

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DE ENERGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DE LA CHANCADORA
DE MANDIBULAS SANDVIK CJ412 PARA INCREMENTO
DE LA DISPONIBILIDAD OPERACIONAL, SOCIEDAD
MINERA EL BROCAL - 2020”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA
OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
MECÁNICO

EDWIN EMILIANO GALINDO SANCHEZ

Callao, 2022

PERÚ

PEDRO BALTAZAR DE LA CRUZ
CASTILLO
INGENIERO MECANICO
Reg. CIP N° 96534

ACTA N° 005-2022 DE EXPOSICIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA LA OBTENCIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO

LIBRO 001, FOLIO N° 305, ACTA N° 005-2022 DE EXPOSICIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO


A los 03 día del mes junio del año 2022, siendo la 18:00 horas, se reunieron, en la sala <https://meet.google.com/xix-vfaj-jsy>, el **JURADO DE EXPOSICIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL** para la obtención del título profesional de **Ingeniero Mecánico** de la **Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

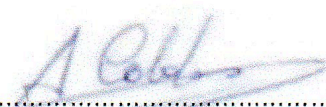
Mg.	Juan Adolfo Bravo Félix	: Presidente
Mg.	Alfonso Santiago Caldas Basauri	: Secretario
Mg.	Juan Carlos Huamán Alfaro	: Vocal
Ing.	Pedro Baltazar de la Cruz Castillo	: Asesor

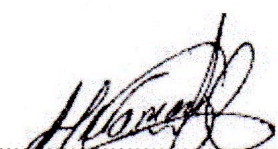
Se dio inicio al acto de **exposición del Trabajo de Suficiencia Profesional** del Bachiller, **GALINDO SANCHEZ, Edwin Emiliano**, quien habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico, expone el TSP titulado **"ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DE LA CHANCADORA DE MANDIBULAS SANDVICK CJ412 PARA INCREMENTO DE LA DISPONIBILIDAD OPERACIONAL, SOCIEDAD MINERA EL BROCAL - 2020"**, cumpliendo con el acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid-19, a través del D.S. N° 044 2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N°039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior Universitario";


Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la exposición de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por **aprobado** con la escala de calificación cualitativa de **Muy Bueno** y calificación cuantitativa **17 (Diecisiete)** la presente exposición, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 245-2018- CU del 30 de octubre del 2018.

Se dio por cerrada la Sesión a las 18.50 horas del 03 del mes de junio y año en curso.


.....
Mg. Juan Adolfo Bravo Félix
Presidente


.....
Mg. Alfonso Santiago Caldas Basauri
Secretario


.....
Mg. Juan Carlos Huamán Alfaro
Vocal


.....
Ing. Pedro Baltazar de la Cruz Castillo
Asesor

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi amada esposa Ketty Casas que estuvo incondicionalmente en toda mi etapa de formación, a mis queridos hijos Leonel y Derek que son mi mayor motivación.

A mis padres Edwin Galindo y Ana Sánchez por su amor y comprensión, a mi abuelo Juan Galindo quien me encamino a ser una persona de bien.

A mi hermano Joy Galindo y mis primos menores que me ven como referente y guía. A mis demás familiares y amigos en general, por su gran aprecio. A Dios por permitirme vivir todas estas experiencias.

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Energía, a los maestros catedráticos y a mi asesor por el soporte brindado que me permitieron concluir esta investigación.

INDICE

INDICE	1
I. ASPECTOS GENERALES	5
1.1 Contexto de la realidad problemática.....	5
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Organización de la empresa	7
1.3.1 Antecedentes históricos.....	9
1.3.2 Filosofía empresarial	11
1.3.3 Estructura organizacional	12
1.3.4 Cargo y Funciones desempeñadas	14
II. FUNDAMENTACIÓN DE LA EXPERIENCIA PROFESIONAL.....	15
2.1 Antecedentes.....	15
2.2 Marco Teórico	18
2.2.1 Definición de términos básicos	35
2.3 Descripción de las actividades desarrolladas	42
2.3.1 Evaluación inicial	42
2.3.2 Identificación de la causa crítica	43
2.3.3 Determinación de la estrategia	46
2.3.4 Desarrollo de protocolo contra rendimiento	47
2.3.5 Control de pruebas	51
2.3.6 Evaluación final	58
III. APORTES REALIZADOS	61
IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	62
Discusión	62

Conclusiones	63
V. RECOMENDACIONES	64
VI. BIBLIOGRAFIA	65
ANEXOS	68
ANEXO N° 1: SOLICITUD DE PRUEBAS	69
ANEXO N° 2: INVITACIÓN A PRUEBA.....	70
ANEXO N° 3: REGISTRO DE CAMBIOS Y DURACIÓN DE MUELAS FIJAS 2019.....	71
ANEXO N° 4: REGISTRO DE CAMBIOS Y DURACIÓN DE MUELAS FIJAS 2020.....	73
ANEXO N° 5: VALORES CRÍTICOS DEL TEST KOLMOGOROV - SMIRNOV .	74
ANEXO N° 6: IMÁGENES DE MUELAS FIJAS NUEVAS	75
ANEXO N° 7: IMÁGENES DE MUELAS FIJAS GASTADAS.....	77

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Ubicación de Sociedad Minera El Brocal S.A.A.....	8
Gráfico 2. Organigrama del directorio Buenaventura	12
Gráfico 3. Organigrama SMEB Unidad Colquijirca.....	13
Gráfico 4. Curva de la bañera	23
Gráfico 5. Distribución weibull	26
Gráfico 6. Familia de distribuciones weibull	26
Gráfico 7. Distribución de Datos vs Distribución Hipotética o Teórica.....	29
Gráfico 8. Circuito simplificado de Chancado de Cobre.	33
Gráfico 9. Vistas de Chancadora Sandvik CJ 412	34
Gráfico 10. Vista de muelas fija (lado izquierdo) y muela móvil (lado derecho). ...	34
Gráfico 11. Disponibilidad mensual de Chancado Cu del año 2019	42
Gráfico 12. PARETO Horas de mantenimiento por equipos, Chancado Cu 2019. 43	
Gráfico 13. JACK KNIFE Componentes de la Chancadora Primaria de Cu.....	44
Gráfico 14. JACK KNIFE Modos de falla de la Chancadora Primaria de Cu.....	44
Gráfico 15. Regresión lineal weibull línea base.....	49
Gráfico 16. Curva de confiabilidad acumulada línea base	49
Gráfico 17. Regresión lineal weibull proveedor #1	52
Gráfico 18. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #1	52
Gráfico 19. Regresión lineal weibull proveedor #2	53
Gráfico 20. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #2	54
Gráfico 21. Regresión lineal weibull proveedor #3.....	55
Gráfico 22. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #3	55
Gráfico 23. Regresión lineal weibull proveedor #4.....	56
Gráfico 24. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #4	56
Gráfico 25. Regresión lineal weibull proveedor #5.....	57
Gráfico 26. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #5	58
Gráfico 27. Disponibilidad mensual de Chancado Cu del año 2020	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ranking mundial de producción minera 2020	5
Tabla 2. Evolución de precio de mineral metálicos	6
Tabla 3. Consumo de muelas fijas y móviles 2019	45
Tabla 4. Tiempos de giro y cambio de muelas.....	45
Tabla 5. Parámetros de modelamiento weibull línea base.....	48
Tabla 6. Parámetros de la prueba de bondad de ajuste línea base	49
Tabla 7. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #1	51
Tabla 8. Parámetros de la prueba de bondad de ajuste proveedor #1	51
Tabla 9. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #2	53
Tabla 10. Parámetros de prueba de bondad de ajuste proveedor #2	53
Tabla 11. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #3	54
Tabla 12. Parámetros de prueba de bondad de ajuste proveedor #3	54
Tabla 13. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #4	55
Tabla 14. Parámetros de prueba de bondad de ajuste proveedor #4	56
Tabla 15. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #5	57
Tabla 16. Parámetros de prueba de bondad de ajuste proveedor #5	57
Tabla 17. Resumen de MTTF y ahorro proyectado por proveedor	59
Tabla 18. Incremento de disponibilidad proyectado por proveedor.....	60

I. ASPECTOS GENERALES

1.1 Contexto de la realidad problemática

El Perú se caracteriza por ser un país minero metálico, donde este rubro aporta aproximadamente un 10% del PBI nacional y del cual más del 50% es debido a la producción de cobre del cual el Perú se encuentra en la segunda posición del ranking mundial según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Tabla 1. Ranking mundial de producción minera 2020

PRODUCTO	LATINOAMÉRICA	MUNDO
Oro	1	8
Cobre	2	2
Plata	2	2
Zinc	1	3
Plomo	1	4
Estaño	1	4
Molibdeno	2	4
Cadmio	2	8
Roca Fosfórica	2	10
Diatomita	1	5
Indio	1	6
Andalucita <i>y minerales relacionados</i>	1	4
Selenio	1	10

Fuente: Tomada de "Anuario Minero 2020". Ministerio de Energía y Minas, 2020, p. 50.

En el 2020, las cotizaciones de los principales metales presentaron incrementos significativos como consecuencia de la pandemia. Siendo así que, el precio del cobre, oro, plata y el hierro mostraron variaciones interanuales positivas. Por otro lado, el panorama global vivido no favoreció a los precios del zinc, plomo, estaño y molibdeno quienes se contrajeron en 11.0%, 8.7%, 8.0% y 23.5%, correspondientemente (Ministerio de Energía y Minas 2020 p.56).

Tabla 2. Evolución de precio de mineral metálicos

AÑOS	COBRE	ORO	ZINC	PLATA	PLOMO
	Ctvs.US\$/lb <i>LME</i>	US\$/Oz.tr. <i>LBMA</i>	Ctvs.US\$/lb <i>LME</i>	US\$/Oz.tr. <i>London Fix</i>	Ctvs.US\$/lb <i>LME</i>
2011	399.66	1,573.16	99.36	35.12	108.76
2012	360.59	1,668.86	88.29	31.15	93.50
2013	332.12	1,409.51	86.59	23.79	97.12
2014	311.26	1,266.06	98.18	19.08	95.07
2015	249.23	1,159.82	87.47	15.68	80.90
2016	220.56	1,249.84	95.02	17.14	84.89
2017	279.68	1,257.86	131.36	17.05	105.12
2018	295.88	1,268.93	132.54	15.71	101.72
2019	272.14	1,393.71	115.50	16.21	90.70
2020 ¹	280.35	1,771.04	102.83	20.55	82.81

Fuente: Tomada de “Anuario Minero 2020”. Ministerio de Energía y Minas, 2020, p. 56.

El Perú es el segundo país de América del Sur más afectado, con una caída de 11.1% de su PBI por reducción de ventas del cobre y oro que son dos de los principales productos de exportación. Aun así, mantiene el segundo lugar en el ranking mundial de producción de cobre cuyo precio se mantiene al alza, a pesar que muchos minerales metálicos han sufrido una caída de sus precios.

SOCIEDAD MINERA EL BROCAL S.A.A. – Pasco, es una minera que extrae mineral de cobre, plomo y zinc y pertenece al grupo Buenaventura, y ha buscado optimizar sus procesos con el objetivo de volverse más productivas y rentables.

1.2 Objetivos

Objetivo General

- Analizar la confiabilidad de la chancadora de mandíbulas Sandvik CJ412 para mejorar la disponibilidad del área de chancado cobre.

Objetivos específicos

- Determinar el equipo y modo de falla que tienen mayor impacto en la disponibilidad del área de chancado de cobre.
- Determinar tiempo de vida (MTTF) del componente crítico mediante modelamiento weibull.
- Implementar protocolo de pruebas contra rendimiento para la muela fija.
- Determinar el impacto económico de las pruebas de cada proveedor.
- Determinar el incremento de la disponibilidad en el 2020.

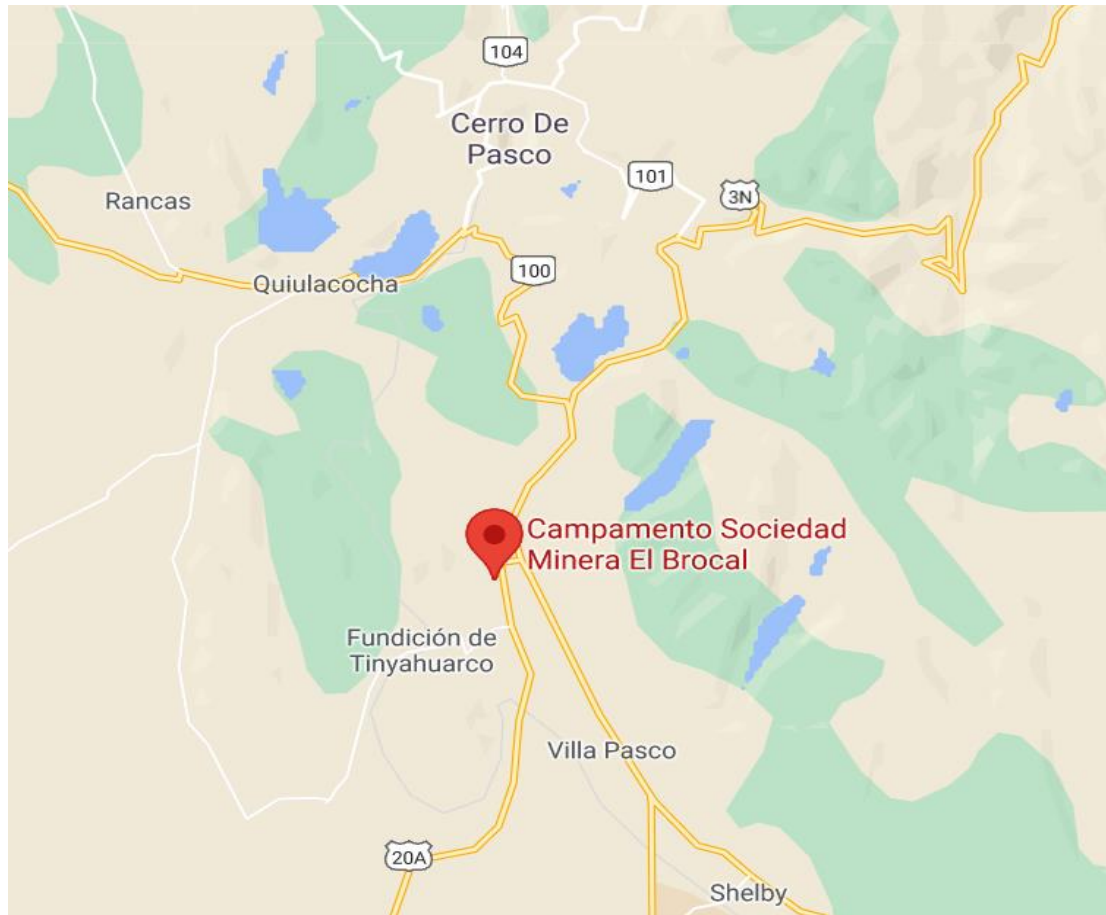
1.3 Organización de la empresa

El Brocal es una empresa minera dedicada a la extracción, concentración y comercialización de minerales polimetálicos: plata, plomo, zinc y cobre. La empresa realiza sus operaciones en las Unidades Mineras de Colquijirca y la Planta Concentradora de Huaraucaca, localizadas en el distrito de Tinyahuarco, provincia de Pasco, departamento y región de Pasco, Perú. Sus oficinas administrativas están localizadas en el distrito de San Isidro, en la ciudad de Lima, Perú (Sociedad Minera El Brocal S.A.A. [SMEB], 2019).

El Brocal explota dos minas contiguas: Tajo Norte, operación a tajo abierto que produce minerales de plata, plomo y zinc; y Marcapunta-Norte, mina subterránea que produce minerales de cobre. El mineral extraído se procesa en dos plantas concentradoras, que actualmente cuentan con una capacidad instalada de

tratamiento de 18,000 toneladas métricas por día. El Brocal cuenta asimismo con toda la infraestructura asociada requerida, como centrales hidroeléctricas, sub estaciones, talleres, almacenes, canchas de relaves, planta de tratamiento de aguas ácidas, viviendas y oficinas administrativas (SMEB, 2019).

Gráfico 1. Ubicación de Sociedad Minera El Brocal S.A.A.



Fuente: Tomada de GoogleMaps.

1.3.1 Antecedentes históricos

Los orígenes de la explotación yacen desde la época pre-incaica. Se sabe que la tribu de los Tinyahuarcos, extraían la plata de las faldas del cerro ubicado frente a Puntac-Marca, que por poseer abundancia y calidad desde aquellos tiempos era conocido como GOLGUE (plata), JIRCA (cerro), hoy Colquijirca, es decir “cerro de la plata” (SMEB, 2019).

La historia nos cuenta que cuando hubo que pagar el rescate del Inca Atahualpa, se recibió la orden de enviar a Cajamarca toda la existencia almacenada de minerales preciosos que se tenían en Golguejirca (SMEB, 2019).

Gracias a estos importantes antecedentes, la evolución siempre estuvo orientada hacia el crecimiento de la empresa y se fue dando de la siguiente manera (SMEB, 2019):

Año 1549, llegan los españoles a la zona y comienzan a trabajar en las minas de Golguejirca.

Año 1880, la mina Colquijirca, propiedad del ciudadano español Manuel Clotet, fue cedida a su yerno, Eulogio Fernandini.

Año 1886, se inician los trabajos del socavón principal de Colquijirca que posteriormente se llamó el “Socavón Fernandini”. La ejecución de la obra de 900 metros de longitud, tomó 13 años llegando por fin con tenacidad y esfuerzo a encontrar vetas de plata, plomo y zinc.

Año 1889, se tenía instalada la Fundición de Huaraucaca, para la producción de barras de plata, cuya instalación y manejo estuvo a cargo del ingeniero Antenor Rizo Patrón.

Año 1921, la empresa, Negociación Minera Eulogio E. Fernandini, decidió cerrar la fundición y reemplazarla por una planta de flotación ubicada en el mismo lugar.

Año 1938, se modificó el nombre de la empresa por “Negociación Fernandini Clotet Hermanos” que incluía tanto negocios mineros como agrícolas.

El 7 de mayo de 1956, se registró como “Sociedad Minera El Brocal S.A.”

Año 1960, se instala el primer molino de barras e inicia su crecimiento.

