos así obtenidos corresponden a los flujos concatenados en los enrollados de las fases correspondientes.

Definiendo la relación de espiras n como:

$$n = \frac{N_r}{N_s} \quad (6-9)$$

Pueden ser referidas las magnitudes del rotor al estator, introduciendo la relación de transformación 8 en la ecuación 1, de la cual obtenemos:

$$\lambda_s = L_s i_s + \frac{1}{n} L_{sr}(\theta_r) n i_r \quad (6-10)$$

$$\frac{1}{n} \lambda_r = \frac{1}{n} L_{sr}^t(\theta_r) i_s + \frac{1}{n^2} L_r n i_r \quad (6-11)$$

Denotando las variables del rotor referidas al estator por el supra-índice queda definido como:

$$\lambda'_r = \frac{1}{n} \lambda_r \quad (12) \quad i'_r = n i_r \quad (13)$$

$$L'_r = \frac{1}{n^2} L_r \quad (6-14)$$

$$L'_{sr}(\theta_r) = \frac{1}{n} L_{sr}(\theta_r) \quad (6-15)$$

Obteniendo:

$$\lambda_s = L_s i_s + L'_{sr}(\theta_r) i'_r \quad (6-16)$$

$$\lambda'_r = L_{sr}^t(\theta_r) i_s + L'_r i'_r \quad (6-17)$$

A partir de las definiciones anteriores obtenemos algunas identidades importantes:

$$L_{ms} = \frac{L_{mr}}{n^2} = \frac{L_{sr}}{n} \quad (6-18)$$

$$L_{ms} = L'_{mr} = L'_{sr} \quad (6-19)$$

$$L'^2_{sr} = L_{ms} = L'_{mr} \quad (6-20)$$

Con estas relaciones, podemos escribir las ecuaciones (6-16) y (6-17) de tal forma:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} & 0 \\ 0 & L_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i'_r \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} M & V \\ V^t & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i'_r \end{bmatrix} \quad (6-21)$$

Donde:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (6-22)$$

$$V = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (6-23)$$

$$L_{ls} = \text{diag}(L_{ls}) \quad (24) \quad L'_{lr} = \text{diag}(L'_{lr}) \quad (6-25)$$

6.2.1 Ecuaciones de las tensiones.

Las expresiones obtenidas para las concatenaciones flujos en los enrollados de las fases del estator o el rotor son obtenidas directamente de las expresiones para las tensiones de los terminales de los enrollados utilizando la relación de tensión corriente en un circuito RL y está dada por:

$$V = Ri + p\lambda \quad (6-26)$$

Utilizando las ecuaciones (6-16) y (6-17), obtenemos de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i'_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr}(\theta_r) \\ L'^t_{sr}(\theta_r) & L'_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_s \\ i'_r \end{bmatrix} + w_r \frac{d}{d\theta_r} \left(\begin{bmatrix} L_s & L'_{sr}(\theta_r) \\ L'^t_{sr}(\theta_r) & L'_r \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_s \\ i'_r \end{bmatrix} \quad (6-27)$$

6.2.2 Ecuación del par electromecánico.

El par es producido por la interacción de los flujos del rotor y del estator. Esta interacción se manifiesta en la variación de inductancia mutua del estator y del rotor en función de posición.

La expresión para el par electromecánico puede ser obtenida de las expresiones de energía almacenada en el circuito magnético a través de la relación:

$$T_e = \frac{dW_e}{d\theta_m} \quad (6-28)$$

Para el caso del motor de inducción, tenemos:

$$W_e = i_s^t L_s i_s + i_r^t L_r i_r + i_s^t L'_{sr}(\theta_r) i_r \quad (6-29)$$

Sustituyendo la ecuación (6-25) en (6-24) se obtiene la expresión para el par:

$$T_e = i_s^t \frac{dL'_{sr}(\theta_r)}{d\theta_m} i_r = \frac{P}{2} i_s^t \frac{dL'_{sr}(\theta_r)}{d\theta_r} i_r \quad (6-30)$$

6.2.3 Ecuación mecánica.

La ecuación mecánica relaciona las variables eléctricas del motor con la carga, según la segunda ley de Newton para el movimiento rotatorio.

La siguiente ecuación describe el comportamiento de la velocidad mecánica, o también la posición del rotor, en función del par electromagnético y los parámetros de la carga. En términos de la velocidad mecánica se puede escribir:

$$Jp w_m + B w_m + T_c = T_e \quad (6-31)$$

Donde:

- J es el momento de inercia del motor más la carga.
- B es el coeficiente de amortiguación del motor más la carga.
- T_c es el par de la carga.
- Podemos también escribir la ecuación 31 en términos de la velocidad angular eléctrica del rotor w_r .

$$w_r = \frac{P}{2} w_m \quad (6-32)$$

$$Jp w_r + B w_r = \frac{P}{2} (T_e - T_c) \quad (6-35)$$

6.2.4 Modelo físico completo.

Las ecuaciones (6-27), (6-30) y (6-33) describen el comportamiento de un motor trifásico de inducción de rotor bobinado de P polos, conectado en estrella y alimentado por tensión, donde se consideraron las aproximaciones del inicio de la sección.

Es importante resaltar algunas de las características notables del modelo que se obtuvo:

- El modelo está construido por 7 ecuaciones dinámicas (6 ecuaciones de voltaje y una ecuación mecánica).
- El modelo es no lineal, dado los productos de las corrientes en la ecuación del par y del producto de la velocidad angular del rotor en las ecuaciones de los voltajes.
- El modelo es variante en el tiempo, dado que la inductancia mutua estator rotor varía con la posición del rotor.

Estas características revelan la complejidad de este modelo e imponen la necesidad de buscar modelos más simplificados que permitan un tratamiento analítico más fácil. Esto se logra con cambios de variables sin implicar aproximación alguna.

6.2.5 Sistema de coordenadas arbitrario.

El modelo desarrollado en la subsección anterior es bastante complejo para un análisis adecuado del comportamiento del motor de inducción. Esta complejidad está relacionada principalmente con el hecho de que la inductancia mutua estator-rotor es dependiente de la posición del rotor, la cual varía con el tiempo.

Una simplificación significativa del modelo del motor de inducción puede ser obtenida por la introducción de un cambio adecuado de las variables. Este cambio de variables consiste en referenciar las variables de sistemas trifásicos, tanto de estator o de rotor, en un mismo sistema de coordenadas compuestos de dos ejes en cuadratura y otro eje, conocido como eje de secuencia cero. Las variables del nuevo sistema de coordenadas son distinguidas por los índices d,q y o representando los ejes directos, de cuadratura y de secuencia cero, respectivamente. Este nuevo sistema de coordenadas es conocido como sistema de coordenadas arbitrario.

La Figura 6-1 ilustra la relación geométrica entre los sistemas de coordenadas arbitrarios y el trifásico. El sistema de coordenadas trifásico representado por los ejes a, b y c desfasados geoméricamente de 120 grados. En la figura también se muestra el sistema de coordenadas arbitrario.

