



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL**

**ESTUDIO DE AUTOMATIZACION DEL CAMBIO DE REVESTIMIENTO DE
MOLINOS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTION Y
DIRECCION DE EMPRESAS**

ALEX SEBASTIAN RAVENTOS NUÑEZ

PROFESOR GUIA:

IVAN MIGUEL BRAGA CALDERON

MIEMBROS DE LA COMISION:

RAFAEL DAVID EPSTEIN NUMHAUSER

MANUEL HUMBERTO ROJAS VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Magister en Gestión y Dirección de
Empresas

Por: Alex Sebastian Raventos Nuñez

Fecha:18/12/2020

Profesor Guia: Ivan Miguel Braga Calderon

ESTUDIO DE AUTOMATIZACION DEL CAMBIO DE REVESTIMIENTO DE MOLINOS

Actualmente la industria minera está experimentando cambios importantes en relación a la incorporación de nuevas tecnologías que permitan mejorar la productividad con procesos estandarizados y sobre todos seguros, sin embargo, esta tendencia presenta un avance más lento en las actividades de mantención en comparación con áreas como operaciones.

El cambio de revestimiento de molinos SAG y bolas representa una de las actividades de mantención más críticas para las plantas concentradoras ya que constituye el mayor impacto en la disponibilidad del proceso, pero sobre todo por la alta exposición de las personas a riesgos de alto potencial durante su ejecución. Si bien esta actividad ha evolucionado en su desarrollo con la incorporación de herramientas de alto poder, mejoras en la planificación y configuraciones en los revestimientos, aún tiene un gran potencial de mejora en los tiempos de ejecución y sobre todo en la gestión de la seguridad de las personas.

De acuerdo a lo anterior el presente estudio entrega un análisis para la propuesta de nuevas tecnologías que permitan automatizar el cambio de revestimiento, a través de una metodología de selección alternativas en base a criterios que miden el impacto en la disminución de los riesgos de la actividad y también la productividad del proceso.

Para la selección de alternativas se desarrolló una metodología de análisis multicriterio en la cual se evaluaron las variables relevantes en base a indicadores económicos y de riesgo.

La alternativa sugerida permite entregar un proceso automatizado con la incorporación de sistemas robotizados para trabajos al exterior e interior del molino lo cual permite disminuir hasta en un 63% la dotación necesaria e incorpora la necesidad de desarrollar nuevas competencias y roles que no tienen exposición a riesgos críticos, lo cual representa un fuerte impacto en los indicadores de riesgo al disminuir la probabilidad de ocurrencia de eventos de alto potencial.

La propuesta de solución permite obtener mejoras en productividad, entregando un beneficio a través de la disminución de hasta un 25% de las horas requerida para el cambio de revestimiento lo cual permite aumentar el tratamiento planta.

El desarrollo de nuevas tecnologías representa uno de los principales desafíos para la industria minera, principalmente a través del impacto que genera en seguridad reduciendo la exposición de las personas, en productividad, en las estrategias de mantención y la reconversión laboral de los contratos de servicio.

SUMMARY OF THE THESIS TO OPT FOR
THE TITLE OF: Master in Management and
Business Administration
By: Alex Sebastian Raventos Nuñez
Date:18/12/2020
Professor Guide: Ivan Miguel Braga Calderon

MILL RELINING AUTOMATION STUDY

Currently, the mining industry is experiencing important changes in relation to the incorporation of new technologies that allow improving productivity with standardized and above all safe processes, however, this trend presents a slower progress in maintenance activities compared to areas such as operations.

Relining of SAG and ball mills represents one of the most critical maintenance activities for concentrator plants and the greatest impact on the availability of the process, but above all because of the high exposure of people to high potential risks during its execution. Although this activity has evolved in its development with the incorporation of high power tools, improvements in the planning and configuration of the liner, it still has great potential for improvement in execution times and above all in the management of people's safety.

In accordance with the above, this study provides an analysis for the proposal of new technologies that allow automating the change of liner, through a methodology of selecting alternatives based on criteria that measure the impact on reducing the risks of the activity and also the productivity of the process.

For the selection of alternatives a methodology of multicriteria analysis was developed in which the relevant variables were evaluated based on economic and risk indicators.

The suggested alternative allows to deliver an automated process with the incorporation of robotic systems for work outside and inside the mill, which allows to reduce up to 63% the necessary staff and incorporates the need to develop new skills and roles that are not exposed to critical risks, which represents a strong impact on risk indicators by reducing the probability of occurrence of high potential events.

The solution proposal allows to obtain productivity improvements, delivering a benefit through the reduction of up to 25% of the hours required for the change of coating which allows to increase the plant treatment.

The development of new technologies represents one of the main challenges for the mining industry, mainly through the impact it generates on safety by reducing people's exposure, on productivity, on maintenance strategies and on the labor reconversion of service contracts.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.2.	PROCESO PRODUCTIVO.....	2
1.1.2.1.	EXTRACCION DE MINERAL.....	3
1.1.2.2.	CHANCADO Y TRASNPORTE DE MINERAL.....	3
1.1.2.3.	PROCESO DE LIXIVIACION DE OXIDO.....	3
1.1.2.4.	PROCESO DE BIOLIXIVIACION DE SULFUROS DE BAJA LEY.....	4
1.1.2.5.	PROCESO DE PLANTAS CONCENTRADORAS.....	4
1.1.2.6.	PROCESO EN PLANTA COLOSO.....	5
2.	DEFINICIÓN DEL PROBLMA.....	6
2.1.	JUSTIFICACION DEL ALCANCE.....	6
2.2.	ALCANCE DEL TRABAJO.....	6
2.3.	OBJETIVOS.....	7
2.3.1.	OBJETIVO GENERALES.....	7
2.3.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	7
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.....	8
3.1.	CAMBIO DE REVESTIMIENTO.....	8
3.2.	AUTOMATIZACIÓN.....	9
3.3.	REQUISITOS DE SEGURIDAD.....	10
4.	MARCO TEORICO.....	11
4.1.	ANÁLISIS DE RIESGO.....	11
4.2.	EVALUACIÓN MULTICRITERIO.....	13
4.3.	ESTRATEGIA DE IMPLEMENTACIÓN Y GESTIÓN DE CAMBIO.....	15
4.4.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	17
5.	METODOLOGIA.....	18
5.1.	LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	18
5.2.	DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS ANALIZADAS.....	19
5.3.	EVALUACIÓN DE RIESGO.....	19
5.4.	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN.....	20
5.5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	20
6.	ANALISIS DE LA INFORMACIÓN.....	21
6.1.	CONTEXTO DE LA INDUSTRIA.....	21

6.2.	SEGURIDAD: RIESGOS DE EXPOSICIÓN DE LAS PERSONAS Y ACCIDENTABILIDAD.....	22
6.3.	DOTACIÓN PARA LA EJECUCIÓN DEL CAMBIO DE REVESTIMIENTO	26
6.4.	TIEMPOS PARA EL CAMBIO DE REVESTIMIENTO	28
6.5.	PROPUESTAS DE AUTOMATIZACIÓN	31
6.5.1.	(A) MIRS: Sistemas Robóticos	31
6.5.2.	(B) Russell Minerals Equipment	34
7.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.....	36
7.1.	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	36
7.2.	DEFINICIÓN DE PONDERACIONES.....	37
7.3.	ANÁLISIS DE RIESGO	38
8.	DESARROLLO DE PROPUESTA DE TECNOLOGÍA SELECCIONADA.....	44
8.1.	PLAN DE IMPLEMENTACIÓN	44
8.2.	PROYECCIÓN DE DISMINUCIÓN DEL PERSONAL EXPUESTO.....	46
8.3.	PROYECCIÓN DE DISMINUCIÓN DE TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL CAMBIO DE REVESTIMIENTO	48
9.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	51
9.1.	CÁLCULO DEL BENEFICIO	51
9.2.	INDICADORES ECONÓMICOS	54
9.3.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	56
10.	CONCLUSIONES	57
11.	BIBLIOGRAFÍA	58
12.	ANEXOS	59
12.1.	Anexo 1: Configuración de revestimientos molinos SAG	59
12.2.	Anexo 2: Data de accidentabilidad.....	60
12.3.	Anexo 3: Tablas de probabilidad de ocurrencia y severidad.	61
12.4.	Anexo 4: Escala de Saaty	63
12.5.	ANEXO 5: Matrices de comparación de criterios	64
12.6.	Anexo 6: Escala de evaluación de criterios y sub criterios.	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Data histórica del Serna geomin de accidentes fatales la interior del molino SAG.....	24
Tabla 2	Estadística de accidentabilidad relacionada al cambio de revestimiento en Escondida. ...	25
Tabla 3 ¹	Flujo de dotación diaria de trabajadores para el cambio de revestimiento durante los Shutdown y mantenencias programadas de la línea 1 y 2 de la Planta Concentradora Laguna Seca para el FY21.....	26
Tabla 4	Ponderación de criterios para selección de alternativas	38
Tabla 5	Análisis de los principales riesgos asociados al cambio de revestimiento	40
Tabla 6	Comparativa de impacto en el riesgo para ñas alternativas consideradas.....	41
Tabla 7	cuadro de valoración de los criterios para las alternativas analizadas por criterio y sub-criterio.	42
Tabla 8	Etapas de robotización de acuerdo a la fase de implementación para molinos de bolas ..	46
Tabla 9	Etapas de robotización de acuerdo a la fase de implementación para molinos de bolas ..	47
Tabla 10	Resultado de escenarios simulados para cabio de revestimiento de molinos de bolas ...	49
Tabla 11	Disminución de horas de cambio de revestimiento totales por año.....	51
Tabla 12	plan de datos operacionales planta.....	52
Tabla 13	Toneladas e ingreso obtenido por disminución de horas de mantención	52
Tabla 14	Flujo de caja del proyecto	53
Tabla 15	Cuadro de análisis de sensibilidad.....	56
Tabla 16	Eventos sin intercambio de energía asociados al cambio de revestimiento	60
Tabla 17	Tabla de probabilidad de ocurrencia.....	61
Tabla 18	Tabla de indicadores de severidad.....	62
Tabla 19	Escala de Saaty	63
Tabla 20	Matriz de comparación de criterios	64
Tabla 21	matriz normalizada y vector de paridades de criterios.	65
Tabla 22	Tabla de índices aleatorios por tamaño de matriz.....	66
Tabla 23	Matriz normalizada para relación de consistencia de la variable implementación	67
Tabla 24	Matriz normalizada para relación de consistencia de la variable Mantenibilidad	67
Tabla 25	Escalas de evaluaciones criterios y sub criterios.....	68

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Mapa de ubicación de Minera Escondida Limitada.....	2
Ilustración 2 Diagrama General del proceso productivo de Minera Escondida	5
Ilustración 3 vista isométrica de cilindro y tapa de alimentación del molino SAG 4, Escondida-..	8
Ilustración 4 Jerarquía de control de riesgos.....	13
Ilustración 5 Proceso general de implementación	15
Ilustración 6 Ilustración xxx Flujograma de gestión de cambio.	16
Ilustración 7 mejoras para la modificación de la configuración de la tapa de descarga del molino SAG mediante la implementación de revestimientos de acero – goma.	21
Ilustración 8 personal expuesto a los riesgos de los trabajos al interior del molino durante el cambio de revestimiento	23
Ilustración 9 Distribución del personal para tareas de desmontaje de revestimientos	27
Ilustración 10 Distribución del personal para tareas de montaje de revestimientos	27
Ilustración 11 Cuadro de evolución de número de piezas y tiempo de cambio de revestimiento.	28
Ilustración 12 Cuadro de distribución horas de detención de molinos de la línea 1 de molienda con un horizonte de dos años fiscales.....	29
Ilustración 13 Cuadro de distribución horas de detención de molinos de la línea 2 de molienda, con un horizonte de dos años fiscales.....	30
Ilustración 14 Imagen comparativa de actividades al exterior del molino entre un cambio de revestimiento convencional versus el desarrollo propuesto por MIRS.	32
Ilustración 15 Disposición general de los sistemas EMMR & IMMR logrando la completa automatización del cambio de revestimientos	33
Ilustración 16 vista general de modelo skyway para molino SAG.	34
Ilustración 17 Implementación de skyway en faena de Cobre Panamá	35
Ilustración 18 Modelo de jerarquía simple para la metodología AHP, Multicriterio de selección de alternativas.....	37
Ilustración 19 Plan general de etapa de la etapa de implementación del piloto de prueba del EMMR.	44
Ilustración 20 Maqueta actual en laboratorio para molino SAG	45

Ilustración 21 Grafica de evolución de la dotación para un turno de cambio de revestimiento para molinos de bolas.....	46
Ilustración 22 Grafica de evolución de la dotación para un turno de cambio de revestimiento para molinos SAG.....	47
Ilustración 23 Grafica de disminución de tiempos de cambio de revestimiento para molino de bolas con la sistemas de robotizados tipo EMMR	49
Ilustración 24 Descripción de configuración de revestimientos para molinos SAG 4 y SAG	59

1. INTRODUCCIÓN

Minera Escondida Limitada es una empresa de extracción de cobre ubicada en la ciudad de Antofagasta que cuenta con procesos de producción de cátodos y concentrado de cobre, con sus plantas Concentradoras Laguna Seca y Los Cobrados.

En el caso de la planta concentradoras de Laguna Seca cuenta con dos líneas de molienda, donde las mantenencias programadas o de imprevisto para el cambio de revestimiento de los molinos SAG y Bolas, constituyen la principal pérdida de disponibilidad de estos equipos, lo cual se traduce en la disminución del run time del proceso productivo, por lo cual, la optimización de esta actividad se convierte en una variable fundamental para el aumento de la rentabilidad del negocio.

El cambio de revestimiento ha evolucionado a lo largo de los años principalmente por el desarrollo de procedimientos, equipos y herramientas que han facilitado la ejecución, sin embargo, es un trabajo extenso que sigue dependiendo de la acción humana, que requiere una gran cantidad de personas para su ejecución lo cual genera ineficiencia y una alta exposición a riesgos de alto potencial e incluso fatalidad debido al trabajo en espacio confinado y manipulación de piezas que pueden pesar sobre los 4.000 kilos.

De acuerdo a lo indicado por académicos en la publicación “Hacia la robotización y nueva forma de hacer los recambios¹”, las tendencias señalan que es posible asegurar la confiabilidad y seguridad del proceso a través de la automatización del cambio de revestimiento, considerando que esta actividad se realiza en condiciones de riesgo, en espacios confinados moviendo piezas de gran peso y tamaño en superficies muy inestables.

La automatización del cambio de revestimiento es un paso necesario para optimización de la mantención en plantas concentradoras y sobre todo para la eliminación del personal expuesto a riesgos de alto potencial en las actividades tanto al interior como exterior de los molinos.

El presente estudio consiste en el análisis de los beneficios que ofrecen las nuevas tecnologías en la búsqueda la reducción de los riesgos de exposición de las persona y aumento de la disponibilidad de planta a través a la automatización del cambio de revestimiento.

¹Hacia la robotización y nueva forma de hacer los recambios. Revista Nueva Minería & Energía 17 de agosto de 2015.

1.1. SOBRE ESCONDIDA | BHP

1.1.1. UBICACIÓN

Minera Escondida se encuentra ubicada en el desierto de Atacama, a una altitud por sobre los 3.000 m.s.n.m en la región de Antofagasta y a unos 170 Km al sureste de la ciudad de Antofagasta. Actualmente es operada por BHP a través de Minera Escondida Limitada (MEL), propietarios de un 57,5% y otros inversionistas como Rio tinto con un 30%, Jeco Corporation con un 10% y Jeco Ltd. 2.5 %.

Actualmente Minera Escondida Limitada cuenta con dos rajes abiertos desde donde extrae el mineral de cobre, Escondida y Escondida Norte, los cuales abastecen de mineral a las plantas Concentradoras Los Colorados, Laguna Seca línea 1 y Laguna Seca Línea 2 en las cuales se produce concentrado de alta ley, y las plantas de Oxido y Lixiviación de sulfuros de baja ley que producen cátodos de alta pureza, además cuenta con el puerto de carga (Puerto Coloso) y una planta desaladora.



Ilustración 1 Mapa de ubicación de Minera Escondida Limitada

1.1.2. PROCESO PRODUCTIVO

En Minera Escondida se obtienen dos productos comerciales: concentrado de cobre que es obtenido a partir de los sulfuros de cobre, y cátodo de cobre de alta pureza (99,99% Cu) obtenido a partir de los óxidos de cobre y sulfuros de baja ley.

