

ÍNDICE GENERAL

| | |
|------------------------------------------------------------------|------|
| AGRADECIMIENTOS..... | ii |
| DEDICATORIA..... | iii |
| RESUMEN..... | iv |
| ÍNDICE GENERAL..... | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | ix |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS..... | xii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xiii |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN..... | 2 |
| 1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA..... | 3 |
| 1.4. OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.4.1. Objetivo general..... | 3 |
| 1.4.2. Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.5. ALCANCES..... | 4 |
| 1.6. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS..... | 5 |
| 1.7. RESULTADOS ESPERADOS..... | 5 |
| 1.8. ORGANIZACIÓN MEMORIA ESCRITA..... | 6 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1. MANTENIMIENTO PREDICTIVO..... | 8 |
| 2.1.1. Técnicas y herramientas del mantenimiento predictivo..... | 8 |
| 2.1.1.1. Ultrasonido..... | 8 |
| 2.1.1.2. Termografía..... | 9 |
| 2.1.1.3. Análisis de lubricantes..... | 9 |
| 2.1.1.4. Análisis de vibraciones..... | 9 |
| 2.1.2. Disponibilidad..... | 9 |
| 2.1.3. Confiabilidad..... | 10 |
| 2.1.4. Criticidad de equipo..... | 11 |
| 2.1.5. Monitoreo por condición..... | 12 |
| 2.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ANÁLISIS DE VIBRACIÓN..... | 13 |
| 2.2.1. Vibraciones..... | 13 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------|----|
| 2.2.2. | Onda | 14 |
| 2.2.3. | Velocidad de la vibración | 15 |
| 2.2.4. | Aceleración de la vibración | 15 |
| 2.2.5. | Desplazamiento de la vibración..... | 16 |
| 2.2.6. | Fase..... | 16 |
| 2.2.7. | Frecuencia natural y resonancia | 17 |
| 2.2.8. | Transformada de Fourier | 17 |
| 2.2.9. | Análisis de envolvente..... | 18 |
| 2.2.10. | Puntos de medición..... | 18 |
| 2.2.11. | Sensores de medición..... | 19 |
| 2.2.11.1. | Sensor de proximidad | 19 |
| 2.2.11.2. | Sensor de velocidad | 19 |
| 2.2.11.3. | Acelerómetro | 19 |
| 2.2.12. | Problemas generados por vibraciones mecánicas | 20 |
| 2.3. | SINTOMATOLOGÍA DE EQUIPOS | 25 |
| 2.3.1. | Desbalanceo..... | 25 |
| 2.3.2. | Desalineamiento | 28 |
| 2.3.2.1. | Desalineamiento angular | 28 |
| 2.3.2.2. | Desalineamiento paralelo | 29 |
| 2.3.2.3. | Rodamiento desalineado o eje inclinado..... | 29 |
| 2.3.3. | Máquina distorsionada..... | 29 |
| 2.3.4. | Soltura mecánica..... | 29 |
| 2.3.4.1. | Soltura tipo A | 30 |
| 2.3.4.2. | Soltura tipo B | 30 |
| 2.3.4.3. | Soltura tipo C | 30 |
| 2.3.5. | Falla de rodamiento | 30 |
| 2.3.5.1. | BPFI | 31 |
| 2.3.5.2. | BPFO..... | 32 |
| 2.3.5.3. | BSF..... | 32 |
| 2.3.5.4. | FTF | 32 |
| 2.3.5.5. | Rodamiento suelto en el eje | 32 |
| 2.3.5.6. | Rodamiento suelto en su alojamiento..... | 32 |

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------|----|
| 2.3.5.7. | Daño por paso de corriente a través del rodamiento | 33 |
| 2.3.6. | Falla de engranajes | 33 |
| 2.3.6.1. | Espectro normal..... | 33 |
| 2.3.6.2. | Desgaste en el diente | 33 |