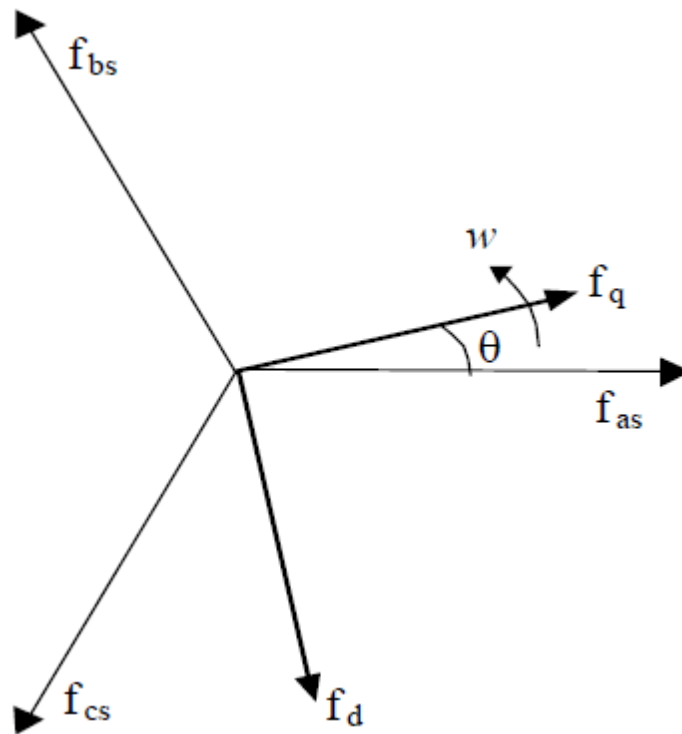


Figura 6-1 Sistemas de coordenadas arbitrarios y trifásico

La relación entre las variables de los dos sistemas de coordenadas está dada como se muestra a continuación:

$$f_{qdo} = K^{-1} f_{abc} \quad (6-34)$$

$$f_{qdo} = \begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_o \end{bmatrix} \quad (6-35)$$

$$f_{abc} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (6-36)$$

$$K^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (6-37)$$

$$\theta = \int w(t) dt \quad (6-38)$$

La transformada inversa está dada por:

$$f_{abc} = K f_{qdo} \quad (6-39)$$

Donde:

$$K = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (6-40)$$

Es importante notar que el ángulo θ determina la posición de sistemas de coordenadas arbitrarios en relación con la trifásica. De esta forma, escogiendo adecuadamente θ , se puede referenciar tanto las variables del estator, como las variables del rotor, en mismo conjunto de ejes dq. Por tanto, es necesario considerar que los enrollados del rotor giran a una velocidad w_r en relación con los enrollados del estator. Asimismo la posición del sistema de coordenadas trifásico fijo en el rotor está dado por $\theta - \theta_r$ donde:

$$\theta_r = \int w_r(t) dt \quad (6-41)$$

Representado por los subíndices s y r, las transformaciones de variables referentes a las variables del estator y del rotor, respectivamente, obtenemos:

$$f_{qdos} = K^{-1} f_{abcs} \quad (6-42)$$

$$f_{qdos} = \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{os} \end{bmatrix} \quad (6-43)$$

$$f_{abcs} = \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix} \quad (6-44)$$

$$K_s^{-1} = K^{-1} \quad (6-45)$$

$$K_s = K \quad (6-46)$$

Lo mismo para el rotor:

$$f_{qdor} = K_r^{-1} f_{abcr} \quad (6-47)$$

$$f_{qdor} = \begin{bmatrix} f_{qr} \\ f_{dr} \\ f_{or} \end{bmatrix} \quad (6-48)$$

$$f_{abcrc} = \begin{bmatrix} f_{ar} \\ f_{br} \\ f_{cr} \end{bmatrix} \quad (6-49)$$

$$K_r^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta - \theta_r) & \sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (6-50)$$

$$K_r = \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \sin(\theta - \theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (6-51)$$

6.2.6 Ecuación de los flujos.

Con las transformaciones K_s y K_r , podemos obtener las ecuaciones de los flujos del motor de inducción de un sistema de coordenadas dqo, aplicando el cambio a las variables en las ecuaciones (6-16) y (6-17) que describen los flujos, obtenemos:

$$K_s \lambda_{qdos} = L_s K_s i_{qdos} + L'_{sr}(\theta_r) K_r i'_{qdor} \quad (6-52)$$

$$K_r \lambda'_{qdor} = L'^t_{sr}(\theta_r) K_s i_{qdos} + L'_r K_r i'_{qdor} \quad (6-53)$$

Desarrollo en matrices:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (6-54)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L'_r & 0 & 0 \\ 0 & L'_r & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (6-55)$$

Escribiendo de forma más compacta:

$$\lambda_{qdos} = L_{qdos}i_{qdos} + L'_{qdosr}i'_{dqor} \quad (6-56)$$

$$\lambda'_{qdor} = L'_{qdosr}i_{qdos} + L'_{qdor}i'_{dqor} \quad (6-57)$$

Donde:

$$L_m = \frac{3}{2}L_{ms} = \frac{3}{2}L'_{mr} = \frac{3}{2}L'_{sr} \quad (6-58)$$

$$L_s = L_{ls} + L_{ms} = L_{ls} + L_m \quad (6-59)$$

$$L_r = L'_{lr} + L'_{mr} = L'_{lr} + L_m \quad (6-60)$$

6.2.7 Ecuaciones de las tensiones.

El mismo procedimiento se puede aplicar a las ecuaciones de tensiones para obtener sus ecuaciones correspondientes en el sistema de coordenadas arbitrario.

De la ecuación (6-27), obtenemos:

$$V_{abcs} = R_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (6-61)$$

$$V'_{abcr} = R'_r i'_{abcr} + p \lambda'_{abcr} \quad (6-62)$$

Aplicando los cambios de variables K_s y K_r en las ecuaciones (6-61) y (6-62), obtenemos:

$$V_{qdos} = K_s^{-1} R_s K_s i_{qdos} + K_s^{-1} p (K_s \lambda_{qdos}) = K_s^{-1} R_s K_s i_{qdos} + (K_s^{-1} p K_s) \lambda_{qdos} + p \lambda_{qdos} \quad (6-63)$$

$$V'_{qdor} = K_r^{-1} R'_r K_r i'_{qdor} + K_r^{-1} p (K_r \lambda'_{qdor}) = K_r^{-1} R'_r K_r i'_{qdor} + (K_r^{-1} p K_r) \lambda'_{qdor} + p \lambda'_{qdor} \quad (6-64)$$

Con esto, las ecuaciones de las tensiones para el motor de inducción en el sistema de coordenadas dqo quedan:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p & w & 0 \\ -w & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{os} \end{bmatrix} \quad (6-65)$$

$$\begin{bmatrix} v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_r & 0 & 0 \\ 0 & R'_r & 0 \\ 0 & 0 & R'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p & w - w_r & 0 \\ -(w - w_r) & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{or} \end{bmatrix} \quad (6-66)$$

6.2.8 Ecuación del par electromecánico.

Aplicando los cambios de variables K_s y K_r en la ecuación del par del motor de inducción y utilizando las ecuaciones (6-52) y (6-53), obtenemos:

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{L_m} (\lambda_{dr} \lambda_{qs} - \lambda_{qr} \lambda_{ds}) \quad (6-67)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) \quad (6-68)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (6-69)$$

Donde σ corresponde al coeficiente de dispersión.

Estas son algunas de las formas posibles de obtener el par electromagnético producido por el motor de inducción en un sistema de coordenadas arbitrario dq .

6.3 Diferentes modelos.

Podemos notar en las ecuaciones de las tensiones en el sistema de coordenadas arbitrario, ecuaciones (6-65) y (6-66), que las tensiones del eje o es independiente de cualquier variable de los ejes d y q . De la definición de la transformación K , se puede verificar que las tensiones en el eje o serán nulas. Asimismo, haciendo esta consideración, el modelo del motor de inducción puede ser representado por ecuaciones relativas a los ejes d y q .