1.1.2.1. EXTRACCION DE MINERAL

La extracción del mineral procede de dos minas a rajo abierto, Rajo Escondida y Rajo Escondida Norte, siendo este último valorado por su mayor ley. El cobre extraído se encuentra de tres formas: sulfuro de alta ley, sulfuro de baja ley y óxidos de cobre. Los sulfuros y óxidos son enviados a chancado y pilas de biolixiviación, además el lastre o material estéril es derivado a los botaderos.

El proceso se realiza en base a la planificación anual, elaborada por el área de planificación, la cual define los sectores de explotación y determina la cantidad y el tipo de mineral a extraer, además de la cantidad de lastre necesaria para despejar el mineral. De esta forma se definen las mallas de perforación que indican los puntos que se deberán perforar para la instalación de cargas explosivas y accesorios de detonación necesarios para la tronadura. Luego, palas y/o cargadores frontales cargan el mineral fragmentado en camiones de alto tonelaje. Los destinos de descarga de los camiones son definidos y coordinados por despacho dependiendo del material en cuestión: óxidos de cobre son destinados al chancador 4, sulfuros de baja ley son trasladados directamente al sector de apilamiento sin pasar por chancado, y sulfuros de alta ley son destinados a chancadores 1, 2 y 3 para el caso del mineral de Rajo Escondida y al chancador 5 para el mineral de Rajo Escondida Norte.

1.1.2.2. CHANCADO Y TRANSPORTE DE MINERAL

El proceso de chancado cuenta con cinco chancadores, uno destinado a los óxidos de cobre (chancador 4) y tres chancadores destinados a sulfuros de alta ley provenientes del Rajo Escondida (chancadores 1, 2 y 3) y un chancador destinado a los sulfuros de alta ley del Rajo Escondida Norte (chancador 5). El objetivo del proceso de chancado y correas es mantener los stockpiles abastecidos de carga viva para que tanto las plantas concentradoras como la pila de lixiviación de óxidos puedan procesar material de forma continua.

1.1.2.3. PROCESO DE LIXIVIACION DE OXIDO

Este proceso tiene como objetivo obtener el cobre contenido en los minerales oxidados a través de la aplicación de una solución de ácido sulfúrico y agua. Una vez que el mineral oxidado ha sido triturado y depositado en un stockpile, se somete a etapas de chancado secundario y terciario para obtener una granulometría P80 de $\frac{3}{4}$ de pulgada, es transportado hasta un silo de almacenamiento y luego derivado a tambores aglomeradores.

Al finalizar el apilamiento se inicia el proceso de lixiviación, en el cual se extrae el cobre del mineral oxidado, basándose en la propiedad de la solubilidad en ácido que posee el mineral de cobre. Para ello, se instalan tuberías y accesorios de riego sobre la pila con el fin de irrigar al mineral con solución de refino e ILS que disolverá lentamente el cobre, dando paso a una solución de cobre llamada PLS, que posee una concentración de 4 a 6 gramos por litro de cobre. Esta solución percola a través de la pila hasta la base impermeabilizada, desde donde escurre hasta ductos absorbentes que la transportan a las piscinas de PLS. A partir de la obtención del electrolito rico en cobre, el proceso se desarrolla en la nave de electro-obtención, tanto para el electrolito proveniente del mineral oxidado como el que viene de la biolixiviación de sulfuros de baja ley.

Posteriormente se realiza la cosecha, que consiste en el retiro de las placas de acero con cobre adherido a ellas y desprender el cobre mediante el uso de la máquina despegadora de cátodos. Finalmente, los cátodos de

cobre son clasificados, apilados y embalados para ser transportados mediante ferrocarril hasta el puerto de Antofagasta, donde son embarcados.

1.1.2.4. PROCESO DE BIOLIXIVIACION DE SULFUROS DE BAJA LEY

Este proceso, también conocido como lixiviación bacteriana de sulfuros, tiene como objetivo transformar el mineral sulfurado de cobre en mineral oxidado. Para ello se utilizan bacterias específicas que, en presencia de oxígeno y condiciones especiales de riego, provocan la oxidación biológica de los sulfuros de cobre, permitiendo su posterior lixiviación por medio de la solución ácida de refino.

Se inicia en la etapa de apilamiento, donde el mineral sulfurado de baja ley es enviado desde los rajos con la granulometría obtenida tras la tronadura. Este mineral es apilado sobre una base impermeable, formando pilas permanentes. Una vez que el mineral es apilado, tuberías instaladas sobre las pilas permiten regarlo mediante una solución de cultivo de bacterias y refino a 25°C, a la vez que le es inyectado aire. El riego se desarrolla en ciclos con una duración de 250 a 350 días, obteniéndose una solución de PLS de 3 a 4 gramos por litro de cobre. Posteriormente, la solución PLS ingresa a la etapa de extracción por solventes SX, cuya función es transferir selectivamente el cobre contenido en el PLS a una solución llamada electrolito, el cual entra a la etapa de electro-obtención descrito anteriormente para producir cátodos de cobre de alta pureza.

1.1.2.5. PROCESO DE PLANTAS CONCENTRADORAS

Se cuenta con tres plantas concentradoras, Los Colorados, Laguna Seca y OGPI, en estos se llevan a cabo los procesos de molienda, clasificación y flotación que permite obtener una pulpa de concentrado de cobre.

El proceso inicia con la alimentación del mineral sulfurado proveniente del stockpile, a la molienda SAG a través de correas transportadoras, en este proceso se ingresa agua de forma dosificada. La pulpa proveniente de la molienda SAG es enviada a una etapa de clasificación en un Hamero de Pebbles, donde son separados los bolones del resto de la pulpa y son enviados a un chancador de Pebbles en el cual se les reduce de tamaño para reingresarlos al molino SAG. La pulpa de baja granulometría que sale del Hamero de Pebbles es enviada a una segunda clasificación de Baterías de Hidrociclones. El mineral que ha alcanzado las dimensiones adecuadas es denominado bajo tamaño u “overflow”, este es enviado a un cajón distribuidor para iniciar el proceso de flotación, en cambio el material sobre tamaño u “underflow” es dirigido a la etapa de molienda secundaria en molinos de bolas. Desde estos molinos, la pulpa es reenviada a la etapa de clasificación en Baterías de Hidrociclones.

Desde el cajón distribuidor, la pulpa es dirigida a las celdas de flotación Rougher, donde llega acondicionada con espumantes y acondicionadores selectivos que mejoran las propiedades de las partículas de cobre, haciéndolas hidrofóbicas y acrofilicas; además se inyecta aire para lograr la formación de burbujas a las que se adherirán las partículas de cobre. Las partículas hidrofóbicas acopladas a las burbujas emergerán a la superficie y serán retenidas allí gracias a la acción de los espumantes, completándose esta etapa del proceso con el reboce de la espuma enriquecida. La cola obtenida de este proceso de flotación de este proceso de flotación Rougher es el primer relave obtenido, el cual se conduce hacia Espesadores de Relaves para recuperar parte del agua y reingresarla al proceso, mientras que el relave remanente se bombea hasta un depósito final llamado Tranque de relaves.

El concentrado de cobre obtenido en la etapa Rougher es enviado a una nueva etapa de clasificación en Baterías de Hidrociclones del área de remolienda, donde el material underflow pasa a una etapa de remolienda en molinos de repaso, donde lo obtenido es llevado nuevamente a las Baterías de Hidrociclones. El material overflow es enviado a una etapa de Flotación Cleaner. La cola se procesa en una etapa de Flotación Scavenger. Aquí nuevamente se incorporan acondicionadores, espumantes y aire, logrando la flotación de las partículas de cobre que se retorna a las Baterías de Hidrociclones del área de flotación. El concentrado obtenido en la Flotación Cleaner contiene 35% de cobre y es enviado a los Espesadores de concentrado.

Finalmente, en los Espesadores de concentrado se retira parte del agua contenida en la pulpa. Como resultado del espesado se obtiene concentrado de cobre con una concentración de sólidos del 62%. El agua recuperada es retomada al proceso y el concentrado de cobre, con 8% de humedad, es enviado a estanques de almacenamiento para ser impulsado a través de un minero ducto de 170 km hasta Puerto Coloso.

1.1.2.6. PROCESO EN PLANTA COLOSO

La Planta Coloso se encuentra ubicada a 14 km al Sur de la ciudad de Antofagasta y consta de una Planta de Filtros y un puerto de embarque para el concentrado de cobre.

La Planta de Filtros tiene por objetivo recibir la pulpa de concentrado de cobre que llega de las plantas concentradoras para retirar el agua y seleccionar las diferentes calidades. Luego es enviado por medio de una correa transportadora hasta un stockpile. Desde ahí el concentrado es almacenado en barco o es transportado en camiones para los diferentes destinos finales.



Ilustración 2 Diagrama General del proceso productivo de Minera Escondida

2. DEFINICIÓN DEL PROBLMA

2.1.JUSTIFICACION DEL ALCANCE

El cambio revestimiento de molinos SAG y bolas es una actividad que depende en su totalidad, durante todas sus etapas de la acción directa de las personas, esto lo hace inestable, poco estandarizado, ineficiente y expone a los trabajadores a riesgos de alto potencial y en algunos casos con resultado de fatalidades. Esto lo confirma el informe de “Accidentalidad en el revestimiento del molino SAG” entregado por el departamento de seguridad Minera y fiscalización del SERNAGEOMIN en abril de 2017, donde se registran 3 accidentes fatales asociados a actividades de cambio de revestimiento y en dos de ellas por la interacción de los trabajadores con la maquina lainera al interior del molino.

En la actualidad el mercado sigue desarrollando medidas mitigadoras de los riesgos y orientada fuertemente en el desarrollo de piezas robustas de gran tamaño y pesos que hacen compleja la implementación de tecnologías que puedan automatizar el cambio de revestimiento. Si bien existen reducciones en los tiempos de ejecución es fundamental debido a la disminución de los giros por la disminución de piezas, no se ha podido eliminar la exposición de las personas a los riesgos por en la manipulación de los martillos, uso de llaves neumáticas, uso de oxicorte al exterior del molino y al aplastamiento por la interacción de la lainera y los revestimientos con el personal al interior del molino quienes debe ejecutar la instalación de los pernos. Por estas razones es fundamental el desarrollo de tecnologías que permitan eliminar la interacción de las personas en los procesos tanto al interior como en el exterior del molino.

Otro aspecto para destacar es que implementación de tecnología para automatización entrega un importante potencial de desarrollo para el cambio de las estrategias de mantención de una planta concentradora, ya que al disminuir los tiempos de ejecución permitiría migrar a un mayor número de detenciones, pero más cortas, para esto el gran desafío es desarrollar maquinas que hagan viable la implementación de revestimientos más pequeños y livianos.

2.2.ALCANCE DEL TRABAJO

Como resultado de este trabajo de tesis, se obtiene una propuesta de implementación de dispositivos y estrategias que permitan avanzar en la automatización del cambio de revestimiento, en base a evaluaciones de riesgo y económicas que justifiquen el valor que tiene la implementación de nuevas tecnologías para disminuir la exposición de las personas a los riesgos de la actividad y los beneficios en rentabilidad.

La propuesta de automatización contempla las características de las nuevas tecnologías que actualmente están desarrollo para la industria minera, acompañada de métricas determinadas en términos de factores de riesgo y aumentos porcentuales de disponibilidad de equipos de molienda lo que se traduce finalmente en un aumento del run time de la planta Concentradora.

El desarrollo de la tesis no consideró la implementación de las alternativas analizadas, sino que consideró solo un análisis de las alternativas a implementar.

2.3.OBJETIVOS

2.3.1. OBJETIVO GENERALES

El objetivo general de este trabajo fue determinar los beneficios de la implementación de tecnologías que permitan automatizar o semi automatizar el cambio el revestimiento en los molinos SAG y bolas en la planta concentradora Laguna Seca en Minera Escondida.

2.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar, analizar y proponer alternativas de desarrollo que permita disminuir la intervención de las cuadrillas en los trabajos de cambio de revestimiento tanto al interior como exterior de los molinos, a través de métricas de medición de exposición al riesgo de accidente mediante severidad y probabilidad de ocurrencia.
- Analizar y proponer cómo se pueden modificar y optimizar la estrategia de detenciones de planta para la ejecución de las mantenciones en base a la automatización del cambio de revestimiento y como se ve afectados los servicios de ejecución.
- Analizar una propuesta de automatización que permita disminuir los tiempos de cambio de revestimiento y posibilite la obtención de beneficio a través de una evaluación económica.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

3.1. CAMBIO DE REVESTIMIENTO

Los revestimientos de los molinos SAG y bolas son componentes de desgastes diseñados para proteger los cilindros y tapas, y mejorar el movimiento al interior del molino con el fin de maximizar el tratamiento de mineral. Estas piezas de desgaste sometidos a diferentes combinaciones de impacto y abrasión, por esta razón tienen distintas características de geometría, material, tamaño y peso de acuerdo con la posición que ocupan. Para molinos SAG los tipos de piezas convencionales son Corazas mono block y/ placa Lifter para cabezales y cilindro, Parrillas, Pulp lifters y Filler rings

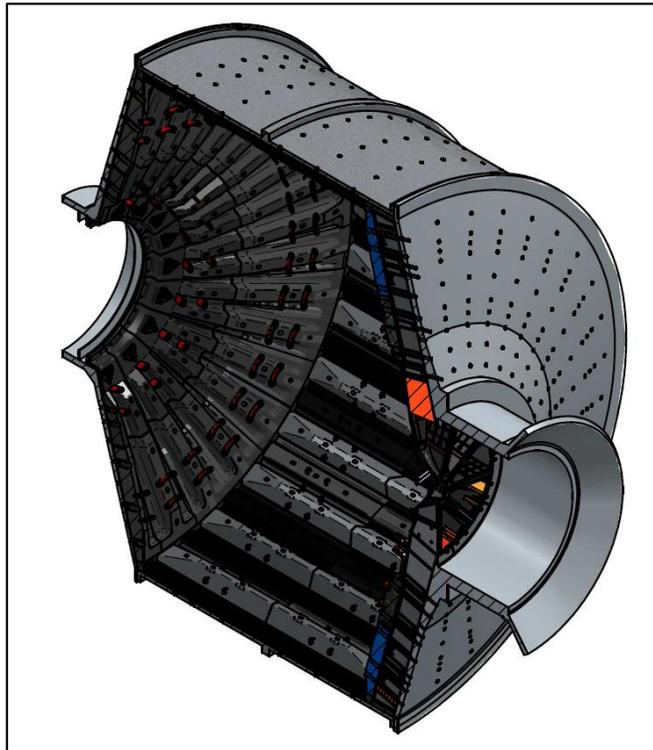


Ilustración 3 vista isométrica de cilindro y tapa de alimentación del molino SAG4, Escondida -

En la actualidad el cambio de revestimiento de molinos representa una actividad crítica del mantenimiento en las plantas concentradoras, por los tiempos asociados y principalmente por los riesgos a los cuales están expuestos los trabajadores tanto al exterior como al interior del molino.

De acuerdo con lo anterior la situación actual plantea el desafío de eliminar el riesgo de exposición de las personas, pero a la vez, ser capaces de mejorar los rendimientos y tiempos asociados a esta actividad de mantenimiento, por lo tanto, la incorporación de tecnología e innovación se ha transformado en uno de los principales objetivos de la industria Minera.

3.2.AUTOMATIZACIÓN

La automatización se refiere a un proceso en el cual una máquina o un sistema o un sistema automatizado es capaz de realizar una actividad sin la intervención humana. Esto ha generado una gran cantidad de posibilidades de mejoras en los procesos industriales y la minería está dejando de ser una excepción.

La automatización también nos relaciona con la Robótica industrial, donde la norma ISO lo define como un sistema manipulador que es capaz de cumplir las siguientes características:

- Es programado en ejes multipropósito
- De mueve de forma automática
- Es programable

En general la automatización se ha convertido en una solución de gran aceptación y placable los procesos mineros, como operación de camiones autónomos, pero también en un área poco implementada hasta ahora como la mantención ya que son equipos capaces de realizar tareas repetitivas, pero por sobre todo permite mejorar la seguridad, como es el caso del cambio de revestimiento de molinos.

En general se puede hablar de tres tipos de automatización:

- Automatización fija: Aquí la secuencia de proceso es fija y está determinado por el producto o proceso, los mecanismos que participan ejercen una actividad fija. Esta caracterizado por:
 - Una alta inversión inicial en equipos
 - Altas tasa de producción
 - Relativamente inflexible a cambios
- Automatización programable: En este caso el equipo tiene la capacidad de cambiar la secuencia de operación mediante la programación para adaptarse a las variaciones que requiere el proceso. Se caracteriza por:
 - Alta inversión en equipos
 - Tasa de producción inferior
 - Flexibilidad para adaptarse a las necesidades
 - Ejemplos: robots industriales.
- Automatización Flexible: Es una combinación de las dos anteriores, este tipo de aplicaciones articula una serie de estaciones conectadas entre sí. Se caracteriza por:
 - Este tipo de sistemas permite que los equipos (robots) trabajen interconectados y que ese intercambio de información pueda coordinar sus movimientos.