| 2.3.6.3. | Carga en el diente | 34 |
| 2.3.6.4. | Excentricidad de engranaje y backlash | 34 |
| 2.3.6.5. | Desalineación de engranaje | 35 |
| 2.3.6.6. | Diente picado..... | 35 |
| 2.3.6.7. | Ajuste holgado del cojinete | 35 |
| 2.3.7. | Falla en motores eléctricos | 36 |
| 2.3.7.1. | Rotor con barras rotas | 37 |
| 2.3.8. | Falla en descanso hidrodinámico..... | 37 |
| 2.3.8.1. | Desgaste y holguras..... | 37 |
| 2.3.8.2. | Inestabilidad por remolino de aceite | 38 |
| 2.3.8.3. | Inestabilidad de latiguo de aceite | 38 |
| 2.3.9. | Falla en bombas y ventiladores | 39 |
| 2.3.9.1. | Paso de alabes o aspas | 39 |
| 2.3.9.2. | Turbulencia en el flujo | 39 |
| 2.3.9.3. | Cavitación..... | 40 |
| 2.3.10. | Vibraciones en correas | 40 |
| 2.3.10.1. | Bandas desgastadas o poca tensión..... | 40 |
| 2.3.10.2. | Desalineamiento en poleas..... | 41 |
| 2.3.10.3. | Excentricidad en poleas | 41 |
| 2.3.10.4. | Resonancia de banda..... | 42 |
| 2.4. | EVALUACIÓN DE SEVERIDAD VIBRATORIA | 42 |
| 2.4.1. | ISO 10816..... | 42 |
| 2.4.2. | ISO 10816-1 | 42 |
| 2.4.3. | ISO 10816-2 | 43 |
| 2.4.4. | ISO 10816-3 | 43 |
| 2.4.4.1. | Tipo de máquina y potencia | 43 |
| 2.4.4.2. | Flexibilidad del sistema de soporte | 44 |
| 2.4.4.3. | Altura de eje | 44 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.4.4. Evaluación..... | 44 |
| 2.4.5. ISO 10816-4 | 45 |
| 2.4.6. ISO 10816-5 | 45 |
| 2.4.7. ISO 10816-6 | 45 |
| 2.4.8. ISO 10816-7 | 45 |
| 2.5. SOFTWARE SKF | 46 |
| CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA | 48 |
| 3.1. SELECCIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS..... | 49 |
| 3.2. BUSQUEDA DE FRECUENCIAS DE FALLAS ASOCIADAS A RODAMIENTOS DE EQUIPOS CRÍTICOS..... | 50 |
| 3.3. CREACIÓN DE BASE DE DATOS | 51 |
| 3.4. PROGRAMACIÓN DE ALARMAS EN SOFTWARE BAJO NORMA ISO 10816-3 E INGRESO DE BASE DE DATOS | 52 |
| 3.4.1. Aplicación Norma 10816-3 | 52 |
| 3.4.2. Creación de jerarquía..... | 55 |
| 3.4.3. Creación de equipos..... | 56 |
| 3.4.4. Creación puntos de medición | 57 |
| 3.4.5. Configuración de equipo | 57 |
| CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 67 |
| 4.1. EQUIPOS CRÍTICOS | 68 |
| 4.2. ANÁLISIS NORMA | 68 |
| CONCLUSIONES..... | 72 |
| REFERENCIAS | 78 |
| ANEXO 1: EXCEL CON EQUIPOS CRÍTICOS..... | 81 |
| ANEXO 2: ESPECTRO LABORATORIO UNIVERSIDAD DE TALCA | 84 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1: Ubicación Celulosa Arauco, Constitución, fuente Google Maps..... | 2 |
| Figura 2-1: Matriz de criticidad, fuente Revista IMG..... | 11 |
| Figura 2-2: Onda de vibración simple, fuente apuntes Francisco Fuentes..... | 14 |
| Figura 2-3: Movimiento oscilatorio, teoría de vibraciones William Thomson..... | 15 |
| Figura 2-4: Fase entre ondas con 90° de retraso, fuente Guiracocha & Andrés, 2015 Universidad politécnica salesiana sede cuenca..... | 16 |
| Figura 2-5: Transformación de una vibración al dominio de frecuencia, fuente A-MAC. Análisis de Maquinaria..... | 18 |
| Figura 2-6: Planos de un punto monitoreado, fuente evaluación técnica y económica para implementar monitoreo continuo de vibraciones en cementos bío-bío planta Curicó, R. Labbé. | 19 |