6.3.1 Modelo del motor de inducción en varios sistemas de coordenadas.

Escogiendo adecuadamente la velocidad del sistema de coordenadas arbitrario w , se puede obtener características particulares en el modelo del motor de inducción. Tres casos particulares son de gran interés.

- $w=0$ sistema de coordenadas fijo en el estator. Coincide con sistema de coordenadas estacionario o también como sistema de coordenadas $\alpha\beta$.
- $w = w_r$ Sistema de coordenadas fijo en el rotor. Es poco utilizado en la literatura para motor de inducción. Sin embargo, es de mucha importancia para el motor sincrónico.
- $w = w_e$ Es conocido como sistema de coordenadas sincrónico, por girar con la frecuencia sincrónica de las tensiones de alimentación.

El sistema de coordenadas sincrónica es el más utilizado en estudio del motor de inducción por presentar la importante propiedad de representar las variables sinusoidales del sistema de coordenadas trifásico por valores constantes.

El modelo del motor de inducción en el sistema de coordenadas arbitrario puede ser presentado de la forma:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + p\lambda_{qs} + w\lambda_{ds} \quad (6-70)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p\lambda_{ds} - w\lambda_{qs} \quad (6-71)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + p\lambda_{qr} + (w - w_r)\lambda_{dr} \quad (6-72)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + p\lambda_{dr} - (w - w_r)\lambda_{qr} \quad (6-73)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (6-74)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (6-75)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (6-76)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (6-77)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) \quad (6-78)$$

$$Jp w_r = -B w_r + \frac{P}{2} (T_e - T_c) \quad (6-79)$$

$$w_m = \frac{2}{P} w_r \quad (6-80)$$

6.3.2 Modelo del motor de inducción en variables de estado.

Tomando los flujos como variables de estado, puede ser obtenido el motor de inducción en variable de estado:

$$\dot{\lambda}_{qs} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \lambda_{qs} - w\lambda_{ds} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{R_s}{L_m} \lambda_{qr} + v_{qs} \quad (6-81)$$

$$\dot{\lambda}_{ds} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \lambda_{ds} + w\lambda_{qs} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{R_s}{L_m} \lambda_{dr} + v_{ds} \quad (6-82)$$

$$\dot{\lambda}_{qr} = -\frac{R_r}{\sigma L_r} \lambda_{qr} - (w - w_r)\lambda_{dr} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{R_r}{L_m} \lambda_{qs} + v_{qr} \quad (6-83)$$

$$\dot{\lambda}_{dr} = -\frac{R_r}{\sigma L_r} \lambda_{dr} + (w - w_r)\lambda_{qr} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{R_r}{L_m} \lambda_{ds} + v_{dr} \quad (6-84)$$

$$\dot{w}_r = -\frac{B}{J}w_r + \frac{P}{2J}(T_e - T_c) \quad (6-85)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{1-\sigma}{2} \frac{1}{L_m} (\lambda_{dr}\lambda_{qs} - \lambda_{qr}\lambda_{ds}) \quad (6-86)$$

$$w_m = \frac{2}{P}w_r \quad (6-87)$$

6.3.3 Modelo del motor de inducción en variable de estado considerando la saturación magnética.

El parámetro del motor que más varía con la saturación es la inductancia mutua L_m . Una forma de considerar el efecto de la saturación es considerar L_m variable en el tiempo en función de las amplitudes de dos flujos. Un modelo más adecuado a las ecuaciones 81 a 87 puede ser obtenido en función de los flujos del entrehierro:

$$\lambda_{dm} = L_m(i_{ds} + i_{dr}) \quad (6-88)$$

$$\lambda_{qm} = L_m(i_{qs} + i_{qr}) \quad (6-89)$$

Reestructurando las ecuaciones (6-81) a (6-87) en función de (6-87) y (6-88), se obtiene:

$$\dot{\lambda}_{qs} = -\frac{R_s}{L_{ls}}(\lambda_{qm} - \lambda_{qs}) - w\lambda_{ds} + v_{qs} \quad (6-90)$$

$$\dot{\lambda}_{ds} = -\frac{R_s}{L_{ls}}(\lambda_{dm} - \lambda_{ds}) + w\lambda_{qs} + v_{ds} \quad (6-91)$$

$$\dot{\lambda}_{qr} = -\frac{R_r}{L_{lr}}(\lambda_{qm} - \lambda_{qr}) - (w - w_r)\lambda_{dr} + v_{qr} \quad (6-92)$$

$$\dot{\lambda}_{dr} = -\frac{R_r}{L_{lr}}(\lambda_{dm} - \lambda_{dr}) + (w - w_r)\lambda_{qr} + v_{dr} \quad (6-93)$$

$$\dot{w}_r = -\frac{B}{J}w_r + \frac{P}{2J}(T_e - T_c) \quad (6-94)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{1}{L_{lr}} (\lambda_{dr}\lambda_{qs} - \lambda_{qr}\lambda_{ds}) \quad (6-95)$$

$$\lambda_{dm} = L_a \left(\frac{\lambda_{ds}}{L_{ls}} + \frac{\lambda_{dr}}{L_{lr}} \right) \quad (6-96)$$

$$\lambda_{qm} = L_a \left(\frac{\lambda_{qs}}{L_{ls}} + \frac{\lambda_{qr}}{L_{lr}} \right) \quad (6-97)$$

$$L_a = \frac{1}{\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_s} + \frac{1}{L_r}} \quad (6-98)$$

$$W_m = \frac{2}{P} W_r \quad (6-99)$$

La obtención del modelo de la máquina es muy importante a la hora de la implementación del proyecto, ya que es éste modelo quien entregará la referencia de las variables a comparar con los valores de las variables medidas, como se ilustra en la Fig. 6-2.

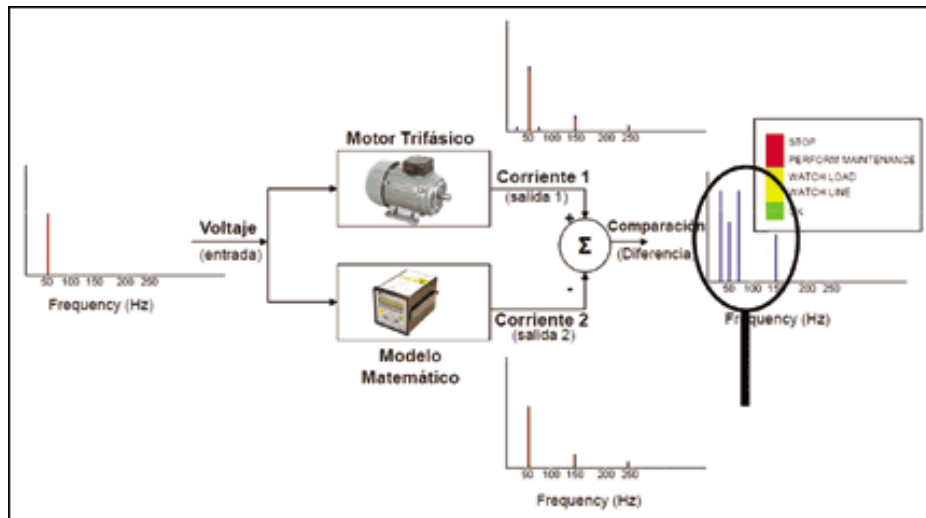


Figura 6-2 Diagrama del modelo de medición de variables eléctricas

CAPÍTULO 7

TRABAJO REALIZADO Y RESULTADOS OBTENIDOS

7.1 Descripción general del problema

La propuesta de proyecto consiste en la implementación de un sistema de monitoreo de las variables críticas de funcionamiento de algún equipo y en consecuencia de éste monitoreo realizar la implementación de un sistema de mantenimiento óptimo de equipos en funcionamiento. Todo esto se llevará a cabo en un equipo o bien en un grupo de equipos pertenecientes a la planta LX-SX-EW de la división Radomiro Tomic.