El presente estudio muestra las diferencias entre un cambio de revestimiento de molinos de manera convencional con la intervención de personas en todas sus etapas, versus un proceso gobernado por sistemas de equipos autónomos programados para ejecutar movimientos determinados con una serie de herramientas que permiten entregar un servicio confiable, estandarizado y sin la exposición de personas a riesgos críticos.

Las alternativas de equipos autónomos van de sistemas programados con accionamientos hidráulicos capaces de mover piezas de gran tamaño y sistemas robotizados con accionamiento de servo motores que si bien no son capaces de levantar grandes pesos si entregan movimientos de la alta precisión a velocidades considerablemente mayores.

3.3.REQUISITOS DE SEGURIDAD

En relación a la seguridad para la implementación de un sistema de automatización y en particular en el caso de los sistemas robotizados es necesario verificar que este no genera riesgos adicionales, y por esta razón es importante destacar que los requisitos de seguridad para robots industriales se rigen por la norma internacional ISO 10218, la cual es una norma tipo C.

En lo que se refiera a de seguridad para las maquinas existe una jerarquía de normas de tipo A, B y C:

- Normas de tipo A: Generales para todas las máquinas
- Normas de tipo B: Aspectos o dispositivos concretos de seguridad, válido para una amplia gama de máquinas
- Normas de tipo C: Concretas para una maquina o grupo de máquinas.

La norma SO 10218 se divide en dos partes. La primera es la ISO10218-1 la cual proporciona la guía para garantizar el diseño y construcción del robot, la ISO 100218-2 proporciona las pautas para protección del personal durante la integración, instalación, pruebas funcionales, operación, mantención y reparación de los robots.

En particular para el cambio de revestimiento se busca que el robot y las personas no compartan espacio al mismo tiempo, como lo indica el punto 5.10.2 de la norma, donde “el robot se detendrá cuando un humano esté en el espacio de trabajo colaborativo. La función de parada debe cumplir con 5.4 y 5.5.3. El robot puede reanudar la operación automática cuando el humano abandona el espacio de trabajo colaborativo”.

Así mismo la normativa se encarga de entregar la guía para un correcto análisis de riesgo y la definición de controles de seguridad como dispositivos limitadores de velocidad, peso y presión que permitan entregar un ambiente controlado y seguro para un correcto proceso de automatización.

4. MARCO TEORICO

4.1. ANÁLISIS DE RIESGO

La medición de los riesgos se realizará a partir de la estructura de gestión de riesgos de BHP, donde en primer lugar se establecen las siguientes definiciones:

- **Riesgo:** Posibilidad de que ocurra algo que podría tener un impacto adverso en los objetivos del proyecto. Se mide en términos de Probabilidad y Severidad.
- **Probabilidad (Likelihood):** Índice asignado a cada riesgo dependiendo de su probabilidad de ocurrencia. Éste índice es asignado de acuerdo a la Tabla de “Probabilidad” (Anexo 3).
- **Severidad (Severity):** Índice asignado a cada riesgo que representa el impacto potencial de un peligro o riesgo. Éste índice es asignado de acuerdo a la Tabla de “Severidad” (Anexo 3).
- **RRR - Índice de Riesgo Residual (Residual Risk Rating):** Calificación numérica aplicada a un riesgo, calculada como el producto de un factor de Severidad y un factor de Probabilidad. Representa el nivel de riesgo residual asociado a un riesgo después de tomar en cuenta los controles establecidos para su eliminación o mitigación y que han sido evaluados en cuanto a su eficacia.

También se establecen las siguientes acciones:

- **Identificación de riesgos**

Luego de establecer el contexto sobre el cual se realizará el análisis, se deben identificar los riesgos de Salud, Seguridad y Medio Ambiente.

Nota: El equipo debe considerar la información histórica relevante y la experiencia en la industria para el ejercicio de identificación y evaluación de riesgos, tales como: inventario de riesgos vigentes, cambios en el área e instalaciones, eventos significativos, eventos con lesión a las personas, Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA), eventos en otras operaciones o en otras compañías de la industria.

- **Analizar los riesgos**

Para cada riesgo identificado:

1. Se determinarán las causas, los controles preventivos existentes, los impactos y los controles mitigadores existentes.
2. Se determina la severidad residual y severidad MFL (perdida máxima permisible) utilizando la tabla de severidad (Anexo 3).
3. Se determina el factor de probabilidad y calcule el RRR (riesgo residual).
4. Clasifique el riesgo identificado según el siguiente criterio:

- Riesgo Material (HSE): $MFL \geq 5$ o $RRR \geq 90$.

- Riesgo de fatalidad única (Safety): MFL = 4.
- Riesgo HE: MFL = 4.
- Riesgo HSE: MFL ≤ 3.

- **Calculo del indicador de riesgo**

Una vez analizados los riesgos de la situación actual de exposición de los trabajadores en las actividades de cambio de revestimiento, se realiza el análisis en base a la implementación de las soluciones de automatización disponibles revisando la probabilidad de ocurrencia y la severidad para así obtener un nuevo valor para el riesgo residual, con este nuevo valor se obtiene la diferencia con el RRR sin proyecto, esta diferencia se divide por la inversión para así obtener un indicador de riesgo, J-factor.

- Para un riesgo identificado el J_{factor} se calcula como:

$$J_{factor} = \frac{RRR_{sp} - RRR_{cp}}{Inversión} \quad (1)$$

Donde RRR_{sp} es sin proyecto y RRR_{cp} con proyecto.

- Si el proyecto afecta a múltiples riesgos entonces el J-Factor se debe calcular considerando cada riesgo i :

$$J_{factor} = \frac{1}{Inversión} \times \sum_{\forall i} (RRR_i^{sp} - RRR_i^{cp}) \quad (2)$$

- El RRR_{cp} se debe estimar considerando el alcance del proyecto y, en consecuencia, la proporción del evento del riesgo que se reduce, *e.g.* para un proyecto que elimine el riesgo de accidente cambio de revestimiento en una parte de la planta concentradora, deberá estimarse que porcentaje p del total del riesgo eliminado representa dicha área. Esto se calcula como:

$$RRR_{cp} = RRR_{sp}(1 - p) + p \times RRR_{cp}^{area} \quad (3)$$

- El RRR_{cp}^{area} del área donde impacta el proyecto debe ser calculada de manera cualitativa.

- Reemplazando (3) en (1), se puede calcular directamente el J_{factor} como,

$$J_{factor} = \frac{(RRR_{sp} - RRR_{cp}^{area}) \times p}{Inversión} \quad (4)$$

Es importante destacar que los desarrollos e implementación de las nuevas tecnologías cumplan con el principio de la jerarquía de control para la gestión de los riesgos, es decir, deben estar enfocadas en eliminar la

exposición de los trabajadores al riesgo y las desviaciones que regeneran detenciones que afecten la continuidad operacional de la planta.

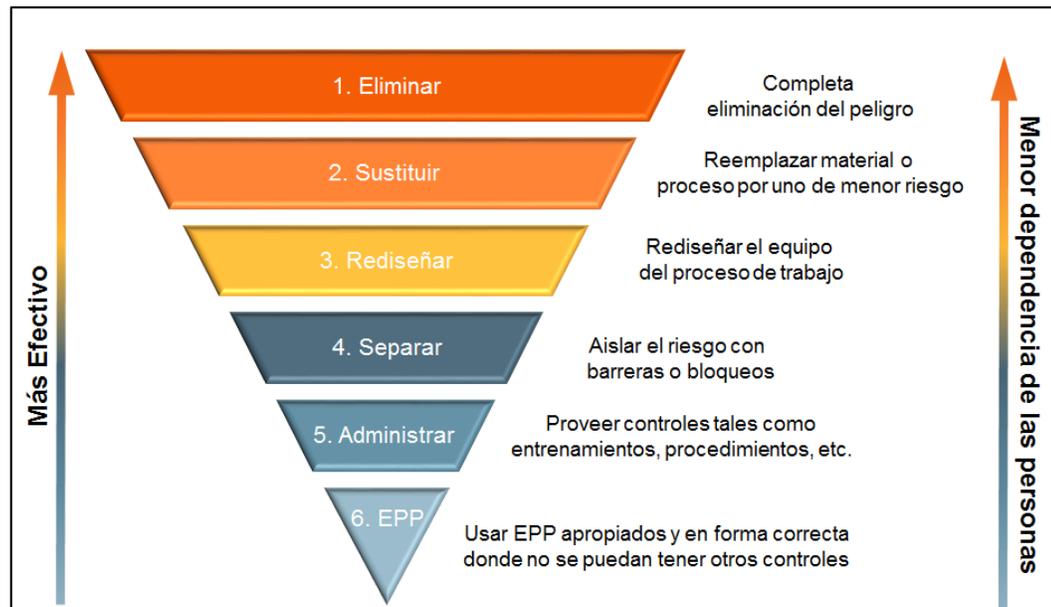


Ilustración 4 Jerarquía de control de riesgos

4.2. EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Para el proceso de selección de las alternativas identificadas se utilizará una Evaluación Multicriterio, con el fin de compararlas por medio de criterios cuantitativos y cualitativos.

Para lo anterior se utilizará el método Analítico Jerárquico, la cual es una herramienta de apoyo para el proceso de toma de decisiones a través de un ordenamiento estructural de las prioridades.

Para la aplicación de este método se realizará el siguiente proceso simplificado:

- Definición del equipo de trabajo: el análisis se realiza a partir de la definición de los objetivos relevantes por lo tanto es necesario un grupo de expertos que sepa identificarlos.
- Definición de las alternativas de solución: se seleccionan las alternativas que se van a comparar.
- Definición de los criterios: Corresponde a la etapa fundamental del proceso, esta puede ser de características muy técnicas y de responder a los siguientes elementos:
 - Se deben definir antes de iniciar el análisis en base a reglas que todos conozcan

- No deben ser redundantes
- Deben ser coherentes y llevara resultados plausibles.
- Jerarquización de los criterios de selección: esta etapa consiste en establecer escalas de relevancias de los criterios y sub criterios con el fin de cuantificar los criterios cualitativos a través de tablas que permite homologación numérica y entregar indicadores.
- Ponderación de los Criterios: el objetivo de esta etapa consiste en ponderar los criterios asignándoles un peso relativo que indique su importancia relativa en el análisis de alternativas.
- Evaluación de las alternativas: en esta etapa se realiza la puntuación de las alternativas en base a los criterio, indicadores y ponderaciones, generado un ranking que permita tomar la decisión.

Una vez obtenidos los datos necesarios para establecer la línea base y aplicar el marco teórico necesario para determinar los indicadores claves, se realizará el análisis de alternativas a través de una trade off en al cual se revisarán criterios como:

- Disminución del riesgo de exposición de la persona a riesgos críticos.
- Costos de implementación
- Tiempo de implementación

El tiempo de implementación considera las estrategias que las alternativas pueden ofrecer ya esto está directamente relacionada con el costo, riesgos y tiempos para asociados para ser entregados a la operación.

La estrategia de implementación deberá considerar el procedimiento de gestión de cambio considerando todas sus etapas antes de la implementación de un piloto o bien frente a una etapa de escalamiento de automatización a gran escala que considere todos los molinos disponibles en proceso que esté sometido al plan de cambio de revestimiento.

4.3. ESTRATEGIA DE IMPLEMENTACIÓN Y GESTIÓN DE CAMBIO

Las propuestas de automatización corresponden a nuevas tecnologías disponibles en el mercado a través de empresas especialista en el cambio de revestimiento. Estas propuestas son innovadoras en la industria frente a los métodos convencionales por lo tanto la implementación se ajustará a una estrategia definida en etapas la cual busca disminución de los riesgos asociados

La estrategia de implementación a desarrollar se describe de la siguiente forma:

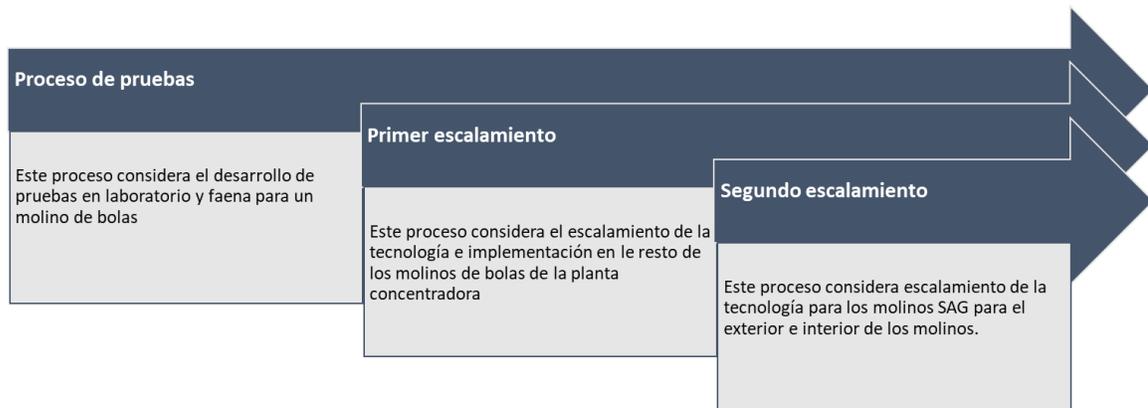


Ilustración 5 Proceso general de implementación

1. Proceso de pruebas: Esta etapa considera la implementación de un dispositivo en el exterior de un molino de bolas con el fin de mitigar los riesgos, contar con mayor flexibilidad para las pruebas en faena y principalmente por que actualmente cuentan con revestimientos apemados por fuera que no requieren la intervención de personal desde el interior del molino. Esta implementación permitirá ejecutar el cambio de revestimiento sin la intervención de personas tanto al interior como en el exterior del molino.

A continuación, se presentan los principales hitos de esta etapa:

- Selección de tecnologías
 - Especificación de procesos
 - Definición de KPI y de protocolos de pruebas
 - Análisis de riesgo
 - Fabricación de estadios de pruebas en laboratorio
 - Pruebas en Laboratorio y en faena.
2. Primer Escalamiento: Esta etapa considera el escalamiento de la tecnología seleccionada al resto de molinos de bolas e incorporando los nuevos equipos a la estrategia de mantenimiento de la planta concentradora.

- Segundo Escalamiento: Esta etapa considera el escalamiento de la tecnología para el exterior de un molino de SAG, junto con el desarrollo de la tecnología para el interior de los molinos.

La automatización del cambio de revestimiento implica cambios en varias dimensiones como:

- Tecnología e implementación de equipos con nuevas especificaciones modelos y diseños.
- Infraestructura o edificios, materiales e insumos.
- Cambios estructurales para Personal interno y colaborador
- Cambios en la confiabilidad del sistema y estrategias de mantención.

De acuerdo a lo anterior un proceso de implementación debe estar sometido a un procedimiento de gestión de cambio que permita una correcta administración y desarrollo del proceso desde la identificación de los riesgos, pasando por los protocolos de pruebas hasta su implementación, tal como lo indica el siguiente flujo de proceso:

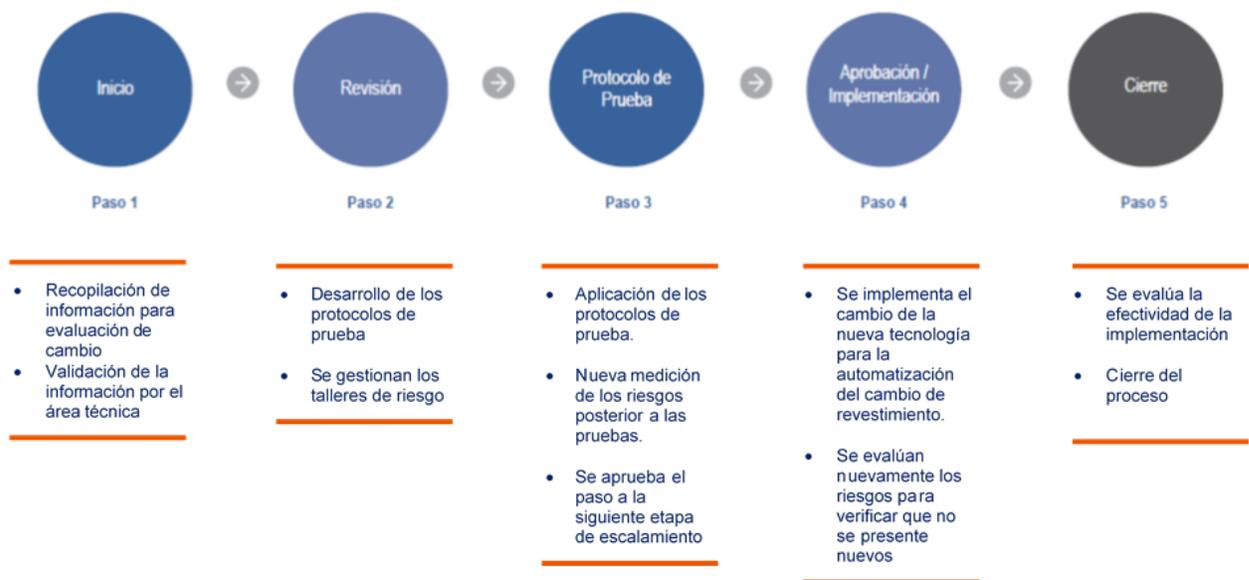


Ilustración 6 Ilustración Flujograma de gestión de cambio.