Año 1973, se inicia los trabajos de tajo abierto “Mercedes-Chocayoc”, mientras en la zona de Marcapunta se explotaba por método subterráneo.

Año 1974, se paraliza la explotación subterránea convencional, y se intensifica el desbroce del tajo abierto, elevando la producción a 580 y posteriormente hasta las 1,000 TMD.

Entre 1980 y 1981, se incrementan las actividades en el tajo abierto, lográndose producir 1,500 TMD de mineral.

En 1990 y 1991, se tratan 1,750 TMD y 2,000 TMD de mineral respectivamente, proveniente de los tajos Principal y Mercedes-Chocayoc.

Año 1994, se inicia un programa agresivo de exploraciones a través de perforaciones diamantinas, lo cual permitió identificar y cuantificar los Proyectos San Gregorio y Marcapunta.

En noviembre de 1996, la planta concentradora de Huaraucaca comienza con la flotación selectiva de zinc, plata y plomo. Al mismo tiempo, la producción llega hasta 2,200 TMD.

El 14 de abril del 2003, la empresa se convirtió en Sociedad Anónima Abierta y su razón social se modificó a Sociedad Minera El Brocal S.A.A.

2007, la capacidad instalada de la planta concentradora Huaraucaca es de 5,500TMD.

2009-2014, El Programa de ampliación de operaciones aprobado en agosto del 2008 por el Directorio, consistente en incrementar la capacidad de producción de mineral a 18,000 TMD, empezó a desarrollarse en el año 2009, consolidándose en el 2014 la operación de la Planta 1 a niveles de 7,000 TMD y de la Planta 2 a 11,000 TMD, contando con una capacidad instalada de 18,000 toneladas métricas por día.

Durante los últimos años, Sociedad Minera El Brocal ha logrado dar un salto cualitativo importante debido al crecimiento integral de la organización, lo que la ubica dentro del grupo de empresas mineras medianas más importantes del país.

1.3.2 Filosofía empresarial

La filosofía de Sociedad Minera El Brocal SAA está orientada a la eficiencia en sus operaciones con seguridad, responsabilidad social y ambiental.

Visión

El Brocal es una empresa minero metalúrgica moderna, que opera con rentabilidad en sus inversiones; cuenta con amplios recursos y reservas de mineral que garantizan su sostenibilidad y crecimiento en el mediano y largo plazo, en base a nuevas operaciones mineras que opera con responsabilidad para con su entorno (SMEB, 2019).

Misión

Producir concentrados minerales y metales, garantizando la creación de valor para los accionistas. Realizar actividades de exploración, asegurando la continuidad del proceso de explotación del mineral, generando oportunidades de desarrollo para nuestros colaboradores y las comunidades del entorno. Mantener el compromiso de operar y desarrollar nuestros proyectos con innovación, eficacia, seguridad, responsabilidad social y ambiental y buen gobierno corporativo (SMEB, 2019).

Valores

Los integrantes de El Brocal sostenemos que para la consecución de nuestra Visión y Misión viviremos y difundiremos los siguientes valores (SMEB, 2019):

INTEGRIDAD: Para que nuestras acciones se desarrollen con entereza moral y probidad.

RESPETO: Para afianzar nuestra relación con los Grupos de Interés y velar por la preservación del medio ambiente.

LEALTAD: Para afirmar nuestro compromiso con la empresa y sus integrantes.

LABORIOSIDAD: Para realizar las tareas con esmero y hacer algo más que cumplir con lo imprescindible, lo obligatorio o lo mínimo necesario.

HONESTIDAD: Para comportarnos y expresarnos con sinceridad y coherencia, respetando los valores de la justicia y la verdad.

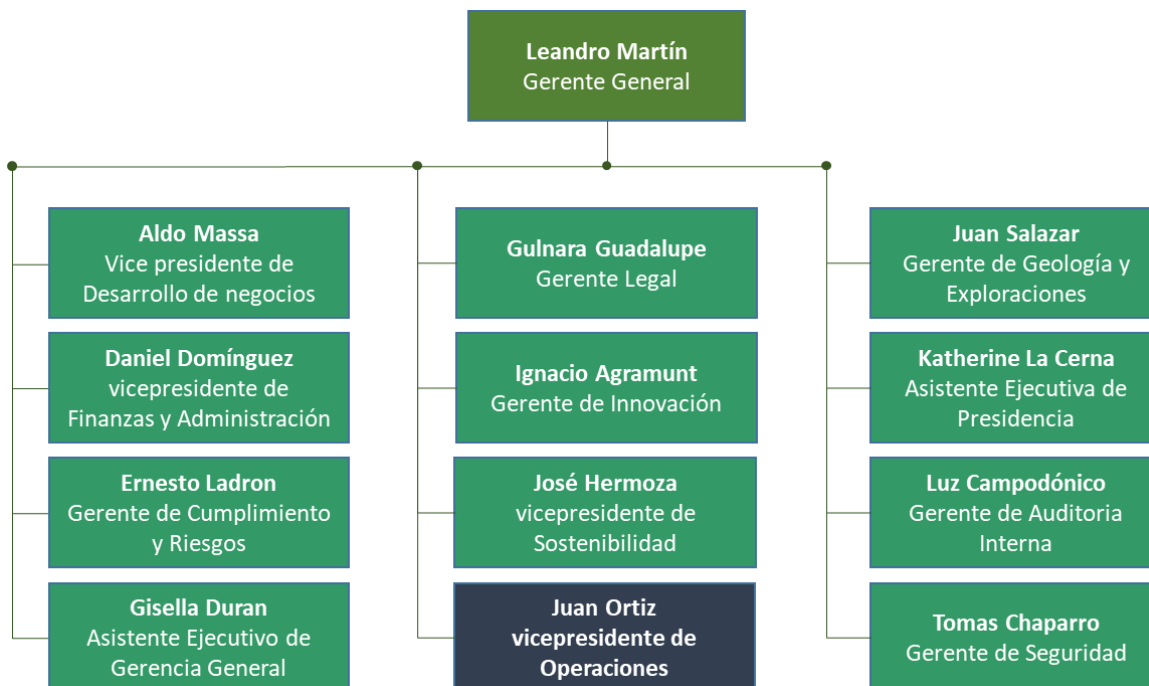
TRANSPARENCIA: Para informar de manera objetiva y oportuna, acerca de nuestras actividades.

SOLIDARIDAD: Para coadyuvar al desarrollo sostenible del entorno.

1.3.3 Estructura organizacional

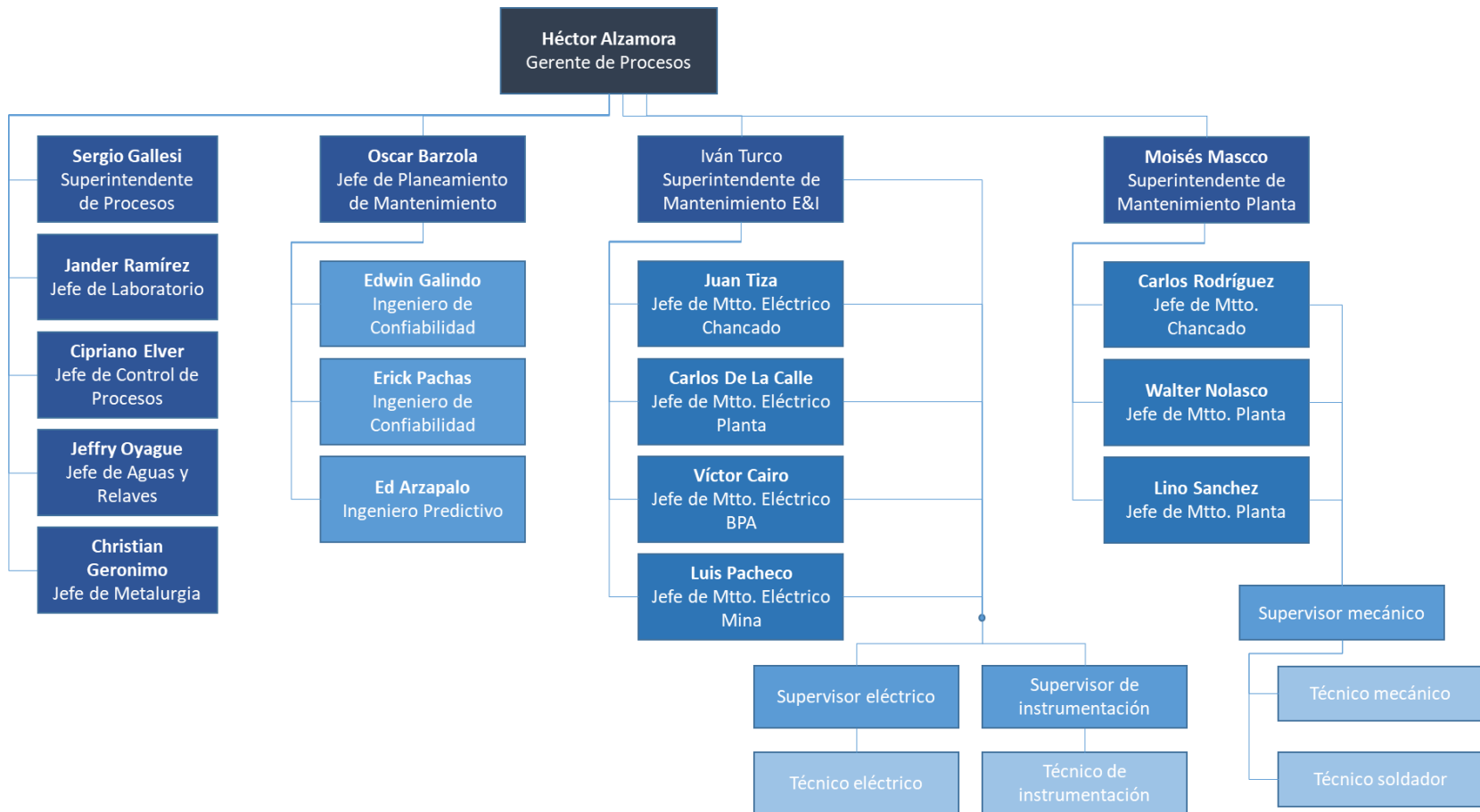
Sociedad Minera El Brocal SAA pertenece al grupo Buenaventura, el cual cuenta con un directorio matricial para gestión de todas las unidades mineras según:

Gráfico 2. Organigrama del directorio Buenaventura



Fuente: Tomada de Plataforma successFactors de Buenaventura

Gráfico 3. Organigrama SMEB Unidad Colquijirca



Fuente: Tomada de Plataforma SuccessFactors de Buenaventura

1.3.4 Cargo y Funciones desempeñadas

Puesto: Ingeniero de Confiabilidad

Reporta a: Superintendente de Ingeniería y Planificación de Mantenimiento

Dependencia jerárquica y funcional: Jefe de Ingeniería de Mantenimiento

Misión del Puesto: Gestionar la base de datos de todos los equipos y demás actividades para asegurar la confiabilidad de los equipos de planta.

Funciones y Responsabilidades:

- Liderar el programa de análisis de causa raíz, consolidar y actualizar el estado de los planes de acción.
- Coordinar y participar en la planeación, formulación, desarrollo y ejecución de proyectos de mejora.
- Realizar el análisis estadístico y modelamiento de las fallas de equipos para determinar los cambios necesarios en los planes de mantenimiento.
- Procesar y preparar los datos estadísticos para los análisis, informes y presentaciones para mejorar o asegurar la confiabilidad de los equipos.
- Utilizar herramientas de calidad (Pareto, Jack Knife, Box Plot).
- Liderar las mejoras en la utilización de repuestos alternativos para equipos de Planta Concentradora y Mina.
- Analizar el Ciclo de Vida de los Equipos (LLC).

Requisitos básicos determinados por la compañía:

Formación: Titulado o Bachiller en Ingeniería Mecánica o afín.

Experiencia: Mínimo 03 años de experiencia en puestos relacionados a Confiabilidad de equipos en Minería.

Conocimientos: Deseable certificación CMRP, MLT/MLA o AV2, manejo de RCM, FMEA, ACR, LCC y PDCA.

II. FUDAMENTACIÓN DE LA EXPERIENCIA PROFESIONAL

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Internacionales

BURGOS, O. y LOBELO, A. (2008), “ESTUDIO DE CONFIABILIDAD DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN PLANTA 1 DE PROPILCO S.A. Y LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN COMPUESTOS 3 DE AJOVER S.A.” sustentado en la Facultad de Ingenierías Físico-Mecánica de la Universidad Industrial de Santander para optar el título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento.

El objetivo en la presente investigación es determinar la estrategia de mantenimiento adecuada para los equipos de la línea de producción planta 1 de Propilco S.A. Y la línea de producción Compuestos 3 de Ajoover S.A. basado en un estudio de confiabilidad. El problema se basa en el conocimiento incipiente de temas de confiabilidad en el área de mantenimiento y la necesidad de establecer estrategias que aporten al incremento de producción y reducción de los costos de mantenimiento.

En tal contexto, los equipos de la empresa no tienen una clasificación de criticidad que sirva para enfocar esfuerzos, y las estrategias de mantenimiento son están definidas.

El antecedente citado tuvo aporte para el desarrollo de la presente investigación debido a que realiza un análisis de confiabilidad con soporte del modelamiento weibull y define estrategias según la fase en que se ubica la tasa de fallas en la curva de la bañera, como implementar TPM, enfoque en reducir tiempos de reparación y actividades predictivas.

AGUALONGO, L (2019). “ANÁLISIS DE FIABILIDAD DE MÁQUINAS Y EQUIPOS POR LA LEY DE WEIBULL EN EL ÁREA DE EXTRUSIÓN DE LA EMPRESA HOLVIPLAS S.A. Y SU INCIDENCIA EN LA DISPONIBILIDAD” sustentado en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato para optar el grado académico de Magister en Mecánica Mención Diseño.

El objetivo en la presente investigación es analizar la fiabilidad de máquinas y equipos en el área de extrusión por la ley de Weibull en la empresa HOLVIPLAS S.A., y su incidencia en la disponibilidad, el problema se basa en la gestión ausente del mantenimiento desde el desconocimiento de la disponibilidad de la planta y el área de extrusión de a que no se mide.

En tal contexto, Agualongo determina los indicadores de disponibilidad de cada uno de los equipos del área de extrusión, luego implementa el AMEF considerando MTBF mediante el modelo de weibull para determinar la frecuencia de intervención y finalmente verifica estadísticamente la incidencia del análisis realizado en la disponibilidad de los equipos.

El antecedente citado tuvo aporte para el desarrollo de la presente investigación debido a que el análisis weibull realizado a los diferentes equipos incide significativamente en la disponibilidad incrementando su valor.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

PANDIA, Y. (2020), “EL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD COMO SOPORTE PARA EL DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO DE LA LÍNEA DE MADURACIÓN DE LANGOSTINOS EN MARINASOL S.A. - TUMBES” sustentado en la Facultad de Ingeniería de la Producción y Servicios de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico.

El objetivo en la presente investigación es implementar el uso de técnicas cualitativas y cuantitativas de confiabilidad para mejorar la Gestión del Mantenimiento de los equipos de la línea de maduración de langostinos de Marinasol S.A. – Tumbes. El problema se basa en que el plan de mantenimiento

actual fue elaborado en base a experiencia y satisface la necesidad de la empresa por lo que resulta necesario un plan de mantenimiento basado en confiabilidad con sustento estadístico.

En tal contexto, Pandia identifico desconocimiento sobre indicadores y técnicas de confiabilidad en el personal de mantenimiento, esta empresa cuenta con un ERP que tiene data de los últimos 4 años lo cual es suficiente. Por lo que, Pandia inicia con un análisis de criticidad donde los equipos más críticos son bombas centrífuga y máquina cosechadora, a los cuales se le realiza el AMEF para definir las actividades de mantenimiento y finalmente basado en resultados de modelo weibull soportado en el software Weibull ++ de Synthesis 11 determina la frecuencia de intervención.

El antecedente citado tuvo aporte para el desarrollo de la presente investigación debido a que el análisis de confiabilidad se soporta en el análisis weibull para determinar el MTBF de los equipos más críticos, para luego utilizarlo en definir la frecuencia de intervención de las actividades de mantenimiento seleccionadas en el AMEF.

CHINO, W. (2018), "ANÁLISIS EN FUNCIÓN DE LA CRITICIDAD DE LOS EQUIPOS DE LA PLANTA DE CENTRO DE INSPECCIÓN TÉCNICA VEHICULAR AZPER PERÚ SAC. JULIACA Y ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD" sustentado en la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.

El objetivo en la presente investigación es diseñar un plan de mantenimiento en base al análisis del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para los Equipos de la planta de centro Inspecciones técnicas vehiculares AZPER PERÚ SAC Juliaca. El problema se basa en las constantes paradas de equipos que ocasionan pérdidas importantes y afectan la calidad de servicio de la planta, producto de que el mantenimiento actual se basa en actividades de tipo correctivas que solo buscan reestablecer la función de los equipos.

En tal contexto, Chino propone diseñar un plan de mantenimiento en base al RCM, para lo cual realiza un análisis de criticidad de los equipos de la planta siendo el banco de suspensión y el frenometro a los cuales calcula el MTBF mediante la distribución weibull sin evaluar los modos de falla.

El antecedente citado tuvo aporte para el desarrollo de la presente investigación debido a que utiliza el análisis weibull para determinar el MTBF de los equipos de mayor criticidad y determina la frecuencia de mantenimiento basado en un 70% de confiabilidad.

2.2 Marco Teórico

Mantenimiento

“Mantenimiento es la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión realizadas durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o a devolverlo a un estado en el que pueda desempeñar la función requerida” (AENOR UNE-EN 13306-2018 p.6).

La administración del mantenimiento implica crear una organización conformado por personas y recursos, dedicados a la gestión, planificación, ejecución, y supervisión, de las tareas de mantenimiento, donde el objetivo debe centrarse en maximizar la disponibilidad de los equipos para garantizar el proceso productivo, y a la vez optimizando los recursos empleados (INTEGRAMARKETS, 2018 p.4).

Según Albert Ramond y Asociados (Estados Unidos de América), la función principal de mantenimiento es maximizar la disponibilidad que se requiere para la producción de bienes y servicios, al preservar el valor de las instalaciones. Para minimizar el deterioro de los equipos, lo cual se debe lograr con el menor costo posible y a largo plazo (Mora, 2009 p.38).