Se encuentran disponibles en la planta LX-RX-EW de la división Radomiro Tomic, un área y equipos asociados a esta, la cual es SX (extracción por solventes), pero también existen equipos disponibles en las líneas de cosecha EW. En el caso del sector de SX existe información, también una cierta cantidad de equipos sin sensores y la estrategia de mantenimiento es por frecuencia de mantenimiento (según plan) y en otros por inspección sintomática (manual). En esta área se puede definir como subsistema, un sector de decantadores de SX y un sector de patio estanque, el cual se subdivide en filtros, columnas, sistema de calentamiento de soluciones (Calentadores de agua, bombas, cañerías, intercambiadores de calor, etc).

La superintendencia de planta de Radomiro Tomic, está interesada en la implementación del proyecto en cualquiera de las áreas antes mencionadas, manteniendo siempre en mente que el proyecto sea aplicable en el resto de la planta, y además, ser recomendada su implementación en otras plantas de la industria, como por ejemplo Minera Gaby y área de Oxido de Chuquicamata, que cuentan con procesos similares.

Para llevar a cabo esta propuesta se pretende partir considerando las teorías de la confiabilidad que incorporan la incertidumbre en ingeniería. Se podría decir que la certeza de un hecho (en el contexto “falla de máquina”), es un acontecimiento determinista con un resultado finito. En cambio la incertidumbre de un hecho es un acontecimiento indeterminista con un resultado probabilístico.

La confiabilidad es la probabilidad de que un aparato, dispositivo o persona desarrolle una determinada función bajo condiciones establecidas durante un periodo de tiempo determinado. La confiabilidad de un elemento puede ser caracterizada a través de distintos modelos de probabilidades.

Se podrían describir varias distribuciones de fallas comunes y observar qué se puede extraer de ellas para gestionar los recursos de mantenimiento. Convirtiendo así el conocimiento obtenido de ellas en acciones proactivas de mantenimiento. Así se puede inferir que el desarrollo de la primera parte del proyecto se llevará a cabo estudiando distintos métodos probabilísticos con la finalidad de determinar qué método es más adecuado a la hora de obtener la información del equipo o grupo de equipos utilizado como piloto.

7.2 Resumen del trabajo realizado

El trabajo realizado consiste en un primer lugar la definición de un camino a seguir a través de la determinación de las variables críticas para el mantenimiento del equipo, en el caso de los sopladores se ha determinado que las vibraciones y las variables eléctricas son variables críticas a la hora de mantener estos equipos.

A raíz de la determinación de las variables críticas se ha investigado la manera de obtener éstas mediciones y llevar la información obtenida al mantenedor, con el objetivo de que éste cuente con las herramientas necesarias para mantener el equipo cuando sea conveniente realizarlo.

La toma de mediciones está a cargo tanto de equipos de monitoreo de vibraciones como de equipos de monitoreo de variables eléctricas.

El monitor de vibraciones mencionado con anterioridad está compuesto de sensores de vibraciones (acelerómetros) y a su vez un equipo que es capaz de determinar anomalías en las vibraciones medidas, esto significa que el equipo en si ya es capaz de entregar información procesada que nos ayuda a obtener un mejor resultado a la hora de tomar decisiones acerca de la intervención del soplador.

El monitor de variables eléctricas (Relé) se encuentra posicionado en la sala eléctrica donde se encuentra conectado el equipo, este equipo entrega las mediciones necesarias para mantener un monitoreo constante de las características eléctricas del equipo, como voltaje, corriente, desbalanceo de fases, factor de potencia, sobrecarga, etc. Variables críticas al momento de tomar la decisión de mantener el equipo.

Luego de la instalación de estos equipos, fue necesario llevar las mediciones obtenidas al sistema de entrega de información, esto quiere decir que fue necesaria la implementación de las mediciones en un dispositivo PLC que es el encargado de llevar la información al software de sistema de información de proceso (PI: Process information system), esto se realiza mediante la implementación del protocolo Modbus con el cual es llevada la información al PLC.

Una vez que la información es entregada al sistema, el software PI se encarga de procesarla mediante la implementación del modelo eléctrico del motor, que es comparado con las variables eléctricas medidas por el Relé y entrega alarmas programadas en caso de que las variables medidas sobrepasen un cierto nivel de desviación, las variables mecánicas se analizan mediante una transformada rápida de Fourier programada en el software y éstas entregan al usuario algunas recomendaciones a la hora de detectar el tipo de falla que está ocurriendo.

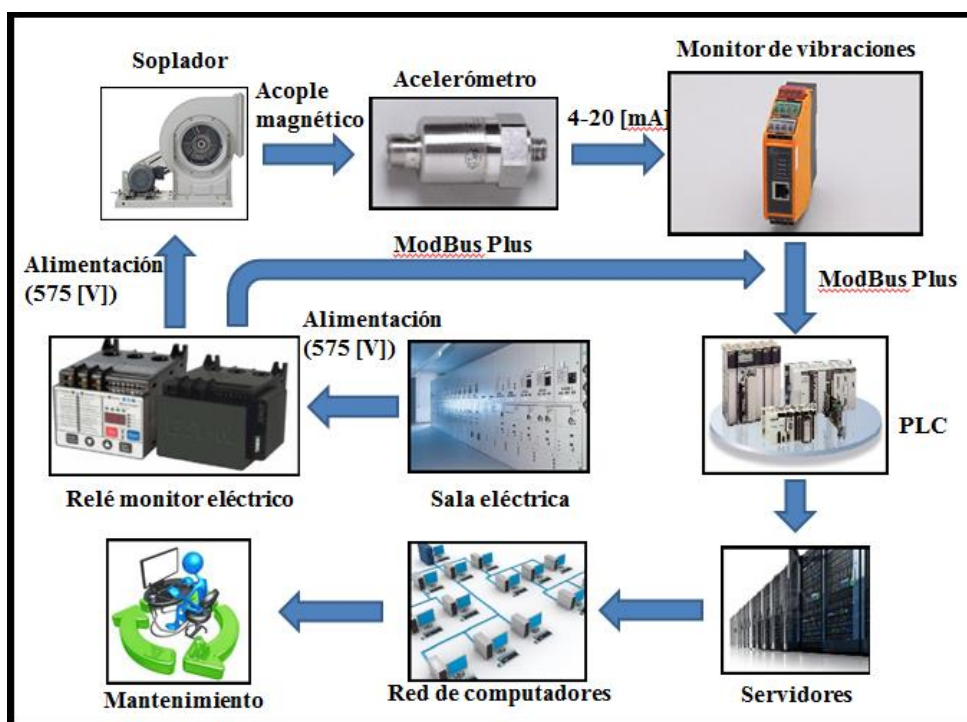


Figura 7-1 Diagrama de bloques general del proceso de obtención de datos

Descripción del diagrama:

Motor: El motor corresponde en este caso a un motor DC de 575 [V], 125 [HP] y 2975 [RPM], este se encuentra ubicado en el dispositivo soplador con el TAG:BC-BL-517, elegido como piloto, en este se instalaron los sensores de vibración y de monitoreo de variables eléctricas.