4.4. ANÁLISIS ECONÓMICO

En relación al impacto en la rentabilidad, una vez seleccionada la alternativa se aplicará un modelo de evaluación económica para medir el beneficio a través de la obtención del NPV del proyecto a partir del gasto capital y operacional frente al potencial de aumento de disponibilidad de planta que entrega la implementación de nuevas tecnologías.

El beneficio por el aumento de disponibilidad se medirá en base al incremento del tratamiento de mineral de acuerdo al plan de producción de la compañía y disminución del costo operacional frente a la inversión de capital.

Es importante destacar que la inversión era considerada en dos fases de escalamiento, en primer lugar, para los molinos de bolas y luego en los molinos SAG.

A partir de lo anterior se definen los siguientes conceptos:

- Costo capital (CAPEX): Corresponde a la inversión de la implementación del sistema que permita la automatización del cambio de revestimiento, dichos dispositivos son considerados activos nuevos para la compañía y los costos de ingeniería e instalación también serán considerados costos capitales.
- Costo operacional (OPEX): Para este caso corresponde al gasto del servicio de los cambios de revestimientos y mantención de los equipos utilizados. Cabe recordar que los contratos de servicios de cambio de revestimiento son de carácter eventual planificados en las detenciones de planta.

5. METODOLOGIA

Para el desarrollo de la tesis, en primer lugar, se presenta un diagnóstico del estado actual de las principales variables, recursos y elementos que gobiernan el cambio de revestimiento. En base a este diagnóstico se midieron los impactos que genera implementación de dispositivos y estrategias a través de un análisis de riesgos para obtener un indicador en base a la disminución de la exposición del personal a los riesgos asociados a la actividad e indicadores económicos que permitan visualizar los beneficios de la automatización en el cambio de revestimiento.

Para llevar a cabo la metodología se establece el siguiente desarrollo:

5.1.LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Durante esta etapa se recopiló la información relevante de todos los procesos asociados al cambio de revestimiento con el fin de identificar las distintas problemáticas y oportunidades de mejoras del proceso.

Para el desarrollo del levantamiento se establecieron los siguientes focos:

- Recopilación de antecedentes de accidentabilidad asociados a cambio de revestimiento de en Escondida y la industria minera.
- Talleres multidisciplinarios que considere las áreas de mantención, procesos, soporte técnico e ingeniería
- Recopilación de datos a partir de los reportes de las áreas de planificación, mejoramiento y cambio revestimiento de la Gerencia de Mantención Planta, como también de las áreas de procesos y metalurgia, establecido los indicadores de desempeños claves que permitan entender las oportunidades de mejora.
- Recopilación de datos a través de la interacción con personal que cuente con experiencia en terreno con el fin de obtener datos claves para minimizar los riesgos en las fases de implementación de las soluciones.
- Recopilación de los costos operacionales del cambio de revestimiento, principalmente con las áreas de gestión y contratos.
- Búsqueda de alternativas de empresas de que puedan entregar soluciones tecnológicas que permitan solucionar las problemáticas identificadas, por medio de los siguientes canales:
 - Asesores expertos
 - Empresas de tecnologías
 - Proveedores estratégicos en cambio de revestimiento

Una vez recopilados los antecedentes se definió la línea base a partir de la cual se desarrolló el análisis de alternativas de automatización del cambio de revestimiento.

5.1.1 DEFINICIÓN DEL ESTADO ACTUAL

A partir de los datos recopilados se estableció el estado actual de las principales variables que rigen la actividad del cambio de revestimiento, con lo cual se proyectaron y midieron los beneficios potenciales que entrega la implementación de nuevas tecnologías.

5.2. DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS ANALIZADAS

Una vez definido el estado actual del proceso a mejorar se revisaron las alternativas tecnológicas que actualmente están presentes en el mercado y que desarrollan soluciones que se ajusten a las necesidades de la minería para mejorar la ejecución del cambio de revestimiento.

El objetivo es generar una búsqueda en base a criterios establecidos por un comité de expertos en los cuales se buscará medir los siguientes aspectos:

- Innovación
- Factibilidad de implementación
- Costos estimados del desarrollo de la nueva tecnología y su implementación
- Riesgos de implementación

5.3. EVALUACIÓN DE RIESGO

Uno de los principales motivadores de este estudio se refiere a la eliminación del riesgo de exposición de las personas, por lo tanto, es fundamental obtener indicadores que permitan medir la eficiencia de la implementación nuevas tecnología para la automatización del cambio de revestimiento.

En particular en este caso se aplicó el procedimiento de identificación, evaluación y análisis de los riesgos de seguridad descritos en el marco teórico con el fin de obtener valores que permitan visualizar la variación de los riesgos residuales en el escenario de implementar una nueva tecnología.

Otros aspectos a analizar son los riesgos que puede traer el realizar un cambio de estas características en otros procesos tales como mantenibilidad, contratos de asistencia técnica, costos operacionales, compra de insumos estratégicos y empleabilidad.

5.4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN

Una vez obtenidos los datos necesarios para establecer la línea base y aplicar el marco teórico necesario para determinar los indicadores claves, se realizó un análisis de alternativas en base a los criterios definidos en el marco teórico:

- Disminución del riesgo de exposición de las personas a riesgos críticos.
- Disminución de tiempos de cambio de revestimiento
- Inversión
- Implementación
- Mantenibilidad

5.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Además de la búsqueda de la reducción de la exposición de las personas a riesgos de alto potencial, es fundamental conocer la rentabilidad que entrega la solución propuesta y su estrategia de implementación, para esto es necesario desarrollar una evaluación económica.

A partir de lo anterior la implementación de una nueva tecnología para el cambio de revestimiento se basa en desarrollar una solución que no afecte la productividad de la planta concentradora como unidad negocio, para esto es importante entender que la automatización busca obtener procesos de calidad que sean más eficientes y estandarizado, por lo tanto el presente estudio analiza el potencial de beneficio económico a través de la reducción de los costos operacionales, y disminución de los tiempos de cambio de revestimiento que permitirían generar optimizaciones en las estrategias de mantenimiento y mayor disponibilidad de planta Concentradora la cual se puede traducir en el aumento del tratamiento de mineral.

Se realiza el cálculo de indicadores económicos en base a la optimización del costo operacional y el aumento de tratamiento para el plan de producción.

6. ANALISIS DE LA INFORMACIÓN

A partir de la metodología planteada se desarrolló el análisis de la información asociada a las tecnologías planteadas que permitirán establecer los indicadores necesarios para desarrollar un análisis de alternativas y establecer una propuesta de implementación.

6.1.CONTEXTO DE LA INDUSTRIA

En la actualidad el cambio de revestimiento sigue siendo una de las tareas más críticas en la operación de las plantas concentradoras, por lo tanto, es un tema que cada vez está más presente en la industria minera. Esto se puede ver en la evolución que ha tenido la mirada hacia esta actividad, según especialistas, se observa cierto nivel de madurez en el enfoque de revestimiento.

Hace algunos años atrás el foco estaba puesto exclusivamente en el desgaste de las piezas, los planes de mantención y entregar un perfil para un correcto comportamiento de la carga la interior del molino, pero carente de un análisis más profundo en el impacto en la operación de la planta y los riesgos a los cuales estaban expuesto los mantenedores. Con el paso del tiempo el análisis se ha profundizado orientado en que el revestimiento es un componente fundamental en el desempeño del equipo ya que es el encargado de dar la energía para la carga al interior del molino, y que los procesos de mantención y recambio tiene un impacto impórtate en la disponibilidad de la planta.

En relación a los tiempos de ejecución del cambio de revestimiento una parte importante de la industria se ha orientado en disminución de los movimientos lo cual implica el desarrollo de revestimientos de mayor tamaño y a la vez disminuir los pesos lo que se traduce finalmente en la disminución de los giros , desarrollando la implementación de nuevos materiales a través de revestimientos híbridos, es decir, piezas que incorporan caucho a la estructura base de acero, haciéndolas más livianas, menos costosas y más fáciles de montar y desmontar. Por ejemplo, en Minera Escondida se han implementado desarrollos de mejora en el pulp lifter¹ en la tapa de descarga del molino SAG 5, cambiando de acero CR-Mo (aleación de Cromo Molibdeno), a acero- Goma de 500 HB, con esto se logra reducir en un 33% el peso de la tapa de alimentación, esto se traduce a su vez en una mejora operacional al utilizar ese peso disponible para el llenado de bolas y eficiencia energética, pero sin duda su principal valor está en que permite una mayor eficiencia en los equipos de mantenimiento (ver ilustración 7).

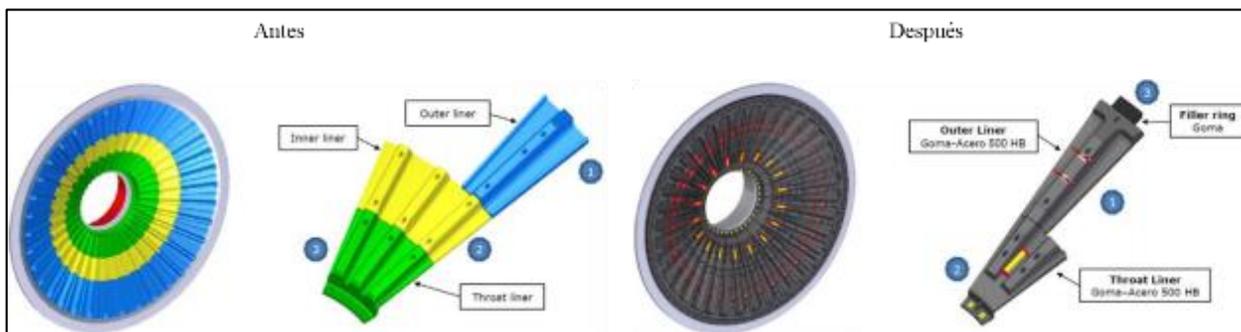


Ilustración 7 mejoras para la modificación de la configuración de la tapa de descarga del molino SAG mediante la implementación de revestimientos de acero – goma.

¹ver descripción de revestimiento del SAG 4 y SAG 5 en anexo 1.

Esta orientación en la búsqueda de piezas más grandes tiene la limitación del peso lo cual lo cual hace los proceso más ineficientes y sobre todo más riesgosos, y es en esta línea donde la industria en general ha tomado acciones que buscan administrar los riesgos asociados a estos movimientos, como la instalación de sensores de proximidad que incorporan sistemas de bloqueo de las máquinas laminas, sin embargo, no son acciones que eliminen la exposición a riesgos de alto potencial como el aplastamiento.

La minería es una industria que se ha caracterizado por ser conservadora en términos de innovación tecnológica ya que en general las implementaciones de nuevos controles hacen la ejecución más segura, pero a la vez más lenta disminuyendo la productividad, sin embargo, a juicio de expertos y académicos, “las tendencias indican que es posible asegurar una integración exitosa entre confiabilidad y seguridad en el cambio de revestimiento a través la automatización”¹.

6.2.SEGURIDAD: RIESGOS DE EXPOSICIÓN DE LAS PERSONAS Y ACCIDENTABILIDAD

Como ya ha sido descrito el cambio de revestimiento es una actividad crítica desde el punto de vista de seguridad, esto se logra apreciar en la gran cantidad de riesgos identificados en los procedimientos, por lo tanto, hoy existe la necesidad de implementar sistemas que permitan eliminar los riesgos que se describen a continuación:

- a) **Caída de persona desde altura:** este riesgo se refiere al potencial de caída de altura durante os trabajos sobre el puente de lamina o bien al exterior del manto y tapas del molino.
- b) **Caída de objeto:** este riesgo se refiere a la caída de objetos de niveles superiores, como bolas o herramientas y también por la proyección de partículas.
- c) **Impacto persona con equipo móvil/vehicula a persona:** este riesgo está relacionado a la interacción con equipos móviles como la grúa horquilla durante te el traslado de los revestimientos.
- d) **Liberación descontrolada de energía:** este riesgo está relacionado al uso de herramientas con energía hidráulica y neumática
- e) **Espacios confinados:** este riesgo está relacionado a todos los trabajos al interior del molino, el cual es considerado un espacio confinado.
- f) **Incendio:** por el uso las máquinas de oxicorte o soldadura, durante el desmontaje de los revestimientos.
- g) **Maniobras de izaje:** se refiere a los riesgos relacionados a las maniobras de Izaje con puente grúa durante las distintas atapas del proceso.

- h) **Atrapamiento:** Debido a los movimientos inesperados que pueden producir los componentes. Mantener siempre manos alejadas de los puntos de partes que puedan moverse y originar posibles atrapamientos.
- i) **Aplastamiento por máquina lainera:** actualmente es uno de los principales riesgos que busca eliminar el proceso de automatización, ya que se refiere a la exposición la personas a los movimientos de la lainera al interior del molino.

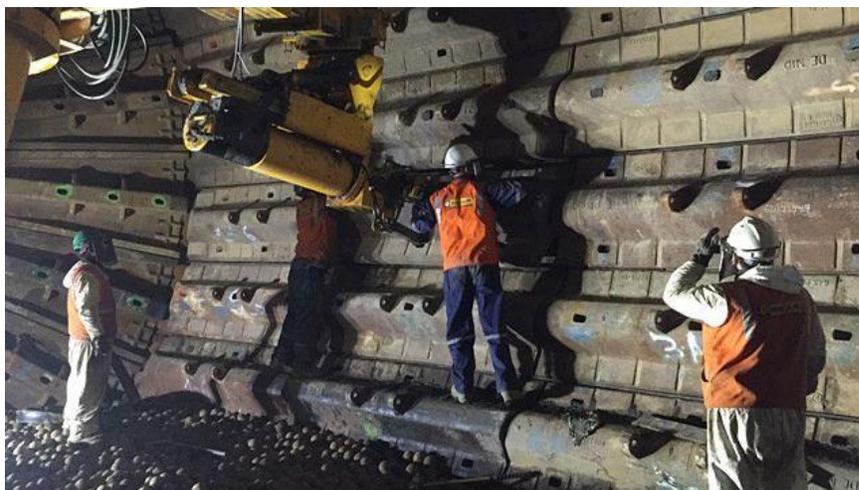


Ilustración 8 personal expuesto a los riesgos de los trabajos al interior del molino durante el cabio de revestimiento

Es importante destacar que en particular en los trabajos de “Montaje de revestimiento desde centro de cilindro hacia tapa descarga” existe el riesgo de aplastamiento entre la maquina lainera y los trabajadores que cumplen la función de “armadores” en cargados de instalar los pernos desde el interior del molino, esta actividad se describe mediante la siguiente secuencia y controles asociados.

- Cuando ya se encuentren apretados a lo menos 2 pernos del revestimiento, el personal armador (3 personas) más el observador de seguridad se posicionan en la zona de seguridad distancia aproximada a 4 Mts. demarcada en lado tapa alimentación contraria al frente de trabajo.
- Operador lainera twin deberá ponerse de pie, verificar visualmente la posición de los 3 armadores y el observador de seguridad, corroborar mediante el líder de los armadores que se encuentren en la zona segura lado contrario a la operación de la lainera, pondrá en servicio maquina lainera twin, soltará pines y retirará cabezal desde asas del revestimiento. Una vez liberados los pines, operador de lainera twin deberá retraer y levantar pluma hasta alcanzar altura que garantice el giro libre y seguro de la pluma para ir en busca del otro revestimiento.