| Figura 2-7: Deformación por flexión en barra empotrada, fuente P.C. Hibbeler..... | 21 |
| Figura 2-8: Esfuerzo de flexión directamente proporcional al desplazamiento Δ , fuente P. Saavedra..... | 22 |
| Figura 2-9: Esfuerzos de flexión, σ , son inversamente proporcional al largo del elemento al cuadrado, fuente P. Saavedra..... | 22 |
| Figura 2-10: Falla por fatiga, fuente ASM Handbook, vol.12: Fractography..... | 23 |
| Figura 2-11: Diagrama esfuerzo-deformación para un material dúctil, fuente R.C. Hibbeler.. | 24 |
| Figura 2-12: Superposición de dos espectros, fuente apuntes Francisco Fuentes..... | 26 |
| Figura 2-13: Espectro y forma de onda para el desbalance de un ventilador, fuente apuntes Francisco Fuentes..... | 27 |
| Figura 2-14: Desbalanceo estático, fuente Charlotte, 1996..... | 27 |
| Figura 2-15: Desbalanceo tipo par, fuente Charlotte, 1996..... | 27 |
| Figura 2-16: Desbalanceo dinámico, fuente Charlotte, 1996..... | 28 |
| Figura 2-17: Desequilibrio de rotores en cantilibre, fuente Charlotte, 1996..... | 28 |
| Figura 2-18: Desalineamiento angular, fuente Charlotte, 1996..... | 28 |
| Figura 2-19: Desalineamiento paralelo, fuente Charlotte, 1996..... | 29 |
| Figura 2-20: Rodamiento desalineado, fuente Charlotte, 1996..... | 29 |
| Figura 2-21: Soltura tipo A, fuente Charlotte, 1996..... | 30 |
| Figura 2-22: Soltura tipo B, fuente Charlotte, 1996..... | 30 |
| Figura 2-23: Soltura tipo C, fuente Charlotte, 1996..... | 30 |
| Figura 2-24: Etapas de averías en rodamientos, fuente Charlotte, 1996..... | 31 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-25: Especificaciones de fórmulas de frecuencias de fallas, fuente power-mi.com..... | 32 |
| Figura 2-26: Análisis de engranes, espectro normal, fuente Charlotte, 1996..... | 33 |
| Figura 2-27: Espectro con desgaste en diente, fuente Charlotte, 1996..... | 34 |
| Figura 2-28: Análisis de engranes, carga en diente, fuente Charlotte, 1996 | 34 |
| Figura 2-29: Análisis de engranes, backlash, fuente Charlotte, 1996 | 34 |
| Figura 2-30: Análisis de engranes, desalineación de engrane, fuente Charlotte, 1996 | 35 |
| Figura 2-31: Análisis de engranes, diente picado, fuente Charlotte, 1996..... | 35 |
| Figura 2-32: Holgura en el cojinete, fuente Charlotte, 1996..... | 36 |
| Figura 2-33: Motor eléctrico, fuente Charlotte, 1996..... | 36 |
| Figura 2-34: Holgura en descansos lisos, fuente Charlotte, 1996 | 37 |
| Figura 2-35: Remolino de aceite en descanso planos, fuente Charlotte, 1996..... | 38 |
| Figura 2-36: Latiguelo de aceite, fuente Charlotte, 1996 | 38 |
| Figura 2-37: BPF, fuente Charlotte, 1996 | 39 |
| Figura 2-38: Espectro BPF, fuente Charlotte, 1996 | 39 |
| Figura 2-39: Flujo turbulento, fuente Charlotte, 1996..... | 40 |
| Figura 2-40: Espectro de cavitación, fuente Charlotte, 1996 | 40 |
| Figura 2-41: Correa desgastada, fuente Charlotte, 1996 | 41 |
| Figura 2-42: Desalineamiento de poleas, fuente Charlotte, 1996..... | 41 |