Sensores: Los sensores corresponden a sensores de vibraciones y de variables eléctricas cuyas características se encuentran detalladas en el capítulo siguiente.

Monitores: Los monitores se encargan de procesar las señales medidas por los sensores y entregar los datos con un nivel de procesamiento mínimo para ser interpretado en la siguiente etapa, cabe destacar que en el caso del monitor de vibraciones, corresponde a un equipo que se encuentra separado de los sensores, no así en el caso del monitor de variables eléctricas, que es un solo equipo que se encarga de realizar las mediciones y entregar los datos semi-procesados al sistema. Estos monitores tienen la capacidad de transmitir señales en modo 4-20[mA] o bien por protocolo ModBus Plus que es el empleado finalmente para realizar la conexión al PLC.

PLC: El PLC utilizado en este caso es un equipo Schneider Modicon Quantum PLC que posee la capacidad de comunicarse vía ModBus Plus y posee entradas disponibles al momento de la implementación del sistema.

Servidor PI: El servidor PI comprende un grupo de computadores que cumplen la función de entregar una base de datos y a su vez procesamiento de variables, es aquí donde se realiza el procesamiento y almacenamiento de historial de las variables entregadas por los monitores para luego dejar disponible la información a la red interna de Codelco, accesible desde cualquier equipo unido a la red de la división.

Red interna: La red interna de la división cuenta con alrededor de 3000 computadores interconectados, cualquier equipo en la red puede tener acceso a la información entregada por el servidor PI, teniendo instalada previamente la aplicación.

Usuario: En este caso el usuario final del sistema es el mantenedor, quien se encarga de revisar la información entregada por el sistema a través de PI para luego tomar la decisión de intervenir el equipo cuando lo estime conveniente.

7.3 Electrónica de medición

A raíz de un estudio de factibilidad de costos del proyecto se determinó que es completamente factible instalar una cierta cantidad de sensores adicionales a los ya existentes, con la finalidad de obtener mayor cantidad de información a la hora de tomar decisiones de intervención del equipo. Para esto se realizaron cotizaciones a los distintos proveedores y a raíz de estas acciones fue posible determinar los sensores y equipos de monitoreo a instalar.

A raíz de la información recopilada se presentan a continuación los sensores a utilizar, sus costos y finalmente los beneficios que estos tendrán a largo plazo en la empresa.

Sensor de variables eléctricas:

El sensor de monitoreo de las variables eléctricas corresponde al equipo Motor Insight Overload and monitoring Relay C441DA, equipo que también sirve de protección en caso de que algunas variables se alejen de los parámetros aceptables de funcionamiento, el equipo tiene un costo aproximado de 1.050 dólares y cuyas capacidades de monitoreo se presentan a continuación:

- Corriente promedio y corriente de fase RMS.
- Voltaje promedio y fase RMS.
- Potencia del motor en KW.
- Factor de potencia.
- Frecuencia.
- Capacidad térmica.

- Horas de uso.
- Fallas de corrientes a tierra.
- Desbalance de corriente (%).
- Desbalance de Voltaje (%).
- Partida de motores.



Figura 7-2 Monitor de variables eléctricas

Monitor y sensores de vibraciones:

Monitor:

El monitor de sensores de vibración cumple con la función de monitorear y diagnosticar fallas tempranas en el sistema que está siendo medido. El equipo corresponde a un sistema de diagnóstico para sensores de vibración, de 4 entradas dinámicas de 0 a 10 [mA], 2 entradas estáticas de 0 a 20 [mA] o pulsos. 2 salidas programables NA/NC o 1 x NA/NC mas una señal analoga (0/4...20 mA). Voltaje de alimentación 24VDC. Interfaz de datos Ethernet TCP/IP, grado de protección IP20, cuya temperatura de operación va de 0 a 70 °C.



Figura 7-3 Monitor y analizador de vibraciones Shädler

Sensores:

Sensor de velocidad de vibración con salida 4-20 [mA] dos hilos, con imán de montaje y cable de 30 m.



Figura 7-4 Acelerómetro (utilizado para la detección de vibraciones)

7.4 Software utilizado para la implementación del sistema

El software utilizado en este proyecto para la obtención, análisis de datos y la interfaz de usuario es Process Information System (PI). Es el encargado de llevar el monitoreo general de las variables, mediciones y estadísticas generadas en el proceso productivo en la planta diseñado para automatizar completamente la recolección almacenaje y presentación de plantas de distinto tipo. PI emplea una arquitectura flexible que puede ser implementada en una variedad de configuraciones de sistema.

El servidor de datos de PI provee una recolección centralizada de información, una base de datos en tiempo real y archivos de datos históricos. Provee a su vez una gran cantidad de información del proceso productivo.

Cada sistema PI puede entregar una interfaz a uno o más sistemas en tiempo real de forma simultánea y puede leer y escribir cualquier dispositivo en tiempo real o base de datos. Posee herramientas de integración que incluyen controles ActiveX, ODBC, y una larga lista de aplicaciones e interfaces de programación y puede ser implementado a través de internet o entornos de programación más tradicionales.

PI ProcessBook es una aplicación que puede desplegar información de variables en tiempo real o información histórica de las variables, creando gráficas de proceso, tendencias, estadísticas y tablas. Los datos pueden ser desplegados en distintos formatos.

Adicionalmente se puede encontrar PI-DataLink que es una herramienta fácil de usar a la hora de monitorear datos adquiridos desde la planta, permite crear reportes de producción y realizar análisis de datos de proceso, función muy importante a la hora de la implementación del proyecto.

En general PI es una herramienta muy útil a la hora de implementar monitoreo de variables en tiempo real, procesamiento y análisis de datos para la toma de decisiones y la entrega de datos de la producción en general.

Para la obtención de datos a través de PI es necesario tener en cuenta el origen de los datos, los rangos de las variables presentadas, a su vez la señal obtenida desde los sensores debe estar bien adaptada, para que no ocurran errores de lectura y posteriores errores debido al análisis de información que es veraz. Por otro lado PI posee una interfaz flexible para la

obtención de estos datos, entregando herramientas que nos permiten obtener datos tanto en una planilla Excel como directamente en una aplicación web, también posee la opción de entregar ésta información de mejor manera en pantalla a través de su interfaz de usuario, esta interfaz también nos permite interactuar de alguna manera con la información presentada y nos entrega la capacidad de realizar un análisis en tiempo real o bien del historial del equipo que se está monitoreando.

Cabe destacar que la robustez del sistema PI permite realizar el análisis de variables como las medidas en este proyecto que tratan de señales de vibración (obtenidas directamente desde los acelerómetros) y señales de variables eléctricas medidas en un motor.

Es por esto que se escogió este sistema por sobre otros sistemas disponibles, ya que es posible utilizar software como MatLab y otros de similares características disponibles para su utilización en la empresa.

La familiarización del personal de proceso y mantenimiento es otro punto a favor de PI, ya que el personal posee los conocimientos necesarios para sacar el mayor provecho a esta herramienta por sobre otras disponibles.