Evolución del Mantenimiento

Las operaciones de mantenimiento evolucionan desde la Revolución Industrial, cuando los procesos comenzaron a exigir un mejor desempeño para incremento de producción, con lo cual las tareas se volvieron más complejas, requiriendo de una organización y recursos especiales, en aquella época las tareas eran básicamente correctivas. A raíz de la Segunda Guerra Mundial, nace el concepto de fiabilidad, lo que implicaba que el objetivo del mantenimiento pasaba de solucionar problemas a prevenir su ocurrencia (INTEGRAMARKETS, 2018 p.4).

En la actualidad las operaciones de mantenimiento se centran en realizar estudios sobre los equipos y procesos susceptibles a fallo, aplicando técnicas estadísticas, metodologías de medición, gestión económica de procedimientos, integración multi-departamentos, entre otras, que permitan planificar las tareas y recursos adecuados para evitar que se produzcan fallas o paradas en la producción (INTEGRAMARKETS, 2018 p.4).

En este final de siglo, con las exigencias de incremento de la calidad de los productos y servicios, hechas por los consumidores, el mantenimiento pasó a ser un elemento importante en el desempeño de los equipos, en un grado de importancia equivalente a lo que se venía practicando en operación (Tavares, 2000 p.4).

Estas etapas evolutivas del Mantenimiento Industrial se caracterizaron por la Reducción de Costos y por la Garantía de la Calidad (a través de la confiabilidad y la productividad de los equipos) y Cumplimiento de los tiempos de ejecución (a través de la disponibilidad de los equipos) (Tavares, 2000 p.4).

Los profesionales de mantenimiento pasaron a ser más exigidos, en la atención adecuada de sus clientes, o sea, los equipos, obras o instalaciones, quedando claro que las tareas que desempeñan, se manifiestan como impacto directo o indirecto en el producto o servicio que la empresa ofrece a sus clientes (Tavares, 2000 p.4). Por otro lado, el mantenimiento también tiene sus proveedores, o sea: los contratistas que ejecutan algunas de sus tareas, el área de materiales que abastece

los repuestos y material de uso común, el área de compras que adquiere materiales y nuevos equipos etc.; siendo todos ellos importantes para que el cliente final de la empresa se sienta bien atendido (Tavares, 2000 p.4).

Confiabilidad Operacional

Esta se define como la capacidad de la empresa para cumplir, a través de los procesos, las tecnologías y las personas, con su propósito dentro de los límites del diseño y de las condiciones operacionales. La Confiabilidad Operacional considera una serie de procesos de mejora continua que incorporan, en forma sistemática, herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías para optimizar el proyecto, la gestión, la planeación, la ejecución y el control, asociados con la producción, el abastecimiento y el mantenimiento industrial (ARATA, A. y ARATA, A. 2013 p.38).

Para la búsqueda de la Confiabilidad Operacional es necesario actuar de manera integrada sobre los activos, desde su diseño hasta su operación, como también sobre aspectos relacionados con los procesos y las personas, es así como las componentes que la conforman y que actúan integradamente son la confiabilidad de los procesos, de los suministros, de los activos y de las personas, y la mantenibilidad de los activos (ARATA, A. y ARATA, A. 2013 p.38).

Ingeniería de Confiabilidad

La aplicación de la confiabilidad a la ingeniería de producto y procesos han demostrado excelentes resultados como medio de anticipar y detectar causas de fallas de operación. El desarrollo de pruebas de campo, análisis de fallas y probabilidades de ocurrencia, ofrecen una excelente alternativa para desarrollar productos robustos y procesos capaces de fabricarlos (Acuña, J. 2003 p.15).

La Ingeniería de la Confiabilidad permite identificar las oportunidades, sobre una base cuantitativa y cualitativa, para mejorar la gestión de los activos durante operación de las instalaciones, como también mejorar las soluciones a nivel de

proyecto a través del enfoque LCC, favoreciendo los resultados del negocio (ARATA, A. y ARATA, A. 2013 p.38).

La Ingeniería de la Confiabilidad, a través del compromiso del factor humano y del análisis cuantitativo, debe, a partir del comportamiento de los equipos y de sus configuraciones sistémicas, proyectar, mejorar y controlar la gestión y el mantenimiento de los activos, desde la etapa de concepción de nuevos proyectos hasta su operación. Es la función que entrega valor ya que a través de la modelación de las variables asociadas con la seguridad de funcionamiento de los equipos y sistemas (disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad y utilización), y con los costos globales (costos propios e inducidos), logra identificar los factores críticos de acuerdo a la combinación de la frecuencia de los eventos y su impacto (ARATA, A. y ARATA, A. 2013 p.38).

Confiabilidad

Una de las técnicas que permite estudiar el comportamiento de los productos durante su desarrollo y durante su vida útil en el campo es la confiabilidad. El estudio de la probabilidad de falla que permite estimar en mejor forma la vida del producto es un elemento decisivo para lograr el objetivo de todo sistema de calidad (Acuña, J. 2003 p.13).

La confiabilidad se define como la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña, durante un período de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno (Mora, A. 2009 p.96).

La curva de confiabilidad es la representación gráfica del funcionamiento después de que transcurre un tiempo t en un período T total. Consiste en la representación de la probabilidad de confiabilidad o supervivencia que tiene un elemento, máquina o sistema después de que transcurre un determinado tiempo t (Mora, A. 2009 p.98).

$$R(t) = P[t < T]$$

Donde:

$R(t)$ es la función de confiabilidad o supervivencia, la cual decrece en la medida en que se incrementa el tiempo, al igual $R(0) = 1$ o sea que siempre la probabilidad de confiabilidad de cualquier elemento antes de iniciar su funcionamiento es máxima del ciento por ciento (100%); t es el tiempo determinado para evaluar el funcionamiento. $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$, expresa que todo elemento o máquina, siempre entra en estado de falla, así sea en un tiempo grande o infinito (Mora, A. 2009 p.98).

Los datos analizados mediante distribuciones pueden responder a diferentes características, de acuerdo con el tipo y el evento de estudio, como, por ejemplo, el tiempo de funcionamiento del equipo (MTTF) que pueden medirse en horas, millas, ciclos de fracaso, ciclos de tensión, o cualquier otra medida con que se puedan evaluar la vida o la exposición del ítem (Mora, A. 2009 p.141).

En el presente trabajo, la variable independiente “ t ” no es el tiempo y se toma como variable independiente el tonelaje procesado por la chancadora ya que tiene mayor influencia con respecto al desgaste de las muelas fija y móvil de la chancadora. Siendo el tonelaje procesado una variable aleatoria de tipo continua pues toma cualquier valor real positivo.

Tasa de falla

La función de tasa de fallas permite determinar el número de fallas que ocurren por unidad de tiempo. Omitiendo la derivación, la tasa de falla se da matemáticamente como:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

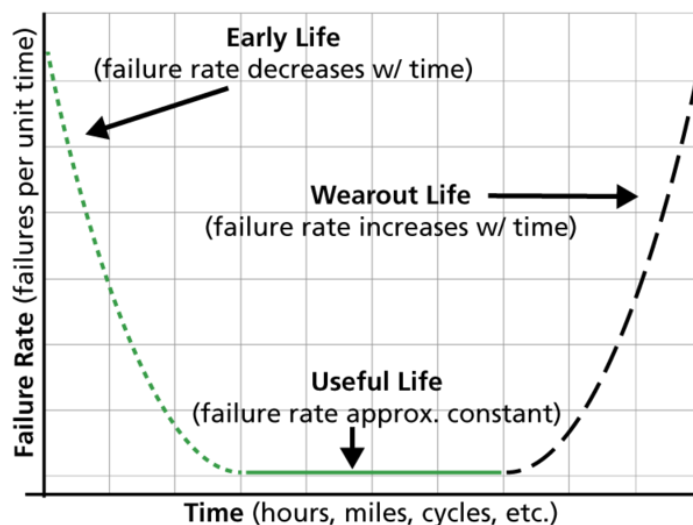
Esto da la tasa de falla instantánea, también conocida como función de riesgo. Es útil para caracterizar el comportamiento de falla de un componente, determinar la asignación del personal de mantenimiento, planificar el aprovisionamiento de repuestos, etc. La tasa de falla se indica como fallas por unidad de tiempo (Reliasoft, 2014 p.14).

Curva de la bañera

La mayoría de los productos exhiben características de falla como se muestra en la curva de la bañera de la siguiente figura. (Tenga en cuenta, sin embargo, que esta figura está algo idealizada).

Esta curva se traza con la vida útil del producto en el eje “x” y con la tasa de falla en el eje “y”. La vida puede ser en minutos, horas, años, ciclos, actuaciones o cualquier otra unidad cuantificable de tiempo o uso. La tasa de fallas se da como fallas entre las unidades supervivientes por unidad de tiempo. Como se puede ver en este gráfico, muchos productos comenzarán su vida con una tasa de fallas más alta (que puede deberse a defectos de fabricación, mano de obra deficiente, control de calidad deficiente de las piezas entrantes, etc.) y exhibirán una tasa de fallas decreciente. Entonces, la tasa de fallas generalmente se estabiliza a una tasa aproximadamente constante en la región de vida útil, donde las fallas observadas son fallas fortuitas. A medida que los productos experimentan un mayor uso y desgaste, la tasa de fallas comienza a aumentar a medida que la población comienza a experimentar fallas relacionadas con el desgaste (Reliasoft, 2014 p.7).

Gráfico 4. Curva de la bañera



Fuente: Tomada de “Life_Data_Analysis_Reference”, por Reliasoft, 2015, p. 7.

Confiabilidad de activos no reparables

Los activos no reparables son aquellos que cumplen lo siguiente:

- Su condición operativa no puede ser restaurada después de una falla.
- Su vida termina con una “única” falla y debe ser reemplazado.

La mayoría de los componentes electrónicos suelen ser considerados “no reparables”. Los bombillos o bulbos de luz son los clásicos ejemplos de equipos no reparables. Sin embargo, es importante destacar que, en esencia, cualquier equipo es reparable; inclusive un bombillo, y es la política o estrategia de mantenimiento y/o reparación la que realmente dice cómo debemos clasificar un equipo o componente. Si la política de mantenimiento es “reemplazar” después de la falla, entonces se clasificará al activo como “no reparable”; si, por el contrario, la política es “reparar y reinstalar” después de la falla, clasificaremos al activo como “reparable” (Yáñez, M., Gómez, H. y Valbuena G. 2004 p.190).

El activo de análisis en este trabajo es la muela fija de la chancadora de mandíbulas CJ412 el cual es un activo no reparable ya que luego de desgastarse por la operación esta se cambia y se dispone como residuo sólido.

Distribución de Weibull

Waloddi Weibull inventó la distribución de Weibull en 1937 y entregó su artículo distintivo estadounidense sobre este tema en 1951. Afirmó que su distribución se aplicaba a una amplia gama de problemas. Ilustró este punto con siete ejemplos que van desde la resistencia del acero hasta la altura de los machos adultos en el Reino Unido. La Fuerza Aérea de los Estados Unidos reconoció el mérito del método de Weibull y financió su investigación hasta 1975. Hoy, el análisis de Weibull es el método líder en el mundo para ajustar y analizar datos de vida (Abernethy, R. 2004 p.13).

El autor descubrió que el método Weibull funciona con muestras extremadamente pequeñas, incluso con dos o tres fallas para el análisis de ingeniería. Esta característica es importante con problemas de seguridad aeroespacial y en pruebas de desarrollo con muestras pequeñas. (Abernethy, R. 2004 p.14).

La distribución de Weibull generalmente proporciona el mejor ajuste de los datos de vida. Esto se debe en parte a la amplia gama de formas de distribución que se incluyen en la familia Weibull. Muchas otras distribuciones se incluyen en la familia Weibull, ya sea de forma exacta o aproximada, incluidas la normal, la exponencial, la de Rayleigh y, a veces, la de Poisson y la Binomial. Si el ajuste de Weibull es deficiente, se deben considerar otras distribuciones a menos que el tamaño de la muestra sea pequeño, menos de 21 fallas. Los datos se pueden graficar en otros papeles de probabilidad para determinar qué distribución se ajusta mejor a los datos. El Log Normal no es miembro de la familia Weibull y es, con mucho, el competidor más importante. El Log Normal es la mejor opción para algunas características del material, para la tasa de crecimiento de grietas y para el deterioro acelerado del sistema no lineal. Las comparaciones de Weibull-Log Normal son mucho más fáciles con el software adecuado. Si hay evidencia de ingeniería que respalde otra distribución, esto debe compararse en gran medida con Weibull. Se necesitan muestras de tamaño moderado, veinte o más fallas, para discriminar con precisión entre la distribución de Weibull y otras distribuciones. Con menos de 20 fallas, Weibull es la mejor opción y, por lo tanto, la mejor práctica (Abernethy, R. 2004 p.18).

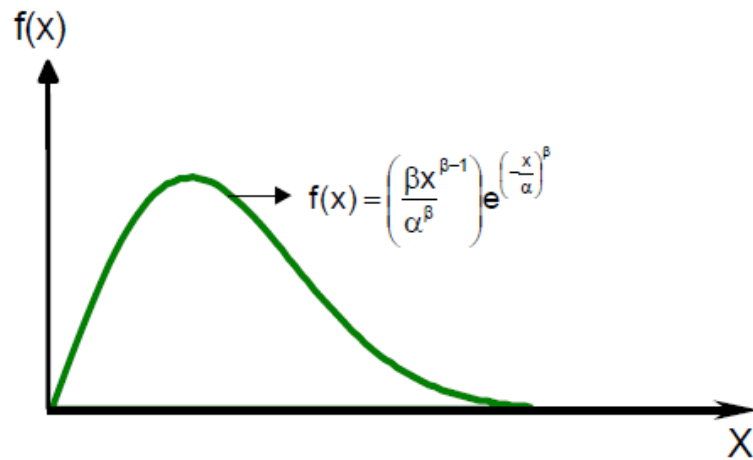
La Distribución Weibull es ampliamente usada en el estudio del tiempo de vida o tiempo para la falla de componentes mecánicos.

Los parámetros de la Distribución Weibull son:

β : Parámetro de forma

α : Parámetro de escala

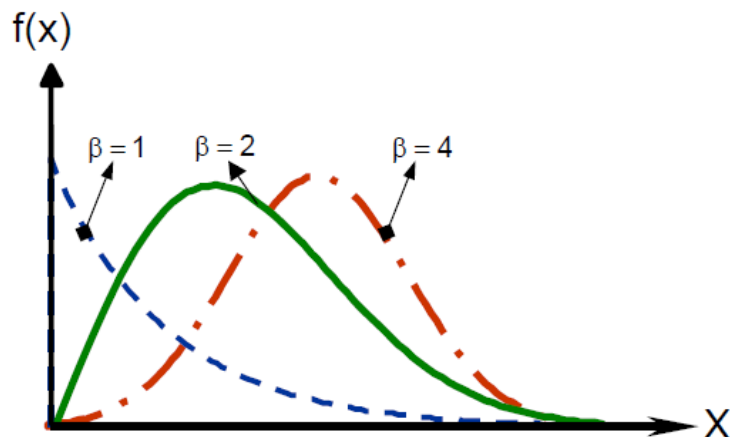
Gráfico 5. Distribución weibull



Fuente: Tomada de “Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo”, por Yáñez, Gómez y Valbuena, 2004, p. 89.

Hay una característica fundamental de las variables que siguen la distribución Weibull: “El número de ocurrencia de eventos por unidad de tiempo no permanece necesariamente constante; es decir, esta tasa de ocurrencia de eventos puede crecer o decrecer con el tiempo” (Yáñez, M. et al. 2004 p.89).

Gráfico 6. Familia de distribuciones weibull



Fuente: Tomada de “Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo”, por Yáñez, Gómez y Valbuena, 2004, p. 89.

La Distribución Weibull es esencialmente una familia de distribuciones que puede asumir las propiedades de otras distribuciones. Por ejemplo, dependiendo de los valores de los parámetros que se definan, puede ser usada como una aproximación a la Exponencial y a la Normal, así como otras (Yáñez, M. et al. 2004 p.89).

Si $\beta = 1$ entonces la Weibull se aproxima a la distribución Exponencial

Si $\beta = 4$ entonces la Distribución de Weibull se aproxima a la Normal

Distribución de Densidad de Probabilidad: $f(t)$

$$f(t) = \left(\frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta}\right) e^{(-\frac{t}{\alpha})^\beta}$$

Distribución de Probabilidad Acumulada: $F(x)$

$$F(t) = 1 - e^{(-\frac{t}{\alpha})^\beta}$$

Parámetros:

Escala: $\alpha = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i^\beta}{n}\right)^{\frac{1}{\beta}}$

Forma: $\frac{\sum_{i=1}^n [x_i^\beta \ln(x_i)]}{\sum_{i=1}^n x_i^\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)$

Otras relaciones importantes:

Moda: $tm = \alpha \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}}$

MTTF: $MTTF = \alpha \Gamma\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)$

Prueba de bondad de ajuste

Una vez que se han definido las Distribuciones Hipótesis teóricas que pudieran representar a la variable aleatoria de interés, el siguiente paso consiste en determinar cuál de esas posibles distribuciones es la que mejor ajuste hace con el conjunto de datos. Para ello se utilizan las llamadas Pruebas de Bondad de Ajuste. De manera sencilla pudiera decirse que la Prueba de Bondad de Ajuste es una comparación entre la Distribución Paramétrica seleccionada y el Histograma de Frecuencia que se puede construir con los datos (Yáñez, M. et al. 2004 p.104).

Bondad de ajuste puede definirse como la probabilidad de reproducir el conjunto de datos de la muestra, a partir de una Distribución Teórica Paramétrica seleccionada; en otras palabras, la estadística definida a partir de la bondad de ajuste permite establecer que tan probable es que una función de Distribución de Probabilidad Paramétrica seleccionada genere el conjunto de datos del que se dispone. La estadística basada en Bondad de Ajuste es usualmente utilizada con sentido relativo mediante la comparación de los valores de Bondad de Ajuste de otras funciones de Distribución de Probabilidad para seleccionar la que mejor representa los datos. Existen diferentes pruebas de Bondad de Ajuste dentro de las cuales se pueden mencionar la Prueba de Chi - Square, la de Kolmogorov - Smirnov y la de Anderson – Darling (Yáñez, M. et al. 2004 p.104).