Esta actividad es crítica, ya que es donde se genera la mayor exposición con el mayor potencial de riesgo, incluso de fatalidad. La estadística entregada por el departamento de seguridad Minera y fiscalización del SERNAGEOMIN en abril de 2017 así lo demuestra:

ACCIDENTES FATALES AL INTERIOR DE MOLINOS SAG PERÍODO 2000 AL 2017							
Fecha	Región	Empresa Mandante	Empresa Contratista	Instalación	Tipo Accidente	Cargo	Fallecido
02-01-2000	Antofagasta	Codelco Chile, División Chuquicamata	Después de realizar el lavado con solvente dieléctrico del motor y estator del molino SAG de la concentradora, se produjo la acumulación residual del líquido inflamable en los pisos y en la base interna del estator y la generación de gases por la volatilización, esta última situación se vio incrementada por el funcionamiento de calefactores ubicados en la parte interna de la base del estator y por encerramiento del sector intervenido producto de la colocación de carpas, generándose las condiciones propicias para la iniciación de fuego por calor radiante y la posterior inflamación violenta de los gases, la que alcanzó a un trabajador que se encontraba en ese lugar causándole la muerte en forma instantánea.	Planta	Carbonizado por incendio en el interior de Molino SAG	Jefe Electromecánico de Planta	1
24-08-2007	L.B. O'Higgins	Codelco Chile, División El Teniente	Retirando revestimiento gastado de la tapa de alimentación del molino (el que se encontraba pegado al manto del mismo), mientras se perforaba el revestimiento con oxicorte para engancharlo y desplazarlo, en un momento se desprende súbitamente, golpeando al trabajador quién se encontraba en el pozo contenedor de bolas, causándole lesiones que le provocaron la muerte.	Planta Sewell	Golpeado por lana de molino.	Auxiliar de aseo Industrial	1
21-10-2016	Antofagasta	Minera Escondida Ltda	8 trabajadores al interior del molino SAG N° 5 realizan el cambio de revestimiento del molino, apoyados por una máquina lainera, en un momento un trabajador es golpeado por el brazo hidráulico del equipo con el cual se realizaba el revestimiento. A consecuencia de las lesiones recibidas el trabajador fallece en el lugar.	Planta	Golpeado por brazo hco de Máquina Lainera al interior de Molino SAG	Armador	1

Tabla 1 Data histórica del Sernageomin de accidentes fatales la interior del molino SAG

Adicionalmente también existen una gran cantidad de eventos de menor potencial, como lo indica la tabla xx y también de incidentes sin intercambio de energía (ver tabla 11 anexo 2), los cuales representan la necesidad de establecer mecanismos que logren eliminar la exposición de las personas a las distintas energías involucradas en la actividad

Fecha	Clasif. Chile	Nivel Real	Nivel Pot.	Empresa es Spot / Permanente	Parte del Cuerpo	Diagnóstico	Descripción de Evento
18-07-16	STP	1	1	Spot	Mano	Contusión palma	Mientras realiza torque de pemo en molino de bolas, llave hidráulica se desencaja de la cabeza del pemo impulsándose hacia atrás golpeando la mano del trabajador
21-10-16	FATAL	4	4	Permanente	Cabeza	Fallecimiento	En actividad de montaje revestimiento molino SAG 5 es golpeado por maquina Lainera
03-08-18	STP	1	1	Permanente	Pie	Lesión osteomuscular tobillo	En planta concentradora los colorados, área Molienda, en circunstancia que mantenedor desplaza andamios, se dobla el pie izquierdo en zona de anclaje de lainera.
24-10-18	CTP	3	3	Permanente	Dedo	Osteomuscular mano izquierda	El trabajador bota pemo de revestimiento usando barretilla, al caer el pemo se desliza barretilla quedando dedo meñique en la perforación del molino, sufre apriete entre borde interior de la perforación del molino y la barretilla.
13-06-19	CTP	3	3	Permanente	Dedo	Lesión osteomuscular	Trabajando en molino n 4 frente a concentradora los colorados, trabajador se encontraba sacando la rótula del muñón lado carga. Cuando se disponía a realizar Izaje de la rótula este baja Y el dedo medio de mano derecha quedó Aprisionado entre 2 piezas que pesan alrededor de 60 kg.
05-09-19	CTP	3	3	Spot	Manos	Mano derecha gravemente lesionada	Mientras trabajador se encuentra la interior del molino se desprende Lifter golpeándolo en su mano derecha

Tabla 2 Estadística de accidentabilidad relacionada al cambio de revestimiento en Escondida.

STP: sin tiempo perdido; CTP: con tiempo perdido

6.3. DOTACIÓN PARA LA EJECUCIÓN DEL CAMBIO DE REVESTIMIENTO

El cambio de revestimiento involucra la gestión y planificación de un número importante de personas enfocadas en distintas tareas específicas tanto en el molino SAG como en los molinos de bolas como en durante las detenciones de Shutdown (SD) y mantenencias programadas (PM)

	Fecha	Línea de molienda	Dotación por día de trabajo					Total
			1	2	3	4	5	
Shutdown	12-08-2020	Línea 1	167	158	158	158	0	641
	09-09-2020	Línea 2	154	154	154	154	0	616
	21-10-2020	Línea 1	89	89	89	0	0	267
	11-11-2020	Línea 2	154	154	145	145	119	717
	02-12-2020	Línea 1	122	122	122	0	0	366
	10-02-2021	Línea 2	144	144	144	144	0	576
	21-04-2021	Línea 1	108	108	54	0	0	270
	12-05-2021	Línea 2	142	142	142	142	142	710
	02-06-2021	Línea 1	112	112	95	78	0	397
Mantención programada	22-07-2020	Línea 2	76	-	-	-	-	76
	23-09-2020	Línea 2	114	114	-	-	-	228
	14-10-2020	Línea 1	76	-	-	-	-	76
	09-12-2020	Línea 1	62	-	-	-	-	62
	09-12-2020	Línea 1	52	-	-	-	-	52
	13-01-2021	Línea 2	76	-	-	-	-	76
	17-03-2021	Línea 2	77	-	-	-	-	77
	14-04-2021	Línea 1	44	-	-	-	-	44
	09-06-2021	Línea 1	69	-	-	-	-	69

Tabla 3¹ Flujo de dotación diaria de trabajadores para el cambio de revestimiento durante los Shutdown y mantenencias programadas de la línea 1 y 2 de la Planta Concentradora Laguna Seca para el FY21.

¹Los datos seleccionados excluyen las actividades de preparativos y normalización del área posterior al cambio de revestimiento de los molinos.

Como se mencionó anteriormente, uno de los principales desafíos que enfrenta la automatización del cambio de revestimiento es poder disminuir las dotaciones de personal que participan en las actividades que están directamente relacionadas a la exposición a los riesgos crítico tanto al interior como al exterior del molino, principalmente en el desmontaje, limpieza y montaje del revestimiento.

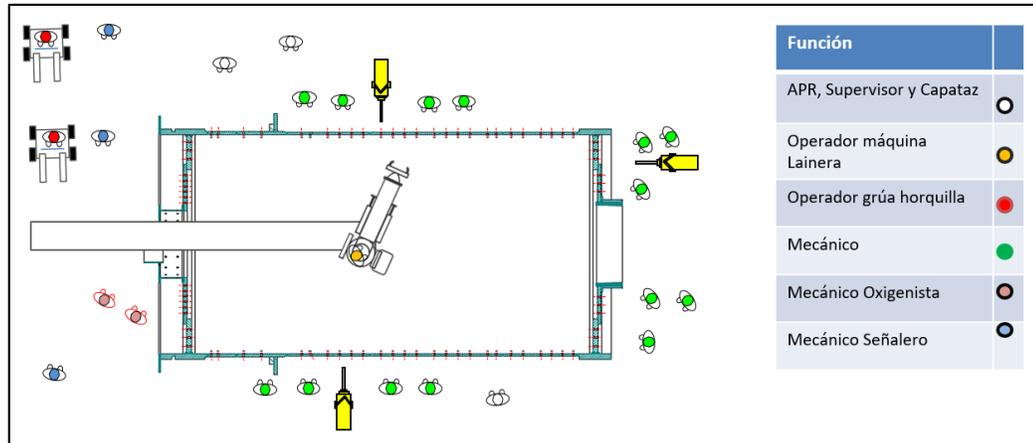


Ilustración 9 Distribución del personal para tareas de desmontaje de revestimientos

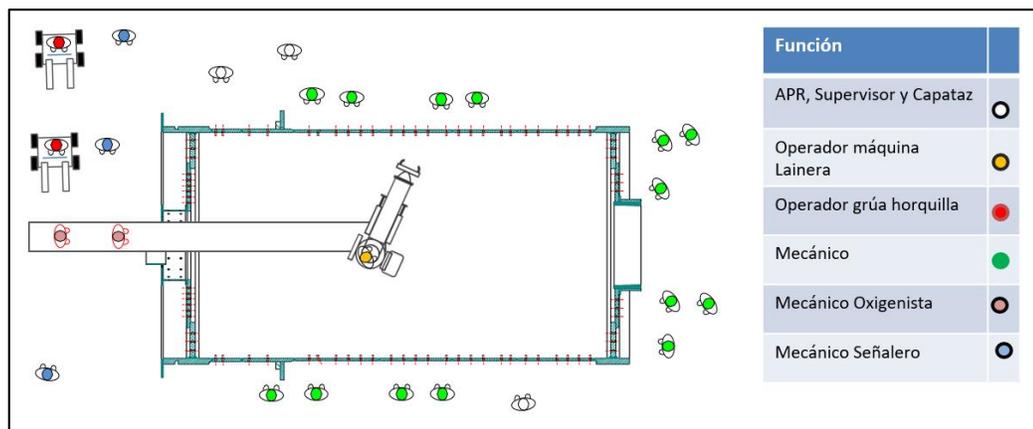


Ilustración 10 Distribución del personal para tareas de montaje de revestimientos

De las ilustraciones 9 y 10 se establece que el total de personas involucradas en las actividades directas de cambio de revestimiento son 25 por molino, de las cuales 20 pueden estar expuestas a riesgos que pueden ser eliminados mediante la implementación de sistemas automatizados.

Es importante destacar que además de la eliminación de la exposición al riesgo la automatización también permite disminuir los costos operacionales asociados, al disminuir el número de personas involucradas en las distintas etapas del proceso, reduciéndolo solo a los roles de supervisión de revestimiento y de la operación de los equipos automatizados.

6.4. TIEMPOS PARA EL CAMBIO DE REVESTIMIENTO

El cambio de revestimiento es el principal elemento que influye en la disponibilidad de la planta concentradora por lo tanto las mejoras asociadas en los tiempos para el cambio de revestimiento son fundamentales para la continuidad operacional.

Como ya se mencionó anteriormente se ha desarrollado mejoras para la implementación de piezas de mayor tamaño en base a la aplicación de piezas de acero – goma, esto permitió redefinir la configuración de corazas en la tapa de descarga lo cual genera un impacto directo en el número de giros del molino durante la mantención.

Como resultado de este proceso de mejoras se han obtenidos resultados importantes en la reducción de los tiempos de ejecución del cambio de revestimiento, sin embargo, los próximos desafíos son complejos ya que al bajar de 75 horas para el mantenimiento implica que el cambio de revestimiento del SAG deja de ser la ruta crítica de las detenciones mayores en planta.

El gran desafío es disminuir aún más los tiempos de ejecución para lo cual es fundamental la implementación de tecnologías para la automatización. Hoy en día existen distintas alternativas de desarrollo, algunas que buscan la instalación de sistemas hidráulicos robustos que permiten mover piezas de gran peso y volumen.

Sin embargo, existen propuestas de robotización lo cual requiere dar un giro en las estrategias actuales ya que para la implementación de sistemas robotizados es necesario disminuir el peso de los revestimientos y volver a un alto número de piezas pero que esta vez serán manipuladas por sistemas de alta velocidad y precisión, esto permitiría dar una visión completamente nueva a las estrategias de mantención de las plantas concentradoras.

Caso: reducción componentes SAG5

Componente	Diseño Original SAG5	Diseño Dic. 2017	Futuro 2019-2020
Tapa alimentación	90 pcs	54 pcs	54 pcs
Cilindro	240 pcs	180 pcs	90 pcs
Tapa descarga	184 pcs	94 pcs	94 pcs
TOTAL PIEZAS	514 pcs	328 pcs	238 pcs
TOTAL MOVIMIENTOS	1028	656	476
TIEMPO ESTIMADO (5,5 mov/hr)	187 hrs	119 hrs	86 hrs

Ilustración 11 Cuadro de evolución de número de piezas y tiempo de cambio de revestimiento.

Actualmente el área de atención ha desarrollado distintas estrategias para disminuir los tiempos de cambio de revestimientos desde la implementación de nuevos revestimientos en los molinos de bolas, y nuevos diseños en la tapa de y cilindros de los molinos SAG hasta nuevas estrategias que consideran el desacople de molinos de bolas de y menor cantidad de horas para el molino SAG volviendo a ser la ruta crítica en la detención de planta.

Para el presenta estudio se estimará el beneficio por la automatización del cambio de revestimiento en base a la disminución de los tiempos en base a la estrategia actual:

Planta Laguna Seca Línea 1

- Las detenciones de shutdown (SD) son por 80-85 horas cada 8 meses:
 - Cambio de revestimiento del molino SAG
 - Cambio de revestimiento de un molino de bolas
- Las detenciones de mantenencias planificadas (PM) son de dos tipos:
 - PM1: 14 horas SAG & 1 línea de Molinos bolas (MB) por 78 horas totales
 - PM2: 30 horas de detención SAG.



Ilustración 12 Cuadro de distribución horas de detención de molinos de la línea 1 de molienda con un horizonte de dos años fiscales.

Planta Laguna Seca Línea 2

- Las detenciones de shutdown (SD) son por 90 hrs cada 8 meses:
 - Cambio de revestimiento del molino SAG
 - Cambio de revestimiento de un molino de bolas
- Las detenciones PM son de dos tipos:
 - PM1: 14 horas SAG & 1 línea de MB por 81 hrs totales
 - PM2: 36 horas de detención SAG.

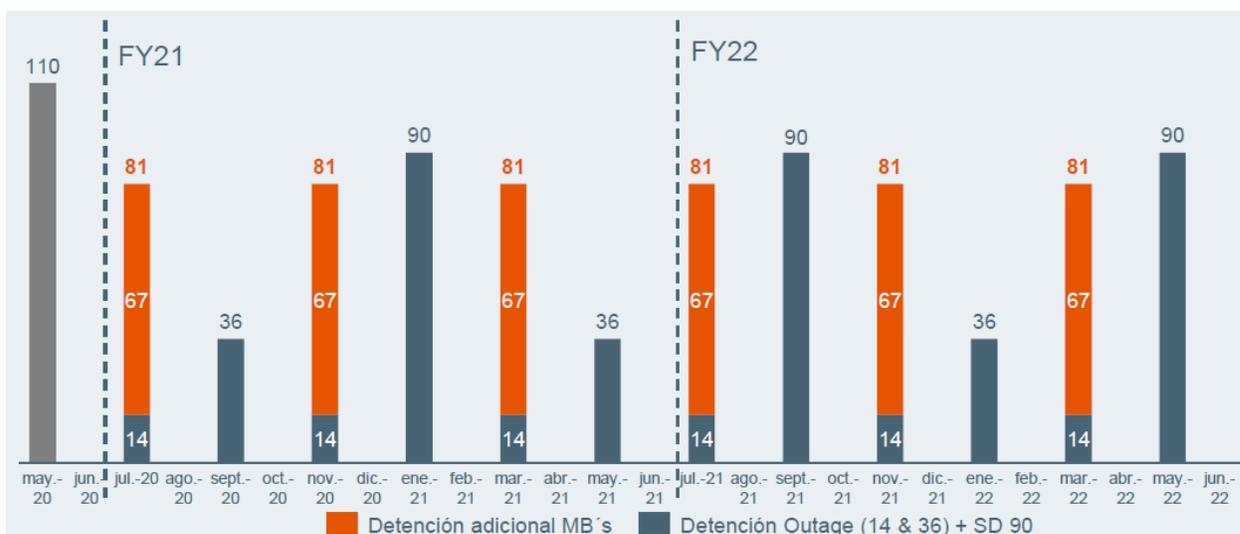


Ilustración 13 Cuadro de distribución horas de detención de molinos de la línea 2 de molienda, con un horizonte de dos años fiscales.

Esta estrategia permite disminuir el número general de personas durante una detención de planta, lo cual permite entregar un mejor control de la seguridad en terreno, además de facilitar la logística para repuestos y trabajos previos.