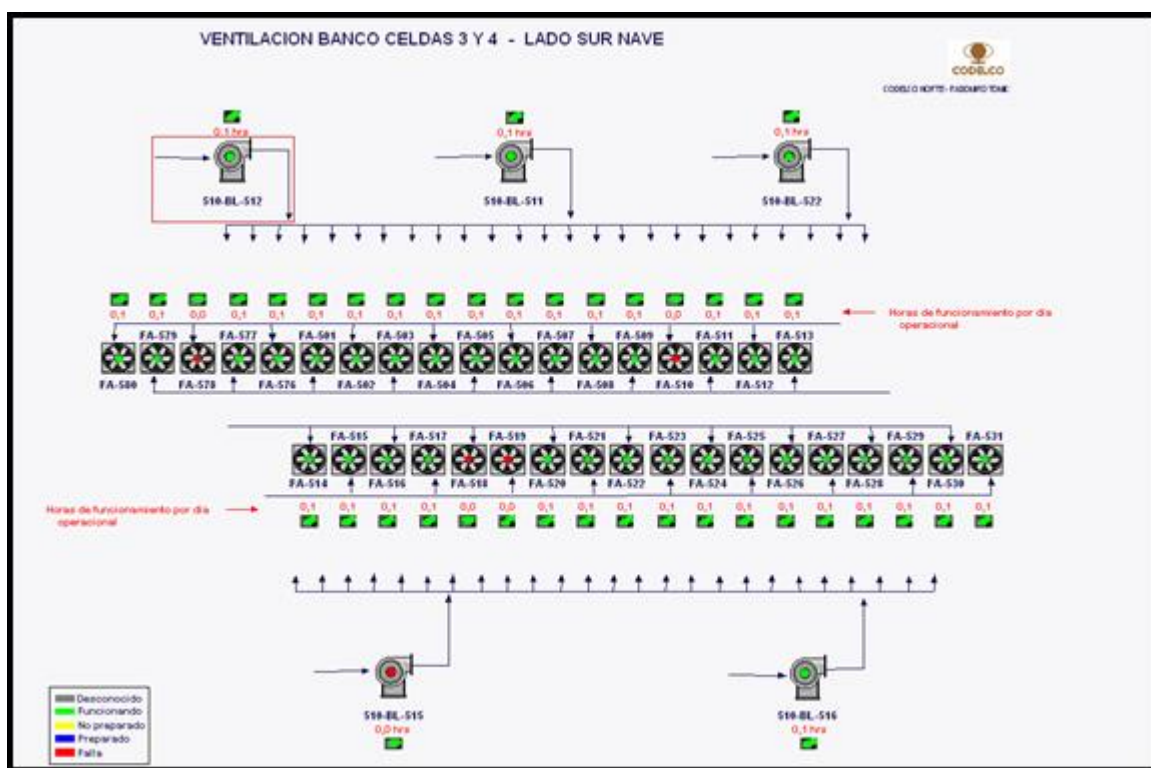


Figura 7-5 Interfaz de usuario PI

7.5 Resultados obtenidos

Dentro de los resultados obtenidos cabe destacar la disminución en las intervenciones del equipo a lo largo del testeo del sistema, a continuación se muestra una tabla con la cantidad de intervenciones realizadas a los dispositivos sopladores desde la instalación del sistema.

Tabla 6.1. Intervenciones mensuales de los equipos.

Intervenciones mensuales de los equipos				
Equipo Soplador	Enero	Febrero	Marzo	Abril
BL-511	8	6	7	9
BL-512	6	9	8	7
BL-513	8	7	7	8
BL-514	3	6	6	5
BL-515	7	7	6	7
BL-516	9	11	10	11
BL-517	4	3	3	4
BL-518	10	9	10	10
BL-519	7	10	11	11
BL-520	8	8	7	9
BL-521	7	9	8	7
BL-522	9	8	10	8
BL-523	6	7	7	6
BL-524	11	9	9	11
BL-525	8	10	9	10
BL-526	9	6	8	7

La tabla indica que la cantidad de intervenciones del equipo BL-517, que es donde se encuentra instalado el sistema, presenta una tendencia baja de intervenciones en comparación con los equipos que no poseen en sistema instalado, lo que implica una considerable rebaja en los costos de mantenimiento en este equipo.

Adicionalmente se pudo apreciar una disminución en las fallas inesperadas del equipo siendo intervenido este a tiempo con precisión del diagnóstico, lo cual evitó la mayor parte del tiempo que el equipo se saliera de los rangos esperados. A continuación se muestra una tabla con la descripción y evaluación de las cuatro intervenciones realizadas al equipo durante el mes de enero.

Tabla 6.2. Descripción de intervenciones del equipo en el mes de enero.

Equipo	Medición	Estado	Descripción del problema	Recomendación
517	MOTOR / SOPORTES	SATISFACTORIO	Leves defectos en rodamientos de descansos se presentan en forma estable	Se continuará evaluando su condición en el tiempo
517	MOTOR / SOPORTES	SATISFACTORIO	Disminución en amplitudes de frecuencias de falla en rodamientos de motor (leve).	Evaluando su condición en el tiempo
517	MOTOR / SOPORTES	SATISFACTORIO	Se mantiene falla incipiente de rodamiento en descansos lado motor y soporte. Condición estable.	Lubricar manualmente ambos descansos de ventilador
517	MOTOR / SOPORTES	SATISFACTORIO	Se mantienen falla incipiente de rodamiento en descanso lado motor. En descanso lado carga del rodete se aprecia una falla incipiente de rodamiento. Leve carencia de lubricación.	Lubricar manualmente descansos del soplador. Evaluando su condición y cambio de rodamientos.

Al revisar la tabla se puede apreciar que gracias al constante monitoreo del equipo fue posible detectar una falla en los rodamientos del descanso del lado del motor, falla que se mantuvo mediante lubricación los primeros días del mes ya que no presentaba mayores complicaciones para el normal funcionamiento del equipo y por lo tanto no era necesaria una detención de éste.

Finalmente se determina bajo el asesoramiento de personal de mantenimiento mecánico que el equipo puede seguir en normal funcionamiento hasta el mes siguiente que es cuando se tiene programada una detención del equipo, en la cual se realizó el cambio de los rodamientos mencionados.

7.6 Beneficios acarreados

Uno de los principales beneficios acarreados por la implementación del sistema es el mantenimiento oportuno de los equipos, esto se genera gracias a que las variables obtenidas en el proceso de medición entregan suficiente información para tomar decisiones de cuándo es óptimo intervenir el equipo, esto lleva también a la reducción de mantenimientos innecesarios por medio del personal, lo que reduce los costos asociados a la mantención de los equipos.

El acceso inmediato al estado del equipo es otro de los beneficios asociados al sistema, es posible obtener información de manera inmediata del estado del equipo al

realizar un chequeo de las variables críticas vía software, esto es resultado del monitoreo constante a éstas variables.

Es posible también evitar la exposición innecesaria del personal a riesgos inherentes al desarrollo del monitoreo manual del equipo, la aproximación a un equipo en permanente funcionamiento acarrea riesgos que son completamente evitables a la hora de utilizar este sistema para la medición de estas variables, ya que en este caso se toman de manera remota con equipos que se encuentran en el lugar y con la tarea específica de encargarse del envío de datos.

Al realizar un análisis de las señales obtenidas desde los sensores, el sistema provoca una reducción en los costos asociados a especialistas externos en análisis predictivo de fallas, estos especialistas normalmente están asociados a contratos costosos.