Estas pruebas consideran las siguientes etapas:

Etapas 1: Graficar cada una de las curvas de las Distribuciones Hipótesis teóricas obtenida con los parámetros estimados en el paso anterior, con el histograma de los datos de la muestra.

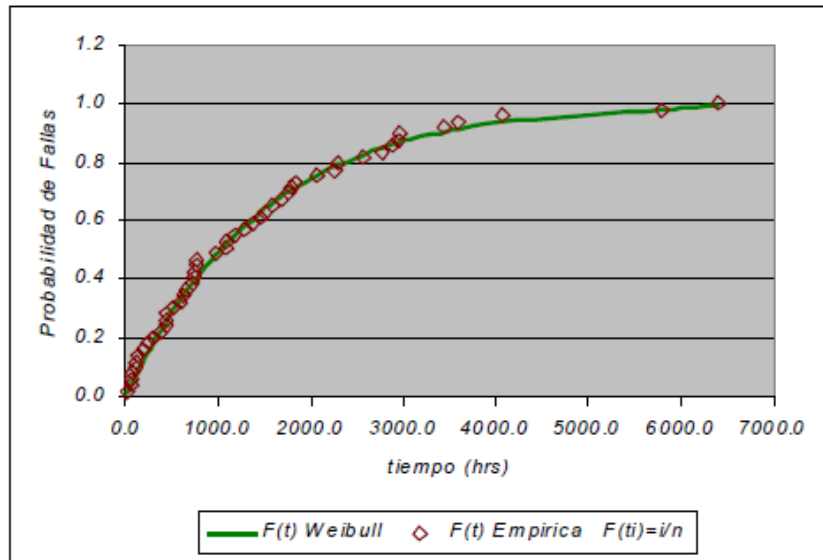
Etapas 2: Calcular para cada Distribución Hipótesis el valor llamado “valor del test” y compararlo contra el valor llamado “valor crítico”.

Etapas 3: Si el valor del test es menor que el valor crítico entonces la Distribución Hipotética se considera un buen ajuste y la hipótesis no es rechazada. Si, por el contrario, el valor del test es mayor que el valor crítico, la hipótesis se rechaza. (Yáñez, M. et al. 2004 p.104).

Prueba de Kolmogorov - Smirnov

Para la prueba se utiliza la función de probabilidad acumulada hipotética seleccionada, la cual es comparada con la función de probabilidad acumulada empírica proveniente de los datos, como se muestra en la figura siguiente (Yáñez, M. et al. 2004 p.107):

Gráfico 7. Distribución de Datos vs Distribución Hipotética o Teórica



Fuente: Tomada de “Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo”, por Yáñez, Gómez y Valbuena, 2004, p. 107.

La estadística para la prueba de Kolmogorov – Smirnov de uso más común es la presentada por Law y Kelton (1982):

$$K - S_{VALUE} = \text{máximo}(|F(t_i) - \hat{F}(t_i)|; |F(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})|)$$

n = número total de datos; $i=1, 2, 3, \dots, n$

$F(t_i)$: Distribución acumulada hipotética para el valor t_i

$\hat{F}(t_i) = \frac{N_{t_i}}{n}$: Distribución empírica

N_{t_i} = Número de datos menores que t_i

En este punto es importante recordar que, para realizar estos cálculos, los datos de la muestra deben ordenarse en forma ascendente (Yáñez, M. et al. 2004 p.108).

La estimación de los valores críticos para las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y de Anderson – Darling se hace muy difícil desde el punto de vista analítico y por tal razón, los mismos son estimados utilizando la técnica de simulación de Monte Carlo según lo explicado por Stephens (1974), Stephens (1977) y Chandra (1981).

A diferencia de la prueba de Chi – Cuadrado, en la cual el valor crítico es el mismo para todas las distribuciones, las Pruebas de Kolmogorov – Smirnov incluye casos especiales para la Distribuciones Normal, Exponencial, Weibull y de Valor Extremo. Para las distribuciones restantes el valor crítico es estimado utilizando una prueba denominada “todos los parámetros conocidos”, la cual es más conservadora que las pruebas para distribuciones específicas (Yáñez, M. et al. 2004 p.108).

Los valores críticos dependen del nivel de significancia seleccionado.

Nivel de significancia

Suponga que queremos probar la hipótesis a un nivel de significancia de α ; esto significa que estamos dispuestos a aceptar α como el riesgo de rechazar erróneamente la hipótesis, es decir, $F_0(t) = F(t)$, cuando es verdadera. Esto se conoce como error de tipo I en las pruebas estadísticas. Reducir el nivel de significancia, α , sin aumentar el tamaño de la muestra al mismo tiempo aumentará otro tipo de riesgo: el riesgo de aceptar erróneamente la hipótesis cuando no es cierta; esto se conoce como error de tipo II. El nivel de significancia utilizado representa una compensación entre el costo del muestreo y el riesgo de tomar decisiones incorrectas a partir de la prueba. Los valores típicos del nivel de significancia son 1%, 2%, 5%, 10% y 20% (Jardine, A. y Tsang, A. 2013 p.249).

Los valores críticos para el test de Kolmogorov-Smirnov, pueden hallarse en la gráfica 26 (ver anexos), a la cual se entra con n (tamaño de la muestra) y el nivel de significancia (Yáñez, M. et al. 2004 p.108).

Disponibilidad

Como disponibilidad se define la probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables, donde el tiempo total considerado incluye el tiempo de operación, el tiempo activo de reparación, el tiempo inactivo, el tiempo en mantenimiento preventivo (en algunos casos), el tiempo administrativo, el tiempo de funcionamiento sin producir y el tiempo logístico (Mora, 2009 p.67).

Es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un equipo. La mayoría de los usuarios aseguran que necesitan la disponibilidad de un equipo tanto como la seguridad. Hay varios métodos para lograrlo, y uno es construir un equipo que cuando falle sea fácil de recuperar, y el otro es que sean confiables y, por lo tanto, demasiado costosos (Mora, 2009 p.67).

La disponibilidad es la relación entre la diferencia del número de horas del periodo considerado programado para producir (horas programadas) con el número de horas de intervención por el personal de mantenimiento (mantenimiento preventivo por tiempo o por estado, mantenimiento correctivo y otros servicios) para cada ítem observado y el número total de horas del periodo considerado (Tavares, 2000 p.54).

En las empresas que producen las 24 horas de cada día se considera como horas programadas las horas calendario, siendo este el caso de la mayoría de empresas mineras. Por tanto, la disponibilidad es calculada en base a la siguiente relación:

$$Disponibilidad = \frac{\textit{Tiempo total programado} - \textit{Tiempo de mantenimiento}}{\textit{Tiempo total programado}}$$

Chancado de minerales

El área de chancado de minerales tiene como función reducir el tamaño de los minerales extraídos de las minas sea de tajo abierto o subterráneo, mediante un proceso llamado conminución realizado por unos equipos llamados chancadoras y de esta manera liberar el mineral valioso e incrementar la superficie específica de las partículas para de esta manera acelerar la velocidad de reacción en los siguientes procesos como molienda y flotación.

La conminución es un proceso en el cual la energía cinética-mecánica de una máquina (chancadoras en minería) es transferida a una mena (mineral extraído de la mina sin limpiar) produciendo en ella fricciones internas y calor que originan su ruptura.

El chancado se divide en 2 o 3 etapas dependiendo de cada empresa, por lo general son 3 en minería como es el caso de Sociedad Minera El Brocal SAA, donde el chancado primario tiene función de reducir el mineral desde 500 mm de tamaño hasta 100 mm, luego el chancado secundario reduce el mineral de 100 mm de tamaño hasta 47 mm y finalmente el chancado terciario reduce el mineral de 47 mm de tamaño hasta 10 mm que es el producto final del área de chancado y luego pasa a la etapa de molienda.

Para las etapas de chancado primario normalmente se utilizan chancadoras de mandíbulas, chancadora giratoria, chancadora de rodillos o chancadora de impacto. En Sociedad Minera El Brocal se utiliza chancadora de mandíbulas y específicamente de la marca Sandvik y modelo CJ412.

Los equipos estáticos comúnmente utilizados en el área de chancado de la mayoría de empresas mineras son chancadoras, transportador de placas (aprom feeder), zarandas y fajas transportadoras, los cuales vienen equipados con sistemas de protección ante condiciones anormales de operación y sistemas de seguridad para proteger a las personas que operen los equipos mencionados.

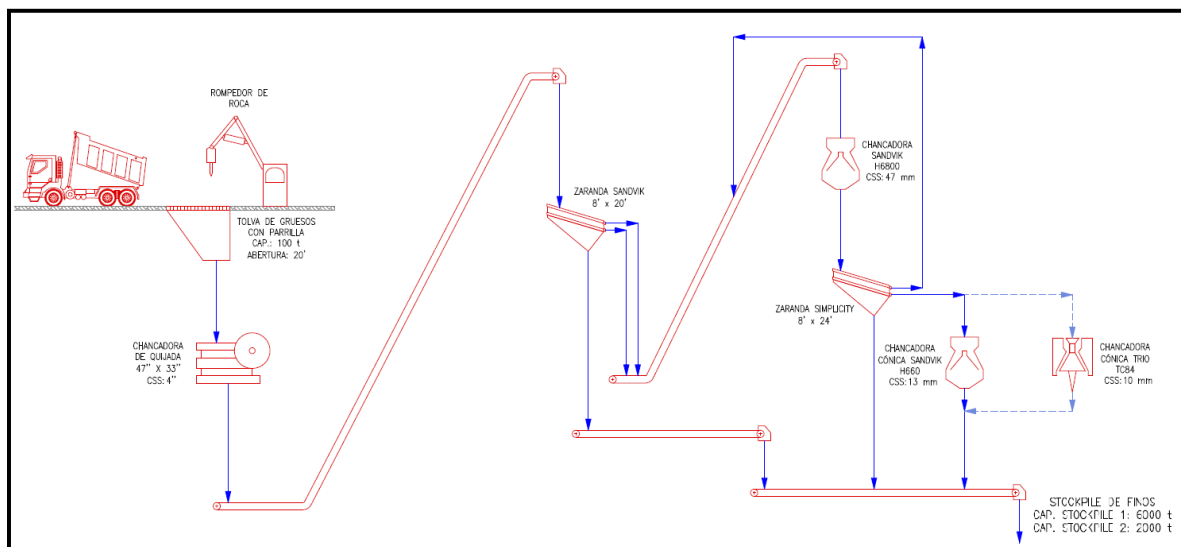
A continuación, se muestra el diagrama de flujo simplificado del área de chancado de cobre, donde se puede observar que la alimentación de mineral se da a través de camiones volquete que descargan en la tolva de gruesos.

El mineral con tamaño mayor a 500 mm es reducido por acción del rompedor de roca y el mineral menor a 500 mm ingresa a la cámara de la chancadora primaria sandvik CJ412 donde por acción de las muelas se reduce el tamaño hasta 100 mm, luego pasa por una zaranda de tipo banana para clasificar tamaños mayores a 47 mm que serán transportados hacia la chancadora secundaria y los tamaños menores de 47 mm van directamente a la chancadora terciaria.

En chancado secundario se cuenta con una chancadora tipo cónica que reduce el tamaño de mineral desde 100 mm hasta 47 mm, luego el producto pasa por una zaranda de clasificación de 10 mm, donde el mineral de tamaño menor a 10 mm va hacia el stock pile y el mineral de tamaño mayor a 10 mm va al chancado terciario donde también se cuenta con una chancadora de tipo cónica que asegura una reducción hasta los 10 mm para finalmente almacenarse todo en el stock pile.

El mineral con tamaño menor a 10 mm del stock pile alimenta al área de molienda para continuar con el proceso de concentración.

Gráfico 8. Circuito simplificado de Chancado de Cobre.



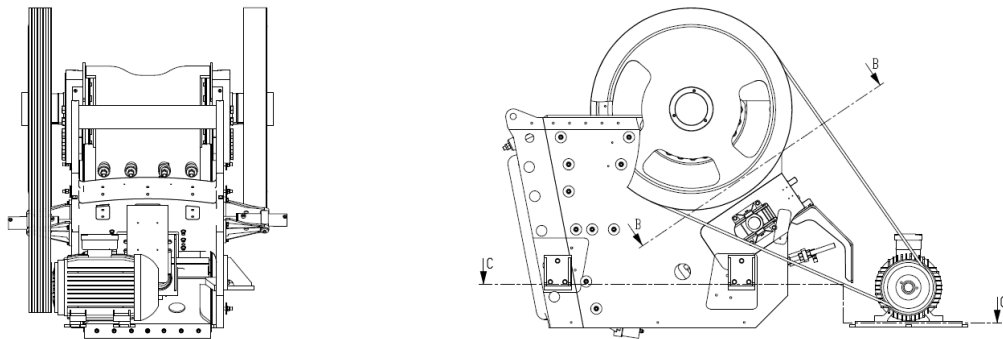
Tomado de "Diagrama de flujo del proceso", por BISA, 2018.

Chancadora de Mandíbulas

La chancadora de mandíbulas cuenta con una mandíbula fija y una mandíbula móvil, donde esta última tiene un movimiento oscilatorio proporcionado por una biela motriz que a su vez es generado por un eje excéntrico.

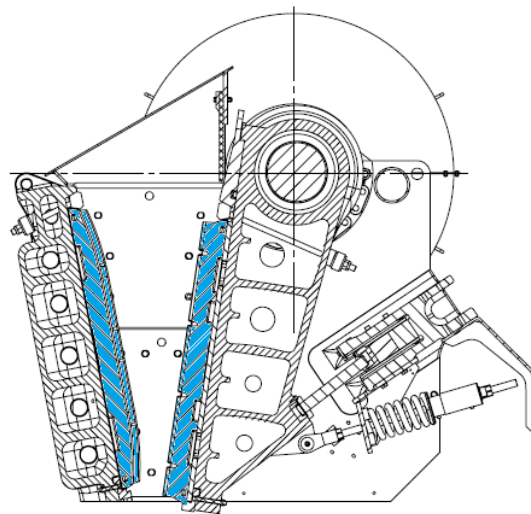
Este movimiento es transferido a la placa de la articulación delantera y ésta, a su vez, causa que la mandíbula móvil se aproxime a la mandíbula fija. Similarmente, el movimiento hacia abajo de la biela motriz permite que la mandíbula móvil se abra.

Gráfico 9. Vistas de Chancadora Sandvik CJ 412



Fuente: Tomada de “Plano CJ 412 _400.1255-901” por Sandvik, 2005.

Gráfico 10. Vista de muelas fija (lado izquierdo) y muela móvil (lado derecho).



Fuente: Tomada de “spare parts catalog Sandvik CJ412:01” por Sandvik, 2010, p.

4.

2.2.1 Definición de términos básicos

De acuerdo a la norma europea UNE UN 13306:2008 (p.6-24), que define la terminología de mantenimiento, se tiene la siguiente definición de términos básicos:

- **Mantenimiento:** Combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión realizadas durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o a devolverlo a un estado en el que pueda desempeñar la función requerida.
- **Gestión del Mantenimiento:** Todas las actividades de la gestión que determinan los requisitos, los objetivos, las estrategias y las responsabilidades del mantenimiento y la implantación de dichas actividades por medios tales como la planificación del mantenimiento, el control de este y la mejora de las actividades de mantenimiento y las cuestiones económicas.
- **Objetivos del mantenimiento:** Metas asignadas y aceptadas para las actividades de mantenimiento.
NOTA Estas metas pueden incluir, por ejemplo, la disponibilidad, la reducción de costes, la calidad del producto, la protección del medio ambiente, la seguridad, la vida útil y la preservación del valor del activo.
- **Estrategia de mantenimiento:** Método de gestión utilizado para lograr los objetivos del mantenimiento.
NOTA Algunos ejemplos podrían ser: la contratación externa del mantenimiento, la adjudicación de recursos, etc.
- **Plan de mantenimiento:** Conjunto estructurado y documentado de tareas que incluyen las actividades, los procedimientos, los recursos y la duración necesaria para realizar el mantenimiento.
- **Activo físico:** Elemento que tiene un valor real o potencial para una organización.

NOTA Ejemplos de un activo físico son componentes, máquinas, plantas, edificios, infraestructuras, etc.

- **Elemento reparable:** Elemento que, después de un fallo y bajo condiciones dadas, se puede devolver a un estado en el que pueda realizar una función requerida.

NOTA Las condiciones dadas pueden ser económicas, ecológicas, técnicas y/o de otro tipo.

- **Elemento consumible:** Elemento o material que es fungible, que puede ser sustituido de forma regular y que generalmente no es un elemento específico.

NOTA Normalmente, los elementos consumibles son de un coste relativamente bajo comparado con el elemento en sí.

- **Repuesto:** Elemento destinado a sustituir a un elemento análogo, con objeto de conservar o mantener la función original requerida del elemento.

NOTA 1 El elemento original se puede reparar posteriormente.

NOTA 2 En inglés, un elemento que sea dedicado y/o intercambiable con un elemento específico, con frecuencia se denomina replacement item.

- **Mantenibilidad:** Capacidad de un elemento bajo condiciones de utilización dadas, de ser preservado, o ser devuelto a un estado en el que pueda realizar una función requerida, cuando el mantenimiento se ejecuta bajo condiciones dadas y utilizando procedimientos y recursos establecidos.

- **Disponibilidad:** Capacidad de un elemento de estar en un estado en el que puede cumplir una función de la manera y en el momento requeridos en las condiciones dadas, asumiendo que se proporcionan los recursos externos necesarios.

NOTA 1 Los recursos externos requeridos, que no sean recursos de mantenimiento, no afectan la disponibilidad del elemento, aunque es posible que el elemento no esté disponible desde el punto de vista del usuario.

NOTA 2 Esta capacidad depende de los aspectos combinados de la fiabilidad, la mantenibilidad del elemento, la compatibilidad con la

sostenibilidad del mantenimiento y las acciones de mantenimiento llevadas a cabo en el elemento.

NOTA 3 La disponibilidad puede cuantificarse utilizando medidas o indicadores apropiados denominándose entonces desempeño de la disponibilidad.

- **Durabilidad:** Capacidad de un elemento de realizar una función requerida bajo condiciones dadas de utilización y de mantenimiento, hasta el final de la vida útil.
- **Redundancia:** En un elemento, es la existencia de más de un medio para realizar una función requerida cuando se necesite.
- **Vida útil:** Intervalo de tiempo que comienza a partir del primer uso hasta el instante en que se alcanza el estado límite.