Según el informe “Impacto de las nuevas tecnologías en las competencias requeridas por la industria minera”, publicado por el consejo minero en el año 2018, en el mantenimiento el mayor impacto está en el cambio a hacia la automatización, principalmente en las competencias asociadas a tareas eléctricos e instrumentación, por esta razón resulta relevante avanzar en el desarrollo de iniciativas de automatización en procesos mecánicos como el cambio de revestimiento.

6.5. PROPUESTAS DE AUTOMATIZACIÓN

Durante el desarrollo del estudio se observa que no existe en el mercado una amplia oferta de empresas que desarrollen tecnologías aplicadas para el cambio de revestimientos, por esta razón, la búsqueda se direcciona en dos líneas de trabajo. Por una parte, enfocada en empresa especialistas en el desarrollo de máquinas para el cambio de revestimiento y por otra parte en empresas de tecnologías que buscan adaptar soluciones de robotización para los procesos de la minería.

6.5.1. (A) MIRS: Sistemas Robóticos

MIRS es una empresa de tecnología fundada en 2007 con el propósito de proporcionar soluciones robóticas que sean altamente sostenibles tanto tecnológica como financieramente para los procesos mineros. MIRS es una de las compañías subsidiarias de HighService Corporation.

En relación al presente estudio MIRS establece los siguientes objetivos en su desarrollo:

1. Transformar el cambio de revestimientos desde un proceso manual, para consolidar un proceso completamente automático
2. Proveer un espacio seguro, en el que se pueda realizar todo tipo de pruebas industriales sin poner en riesgo la continuidad operacional de la planta
3. Especificar, en conjunto con los usuarios futuros, un sistema de cambio de revestimientos automático que permitan finalmente:
 - a. Eliminar la exposición de los trabajadores a la interacción con equipos y objetos pesados
 - b. Reducir los tiempos de cambio de revestimiento
 - c. Estandarizar la calidad el proceso

A partir de la experiencia capturada en desarrollos previos de similares características comienza la propuesta de implementación de esta tecnología para resolver los desafíos del cambio de revestimiento en base a los siguientes conceptos:

1. **EMMR: External Mill Maintenance Robot:** Es un conjunto de sistemas robóticos que permiten realizar el 100% de las actividades externas al cambio de revestimientos, entre ellas:
 - a. Lubricación y limpieza de los elementos de sujeción (tuercas/pernos)
 - b. Alimentación automática de elementos de sujeción
 - c. Terqueo controlado electrónicamente por estrategias de torque/Angulo
 - d. Botado de pernos por medio de usos de martillos de alta energía y alta frecuencia
 - e. Corte de elementos de sujeción que se encuentren trabados, con eliminación de. Trabajos en caliente

2. **IMMR: Internal Mill Maintenance Robot:** Es un Sistema robótico que permite automatizar completamente el 100% de las tareas de cambio de revestimientos al interior del molino, permitiendo así lograr la CERO exposición de personal al interior de este. Dentro de sus características se pueden destacar:
- Sistema de lavado automático de revestimientos a alta presión: permite eliminar residuos de mineral, rocas, chips de bolas y otros elementos ajenos normalmente atascados entre los Revestimientos
 - Sistema automático de corte por método de Oxicorte: El sistema está equipado con una herramienta especial de oxicorte que permite realizar de forma segura, rápida y precisa la liberación de los revestimientos que se encuentren atascados por micro soldaduras o atascamiento.
 - Tecnología MIRS Bolt-Driven ®: Avance tecnológico que permite realizar el retiro de revestimientos gastados directamente desde su posición de instalación (shell, tapas) al exterior del molino, eliminando la necesidad de dejarlos caer sobre la carga de mineral/bolas y reduciendo significativamente el tiempo de cambio de revestimientos
 - Alta velocidad y precisión: Gracias a los sistemas robóticos utilizados en la tecnología MIRS, los robots de cambio de revestimientos EMMR e IMMR, pueden alcanzar niveles de desempeño de hasta 24 movimientos por hora, reduciendo con ello dramáticamente los tiempos de cambio de revestimientos.

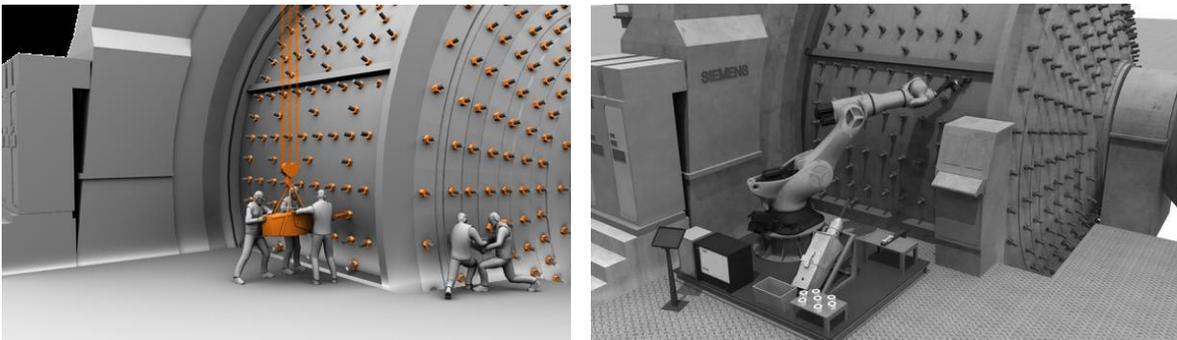


Ilustración 14 Imagen comparativa de actividades al exterior del molino entre un cambio de revestimiento convencional versus el desarrollo propuesto por MIRS.

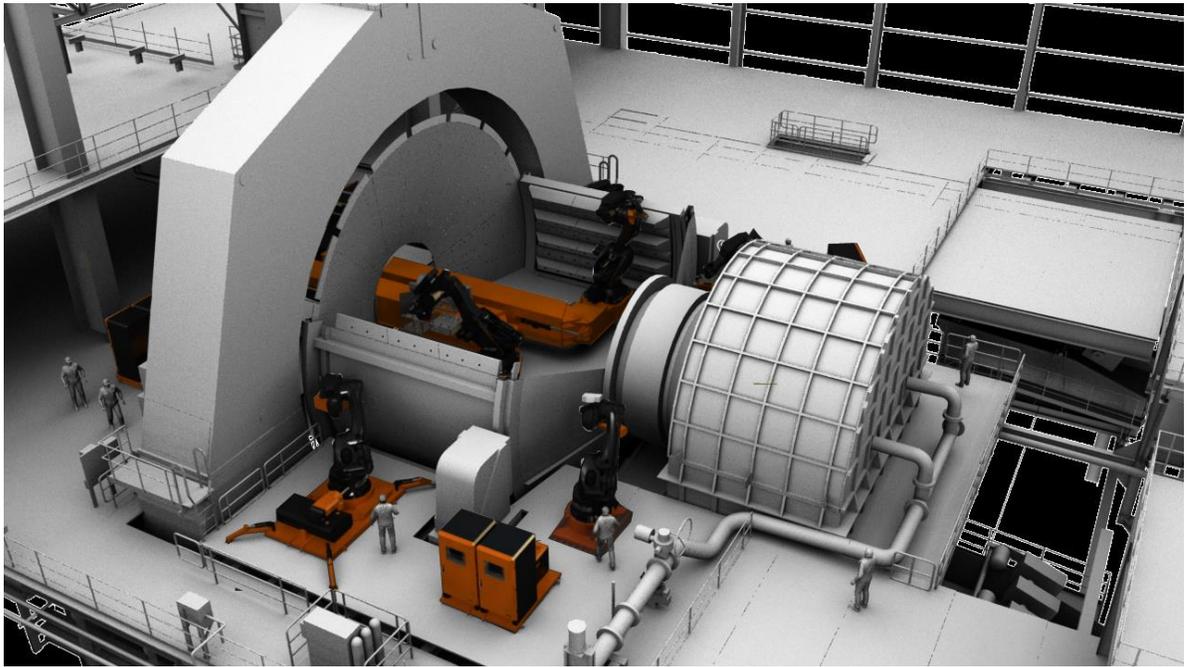


Ilustración 15 Disposición general de los sistemas EMMR & IMMR logrando la completa automatización del cambio de revestimientos

Actualmente esta tecnología se encuentra en proceso de validación en algunas faenas mineras del país, específicamente para el sistema EMMR (External Mill Maintenance Robot) incluso con pruebas en faena, lo cual responde a programas que consideran en su alcance final la implementación del sistema IMMR (Internal Mill Maintenance Robot).

Estos programas contemplan actividades relevantes de las cuales se destacan la siguiente secuencia:

1. Ingeniería
2. Preparación de herramientas EMMR y IMMR
3. Fabricación de estadios para pruebas en laboratorio
4. Pruebas de validación en laboratorio
5. Pruebas de validación en Faena

En el caso del sistema IMMR aún no cuenta con pruebas en faenas, solo con modelos en laboratorio. Esto es de gran importancia ya que es el principal desafío para esta tecnología debido a que los brazos robotizados tiene la limitación para manipular hasta 2.000 kilos mientras que los revestimientos actuales pueden llegar a pesar 4.000 kilos, lo cual obliga a redefinir la configuración del revestimiento con piezas as livianas o bien más pequeñas, lo cual representa un mayor número de movimientos, sin embargo esta variable es compensada con una mayor velocidad, alcance y presión que los sistemas convencionales. Además de entrega caracterices adicionales de como:

- Seguridad
- Versatilidad
- Proceso estandarizado

6.5.2. (B) Russell Minerals Equipment

Russell es una empresa australiana fundada en 1985 por, dedicada al desarrollo de herramientas, equipos y tecnología para el cambio de revestimientos con el fin de disminuir los tiempos de cambio de revestimiento.

En relación al presente estudio se destaca que han sido los pioneros en la búsqueda de las mejoras en los sistemas de cambio de revestimiento a través del desarrollo de la tecnología orientada en reducir de manera drástica los tiempos de cambio de revestimiento del molino desde e interior hasta el exterior. Esta tecnología denominada “Skyway”. Este es una estructura que se monta sobre el molino entregando un sistema semi automatizado que permite sujetar y posicionar los martillos evitando los culatazos al momento de operarlos, además también cuenta con una plataforma elevadora la cual permite a los trabajadores acceder a mayores alturas de manera segura para la aplicación del torque en tuercas. Esto se complementa con la operación de la lainera al interior del molino más la implementación de un sistema para instalar el revestimiento con los pernos en su interior y extraerlos desde afuera para la instalación final de la tureca.

Este sistema ya ha sido implementado por primera vez en la compañía minera Cobre Panamá de First Quantum Minerals Ltd.

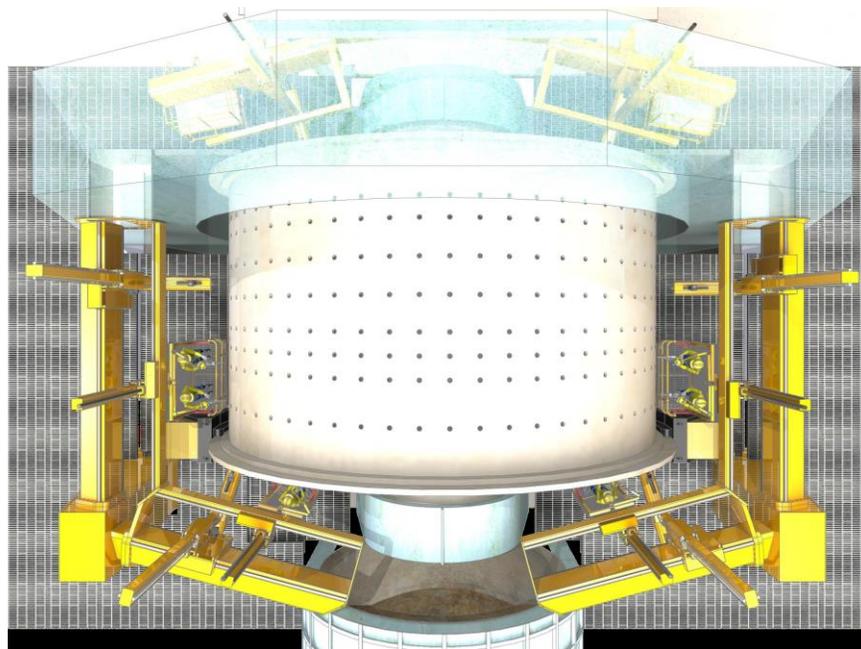


Ilustración 16 vista general de modelo skyway para molino SAG.



Ilustración 17 Implementación de skyway en faena de Cobre Panamá

7. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

En esta sección se desarrolla la estrategia de selección de alternativas, en la cual se establecen los criterios de selección los cuales son considerados para la aplicación del modelo de análisis jerárquico que permite establecer una matriz para la selección de la alternativa a desarrollar.

7.1.CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Las alternativas propuestas para la automatización del cambio de revestimiento serán evaluadas y se seleccionará una de acuerdo a los siguientes criterios y sub-criterios:

- **Disminución del riesgo de exposición de las personas a riesgos críticos:**

Corresponde a un factor determinante a la hora de definir una alternativa tecnología a implementar, para este caso será considerado el riesgo residual para medir la disminución de la exposición a los riesgos críticos al implementar las alternativas propuestas.

- **Disminución de tiempo de cambio de revestimiento**

Este factor corresponde al potencial de disminución del tiempo requerido para el cambio de revestimiento que se compromete al implementar las tecnologías analizadas.

- **Implementación**

- **Tiempo de implementación:** este factor se refiere al tiempo requerido para el desarrollo de la estrategia de implementación.
- **Riesgo de implementación:** este factor se refiere, si la tecnología ha sido validada a nivel de pruebas en laboratorio y faenas de similares características.
- **Flexibilidad:** este factor se refiere a la flexibilidad para la utilización entre los molinos SAG y bolas.

- **Mantenibilidad**

Este factor corresponde a la factibilidad de la mantención de los sistemas posterior a su implementación, destacando los siguientes sub factores:

- **Servicio de post venta:** una vez implementado, es importante contar con un servicio de soporte técnico con las competencias requeridas para asegurar su correcto funcionamiento gestión de repuestos críticos.
- **Estrategia de mantención:** es importante entender si los sistemas implementados requieren de una estrategia compleja de mantención en términos de frecuencia y disponibilidad.

- **Operación**

Este factor corresponde a la operación considerando el plan de capacitación, disponibilidad de personal calificado y las estrategias de actualizaciones que permita enfrentar la obsolescencia para los nuevos dispositivos que ofrecen las alternativas tecnológicas

A partir de los criterios definidos se construye el modelo de jerarquía simple esto con el fin de ordenar el proceso de selección. En esta se establecen en el cual se define el foco, los criterios y finalmente las alternativas disponibles.

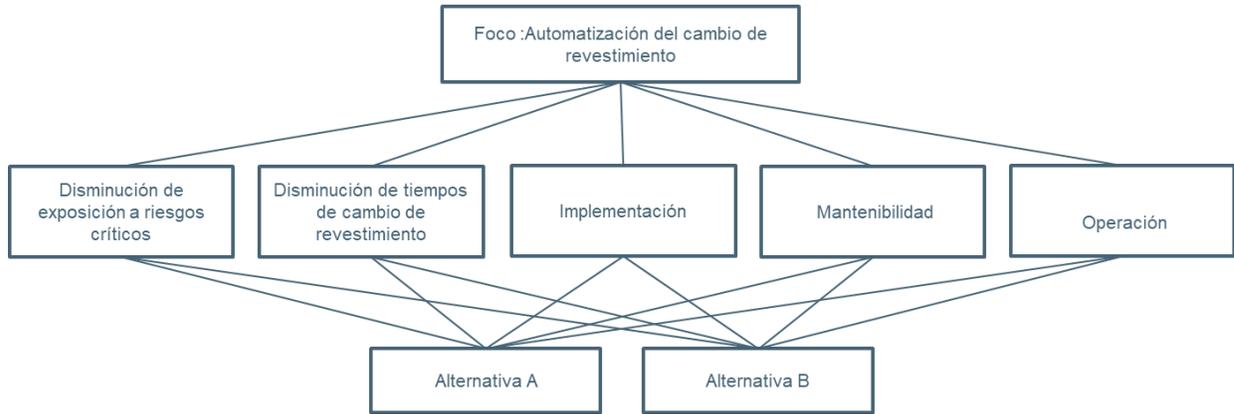


Ilustración 18 Modelo de jerarquía simple para la metodología AHP, Multicriterio de selección de alternativas.