El software utilizado es de naturaleza amigable y es de gran uso dentro de la corporación, por lo que se evitan capacitaciones y especializaciones de personal para la manipulación del sistema, lo que es un plus con respecto a otros tipos de software disponibles para la realización de los análisis e interfaces.

7.7 Trabajo futuro

El trabajo futuro a realizar por parte de la corporación es expandir el proyecto a otras áreas, partiendo por los trenes de extracción por solventes, en los que se encuentran equipos (DOP) que por sus características, en caso de una falla llevan a la planta a una total detención.

Otra aplicación en la que el sistema puede ser útil es al medir el rendimiento de un operario al trabajar con un equipo en específico, esto quiere decir que se pueden detectar el mal uso de la maquinaria o equipos y tomar acciones para que sean corregidos con capacitaciones y especializaciones.

Otro punto en el cual se presenta una proyección a los alcances del proyecto es la expansión del sistema a otras áreas dentro de la división y de presentarse finalmente buenos resultados en general, es posible que se extienda a otras divisiones.

Debido a la gran capacidad de adaptación del sistema a las condiciones de trabajo de un equipo es que es posible abordar los puntos mencionados teniendo siempre en cuenta que el costo de la implementación, no debe ser muy alto con respecto a tener personal especializado en mantenimiento predictivo y con respecto al costo del equipo que se monitoreará, ya que existen casos en los que cambiar el equipo cada vez que este falla conlleva un costo menor a la instalación del sistema de monitoreo de sus variables críticas.

CAPÍTULO 8

EVALUACIÓN ECONÓMICA

Dentro del marco de la evaluación económica se destacan los distintos aspectos relevantes que hacen que el proyecto sea considerado para una implementación a mayor escala dentro de la División Radomiro Tomic.

Según los beneficios mostrados anteriormente en 3.2 cabe destacar la reducción de costos en el análisis de las variables de personal para un mantenimiento predictivo, actualmente este análisis es llevado a cabo mediante personal externo, con un contrato global que consiste en analizar los distintos equipos ubicados en la Planta LX-SX-EW con un costo asociado por intervención por equipo muy superior al costo de tener funcionando el sistema en cada equipo.

A continuación se muestra una tabla donde se detallan los costos asociados a las mediciones y los análisis a realizar por la empresa externa encargada de los mantenimientos predictivos, todos los costos están dados en dólares estadounidenses.

Tabla 8.1a. Motores Área EW y costos asociados al análisis de mantenimiento predictivo.

Ubicación técnica	Utilización	Cant./ Terreno	Costo de medición por equipo	Costo por análisis	Análisis mensuales	Costo total análisis
Máquina N° 1	Bba. Hidraulica	4	200	250	2	3600
	Bba. recirc. aceite	1	200	250	2	900
	Sistema de refrigeración	1	200	250	2	900
	Bba. de lavado	1	200	250	2	900
	Bba. de lavado	1	200	250	2	900
	Deshumificador	1	200	250	2	900
	Traslación carros	2	200	250	2	1800
	Bba. Hidraulica carros	2	200	250	2	1800
	Escobillas	2	200	250	2	1800
	Enzunchado	1	200	250	2	900

Tabla 8.1b. Motores Área EW y costos asociados al análisis de mantenimiento predictivo.

Ubicación técnica	Utilización	Cant./ Terreno	Costo de medición por equipo	Costo por análisis	Análisis mensuales	Costo total análisis
Máquina Nº 2	Bba. Hidraulica	3	200	250	2	2700
	Bba. recirc. Aceite	1	200	250	2	900
	Sistema de refrigeración	1	200	250	2	900
	Bba. de lavado	1	200	250	2	900
	Bba. de lavado	1	200	250	2	900
	Deshumificador	1	200	250	2	900
	Traslación carros	2	200	250	2	1800
	Bba. Hidraulica carros	2	200	250	2	1800
	Escobillas	2	200	250	2	1800
Máquina Nº 3	Bba. Hidraulica	4	200	250	2	3600
	Bba. recirc. Aceite	1	200	250	2	900
	Sistema de refrigeración	1	200	250	2	900
	Bba. de lavado	2	200	250	2	1800
	Bba. de lavado	2	200	250	2	1800
	Deshumificador	2	200	250	2	1800
	Traslación carros	1	200	250	2	900
	Bba. Hidraulica carros	1	200	250	2	900
	Escobillas	2	200	250	2	1800
	Enzunchado	1	200	250	2	900
	Bba. Hidraulica corrugado	1	200	250	2	900
Máquina Nº 4	Bba. Hidraulica	1	200	250	2	900
	Traslación carro	2	200	250	2	1800
	Tecla de levante	1	200	250	2	900
Grua 501	Sistema de levante	1	200	250	2	900
	Sistema de traslación	2	200	250	2	1800
	Bale eje "x"	2	200	250	2	1800
	Bale eje "y"	2	200	250	2	1800
	Bale peinetas	2	200	250	2	1800
	Bomba de agua	1	200	250	2	900

Tabla 8.1c. Motores Área EW y costos asociados al análisis de mantenimiento predictivo

Ubicación técnica	Utilización	Cant./ Terreno	Costo de medición por equipo	Costo por análisis	Analisis mensuales	Costo total análisis
Grua 502	Sistema de levante	1	200	250	2	900
	Sistema de traslación	2	200	250	2	1800
	Bale eje "x"	2	200	250	2	1800
	Bale eje "y"	2	200	250	2	1800
	Bale peinetas	2	200	250	2	1800
	Bomba de agua	1	200	250	2	900
Grúa 503	Sistema de levante	1	200	250	2	900
	Sistema de traslación	4	200	250	2	3600
	Bale eje "x"	2	200	250	2	1800
	Bale eje "y"	2	200	250	2	1800
	Bale peinetas	2	200	250	2	1800
	Utilización	Cant./ Terreno	Costo de medición por equipo	Costo por análisis	Analisis mensuales	Costo total análisis
	Antigoteo	2	200	250	2	1800
	Bomba de agua	2	200	250	2	1800
	Deflector	1	200	250	2	900
Grúa 504	Sistema de levante	1	200	250	2	900
	Sistema de traslación	4	200	250	2	3600
	Bale eje "x"	2	200	250	2	1800
	Bale eje "y"	2	200	250	2	1800
	Bale peinetas	2	200	250	2	1800
	Antigoteo	2	200	250	2	1800
	Bomba de agua	2	200	250	2	1800
	Deflector	1	200	250	2	900
Refrigeración Rectificadores	Bba. recirc. agua	12	200	250	2	10800
	Ventiladores	36	200	250	2	32400
	Ventiladores	18	200	250	2	16200
Extractores	Extracción nave	72	200	250	2	64800
	Extracción nave	28	200	250	2	25200
	Extracción MDC		200	250	2	0

Ubicación técnica	Utilización	Cant./ Terreno	Costo de medición por equipo	Costo por análisis	Análisis mensuales	Costo total análisis
Sopladores	Sopladores	10	200	250	2	9000
	Sopladores	4	200	250	2	3600
	Ventiladores Extractores	4	400	500	2	7200
	Ventiladores Extractores	2	400	500	2	3600
					Total	266400

En la tabla es posible apreciar un listado de motores y costos asociados al análisis de mantenimiento predictivo perteneciente al área de electro-obtención, con un costo total ascendente a USD\$ 266.400 mensuales, lo que es un costo bastante elevado considerando que el servicio incluye solamente la medición y una recomendación de mantenimiento entregada mensualmente.