NOTA 1 El estado límite puede ser una función de la tasa de fallos, de requisitos de soporte de mantenimiento, de las condiciones físicas, de los aspectos económicos, de la edad, de la obsolescencia, de los cambios en los requisitos del usuario, o de otros factores relevantes.

NOTA 2 El estado límite puede redefinirse mediante cambios en las condiciones de uso.

NOTA 3 En este contexto, el "primer uso" excluye las actividades de prueba antes de la entrega del elemento al usuario final.

- **Fallo:** Cese de la aptitud de un elemento para realizar una función requerida.
NOTA 1 Después del fallo el elemento presenta una avería, que puede ser total o parcial. NOTA 2 El "fallo" es un evento que se debe diferenciar de la "avería", que es un estado.

NOTA 3 El concepto tal como se ha definido no es de aplicación a elementos constituidos sólo por software.

- **Modo de fallo DESACONSEJADO modo de avería:** Manera en que se produce la inaptitud de un elemento para realizar una función requerida.
NOTA 1 Un modo de fallo se puede definir por la pérdida de función o por un cambio de estado que se ha producido.

- **Causa de fallo:** Circunstancias habidas durante la especificación, el diseño, la fabricación, la instalación, la utilización o el mantenimiento que provocan el fallo.
- **Mecanismo de fallo:** Procesos físicos, químicos o de otros tipos que pueden conducir o han conducido al fallo.
- **Severidad (de un fallo o de una avería):** Consecuencias perjudiciales potenciales o reales de un fallo o de una avería.
 NOTA 1 La severidad de un fallo puede estar relacionada con la seguridad, la disponibilidad, los costes, la calidad, el medio ambiente, etc.
- **Criticidad (de un fallo o de una avería):** Índice numérico de la severidad de un fallo o de una avería combinado con la probabilidad o frecuencia de su ocurrencia.
 NOTA 1 En este contexto, el índice numérico se puede definir, por ejemplo, como un área en el diagrama matricial de frecuencia de ocurrencia del fallo – severidad.
- **Avería:** Estado de un elemento caracterizado por la inaptitud para realizar una función requerida, excluyendo la inaptitud durante el mantenimiento preventivo o por otras acciones planificadas, o debido a la falta de recursos externos.
 NOTA 1 Una avería, generalmente, es la consecuencia de un fallo, pero en algunas circunstancias, como la especificación de diseño, la construcción o el mantenimiento puede tratarse de una avería preexistente. Véase avería latente.
- **Mantenimiento preventivo:** Mantenimiento llevado a cabo para evaluar y/o mitigar la degradación y reducir la probabilidad de fallo de un elemento.
- **Mantenimiento predeterminado:** Mantenimiento preventivo que se realiza de acuerdo con intervalos de tiempo establecidos o con un número definido de unidades de funcionamiento, pero sin análisis previo de la condición del elemento.

NOTA 1 Los intervalos de tiempo o el número de unidades de funcionamiento se pueden establecer a partir del conocimiento de los mecanismos de fallo del elemento.

- **Mantenimiento basado en la condición:** Mantenimiento preventivo que incluye una combinación de la evaluación de las condiciones físicas, el análisis y las posibles acciones de mantenimiento posteriores.

NOTA 1 La evaluación de la condición se puede realizar mediante la observación del operador y/o inspección, y/o pruebas, y/o monitorización de la condición de los parámetros del sistema, etc., realizada de acuerdo con un cronograma, bajo petición o en forma continua.

- **Mantenimiento predictivo:** Mantenimiento basado en la condición que se realiza siguiendo una predicción obtenida del análisis repetido o de características conocidas y de la evaluación de los parámetros significativos de la degradación del elemento.

- **Mantenimiento activo:** Parte del mantenimiento durante el cual las acciones se llevan a cabo directamente en un elemento para mantenerlo o restaurarlo a un estado en el que pueda realizar la función requerida

NOTA 1 El mantenimiento preventivo activo es la parte del mantenimiento preventivo donde se llevan a cabo acciones para restaurar un elemento directamente o bien siguiendo las degradaciones observadas a través de la monitorización de la condición, inspección o prueba.

NOTA 2 El mantenimiento correctivo activo es la parte del mantenimiento correctivo en el que se llevan a cabo acciones para restaurar el elemento.

- **Mantenimiento correctivo:** Mantenimiento que se realiza después del reconocimiento de una avería y que está destinado a poner a un elemento en un estado en que pueda realizar una función requerida.
- **Mantenimiento correctivo diferido:** Mantenimiento correctivo que no se realiza inmediatamente después de detectarse una avería, sino que se retrasa de acuerdo con reglas dadas.

- **Mantenimiento correctivo inmediato:** Mantenimiento correctivo que se realiza sin dilación después de detectarse una avería, a fin de evitar consecuencias inaceptables.
- **Mantenimiento programado:** Mantenimiento que se realiza de acuerdo con un programa de calendario establecido o un número establecido de unidades de utilización.
- NOTA 1 El mantenimiento correctivo diferido también puede ser programado.
- **Mantenimiento oportunista:** Mantenimiento preventivo o mantenimiento correctivo diferido realizado sin programación al mismo tiempo que otras acciones de mantenimiento o eventos particulares para reducir costos, indisponibilidad, etc.
- **Historial de mantenimiento:** Parte de la documentación de mantenimiento que contiene el historial de todos los datos relativos al mantenimiento de un elemento.
- **Tiempo medio entre fallos MTBF (Mean Time Between Failures):** Media de los tiempos entre fallos.
NOTA 1 En el campo de la fiabilidad, el tiempo medio entre fallos se define como la esperanza matemática del tiempo entre fallos.
- **Tiempo medio hasta la recuperación, MTTR (Mean Time To Restoration):** Media aritmética de los tiempos hasta la recuperación.

Otras definiciones:

- **Falla funcional:** Es la incapacidad de un componente de realizar una función estándar bajo parámetros establecidos.
- **Falla potencial:** Es una condición física identificable de un componente.
- **Falla total:** Es la condición en la que un equipos o componente no realiza ninguna función.
- **Efecto de falla:** Es la consecuencia de que ocurra un modo de falla en un componente.

- **Indicador de mantenimiento:** Es un valor que nos permite medir el avance que se tiene en el cumplimiento de objetivos del área de mantenimiento.
- **Árbol lógico de fallas:** Es una metodología deductiva para determinar un modo de falla y sus efectos.
- **Informe de mantenimiento:** Documento en el que se describe las actividades que han sido ejecutadas en un equipo y que sirve de referencia para posteriores intervenciones.
- **Manual de operación:** Documento en el que se describe los parámetros de operación del equipo, la forma correcta de uso y las precauciones de seguridad que debe tener el operador.
- **Lista de repuestos:** Documento en el que se describe los repuestos que conforman un equipo, detallando el modelo, número de serie, número de parte, posición de acuerdo a plano y cantidad. En algunos casos se detalla la criticidad de los repuestos.
- **Almacén:** Espacio físico en el que se almacenan repuestos, consumibles y materia prima.
- **SAP:** Representa las siglas en alemán de Systeme anwendungen und produkte, que en español significa sistemas, aplicaciones y productos, es un sistema ERP centralizado para administrar recursos humanos, financieros, logísticos, proyectos, mantenimiento y materiales de una empresa.
- **Sistema ERP:** Representan las siglas de Enterprise resource planning, que en español significa planificación de los recursos empresariales, son programas que ayudan a gerenciar recursos, servicios y productos de una empresa.

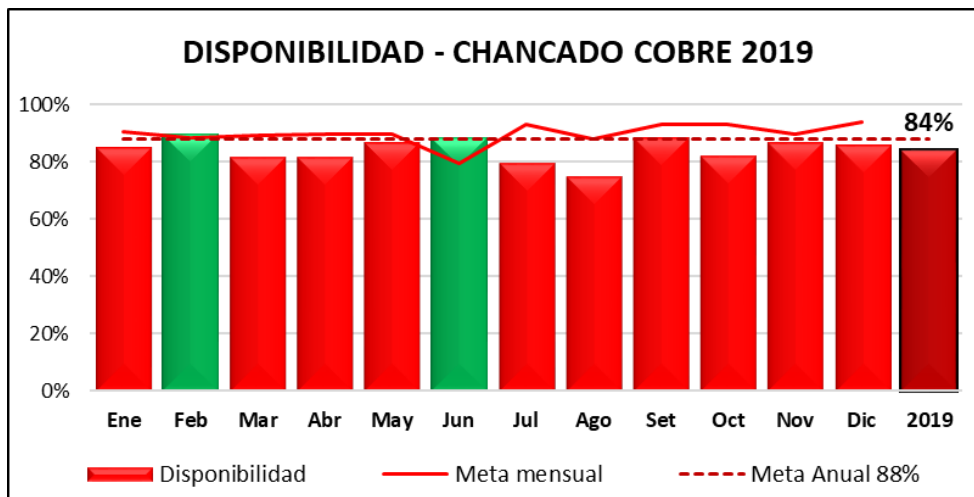
2.3 Descripción de las actividades desarrolladas

2.3.1 Evaluación inicial

Debido al precio de los metales cobre, plomo y zinc se tiene una especial atención a la planta N°1 que trata el mineral de cobre que tiene una tendencia creciente de su precio.

El año 2019 se tuvo una baja disponibilidad del área de chancado cobre igual a 84%, por debajo de la meta anual prevista en 88% de disponibilidad.

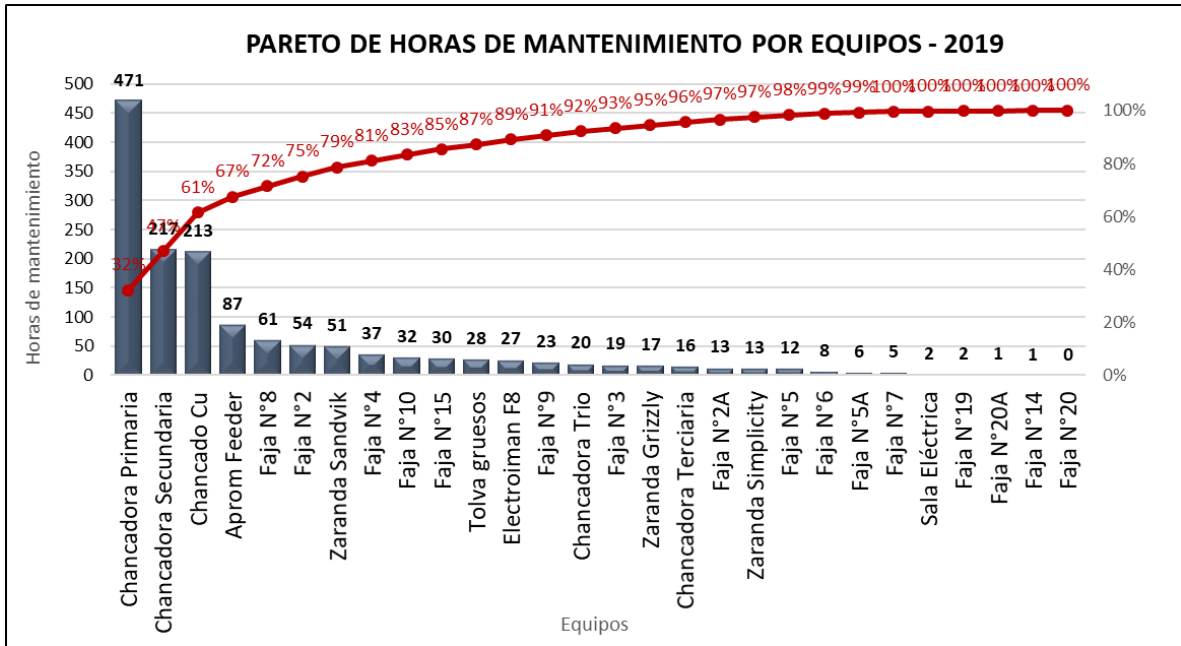
Gráfico 11. Disponibilidad mensual de Chancado Cu del año 2019



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019.

Como Ingeniero de Confiabilidad, la primera acción realizada fue recolectar todos los eventos que ocasionaron parada del área de chancado cobre en todo el año 2019, para luego realizar un tratamiento de estos datos que permitan realizar un análisis de los mismos. Se realizó una clasificación de equipos causantes de las detenciones en el área de Chancado Cobre y mediante la técnica del principio de Pareto se dio enfoque a aquel que mayor cantidad de horas detenidas produjo.

Gráfico 12. PARETO Horas de mantenimiento por equipos, Chancado Cu 2019

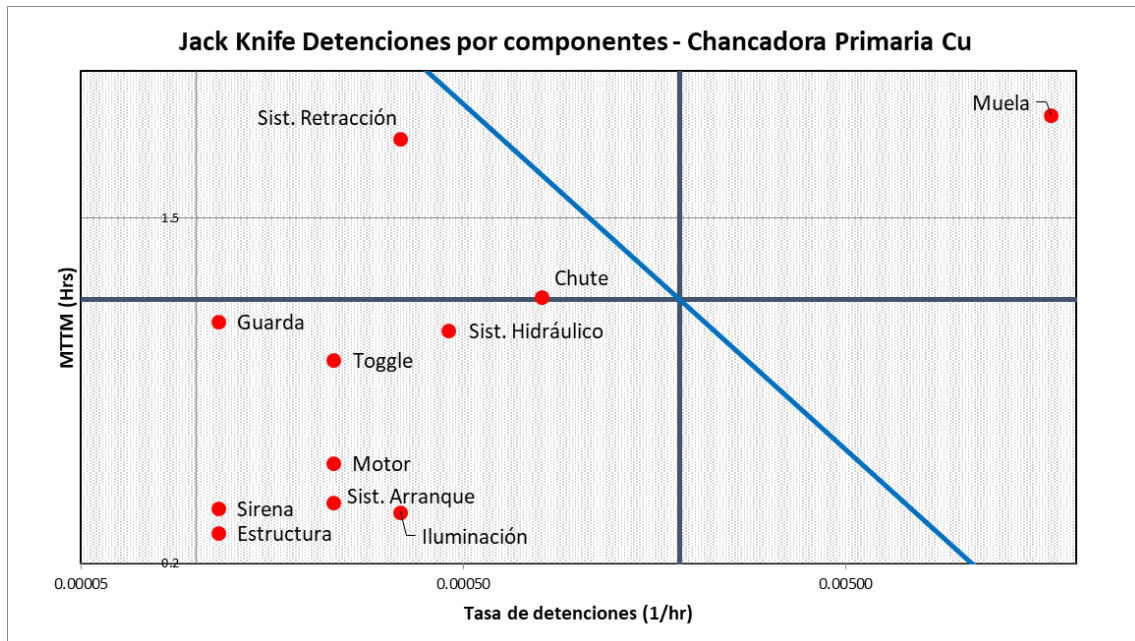


Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019

2.3.2 Identificación de la causa crítica

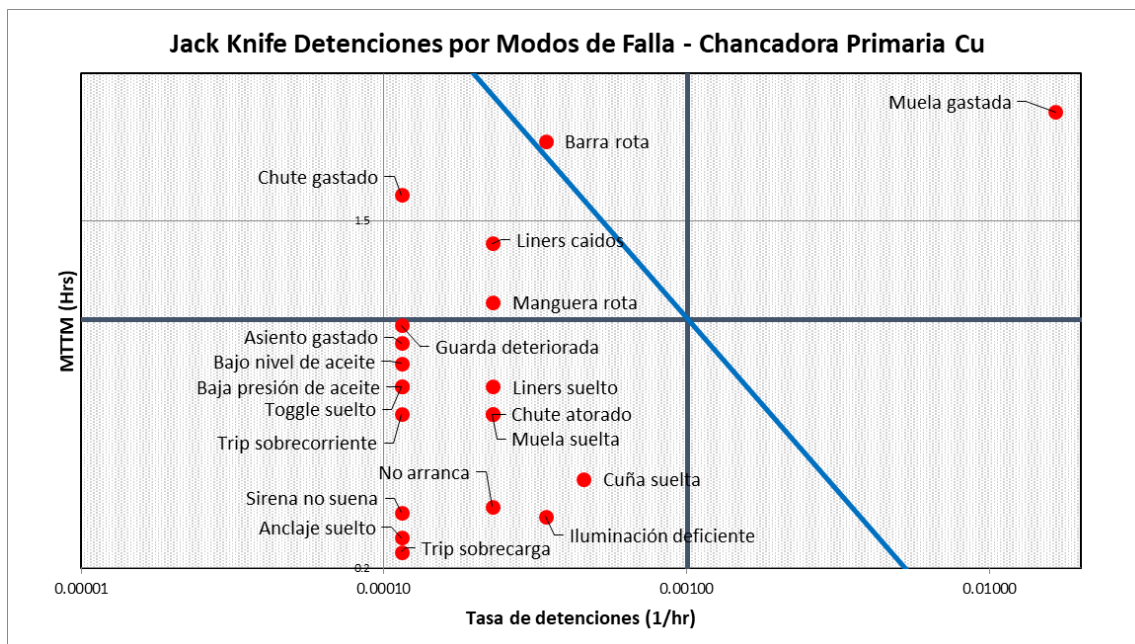
Una vez determinado el equipo de mayor criticidad para este análisis el cual fue la Chancadora Primaria que es de tipo mandíbulas fabricado por Sandvik y de modelo CJ412, se tratan los datos a fin de identificar los componentes y modos de falla los cuales son priorizados esta vez mediante un diagrama Jack Knife. Este diagrama Jack Knife finalmente mostró el componente y modo de falla que se debe atacar para mejorar la disponibilidad.

Gráfico 13. JACK KNIFE Componentes de la Chancadora Primaria de Cu



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019

Gráfico 14. JACK KNIFE Modos de falla de la Chancadora Primaria de Cu



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019

Se determina que el desgaste de muelas es el principal modo de falla de la Chancadora Sandvik CJ412 a analizar a detalle.

De las 471 horas detenidas de la Chancadora Sandvik, 449 horas son debido al modo de falla “desgaste de muelas” que representa un 95.3% de las horas de mantenimiento realizado en el área de Chancado de cobre.