| Figura 2-43: Tipos de desalineamiento, fuente Charlotte, 1996..... | 41 |
| Figura 2-44: Polea excéntrica, fuente Charlotte, 1996 | 41 |
| Figura 2-45: Excentricidad, fuente Charlotte, 1996 | 42 |
| Figura 2-46: Resonancia de banda, fuente Charlotte, 1996..... | 42 |
| Figura 2-47: Resonancia, fuente Charlotte, 1996..... | 42 |
| Figura 2-48: Evaluación de severidad, fuente ISO..... | 45 |
| Figura 2-49: Diagrama de proceso de análisis SKF, fuente SKF..... | 47 |
| Figura 2-50: Comunicación Software @ptitud, fuente SKF | 47 |
| Figura 3-1: Puntos de medición cuando no se tiene acceso a la caja del rodamiento √: Ubicación correcta, X: Ubicación incorrecta, fuente P. Saavedra | 53 |
| Figura 3-2: Representación altura de eje máquina, fuente P. Saavedra | 54 |
| Figura 3-3: Software SKF, fuente propia | 55 |
| Figura 3-4: Software SKF, fuente propia | 56 |
| Figura 3-5: Software SKF, fuente propia | 57 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-6: Software SKF, fuente propia | 58 |
| Figura 3-7: Software SKF, fuente propia | 59 |
| Figura 3-8: Configuración de norma. Fuente propia | 60 |
| Figura 3-9: Carga de rodamiento a software, fuente propia | 61 |
| Figura 3-10: Ingreso frecuencias de fallas fundamentales de rodamiento, fuente propia | 62 |
| Figura 3-11: Notas del equipo, fuente propia | 63 |
| Figura 3-12: Pestaña para cargar imágenes de equipo, fuente propia | 64 |
| Figura 3-13: Filtros para análisis de fallas, fuente propia | 65 |
| Figura 3-14: Filtros para análisis de falla | 66 |
| Figura 4-1: Unidad motor-ventilador analizada, fuente P. Saavedra | 69 |
| Figura 4-2: Espectro medido en el punto B-V del motor, fuente P, Saavedra | 70 |
| Figura 4-3: Rodamiento 7314 BECBM, fuente indiamart | 75 |
| Figura 4-4: Rodamiento NUP 313, fuente rsdelivers. | 76 |
| Figura 4-5: Nivel bajo de líquido lubricante en bomba, fuente propia | 76 |
| Figura 4-6: Nivel corregido de lubricante en bomba, fuente propia | 77 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 2-1: Gráfico de la resistencia a la fatiga de un acero SAE 4130 para diferentes números de ciclos de vida, fuente P. Saavedra..... | 23 |
| Gráfico 4-2: Tendencia de un equipo, fuente A-Maq..... | 72 |
| Gráfico 4-1: Zonas de funcionamiento bajo norma ISO para monitoreo operacional, fuente P. Saavedra..... | 73 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3-1 Tabla de cálculo de criticidad de equipo..... | 49 |
| Tabla 3-2: Rodamientos de activos críticos con sus respectivas frecuencias de fallas, elaboración propia..... | 50 |
| Tabla 3-3: Base de datos equipos críticos, elaboración propia..... | 51 |
| Tabla 3-4: Clasificación tipo de máquina potencia nominal o altura del eje a la base, fuente ISO 10816-3..... | 53 |
| Tabla 3-5: Tabla base para aplicar norma ISO-10816-3, elaboración propia | 54 |
| Tabla 3-6: Velocidades de vibraciones en valores mm/seg RMS de equipos críticos bajo norma ISO10816-3, elaboración propia..... | 55 |
| Tabla 4-1: Análisis de rodamiento, Fuente: Elaboración propia | 74 |
| Tabla 4-2: Especificación rodamientos equipo 511J102, fuente SKF..... | 75 |