Al revisar la tabla anterior es posible determinar que el costo total mensual asociado al análisis predictivo de fallas de todos los sopladores es de USD\$12.000, esto sin estar asociado el costo de la mantención requerida por el equipo. El costo de la implementación del sistema se divide en 3 ítems que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8.2. Costos asociados a la implementación del sistema por soplador

Ítem	Costo Asociado por soplador en USD\$
Monitor de variables eléctricas	1.050
Monitor de vibraciones y sensores	3.250
Implementación	1.000
Total	5.300

Al verificar los costos asociados a la implementación del sistema por un total de 14 sopladores que alcanzan un total de USD\$ 74.200 y los costos mensuales asociados a los análisis predictivos de fallas realizados por la empresa externa por los 14 sopladores que llegan a un total de USD\$12.600, se puede determinar que la inversión es recuperable en un periodo de aproximadamente 7 meses. Esto sin considerar los costos reducidos al optimizar la cantidad de intervenciones de los equipos, que incluyen materiales, insumos, utilización de equipos y herramientas y la mano de obra asociada a la actividad.

Si consideráramos el caso ideal, en el que cada equipo eléctrico encontrado en el área de eletro-obtención posee características similares a los sopladores, se puede realizar una proyección de la implementación del sistema en la totalidad de la planta, que posee un total de 290 equipos, por lo que la implementación del sistema sería de aproximadamente USD\$ 1.537.000, que en contraste con los USD\$ 266.400 asociados al análisis de mantenimiento predictivo de todos estos equipos, se estima una recuperación de la inversión en 6 meses, esto considerando un caso ideal como se mencionaba anteriormente.

En el Anexo N°1 se presentan las tablas correspondientes a los equipos utilizados en la planta y el costo asociado de análisis de mantenimiento preventivo realizado por la empresa externa, divididos en 3 áreas importantes que son electro-obtención, refino y patio de estanques, los que tienen costos asociados de USD\$ 266.400, USD\$ 23.400, USD\$ 146.700, lo que entrega un total equivalente de USD\$ 436.500, mensuales a cancelar por concepto de mantenimiento preventivo en toda la planta.

CONCLUSIONES

El proyecto muestra en general un buen funcionamiento en la planta piloto como se describe en los resultados obtenidos, en primer lugar se han obtenido excelentes resultados a la hora de obtener la información necesaria para tomar la decisión del momento en que se debe mantener el equipo.

Por otra parte si bien el sistema se encuentra en funcionamiento, aun no se han registrado anomalías en la alimentación eléctrica del equipo, por lo que este sistema aún no presenta datos reales de su capacidad de respuesta al momento de una real emergencia, sin embargo se han introducido anomalías generadas intencionalmente, para medir la respuesta del sistema en este sentido, estas pruebas han entregado resultados satisfactorios al momento de medir una caída de tensión que sobrepasa el 10% de la tensión de funcionamiento (575 [V]), adicionalmente se probó la variación de los niveles de corriente bloqueando la salida del soplador, aumentando la carga, al observar la respuesta del sistema a este bloqueo, el análisis entregó un resultado con el cual fue posible determinar una sobrecarga del equipo, siendo esta la única información entregada, por lo tanto en caso de variaciones de corriente en la alimentación es necesario observar distintas causas posibles, ya que el sistema no es capaz de determinar la causa de la sobrecarga.

Desde el punto de vista de la reparación del equipo en el momento oportuno, en el apartado de resultados obtenidos se muestra la información con la que fue posible tomar la decisión de detener el equipo ante una evidente falla de rodamientos, la que no presentaba un real peligro de detención imprevista del equipo, por lo que se tomó la decisión en el momento de no detener el equipo y solo mantenerlo con un mantenimiento preventivo hasta el momento de una detención programada, donde se realizó el cambio de rodamientos sin necesidad de perder disponibilidad del equipo.

Con respecto a los trabajos futuros a realizar con el sistema hay que destacar la implementación en los equipos DOP (bomba de impulsión y agitador), esta implementación fue llevada a cabo y se ha recabado información importante ya que este equipo debe mantenerse con un 100% de disponibilidad, las variables críticas medidas en este equipo son las mismas medidas en los sopladores, con algunas diferencias debido a la configuración del equipo, ya que el motor está dispuesto de forma vertical y la cantidad de rodamientos es distinta en los ejes.

La implementación llevada a cabo ha tenido buenos resultados en general y justifica completamente la inversión realizada en los equipos, sin embargo para hacer una extensión del sistema a otros equipos es necesario realizar un estudio completo de sus variables críticas, ya que aunque sea un equipo similar, la función que cumple en el sistema es determinante a la hora de determinar sus variables críticas.

La evaluación económica muestra que la implementación del sistema en el grupo total de sopladores se llevaría a cabo con una inversión total de USD\$ 74.200, inversión de la que se espera un retorno en 7 meses una vez realizada la implementación y sustituyendo

completamente el servicio externo encargado de cumplir con estas funciones. Servicio que actualmente cuesta USD\$ 12.000 mensuales en concepto de sopladores.

Finalmente la evaluación económica responde a muchas de las preguntas planteadas con anterioridad, se puede observar que a pesar de que la inversión para la implementación del sistema en toda la planta es bastante ostentosa (USD\$ 1.537.000), ésta puede ser recuperada en tan solo 6 meses en un caso ideal, sin considerar equipos extra como PLC dedicados a la labor de recolectar la información de la gran cantidad de variables a analizar y sin considerar, que si bien se trata siempre de motores eléctricos y poseen similares características, no siempre sus variables críticas para el mantenimiento serán las mismas que en el caso de los sopladores, estas pueden variar y eventualmente requerir mayor o menor cantidad de sensores y estos a su vez pueden variar su naturaleza. Sin embargo hoy en día el servicio prestado por la empresa externa de mantenimiento preventivo tiene un costo mensual de USD\$ 436.500.

El costo mensual del servicio es bastante elevado considerando que el servicio posee características similares a las prestaciones del sistema de diagnóstico para el mantenimiento óptimo implementado, incluso se pueden reconocer algunas ventajas del sistema por sobre el servicio, como por ejemplo el monitoreo en línea de las variables que no solo puede servir para determinar el momento en el cual es necesario intervenir el equipo sino que también entrega la capacidad de medir rendimientos de operación, entregar informes diarios, semanales y mensuales e historiales de forma instantánea para que el equipo del área de mantenimiento pueda tomar la mejor decisión a la hora de intervenir.

En definitiva el proyecto es completamente factible, su implementación debe ser realizada en forma gradual debido a la gran inversión que requiere para su implementación, sus alcances son variados y ya se está utilizando el sistema no solo con la finalidad que tenía originalmente sino que también se ha podido utilizar para realizar cálculos de rendimiento de operarios y determinación de falencias a la hora de operar, entregándole a la industria un sistema de evaluación de las funciones del operario.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Furlanetto, « Manual de gestión de activos y mantenimiento.,» 2005,
- [2] A. J. Pistarelli, « Manual de mantenimiento, ingeniería, gestión y organización.,» 2002.
- [3] Rolf Iserman, « Fault-Diagnosis Applications., » 2011.
- [4] A.E. Fitzgerald, « Máquinas eléctricas 6ta edición., »
- [5] http://www.osisoft.com/software-support/what-is-pi/What_Is_PI.aspx