Se muestra el consumo de muelas fijas y móviles realizados durante el año 2019:

Tabla 3. Consumo de muelas fijas y móviles 2019

Consumo 2019	Cantidad	Costo
MUELAS FIJAS	60	\$624,420
MUELAS MÓVILES	12	\$114,252

Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019

Una vez instalada las muelas se controla el desgaste de acuerdo a la recomendación del fabricante, y se gira cuando las crestas llegan a estar a la misma altura del valle para continuar monitoreando de la misma forma y al llegar al desgaste máximo se realiza el cambio por otra muela nueva.

Los giros y cambios de muelas móviles se hacen coincidir con los giros o cambio de muelas fijas.

Tabla 4. Tiempos de giro y cambio de muelas

Tiempos	Giro	Cambio
MUELA FIJA y MUELA MÓVIL	3.5 horas	5.5 horas
SOLO MUELA FIJA	2.5 horas	4.5 horas

Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019

Finalmente, ingeniería de confiabilidad soportado por herramientas de tratamiento y análisis de datos muestra la causa principal de la baja disponibilidad del área de chancado de cobre, donde la causa principal fue las detenciones por cambio y giro de muela fija de la chancadora primaria sandvik CJ412, que también genera un

efecto de alto costo de repuesto en este equipo, por lo que la solución a esta causa impactó tanto en disponibilidad como en ahorro de costos de mantenimiento.

2.3.3 Determinación de la estrategia

El desgaste de muelas es propio de la operación ya que estas muelas están en contacto directo con el mineral a chancar, pero la misión es extender el tiempo de duración entre cambios de muelas debido a desgaste para de esta manera reducir el número de paradas anuales e incrementar la disponibilidad de chancado de cobre, por lo que se analiza las variables que intervienen en el proceso de desgaste:

Mineral tratado: Las características del mineral como índice de abrasión e índice de dureza son directamente proporcionales al desgaste de las muelas, pero buscar reducir estas características del mineral no es viable ya que incidiría en el cambio de minado de vetas y va en contra de la producción, que es el fin global de la unidad.

Condiciones de operación: El tamaño de alimentación de mineral es de 20" garantizado por una parrilla ubicado en la tolva de alimentación y es menor al tamaño máximo indicado en manual que es de 29.5", la regulación CSS (ajuste de extremo cerrado) de la chancadora es de 4" y está dentro de la tolerancia del equipo que según diseño debe ser entre 2.9" y 10.8". Por lo expuesto, se verifica que el equipo se encuentra operando en condiciones normales.

Diseño y aleación de muelas: Las muelas utilizadas son la alternativa "heavy duty" originales de Sandvik con aleación M1 y composición no mencionada debido a que es ingeniería del fabricante. Por tanto, se considera una oportunidad el utilizar diseños y aleaciones mejoradas de muelas que tengan un mayor rendimiento aprovechando el avance tecnológico de los materiales y empresas de fundición alternativas a Sandvik.

2.3.4 Desarrollo de protocolo contra rendimiento

Se propone realizar una licitación a empresas de fundición con experiencia en muelas y revestimientos de chancadoras, que estén dispuestas a asumir el reto de mejorar el tiempo de vida de las muelas actualmente utilizadas, para lo cual se prepara un protocolo de pruebas que incluye pagos contra rendimiento basado en el indicador de costo muela por tonelada tratada (\$/t). El periodo de prueba sería realizado en todo el año 2020, para luego en el 2021 utilizar solo los productos de aquellos 02 proveedores que mejor rendimiento hayan obtenido.

Se procede a determinar la estructura del protocolo:

- a. Condiciones de pago contra rendimiento.
- b. Datos de operación.
- c. Datos del mineral.
- d. Datos de la muela fija.
- e. Cálculo de indicador línea base.
- f. Fuente de información.
- g. Indicadores de evaluación

a. Condiciones de pago contra rendimiento:

Se alinea con la superintendencia de mantenimiento y jefatura de compras las condiciones a imponer a los proveedores participantes, dando resultado:

- Si la duración de la muela es menor al 70% del MTTF línea base no se realizará pago alguno al proveedor.
- Si la duración de la muela es mayor al 85% del MTTF línea base se realizará el pago del 100% del valor de la muela fija al proveedor.
- Si la duración de la muela esta entre 70% y 85% del MTTF línea base se le pagará el mismo porcentaje del valor de la muela fija al proveedor.

a. Datos de operación

Tamaño de mineral alimentado: 20”
Tamaño de mineral chancado: 4”
Ritmo de operación: 400 t/h en promedio

b. Datos del mineral

Mineral tratado: Mineral de cobre
Humedad: 4% - 6%
Índice de abrasión: 0.62 a 0.85
Bond Work Index (BWi): 15 - 18 Kwh/mt

c. Datos de la muela fija

Se proporciona una muela nueva para escaneo de medidas y una muela usada para mediciones de dureza, los cuales son necesarios para determinar la aleación y perfil mejorado a suministrar por los proveedores.

d. Cálculo de indicador línea base

Primeramente, se realiza el cálculo del MTTF de la muela fija mediante modelamiento estadístico weibull, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5. Parámetros de modelamiento weibull línea base

Parámetro	Valor
# Datos	60
Beta	3.57
Eta	46,588
MTTF (t)	41,964
R(MTTF)	50%

Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019

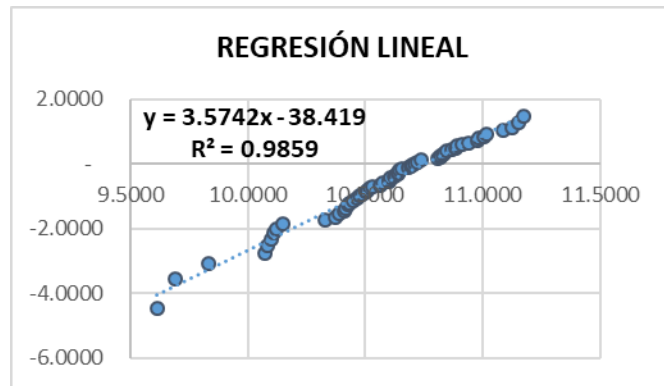
Seguido, se realiza la prueba de bondad de ajuste tomando el modelo de Kolmogorov-Smirnov para validar el uso del modelo weibull.

Tabla 6. Parámetros de la prueba de bondad de ajuste línea base

Parámetro	Valor
Nivel de significancia	0.20
Valor crítico	0.1381364
Valor del test	0.0701753
Distribución WEIBULL:	ACEPTADO

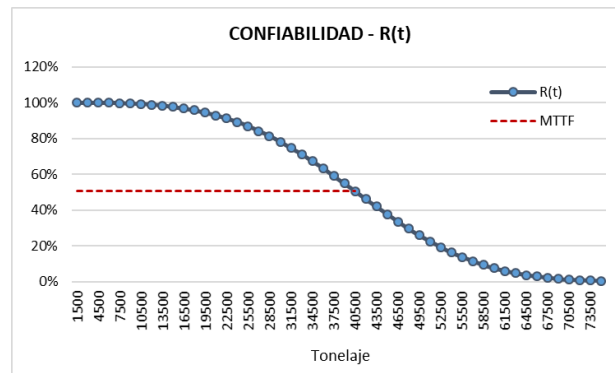
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019

Gráfico 15. Regresión lineal weibull línea base



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019

Gráfico 16. Curva de confiabilidad acumulada línea base



/Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2019

De las órdenes de compra por muelas fijas emitidas, se tiene un costo unitario de \$ 10,407.00.

El KPI línea base es la relación \$ 10,407.00 / 41,964 t; obteniendo KPI = 0.248 \$/t y el reto es lograr reducir este valor.

e. Fuente de información

Las fechas de instalación, giro y retiro de muelas se encuentran corroboradas con el control de gestión por parte del área de Programación de Mantenimiento Chancado y tienen asociados los números de orden SAP.

Los tonelajes procesados durante los días de pruebas son tomados del registro de pesaje de la balanza instalada en la Faja N°7 de Chancado Cu, verificando que los valores se encuentran dentro de una operación normal y extraídos por medio del PI DATA LINK bajo la señal “\\192.168.128.14\400:WIT001_Real.T”.

f. Indicadores de evaluación

La evaluación de salida comprende de 2 puntos:

- MTTF obtenido del producto en prueba: Este valor indicará el monto a pagar al proveedor según las condiciones de pago estipuladas.
- KPI (\$/t): Este indicador debe ser menor al valor de línea base y se escogerá trabajar con aquellos 2 proveedores que obtengan los menores valores entre todos y lógicamente que sea menor al valor de línea base.

2.3.5 Control de pruebas

Durante el 2020 se realizó prueba de muelas fijas con 05 distintos proveedores cuya razón social no es mostrada por ser información confidencial de la unidad minera, los cuales proporcionaron 06 muelas cada uno para las pruebas respectivas contra rendimiento que fueron instalados, girados y retirados según cuadro mostrado en el anexo 4.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de cada proveedor basados en el modelamiento weibull con la respectiva prueba de bondad de ajuste para validar que los datos se ajustan adecuadamente al modelo probabilístico seleccionado:

Modelamiento de datos con los resultados del proveedor N°1:

Tabla 7. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #1

PROVEEDOR #1	
Parámetro	Valor
# Datos	6
Beta	13.53
Eta	34,529
MTTF (t)	33,231
R(MTTF)	55%

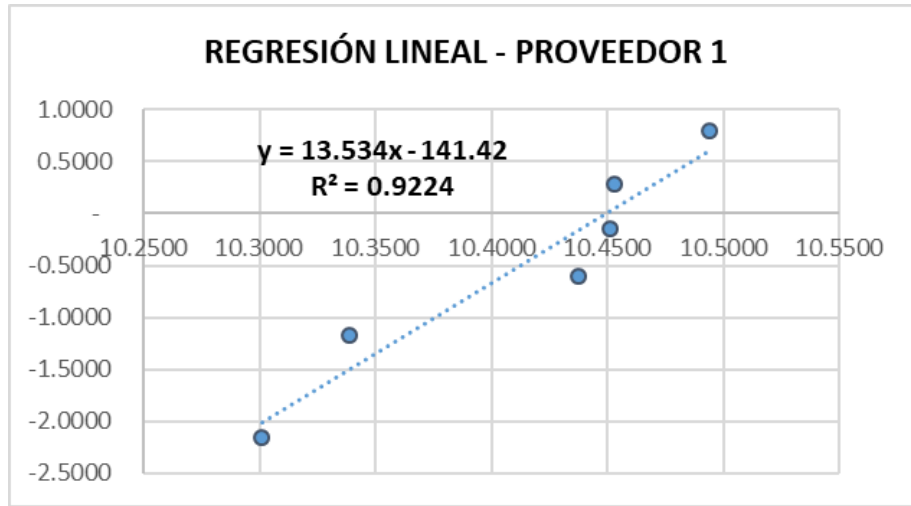
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Tabla 8. Parámetros de la prueba de bondad de ajuste proveedor #1

Descripción	Valor
Nivel de significancia	0.20
Valor crítico	0.410
Valor del test	0.305
Distribución WEIBULL:	ACEPTADO

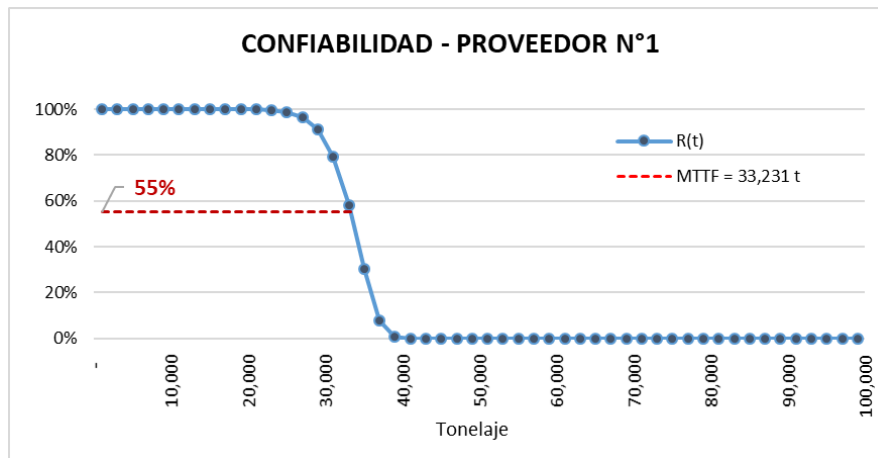
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 17. Regresión lineal weibull proveedor #1



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 18. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #1



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Modelamiento de datos con los resultados del proveedor N°2:

Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

PROVEEDOR #2	
Parámetro	Valor
# Datos	6
Beta	4.00
Eta	37,658
MTTF (t)	34,135
R(MTTF)	51%

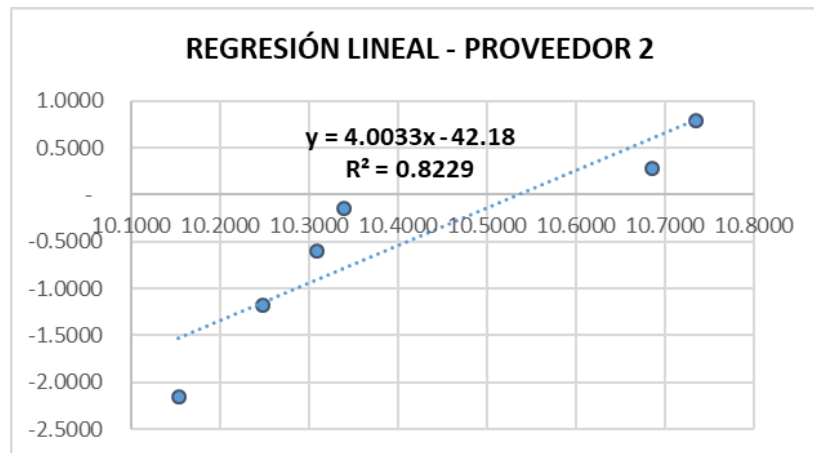
Tabla 9. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #2

Tabla 10. Parámetros de prueba de bondad de ajuste proveedor #2

Descripción	Valor
Nivel de significancia	0.20
Valor crítico	0.410
Valor del test	0.259
Distribución WEIBULL:	ACEPTADO

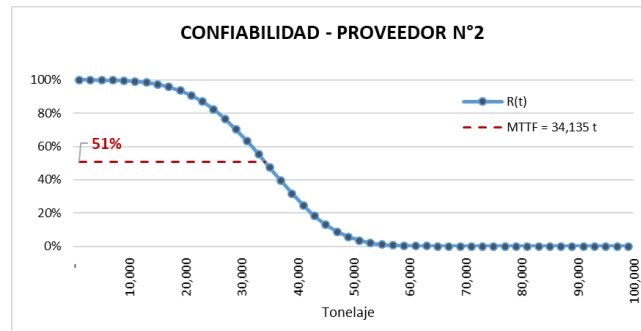
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 19. Regresión lineal weibull proveedor #2



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 20. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #2



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Modelamiento de datos con los resultados del proveedor N°3:

Tabla 11. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #3

PROVEEDOR #3	
Parámetro	Valor
# Datos	6
Beta	2.62
Eta	64,321
MTTF (t)	57,144
R(MTTF)	48%

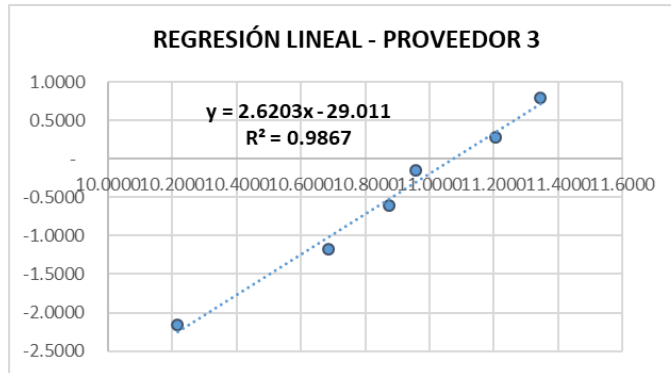
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Tabla 12. Parámetros de prueba de bondad de ajuste proveedor #3

Descripción	Valor
Nivel de significancia	0.20
Valor crítico	0.410
Valor del test	0.195
Distribución WEIBULL:	ACEPTADO

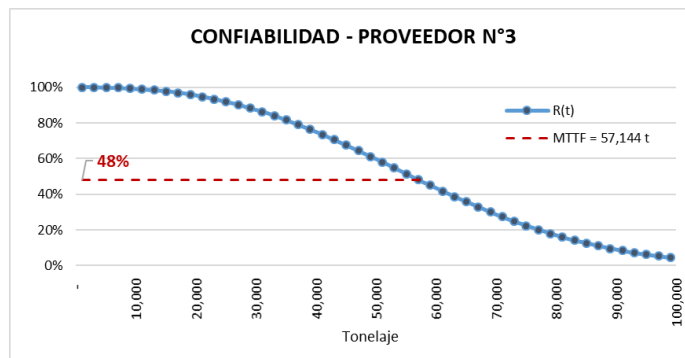
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 21. Regresión lineal weibull proveedor #3



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 22. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #3



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Modelamiento de datos con los resultados del proveedor N°4:

Tabla 13. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #4

PROVEEDOR #4	
Parámetro	Valor
# Datos	6
Beta	7.88
Eta	76,843
MTTF (t)	72,313
R(MTTF)	54%

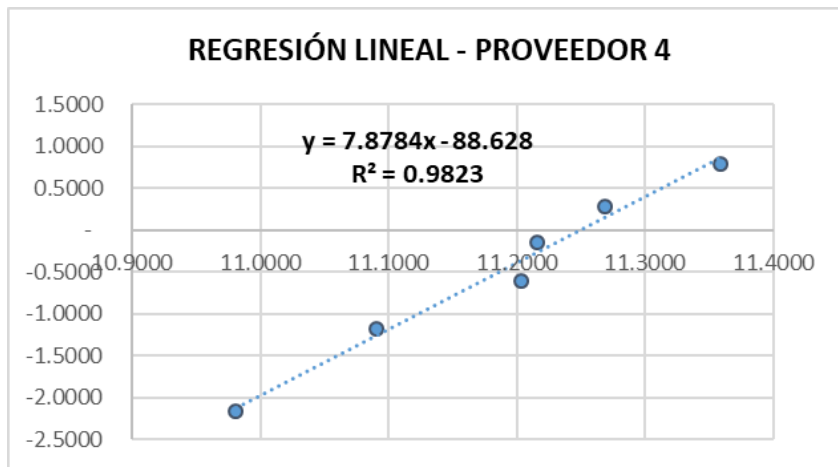
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Tabla 14. Parámetros de prueba de bondad de ajuste proveedor #4