Una vez definido el modelo de jerarquía se definen escalas discretas común para todos los criterios, para evaluar de manera consistente desde un mínimo de 1 a un máximo de 5 y un valor medio de 3, donde también es permitido evaluar con valores intermedios en caso que se considere necesario. Con esto se construyen las escalas de evaluaciones de los criterios (anexo 6)

7.2.DEFINICIÓN DE PONDERACIONES

Se realiza el cálculo de las prioridades con el fin de definir las ponderaciones de los criterios definidos, para esto se establecen comparaciones en pares para un criterio dado, donde su importancia fue ponderada mediante la construcción de matrices de comparación utilizando la escala de Saaty para asignar una preferencia a un criterio sobre otro (Ver Anexo 4).

Utilizando la escala de proporciones de Saaty se desarrollan las matrices de comparación en el anexo 5, para obtener las siguientes ponderaciones de los criterios y sub-criterios definidos

Criterio	Ponderación	Sub-criterio	Ponderación	Ponderación Global
Disminución de exposición a riesgos críticos	40%			40%
Disminución de tiempo de revestimiento	28%			28%
Implementación	14%	Riesgo de implementación	55%	8%
		Tiempo de implementación	24%	3%
		Flexibilidad	21%	3%
Mantenibilidad	6%	Estrategia de mantención	50%	3%
		Servicio de soporte	50%	3%
Operación	12%			12%

Tabla 4 Ponderación de criterios para selección de alternativas

7.3. ANÁLISIS DE RIESGO

Como ya se ha mencionado anteriormente, durante el cambio de revestimiento el personal está expuesta a un gran número de riesgos, para los cuales existen controles críticos, donde su aplicación es clave para disminuir la probabilidad de ocurrencia de estos.

Es importante destacar que el objetivo de automatización analizado en el presente estudio está orientado en las actividades directamente relacionadas al cambio de revestimiento a interior y exterior del molino durante el desmontaje y montaje de los revestimientos, por esta razón se excluyen los siguientes riesgos:

- Impacto vehículo persona: relacionado a la operación de la grúa horquilla para el traslado de los revestimientos
- Accidente en maniobras de Izaje: Relacionado a los riesgos asociados durante las maniobras de Izaje.

Para el análisis de riesgo se utiliza la metodología planteada en la cual se calcularán los riesgos residuales a partir de la severidad y probabilidad de ocurrencia de las tablas 16 y 17 del anexo 3, para seguridad, en base a los datos históricos de accidentabilidad recopilados y la experiencia de las personas de terreno que realizan el análisis de los riesgos de forma regular antes de y durante las mantenciones.

Es importante mencionar que también serán considerados los controles que actualmente se utilizan en cada uno de los riesgos considerados en la tabla 5.

En esta se puede apreciar que los riesgos residuales disminuyen una vez considerado los controles críticos implementados, sin embargo, estos controles no logran eliminar la exposición de manera definitiva ya que en la jerarquía de control solo logran llegar al tercer nivel, "separar", aislando los riesgos con la aplicación de barreras duras y bloqueos.

En particular para el riesgo de atrapamiento por interacción de la máquina laminadora, considera un evento de fatalidad esto genera un factor de severidad alto el cual no se ve modificado con los controles que actualmente

se implementan, solo en la probabilidad de ocurrencia. Por otra parte, el escenario planteado también considera la detención del proceso productivo por 7 días, más 2 días de restricción del proceso específico en la planta concentradora y las multas económicas por la fatalidad, genera un impacto financiero nivel 4, (MFL 4).

$$MFL = (EBIT * \%detención * dias)_{asset} + (EBIT * \%detención * dias)_{ope} + multas$$

$$MFL = (19,2 \$USM * 100\% * 5)_{asset} + (3,3 \$USM * 100\% * 2)_{ope} + 1 \$USM$$

$$MFL = 102,9 \$USM \rightarrow Nivel 4$$

Riesgo	Comentario	Sin controles			Controles Críticos	Con controles		
		Severidad	Prob de ocurrencia	RRR		Severidad	Prob de ocurrencia	RRR
Caída de objeto	Se refiere al acada de objetos de niveles superiores, como bolas o herramientas y también por la proyección de partículas	10	1	10	Inspeccion el interior del molino, para eliminar probabilidad que alguna bola en la parte superior del cilindro o tapas caiga involuntariamente. Barreras duras en parte inferior del molino.	10	0,3	3
Caída de persona desde altura	Se refiere al potencial de caída de altura durante los trabajos sobre el puente de lainera o bien al exterior del manto y tapas del molino.	30	3	90	Capacitación del personal en uso de Sistema de protección contra caídas. Inspección y certificación de arnes puntos de anclaje, cinta anti-trauma. Inspección y certificación de plataformas de trabajo esporádicas y móviles (andamios, escalas, man- lift, otros).	30	1	30
Liberación descontrolada de energía	Este riesgo esta relacionado al uso de herramientas con energía hidráulica y neumática	10	3	30	Planificación de bloqueo. (Identificación de energías y puntos de bloqueo) Disponibilidad de equipamientos para bloqueo (Pinzas, tarjeta, cadena, otros).	10	1	10
Espacios confinados	Este riesgo está relacionado a todos los trabajos al interior del molino, el cual es considerado un espacio confinado.	30	3	90	Medición de gases y atmósferas peligrosas. Permiso de ingreso a Espacios Confinado.	30	1	30
Aplastamiento por máquina enlainadora	El alcance de este riesgo incluye la intervención o contacto del cuerpo o extremidades con partes móviles de la lainera en el cambio de revestimiento del molino SAG, con el potencial de causar una fatalidad. Ocurre cuando la lainera es el que se mueve hacia la persona (Golpeado por).	100	3	300	Parada de emergencia. Cámaras ubicadas en puntos ciegos del operador. Respetar zonas de seguridad. Comunicación con intercomunicadores entre operador de máquina lainera y mecánico montador	30	3	90
atrapamiento/aplastamiento	Debido a los movimientos inesperados que pueden producir los componentes. Mantener siempre manos alejadas de los puntos de partes que puedan moverse y originar posibles atrapamientos.	10	3	30	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual Parada de emergencia funcionando. . Zona de seguridad interior Molino. Intercomunicadores	10	1	10

Tabla 5 Análisis de los principales riesgos asociados al cambio de revestimiento

Nota: los riesgos asociados a tareas de traslado de revestimientos, como la interacción con grúa horquilla quedan excluidos de este análisis ya que su control no depende de la automatización del cambio de revestimiento.

Las tecnologías analizadas para la automatización o semi automatización permiten eliminar la exposición a partir de la disminución y eliminación de las personas en las actividades críticas, en especial aquellas a interior del molino, disminuyendo de manera significativa la severidad y la probabilidad de ocurrencia para el análisis de riesgo en seguridad y financiero.

Comentario	con controles actuales				MFL US\$	Controles Críticos	Con automatización		
	Severidad	Prob de ocurrencia	RRR				Severidad	Prob de ocurrencia	RRR
Caída de persona desde altura	30	3	90	N/A	Alternativa A Implementación de automatización mediante brazos robotizados	30	0,03	0,9	
					Alternativa B Implementación de sistema semi automatizado	30	1	30	
Espacio Confinado	30	3	90	NA	Alternativa A Implementación de automatización mediante brazos robotizados	30	0,03	0,9	
					Alternativa B Implementación de sistema semi automatizado	30	1	30	
Aplastamiento por maquina Lainera	30	3	90	4	Alternativa A Implementación de automatización mediante brazos robotizados	30	0,03	0,9	
					Alternativa B Implementación de sistema semi automatizado	30	0,03	0,9	

Tabla 6 Comparativa de impacto en el riesgo para ñas alternativas consideradas

Las dos alternativas analizadas permiten eliminar la interacción de las personas con maquina lainera al interior del molino, ya que integran dispositivos para generar la instalación de los pernos desde el interior sin la necesidad de la manipulación por arte de instaladores como lo requiere el método convencional. Sin embargo, es importante destacar que la solución de un sistema semi automatizada, de igual forma requiere a participación de al menos dos pernas en actividades puntuales al exterior de los molinos como la aplicación del torque final a los pernos en el proceso de montaje de los revestimientos, esta condición no permite reducir de manera significativa los riesgos de caída de altura y especio confinado.

Si bien las actividades son contraladas de igual forma en genera exposición de los trabajadores a riesgos como atrapamiento, liberación descontrolada de energía y caída desde altura, es decir no elimina a la totalidad de las personas expuestas en las actividades de cambio de revestimiento.

Una vez obtenidas las ponderaciones de los criterios generales y los sub-criterios se califican las alternativas A y B en base a las escalas específicas descritas en la tabla 24 del anexo 6, en las cuales se cuantifica la información cualitativa, definiendo los grados de los atributos asignando su correspondiente valor numérico.

Una vez asignadas las calificaciones a cada una de las alternativas evaluadas estas se multiplican por su correspondiente ponderador global obteniendo los puntajes parciales y finalmente la puntuación final para cada una.

MATRIZ DE EVALUACIÓN ALTERNATIVAS								
CONSIDERACIONES DE EVALUACIÓN					ALTERNATIVA			
Aspecto Análisis	Ponderación Aspecto	Sub-Aspecto	Ponderación Sub-Aspecto	Indicador	A	B		
Disminución de exposición a riesgos críticos	40%			índice de reducción de riesgo	5	3		
				Puntaje aspecto	5,00	3		
		Puntaje aspecto ponderado				1,99	1,19	
Disminución de tiempo de revestimiento	28%			Reducciones horas de Shutdown	4	3		
				Puntaje aspecto	4,00	3,00		
		Puntaje aspecto ponderado				1,12	0,84	
Implementación	14%	Riesgo de implementación	55%	índice de reducción de riesgo	4	3		
				Puntaje sub-aspecto	4,0	3,0		
				Puntaje sub-aspecto ponderado	2,20	1,65		
		Tiempo de implementación	24%				3	3
				Puntaje sub-aspecto	3,00	3,00		
				Puntaje sub-aspecto ponderado	0,72	0,72		
		Flexibilidad	21%				4	2
				Puntaje sub-aspecto	4,00	2,00		
				Puntaje sub-aspecto ponderado	0,84	2,00		
				Puntaje aspecto	3,76	4,37		
				Puntaje aspecto ponderado	0,53	0,62		
Operación	12%				5	3		
				Puntaje sub-aspecto	5,00	3,00		
		Puntaje aspecto ponderado				0,60	0,36	
Mantenibilidad	6%	Estrategia de mantención	50%		3	3		
				Puntaje sub-aspecto	3,0	3,0		
				Puntaje sub-aspecto ponderado	1,50	1,50		
		Post-venta	50%				5	3
				Puntaje sub-aspecto	5,0	3,0		
				Puntaje sub-aspecto ponderado	2,50	1,50		
				Puntaje aspecto	4,00	3,00		
				Puntaje aspecto ponderado	0,24	0,18		
CALIFICACION FINAL					4,48	3,19		

Tabla 7 cuadro de valoración de los criterios para las alternativas analizadas por criterio y sub-criterio.

De la tabla 7 se observa que ambas alternativas son competitivas entre sí sin embargo la alternativa A es la mejor calificada la cual corresponde a al desarrollo de la empresa Mirs que considera sistemas de brazos robotizados.

- La alternativa desarrollada por Mirs cumple con todos los criterios evaluados destacando principalmente que la propuesta de automatización permite eliminar la exposición de las personas a los riesgos críticos, y que a su vez permite disminuir los tiempos requeridos para el cambio de revestimiento. Adicionalmente en términos de implementación es importante destacar que cuenta ya cuenta con pruebas en laboratorio y en terreno junto con la implementación en operaciones de similares características, entrega una alta flexibilidad.

En términos de implementación también es una Finalmente cuenta con soporte técnico que asegura su correcta que asegura una correcta aplicación de la estrategia de mantención y programas de capacitaciones que permiten asegurar una correcta operación de los nuevos dispositivos.

- Por otra parte, el sistema semi- automatizada es muy buena alternativa considerando que utiliza las maquinas láseras que actualmente se encuentran en planta, destacando que también cuenta con pruebas pilotos en fábrica y en otras operaciones, sin embargo, por sus características no permite eliminar por completo las exposiciones a los riesgos críticos ya que requiere de la intervención humana para tareas específicas. Por otra parte, este sistema depende el uso de herramientas para la instalación del perno sin la intervención humana desde interior lo cual no asegura una mejora en los tiempos de cambio de revestimiento

8. DESARROLLO DE PROPUESTA DE TECNOLOGÍA SELECCIONADA.

8.1.PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

El desarrollo de esta tecnología considera un programa de trabajo con un horizonte en el corto y mediano plazo en base a las siguientes etapas.

- Fase 1: Evaluar

Consiste en el desarrollo de talleres de usuarios en la cual se capturan los aspectos generales a mejorar e información que permite generar la línea base

- Fase 2: Validar y adecuar

Adecuar la tecnología desarrollada por MIRS a los requerimientos de Escondida, es particular a los molinos escogidos para el protocolo de prueba (molinos de bolas 4 y 8)

- Fase 3: implementación de piloto de prueba EMMR.

Considera la realización de las pruebas de validación en laboratorio, pruebas industriales en faena en un molino de bolas y plan de gestión de cambio de acuerdo al siguiente programa:

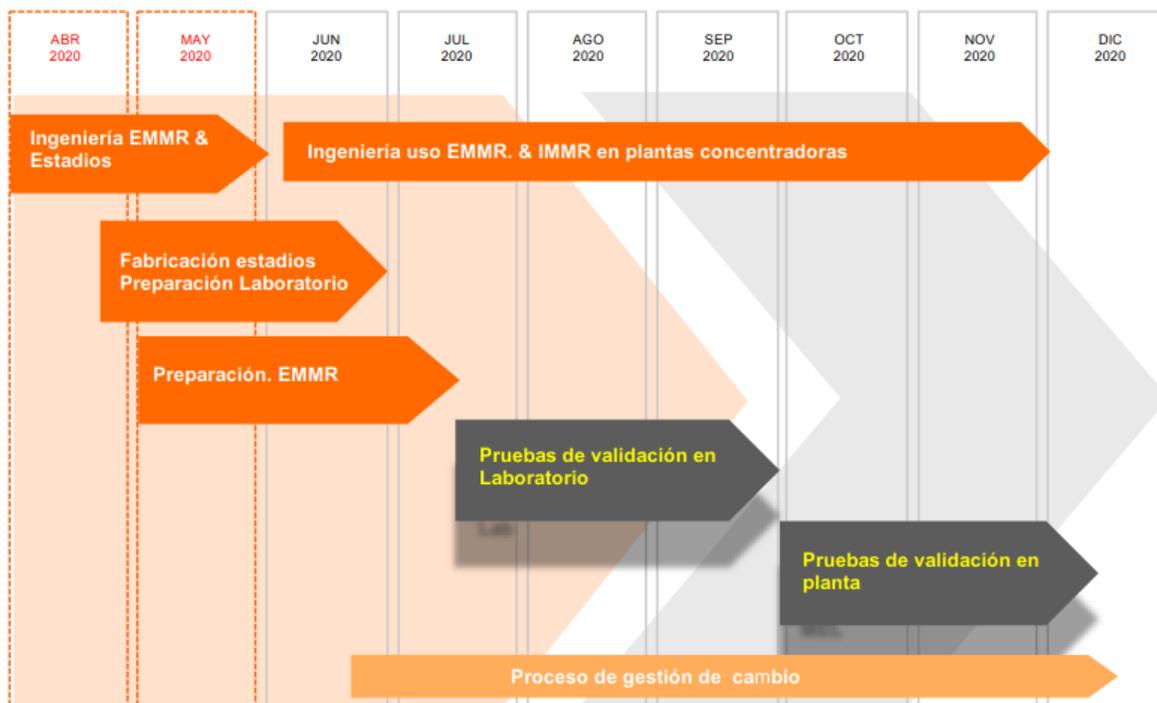


Ilustración 19 Plan general de etapas de la etapa de implementación del piloto de prueba del EMMR.

Las pruebas de validación en laboratorio consideran la construcción de un estadio a escala real del manto de un molino SAG y un molino de bolas en las cuales se realizan pruebas de:

- Movilidad
- Visión artificial & Calibración
- Botado, instalación y torque.



Ilustración 20 Maqueta actual en laboratorio para molino SAG

Análisis de riesgo de implementación

Se reúnen a las distintas áreas involucrada y se evalúan integralmente los riesgos desde una forma preventiva y post evento, con el objetivo de mitigar, controlar y comunicar de mejor manera los riesgos presentes escenarios del proyecto. Así, se definirá la mejor forma el cómo transmitir el entendimiento de la relación entre los riesgos, las amenazas y los eventos no deseados a todos los involucrados de los procesos.