Descripción	Valor
Nivel de significancia	0.20
Valor crítico	0.410
Valor del test	0.234
Distribución WEIBULL:	ACEPTADO

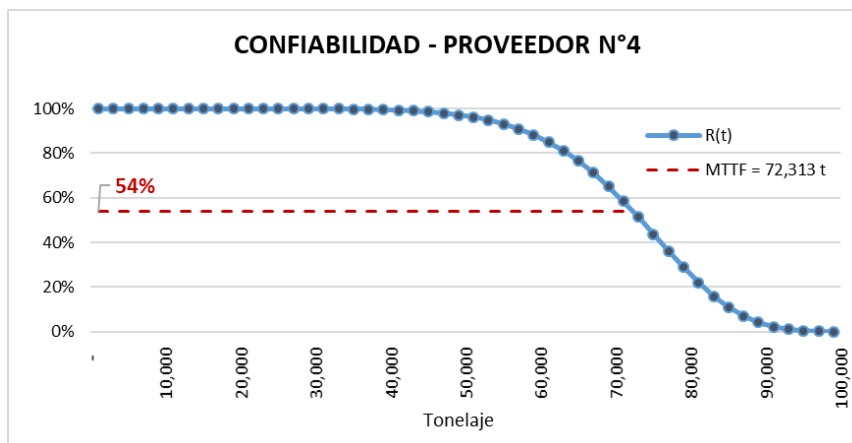
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 23. Regresión lineal weibull proveedor #4



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 24. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #4



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Modelamiento de datos con los resultados del proveedor N°5:

Tabla 15. Parámetros de modelamiento weibull proveedor #5

PROVEEDOR #5	
Parámetro	Valor
# Datos	6
Beta	12.97
Eta	69,525
MTTF (t)	66,813
R(MTTF)	55%

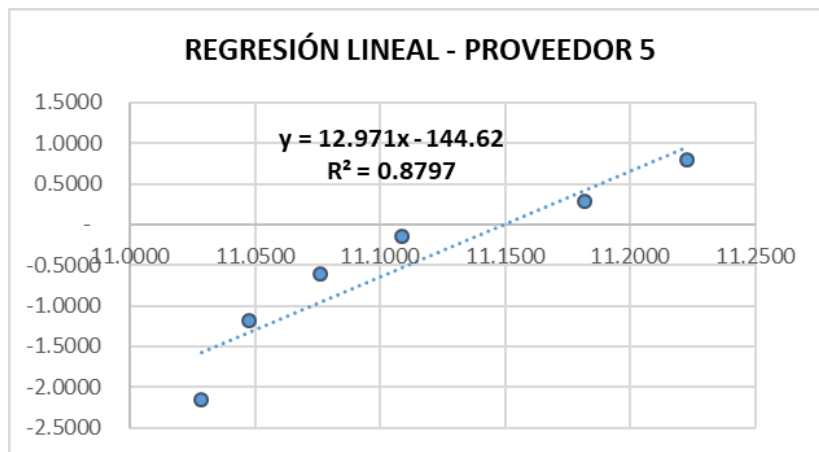
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Tabla 16. Parámetros de prueba de bondad de ajuste proveedor #5

Descripción	Valor
Nivel de significancia	0.20
Valor crítico	0.410
Valor del test	0.203
Distribución WEIBULL:	ACEPTADO

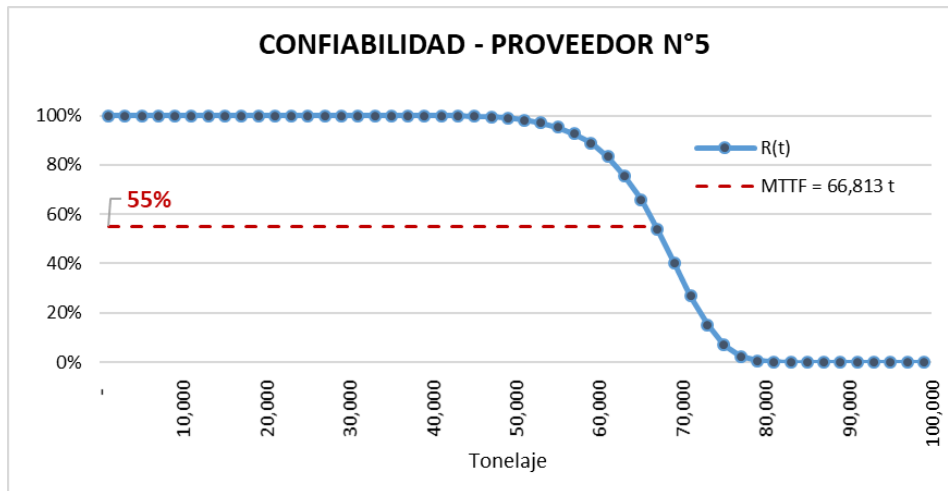
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 25. Regresión lineal weibull proveedor #5



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

Gráfico 26. Curva de confiabilidad acumulada proveedor #5



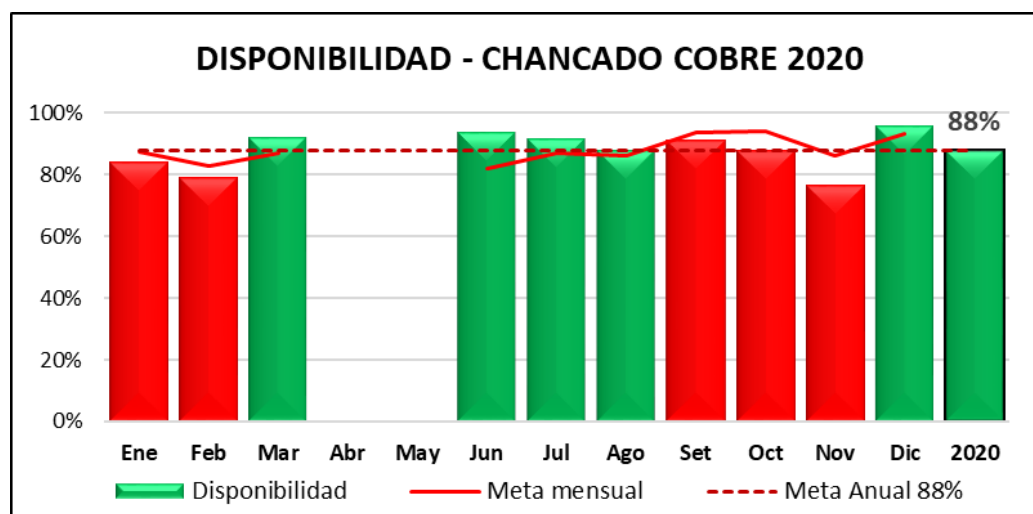
Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

2.3.6 Evaluación final

Los resultados estadísticos de las muelas de cada proveedor fueron determinados mediante el modelo weibull de 2 parámetros con aceptación basada en la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, y una beta mayor a 1 que explica una tasa de falla creciente por efecto del desgaste de muelas.

Durante el año 2020 que se realizaron las pruebas de muelas fijas en la Chancadora primaria de cobre, se reflejó un aumento en la disponibilidad de 4% con respecto al año anterior, cerrando el 2020 con 88% de disponibilidad, a pesar del impacto por 02 meses inoperativos causados por restricciones de la pandemia.

Gráfico 27. Disponibilidad mensual de Chancado Cu del año 2020



Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

De las muelas fijas probadas con 05 proveedores distintos, solo 03 proveedores (#3, #4 y #5) obtuvieron un MTTF mayor a 41,964 toneladas que implica un incremento de disponibilidad de la Chancadora Primaria Sandvik CJ412. Además, todos cuentan con un KPI(\$/t) menor a 0.248.

Se muestra el MTTF y KPI (\$/t) con coloración tipo semáforo basado en la línea base de 41,964 toneladas y 0.248 \$/t respectivamente, donde se puede observar que con los proveedores #4 y #5 se obtienen ahorros de 250 mil dólares anuales.

Tabla 17. Resumen de MTTF y ahorro proyectado por proveedor

PROVEEDOR	DATOS		RESULTADOS		PROYECCIÓN		
	Costo Unitario (\$)	MTTF (t)	R (MTTF)	KPI (\$/t)	CAMBIOS AL AÑO	COSTO AL AÑO (\$)	Ahorro (\$)
PROVEEDOR #1	6,423.30	33,231	55%	0.193	92	590,943.60	33,476.40
PROVEEDOR #2	8,393.62	34,135	51%	0.246	90	755,425.80	- 131,005.80
PROVEEDOR #3	9,825.81	57,144	48%	0.172	54	530,593.74	93,826.26
PROVEEDOR #4	8,654.75	72,313	54%	0.120	43	372,154.25	252,265.75
PROVEEDOR #5	8,130.15	66,813	55%	0.122	46	373,986.90	250,433.10

Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

El incremento de disponibilidad del 2020 con respecto al 2019 fue de 4%.

El incremento de disponibilidad proyectado por proveedor para la capacidad de diseño del área de chancado cobre igual a 9,500 t/día y la disponibilidad proyectada de 88% que es la meta considerada en la unidad para los años 2019 y 2020, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 18. Incremento de disponibilidad proyectado por proveedor

PROVEEDOR	PROYECCIÓN			Indisponibilidad de muelas 2019	Incremento de disponibilidad anual
	CAMBIOS AL AÑO (Und)	Tiempo (hrs) instalación + giro	Indisponibilidad anual		
PROVEEDOR #1	92	7.00	7.4%	5.4%	-2.0%
PROVEEDOR #2	90	7.00	7.2%	5.4%	-1.8%
PROVEEDOR #3	54	7.00	4.3%	5.4%	1.1%
PROVEEDOR #4	43	7.00	3.4%	5.4%	1.9%
PROVEEDOR #5	46	7.00	3.7%	5.4%	1.7%

Fuente: Elaboración propia, con base de datos SMEB, 2020

III. APORTES REALIZADOS

Los aportes realizados en este presente trabajo de suficiencia profesional son los siguientes:

- Elaboración del modelo estadístico de weibull para determinar la confiabilidad de la chancadora de mandíbulas Sandvik CJ412 mostrado en la tabla 5 y tabla 6.
- Elaboración de herramientas de priorización de datos como el diagrama de Pareto mostrado en el gráfico N°12 y diagramas Jack Knife mostrados en los gráficos N°13 y N°14, además de la catalogación de modos de falla de la chancadora CJ412.
- Elaboración del modelo estadístico de weibull de 2 parámetros para determinar el MTTF de las muelas fijas de la chancadora CJ412 expresado en unidades de toneladas procesadas, tanto para el material de referencia mostrado en el punto 2.3.4, como para los materiales probados mostrados en el apartado 2.3.5 de este trabajo de suficiencia profesional.
- Implementación de 02 formatos: El formato de solicitud de pruebas mostrado en el anexo N°1, donde se identifica el equipo, componente y MTTF actual; y el formato de invitación a pruebas mostrado en el anexo N°2 donde se adicionan consideraciones de fracaso y éxito para la prueba.
- Cálculo del impacto económico mostrado en la tabla N°17, mostrado como ahorro anual en dólares con respecto al producto de referencia y es determinado para cada proveedor, considerando el costo de material y el MTTF obtenido mediante el modelamiento weibull después de la prueba.
- Cálculo del incremento de disponibilidad mostrado en la tabla N°18, determinado por las horas acumuladas detenidas de la chancadora CJ412 en base a la cantidad de cambios de muelas fijas proyectadas para cada proveedor considerando el MTTF obtenido después de la prueba.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión

El análisis de confiabilidad es ampliamente utilizado en muchas empresas debido al beneficio que se obtiene no solo para el área de mantenimiento, sino para toda la empresa ya que implica en la mayoría de casos ahorro e incremento de disponibilidad.

En los antecedentes nombrados, se tiene análisis de confiabilidad con modelamiento weibull para determinar el MTBF de los equipos críticos seleccionados y definir la frecuencia de intervención para las actividades de mantenimiento seleccionadas en el AMEF con el fin de reducir los mantenimientos correctivos y mejorar la disponibilidad ya que en las actividades programadas el tiempo de intervención es menor que en las actividades correctivas inmediatas. Mientras, en este informe se utiliza el modelamiento weibull para hallar el MTTF del desgaste de muela fija pero no para implementar una actividad de mantenimiento, sino para establecer una estrategia que incremente este valor y consecuentemente incida positivamente en la disponibilidad.

En cuanto a los resultados obtenidos, es necesario considerar realizar la prueba de bondad de ajuste para validar la utilización del modelo weibull como se realizó en este informe, mientras que los trabajos de Burgos y Chino carecen de esta prueba. El análisis weibull puede realizarse de varias maneras, como Agualongo que lo realiza de forma gráfica en el papel weibull, Pandia que utiliza el software weibull ++ de Synthesis 11, Burgos y Chino quienes utilizan Microsoft Excel como es el caso del presente trabajo. Todos los métodos son válidos y siempre se recomienda utilizar un software diseñado para cálculos estadísticos, pero esto no es restrictivo, más el utilizar el método gráfico puede generar errores en los trazos y lecturas, siendo una opción buena y accesible el utilizar el Microsoft Excel.

Conclusiones

- La confiabilidad de la Chancadora de mandíbulas Sandvik CJ412 fue analizada en base a su modo de falla crítico “desgaste de muelas” y recurrencia expresado en MTTF (ver tabla 17), siendo la confiabilidad del año 2019 igual a 50%, y en el año 2020 se obtuvo una confiabilidad de 54% con el proveedor #4 y confiabilidad de 55% con el proveedor #5 los cuales fueron los más altos alcanzados.
- Se pudo determinar que la chancadora de mandíbulas Sandvik CJ412 fue el equipo que tuvo mayor impacto en la disponibilidad del año 2019 ya que se encuentra en la primera posición en el diagrama de Pareto con 471 horas detenidas, de las cuales 449 horas fueron debido al desgaste de muelas que es el modo de falla más predominante.
- En el análisis estadístico weibull realizado para las 60 muelas fijas utilizadas durante el 2019, los parámetros obtenidos fueron: Beta igual a 3.57 y eta igual a 46,588 toneladas para obtener un MTTF igual a 41,964 toneladas con una confiabilidad de 50%.
- Se implementó el protocolo para pruebas contra rendimiento estructurado con condiciones de pago de acuerdo al desempeño, datos de la operación, datos del mineral, datos de la muela fija, indicadores línea base de MTTF y KPI(\$/t), los cuales tuvieron aceptación tanto de la gerencia de la unidad como por los 05 proveedores que participaron en las pruebas del año 2020.
- Se realizó una proyección de ahorro en cuanto al gasto por adquisición de muelas fijas para un año, donde los valores más altos fueron alcanzados por los proveedores #4 con un ahorro anual de \$90,086.75 al obtener un MTTF de 72,313 toneladas y el proveedor #5 con un ahorro anual de \$88,254.10 al obtener un MTTF de 66,813 toneladas.
- El 2020 se tuvo una disponibilidad del área de chancado cobre de 88% que fue mayor en 4% a la disponibilidad de 84% obtenido en el 2019, superando las expectativas previas.

V. RECOMENDACIONES

- Establecer un análisis de confiabilidad de los equipos críticos del área de chancado cobre y establecer un plan de mejoras priorizados mediante matriz de esfuerzo-impacto.
- Controlar el desempeño futuro de las muelas a utilizar durante el 2021-2022 y establecer una nueva línea base para nuevas pruebas enfocado por la mejora continua.
- Mantener prácticas de control de duración de distintos componentes críticos y de alto desgaste en los diversos equipos que forman parte del proceso de chancado y concentrado de minerales, mediante modelamiento estadístico weibull.
- Establecer protocolos de pruebas contra rendimiento para demás componentes de alto desgaste en las demás áreas y generar ahorros en gastos de mantenimiento a través de uso de componentes alternativos de mayor duración.
- Implementar la utilización de muelas fijas suministradas por el proveedor #4 que ha obtenido un mejor rendimiento con respecto a los demás proveedores mediante un contrato de consignación para así de esta manera también obtener ahorro con respecto al valor de inventario de materiales de mantenimiento.
- Mantener disciplina de control y análisis crítico de la disponibilidad del área de chancado cobre, a fin de identificar desvíos y oportunidades de mejora en equipos que permitan tomar acción prematura.

VI. BIBLIOGRAFIA


- ABERNETHY, R. The New Weibull Handbook 5.^a ed. Florida: Robert B. Abernethy, 2004. 334 pp. ISBN: 978-0-9653062-3-2
- ACUÑA J. Ingeniería de Confiabilidad Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2003. 328 pp. ISBN: 9977-66-141-3
- AENOR. Mantenimiento. Terminología de Mantenimiento. UNE-UN 13306:2018. Madrid: AENOR, 2018.
- AGUALONGO, L. Análisis de fiabilidad de máquinas y equipos por la ley de weibull en el área de extrusión de la empresa Holviplas S.A. y su incidencia en la disponibilidad. Tesis (Magister en Mecánica Mención Diseño). Ambato: Universidad Técnica de Ambato, 2019, 274 pp. [fecha de consulta: 23 de agosto del 2021]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/30606?locale=de>
- ARATA, A. y A, ARATA, Ingeniería de la Confiabilidad. Santiago: RIL Editores, 2013. 360 pp. ISBN: 978-956-284-967-8
- BISA, Diagrama de Flujo del Proceso – PFD, Rev.C. S/E. 019GP0132A-0000-08-0003_C.
- BURGOS, O. y LOBELO, A. Estudio de confiabilidad de los equipos críticos de la línea de producción planta 1 de Propilco S.A. y la línea de producción compuestos 3 de ajover S.A. Tesis (Título de Especialista en Gerencia del Mantenimiento). Cartagena: Universidad Industrial de Santander, 2008, 107 pp. [fecha de consulta: 23 de agosto del 2021]. Disponible en: <https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/1417>
- CHINO, W. Análisis en función de la criticidad de los equipos de la planta de centro de inspección técnica vehicular Azper Perú SAC. Juliaca y elaboración de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista). Puno: Universidad Nacional del Altiplano, 2018, 103 pp. [fecha de consulta: 23 de agosto del 2021]. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/9054>

- INTEGRAMARKETS, Gestión y Planificación del Mantenimiento Industrial 2da. Edición, 2018.
- JARDINE A. y TSANG, A. Maintenance, Replacement, And Reliability. 2.^a ed. Florida: Taylor & Francis Group, 2013. 360 pp. ISBN: 978-1-4665-5486-3
- Ministerio de Energía y Minas. Anuario Minero 2020 [en línea]. Lima: Oficina de Imagen Institucional y Comunicaciones, 2020 [Fecha de consulta: 16 de agosto del 2021]. Disponible en: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2020/AM2020.pdf>.
- MORA, A. Mantenimiento. Planeación, Ejecución y Control. México: Alfa Omega Grupo Editor, 2009. 504pp. ISBN: 978-958-682-769-0
- PANDIA, Y. El análisis de confiabilidad como soporte para el diseño del plan de mantenimiento de la línea de maduración de langostinos en Marinasol S.A. – Tumbes. Tesis (título Profesional de Ingeniero Mecánico). Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2020, 173 pp. [fecha de consulta: 23 de agosto del 2021]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/12636>
- RELIASOFT, Life Data Analysis Reference [en línea]. Arizona: Reliasoft Corporation, 2015 [fecha de consulta: 10 de agosto del 2021]. Disponible en: http://www.synthesisplatform.net/references/Life_Data_Analysis_Reference.pdf
- SANDVIK, Installation Drawing CJ412:01, Rev.04. Escala 1:20. 2005. 400.1255. 1 plano A1.
- SOCIEDAD MINERA EL BROCAL S.A.A. Nosotros. 2019 [Fecha de consulta: 16 de agosto del 2021]. Disponible en: <https://www.elbrocal.pe/nosotros.html>
- SOCIEDAD MINERA EL BROCAL S.A.A. Nuestra Historia. 2019 [Fecha de consulta: 16 de agosto del 2021]. Disponible en: https://www.elbrocal.pe/index.php?fp_cont=903

- SOCIEDAD MINERA EL BROCAL S.A.A. Visión, Misión y Valores. 2019 [Fecha de consulta: 16 de agosto del 2021]. Disponible en: https://www.elbrocal.pe/mision_vision_valores.html
- TAVARES, L. Administración Moderna del Mantenimiento [en línea]. Brasil: Novo Polo Publicación, 2000 [Fecha de consulta: Fecha de consulta: 31 de julio del 2021]. Disponible en: <https://predictiva21.com/1-1-evolucion-organizacional-mantenimiento/>.

ANEXOS

ANEXO N° 1 SOLICITUD DE PRUEBAS

		SOLICITUD DE PRUEBAS		2019-SP-01
				INGENIERIA MANTTO
				REV1
DATOS DEL SOLICITANTE				
APELLIDOS Y NOMBRES		CARGO		FECHA
	<input style="width: 100%;" type="text"/>		<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>
UBICACIÓN				
PLANTA	<input style="width: 60%;" type="text"/>	TON/DÍA	<input style="width: 20%; background-color: #f8d7da;" type="text"/>	Llenado por confiabilidad
EQUIPO	<input style="width: 100%;" type="text"/>			
COMPONENTE	<input style="width: 100%;" type="text"/>			
NECESIDAD IDENTIFICADA				
MODO DE FALLA	<input style="width: 100%;" type="text"/>			
DESCRIPCIÓN	<input style="width: 100%; height: 40px;" type="text"/>			
CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTE ACTUAL				
DESCRIPCIÓN	<input style="width: 60%;" type="text"/>	CANTIDAD	<input style="width: 20%;" type="text"/>	
PROVEEDOR	<input style="width: 60%;" type="text"/>	MTBF	<input style="width: 20%;" type="text"/>	
NÚMERO DE PARTE	<input style="width: 60%;" type="text"/>	PRECIO	<input style="width: 20%;" type="text"/>	
NÚMERO SAP	<input style="width: 60%;" type="text"/>	KPI (US\$/TON)	<input style="width: 20%; background-color: #f8d7da;" type="text"/>	
			Calculado por confiabilidad	
PROVEEDORES SUGERIDOS				
PROVEEDOR N°1	<input style="width: 60%;" type="text"/>	E-MAIL/TELEFONO	<input style="width: 20%;" type="text"/>	
PROVEEDOR N°2	<input style="width: 60%;" type="text"/>	E-MAIL/TELEFONO	<input style="width: 20%;" type="text"/>	
PROVEEDOR N°3	<input style="width: 60%;" type="text"/>	E-MAIL/TELEFONO	<input style="width: 20%;" type="text"/>	
PROVEEDOR N°4	<input style="width: 60%;" type="text"/>	E-MAIL/TELEFONO	<input style="width: 20%;" type="text"/>	
SOLICITANTE		JEFATURA		
_____ <small>FIRMA</small>		_____ <small>FIRMA</small>		
<small>NOMBRE:</small>		<small>NOMBRE:</small>		
<small>CARGO:</small>		<small>CARGO:</small>		
<small>FECHA:</small>		<small>FECHA:</small>		

Fuente: Archivo de Ingeniería de Confiabilidad SMEB

ANEXO N° 2

INVITACIÓN A PRUEBA

	<h2 style="margin: 0;">INVITACIÓN A PRUEBA</h2>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="font-size: small;">2019-IP-01</td></tr> <tr><td style="font-size: small;">INGENIERÍA MANTTO</td></tr> <tr><td style="font-size: small;">REV1</td></tr> </table>	2019-IP-01	INGENIERÍA MANTTO	REV1
2019-IP-01					
INGENIERÍA MANTTO					
REV1					
CONDICIONES GENERALES					
<p>a) SI EL RENDIMIENTO DEL COMPONENTE ES MAYOR O IGUAL AL VALOR ACTUAL, SE CANCELARA EL 100% DEL VALOR DE LA PIEZA.</p> <p>b) SI EL RENDIMIENTO DEL COMPONENTE ES MAYOR O IGUAL A 90% Y MENOR A 99% DEL VALOR ACTUAL, SE CANCELARA EL 90% DEL VALOR DE LA PIEZA.</p> <p>c) SI EL RENDIMIENTO DEL COMPONENTE ES MAYOR O IGUAL A 80% Y MENOR A 89% DEL VALOR ACTUAL, SE CANCELARA EL 80% DEL VALOR DE LA PIEZA.</p> <p>d) SI EL RENDIMIENTO DEL COMPONENTE ES MAYOR O IGUAL A 70% Y MENOR A 79% DEL VALOR ACTUAL, SE CANCELARA EL 70% DEL VALOR DE LA PIEZA.</p> <p>e) SI EL RENDIMIENTO DEL COMPONENTE ES MENOR AL 70% DEL VALOR ACTUAL, NO SE REALIZARA EL PAGO DE LA PIEZA.</p>					
OBJETIVO GENERAL					
<p>a) MEJORA DE DISPONIBILIDAD POR INCREMENTO DE PERIODO ENTRE CAMBIOS CORRECTIVOS Y PREVENTIVOS.</p> <p>b) REDUCCION DE COSTOS EN REPUESTOS POR INCREMENTO DE PERIODO ENTRE CAMBIOS CORRECTIVOS O PREVENTIVOS.</p> <p>c) REDUCCION DE COSTO EN HORAS HOMBRE INCREMENTO DE PERIODO ENTRE CAMBIOS CORRECTIVOS O PREVENTIVOS.</p>					
UBICACIÓN DEL COMPONENTE					
PLANTA	<input style="width: 100%;" type="text"/>	EQUIPO	<input style="width: 100%;" type="text"/>		
COMPONENTE	<input style="width: 100%;" type="text"/>	MTBF	<input style="width: 100%;" type="text"/>		
DATOS DEL PROVEEDOR					
RAZON SOCIAL	<input style="width: 100%;" type="text"/>	E-MAIL	<input style="width: 100%;" type="text"/>		
REPRESENTANTE	<input style="width: 100%;" type="text"/>	FONO	<input style="width: 100%;" type="text"/>		
PROVEEDOR					
<div style="text-align: center; margin-bottom: 10px;"> _____ FIRMA </div> <p>NOMBRE:</p> <p>CARGO:</p> <p>FECHA:</p>					

Fuente: Archivo de Ingeniería de Confiabilidad de SMEB

ANEXO N° 3

REGISTRO DE CAMBIOS Y DURACIÓN DE MUELAS FIJAS 2019

Fecha de Instalación	Fecha de Giro	Fecha de Retiro	Fabricante	Duración en Días	Duración en Horas Operativas	Duración en Toneladas SIGM
28/01/2019	1/02/2019	3/02/2019	FABRICANTE	6	111	49,570
3/02/2019	6/02/2019	9/02/2019	FABRICANTE	6	105	42,450
9/02/2019	11/02/2019	14/02/2019	FABRICANTE	5	94	41,280
14/02/2019	17/02/2019	19/02/2019	FABRICANTE	5	87	41,020
19/02/2019	23/02/2019	27/02/2019	FABRICANTE	8	157	71,100
27/02/2019	3/03/2019	6/03/2019	FABRICANTE	7	105	44,430
6/03/2019	9/03/2019	10/03/2019	FABRICANTE	4	76	32,040
10/03/2019	11/03/2019	12/03/2019	FABRICANTE	2	38	14,970
12/03/2019	15/03/2019	16/03/2019	FABRICANTE	4	68	23,940
16/03/2019	19/03/2019	23/03/2019	FABRICANTE	7	122	51,480
23/03/2019	26/03/2019	30/03/2019	FABRICANTE	7	104	41,880
30/03/2019	1/04/2019	2/04/2019	FABRICANTE	3	57	24,540
2/04/2019	5/04/2019	6/04/2019	FABRICANTE	4	60	24,810
6/04/2019	8/04/2019	11/04/2019	FABRICANTE	5	86	40,440
11/04/2019	14/04/2019	16/04/2019	FABRICANTE	5	81	35,904
16/04/2019	19/04/2019	21/04/2019	FABRICANTE	5	79	35,430
21/04/2019	23/04/2019	25/04/2019	FABRICANTE	4	69	32,430
25/04/2019	27/04/2021	28/04/2019	FABRICANTE	3	51	24,330
28/04/2019	2/05/2019	5/05/2019	FABRICANTE	7	127	58,930
5/05/2019	9/05/2019	14/05/2019	FABRICANTE	9	104	50,040
14/05/2019	17/05/2019	20/05/2019	FABRICANTE	6	107	50,910
20/05/2019	24/05/2019	28/05/2019	FABRICANTE	8	133	67,920
28/05/2019	31/05/2019	4/06/2019	FABRICANTE	7	128	60,720
4/06/2019	7/06/2019	11/06/2019	FABRICANTE	7	126	58,650
11/06/2019	16/06/2019	18/06/2019	FABRICANTE	7	110	56,280
18/06/2019	22/06/2019	25/06/2019	FABRICANTE	7	122	60,210
25/06/2019	29/06/2019	4/07/2019	FABRICANTE	9	136	69,720
4/07/2019	8/07/2019	10/07/2019	FABRICANTE	6	101	49,980
10/07/2019	12/07/2019	16/07/2019	FABRICANTE	6	106	54,810
16/07/2019	19/07/2019	21/07/2019	FABRICANTE	5	78	36,660
21/07/2019	24/07/2019	27/07/2019	FABRICANTE	6	91	44,700
27/07/2019	30/07/2019	2/08/2019	FABRICANTE	6	107	53,370
2/08/2019	5/08/2019	8/08/2019	FABRICANTE	6	92	45,390
8/08/2019	11/08/2019	13/08/2019	FABRICANTE	5	94	43,500
13/08/2019	19/08/2019	22/08/2019	FABRICANTE	9	75	36,500
22/08/2019	23/08/2019	24/08/2019	FABRICANTE	2	34	16,170
24/08/2019	26/08/2019	1/09/2019	FABRICANTE	8	144	65,460

Fecha de Instalación	Fecha de Giro	Fecha de Retiro	Fabricante	Duración en Días	Duración en Horas Operativas	Duración en Toneladas SIGM
1/09/2019	6/09/2019	9/09/2019	FABRICANTE	8	108	52,530
9/09/2019	11/09/2019	14/09/2019	FABRICANTE	5	92	46,110
14/09/2019	16/09/2019	17/09/2019	FABRICANTE	3	50	25,590
17/09/2019	19/09/2019	21/09/2019	FABRICANTE	4	70	34,460
21/09/2019	24/09/2019	27/09/2019	FABRICANTE	6	106	50,490
27/09/2019	29/09/2019	30/09/2019	FABRICANTE	3	51	23,714
30/09/2019	3/10/2019	6/10/2019	FABRICANTE	6	101	41,757
6/10/2019	8/10/2019	10/10/2019	FABRICANTE	4	70	30,582
10/10/2019	13/10/2019	15/10/2019	FABRICANTE	5	77	33,426
15/10/2019	19/10/2019	22/10/2019	FABRICANTE	7	93	40,093
22/10/2019	24/10/2019	26/10/2019	FABRICANTE	4	78	33,146
26/10/2019	30/10/2019	1/11/2019	FABRICANTE	6	93	38,709
1/11/2019	4/11/2019	7/11/2019	FABRICANTE	6	93	44,134
7/11/2019	10/11/2019	12/11/2019	FABRICANTE	5	82	33,857
12/11/2019	15/11/2019	17/11/2019	FABRICANTE	5	86	33,814
17/11/2019	20/11/2019	23/11/2019	FABRICANTE	6	97	41,654
23/11/2019	28/11/2019	1/12/2019	FABRICANTE	8	123	53,695
1/12/2019	3/12/2019	7/12/2019	FABRICANTE	6	94	40,256
7/12/2019	10/12/2019	13/12/2019	FABRICANTE	6	93	37,027
13/12/2019	15/12/2019	19/12/2019	FABRICANTE	6	95	39,131
19/12/2019	22/12/2019	25/12/2019	FABRICANTE	6	89	35,077
25/12/2019	27/12/2019	28/12/2019	FABRICANTE	3	46	18,644
28/12/2019	30/12/2019	2/01/2020	FABRICANTE	5	91	37,440

Fuente: Registro SAP y SIGM de SMEB

ANEXO N° 4

REGISTRO DE CAMBIOS Y DURACIÓN DE MUELAS FIJAS 2020

Fecha de Instalación	Fecha de Giro	Fecha de Retiro	Fabricante	Duración en Días	Duración en Horas Operativas	Duración en Toneladas Faja 7
02/01/20	04/01/20	07/01/20	PROVEEDOR #1	5	80	34,645
07/01/20	10/01/20	12/01/20	PROVEEDOR #1	5	80	29,766
12/01/20	14/01/20	17/01/20	PROVEEDOR #1	5	79	34,584
17/01/20	19/01/20	21/01/20	PROVEEDOR #1	4	68	34,106
21/01/20	23/01/20	25/01/20	PROVEEDOR #1	4	72	30,906
25/01/20	28/01/20	30/01/20	PROVEEDOR #1	5	81	36,111
30/01/20	01/02/20	04/02/20	PROVEEDOR #2	5	76	28,217
04/02/20	07/02/20	11/02/20	PROVEEDOR #2	7	76	29,975
11/02/20	13/02/20	15/02/20	PROVEEDOR #2	4	67	25,674
15/02/20	18/02/20	21/02/20	PROVEEDOR #2	6	110	45,905
21/02/20	24/02/20	27/02/20	PROVEEDOR #2	6	101	43,696
27/02/20	29/02/20	03/03/20	PROVEEDOR #2	5	85	30,919
03/03/20	04/03/20	07/03/20	PROVEEDOR #3	4	68	27,331
07/03/20	11/03/20	14/03/20	PROVEEDOR #3	7	114	43,679
24/05/20	05/06/20	13/06/20	PROVEEDOR #3	20	153	57,372
13/06/20	21/06/20	27/06/20	PROVEEDOR #3	14	203	73,476
27/06/20	04/07/20	09/07/20	PROVEEDOR #3	12	155	52,875
09/07/20	16/07/20	23/07/20	PROVEEDOR #3	14	210	84,579
23/07/20	29/07/20	06/08/20	PROVEEDOR #4	14	199	73,348
06/08/20	15/08/20	23/08/20	PROVEEDOR #4	17	273	74,298
23/08/20	29/08/20	10/09/20	PROVEEDOR #4	18	281	84,579
10/09/20	21/09/20	26/09/20	PROVEEDOR #4	16	182	65,518
26/09/20	15/10/20	14/10/20	PROVEEDOR #4	18	197	58,732
14/10/20	23/10/20	29/10/20	PROVEEDOR #4	15	225	78,277
29/10/20	04/11/20	08/11/20	PROVEEDOR #5	10	161	66,732
08/11/20	14/11/20	18/11/20	PROVEEDOR #5	10	186	61,610
18/11/20	24/11/20	02/12/20	PROVEEDOR #5	14	219	64,619
02/12/20	12/12/20	16/12/20	PROVEEDOR #5	14	182	62,808
16/12/20	23/12/20	28/12/20	PROVEEDOR #5	12	184	71,804
28/12/20	02/01/21	07/01/21	PROVEEDOR #5	10	164	74,778

Fuente: Registro SAP y PI System de SMEB

ANEXO N° 5

VALORES CRÍTICOS DEL TEST KOLMOGOROV - SMIRNOV

Critical Values $D_n^{(\gamma)}$ for the Kolmogorov Goodness-of-Fit Test*

n	γ				
	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.210	0.220	0.240	0.270	0.320
30	0.190	0.200	0.220	0.240	0.290
35	0.180	0.190	0.210	0.230	0.270
>35	$\frac{1.07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.14}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{n}}$

Fuente: Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgos, por Yáñez, Gómez y Valbuena, 2004, p. 108.

ANEXO N° 6
IMÁGENES DE MUELAS FIJAS NUEVAS



Fuente: Archivo fotográfico de Ingeniería de Confiabilidad SMEB



Fuente: Archivo fotográfico de Ingeniería de Confiabilidad SMEB



Fuente: Archivo fotográfico de Ingeniería de Confiabilidad SMEB

ANEXO N° 7
IMÁGENES DE MUELAS FIJAS GASTADAS



Fuente: Archivo fotográfico de Ingeniería de Confiabilidad SMEB



Fuente: Archivo fotográfico de Ingeniería de Confiabilidad SMEB



Fuente: Archivo fotográfico de Ingeniería de Confiabilidad SMEB