- Fase 4: Escalamiento

Considera las etapas de escalamiento de al resto de los molinos de bolas y los molinos SAG considerando los sistemas EMMR (exterior molino) e IMMR (interior molino), las cuales se integran de manera progresiva de acuerdo a la zona del molino pasando desde una Etapa 0 la cual representa la condición actual con actividades completamente manuales a un proceso robotizado en el interior y en todas las zonas del exterior

8.2.PROYECCIÓN DE DISMINUCIÓN DEL PERSONAL EXPUESTO

De acuerdo al plan de implementación se establece un plan de disminución de dotación en base al nivel de avance de la robotización desde la Etapa 0 (E 0) la cual representa la condición actual con una actividad de cambio revestimiento completamente manual, hasta la etapa 3 o 4, dependiendo del tipo de molino con un proceso completamente automatizado.

Molino de bolas		Etapa 0	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Zona Molino	Alimentación	Manual	Robotizado	Robotizado	Robotizado
	Cilindro	Manual	Robotizado	Robotizado	Robotizado
	Descarga	Manual	Robotizado	Robotizado	Robotizado
	Interior	Manual	Manual	Manual	Robotizado
Personal apoyo	Coordinador	1	1	1	1
	Supervisor turno	1	1	1	1
	Supervisor Torque	1	1	-	-
	Asesor HSE	1	1	1	1
	Personal apoyo mecánico	3	3	3	2
TOTAL Categoría		7	7	6	5
Personal revestimiento	Operador lainera	1	1	1	-
	Líder mecánico (capataz)	1	1	-	-
	Oxigenista / Torchador	2	2	-	-
	Mecánicos y armadores	14	6	-	-
TOTAL Categoría		18	10	1	-
Operadores	Operadores Robots	-	4	6	7
	TOTAL Categoría	-	4	6	7
Total por turno		25	21	11	11

Tabla 8 Etapas de robotización de acuerdo a la fase de implementación para molinos de bolas

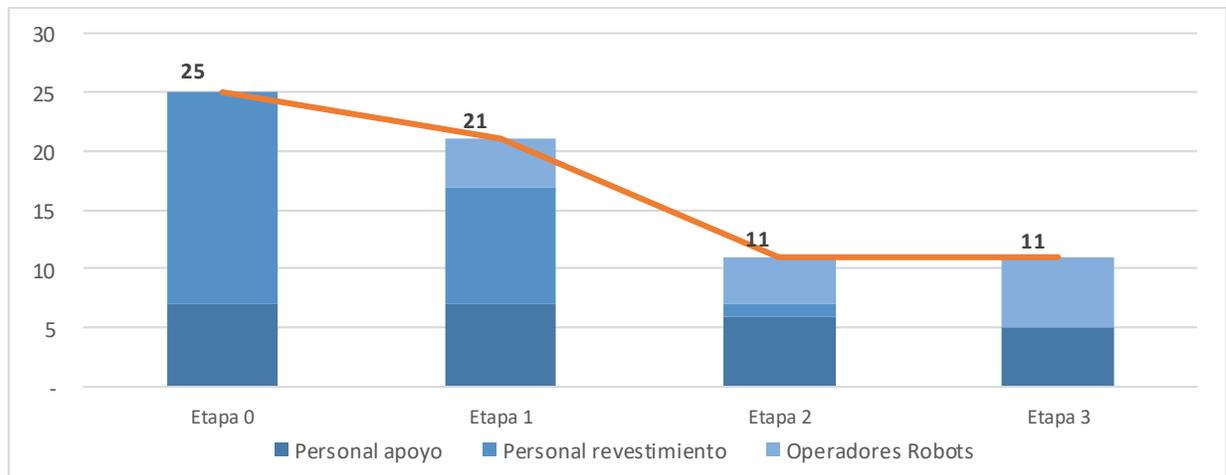


Ilustración 21 Gráfica de evolución de la dotación para un turno de cambio de revestimiento para molinos de bolas.

Molinos SAG		Etapa 0	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Zona Molino	Alimentación	Manual	Manual	Manual	Robotización	Robotización
	Cilindro	Manual	Robotización	Robotización	Robotización	Robotización
	Descarga	Manual	Manual	Robotización	Robotización	Robotización
	Interior	Manual	Manual	Manual	Manual	Robotización
Personal apoyo	Coordinador	1	1	1	1	1
	Supervisor turno	1	1	1	1	1
	Supervisor Torque	1	1	1	-	-
	Asesor HSE	1	1	1	1	1
	Personal apoyo mecánico	4	4	4	4	3
	TOTAL Categoría	8	8	8	7	6
Personal revestimiento	Operador lainera	2	2	2	2	-
	Líder mecánico (capataz)	1	1	1	-	-
	Oxigenista / Torchador	4	4	2	-	-
	Mecánico / Armador	21	15	9	3	-
	TOTAL Categoría	28	22	14	5	-
Operadores	Operadores Robots	-	2	4	6	7
	TOTAL Categoría	-	2	4	6	7
	Total por turno	36	32	26	18	13

Tabla 9 Etapas de robotización de acuerdo a la fase de implementación para molinos de bolas

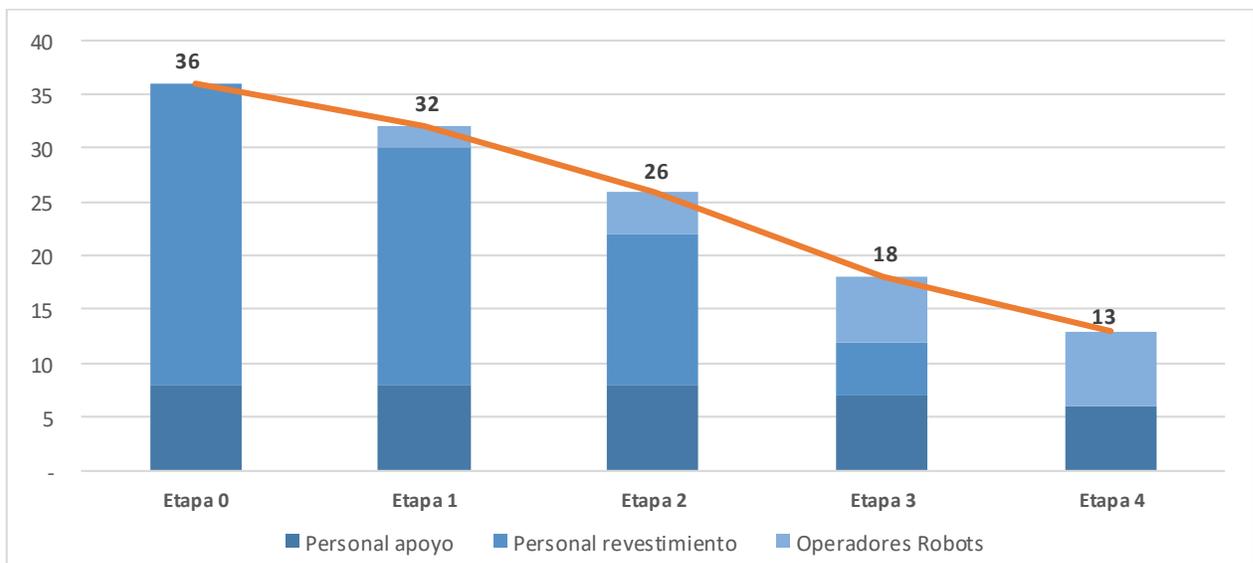


Ilustración 22 Gráfica de evolución de la dotación para un turno de cambio de revestimiento para molinos SAG.

Para el caso del molino de bolas presenta una estrategia más agresiva con tres etapas en la cuales se inicia con la robotización de todas las zonas exteriores considerando que esta actividad ya cuenta con pruebas en laboratorio y en faena para finalmente incorporar el sistema IMMR para el interior del molino para entregar una disminución de un 56% del personal para el cambio de revestimiento

Para los molinos de se presenta una estrategia más conservadora considerado la automatización de manera progresiva en las áreas exteriores del molino entre las etapas 1 y 3, con el objetivo de controlar los riesgos y los tiempos de ejecución, sin embargo, entrega una disminución importante de la dotación al término de la etapa 3 para finalmente disminuir en un 63% la dotación al término de la etapa 4, la cual entrega la automatización completa al proceso eliminando el riesgo de interacción con maquina lainera al interior de los molinos SAG.

Si bien el personal de apoyo se mantiene independiente de la automatización ya que son toles de supervisión del proceso general, la principal disminución de la dotación se presenta en el personal directo, específicamente en los roles de mecánicos, armadores y Oxigenista par finalmente eliminar a los operadores de máquinas laineras, mientras que se incorporan nuevos roles como los operadores de los sistemas robotizados, personal con competencias distintas asociadas al conocimiento de sistemas y robotización.

8.3.PROYECCIÓN DE DISMINUCIÓN DE TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL CAMBIO DE REVESTIMIENTO

Uno de los aspectos impórtate en la implementación de nuevas tecnologías es que también puedan mejorar la productividad del proceso, en este caso está directamente relacionado al impacto que pueda tener en los tiempos para la ejecución del cambio revestimiento.

Para definir la proyección en los tiempos de ejecución de esta actividad se tomará como referencia el resultado del análisis de tiempo de cambio de revestimiento realizado por la empresa MIRS para un molino de bolas de 26' x 43', donde las condiciones del caso base son las siguientes:

- Numero de pacas: 408
- Número de giros: 5
- Numero de posiciones de molino: 6
- Filas por posición: 2 por lado
- Tiempo total: 71,28 horas

A partir de lo anterior los escenarios simulados son los siguientes:

	Caso base	Caso 1	Caso 2
Sistema	Convencional	Robots EMMR	Robots EMMR
Filas por lado por posición	2	2	3
Tasa de botado (mov / min)	5,62	2,13	2,13
Tasa de limpieza (mov/min)	2,81	2,81	2,81
Tasa de instalación (mov/min)	5,15	5,2	5,2
Número de placas	408	408	408
Numero de giros	6	6	5
Tiempo efectivo (horas)	61,2	51,19	48,9
Tiempo total (horas)	71,28	59,43	58,42

Tabla 10 Resultado de escenarios simulados para cambio de revestimiento de molinos de bolas

Observaciones:

- Los sistemas EMMR pueden alcanzar hasta 4 filas por lado, sin embargo, no existe certeza que el manipulador interior convencional pueda alcanzar dicha cantidad.

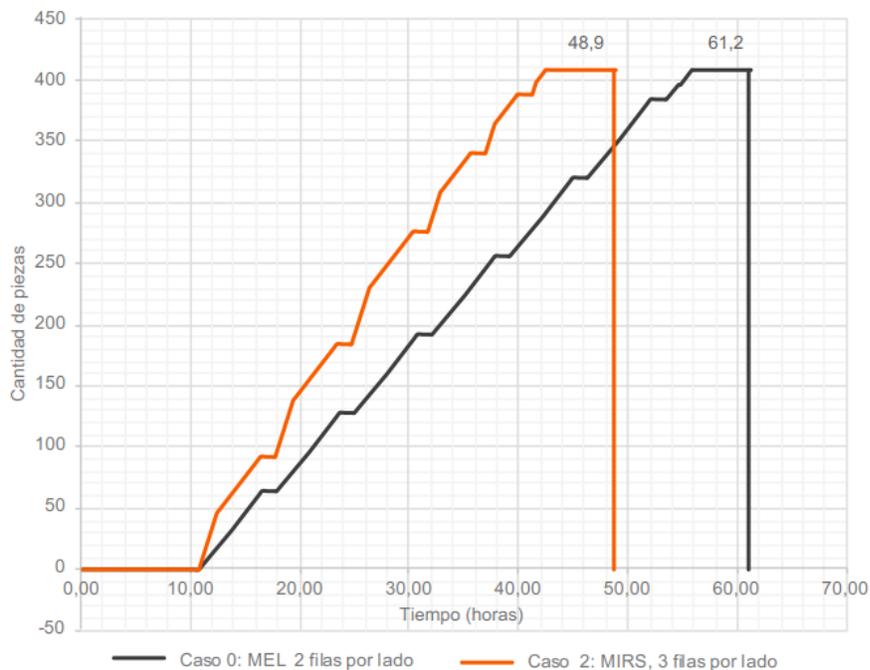


Ilustración 23 Grafica de disminución de tiempos de cambio de revestimiento para molino de bolas con la sistemas de robotizados tipo EMMR

Los resultados obtenidos entregan una disminución de 18% en tiempo total efectivo para el cambio de revestimiento, este valor alcanzado será considerado para la proyección de las tintas etapas del plan de escalamiento el cual proyectará un mínimo de 10% hasta un máximo de 25% debido a la incorporación del sistema IMMR para el interior de los molinos.

A partir de las simulaciones de disminución del tiempo de cambio de revestimiento es importante destacar que el potencial que presentan la incorporación de nuevas tecnologías que permitan disminuir los tiempos del cambio de revestimiento permitirían evaluar nuevas estrategia de mantención que consideren una número mayor de detenciones pero de menor duración esto permitiría ejecutar mantenciones son un muero de personas en planta y genera un potencial de mayor rendimiento en la operación de los molinos.

De acuerdo a estudios como el presentado en la publicación de Minerals Engineering, “Designing liners for performance not life”, es posible obtener un mayor rendimiento del molino en base a una mayor frecuencia d de cambio de cambio de revestimiento en base al tratamiento obtenido.

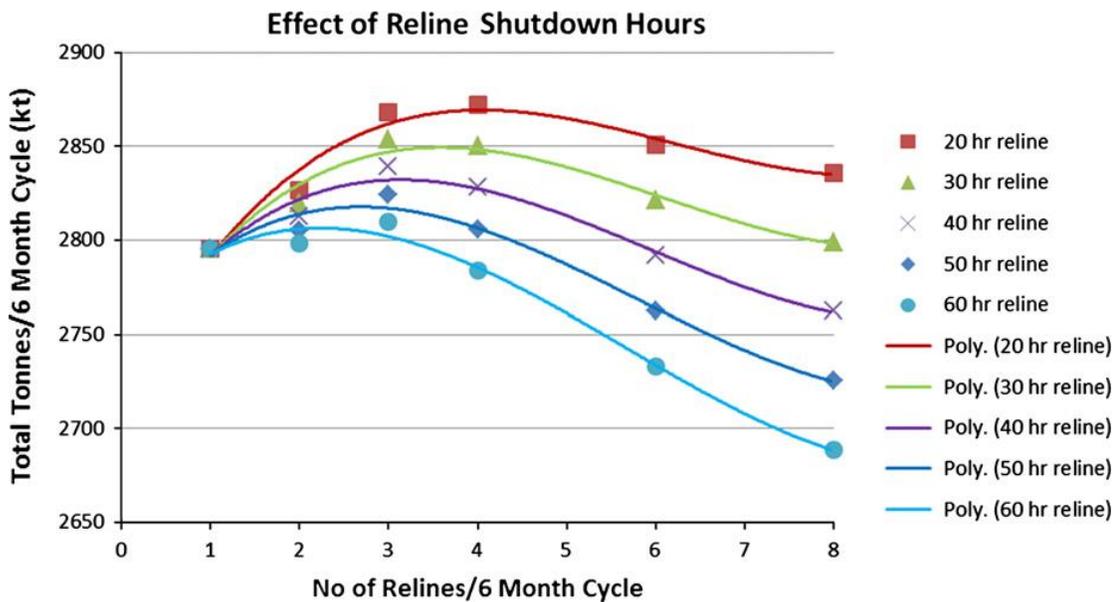


Ilustración 24 efecto de la frecuencia de cambio revestimiento en el tratamiento del molino.

Esta línea de trabajo queda propuesta en el presente estudio ya que requiere analizar la integración con la mantención del resto de los activo críticos que construyen la línea crítica de las menciones de planta tipo Shutdown.

9. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En el presente capítulo se presenta el desarrollo del cálculo del beneficio económico de la implementación de la tecnología seleccionada para la automatización del cambio de revestimiento de acuerdo a la estrategia de escalamiento definida.

9.1. CÁLCULO DEL BENEFICIO

8.1.1. DISMINUCIÓN DE HORAS DE CAMBIO DE REVESTIMIENTO

Para el cálculo de las horas de los molinos SAG se consideran solo las detenciones para mantenencias de tipo Shutdown (SD) y PM2, mientras que para los molinos de bolas las detenciones de tipo PM1, para los cuales se establece la relación de horas equivalentes SAG a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Horas equivalentes SAG} = \text{Horas Molino bolas} * 0,15$$

El valor de 0,15 corresponde a una factora de conversión definidos por lo niveles de producción equivalentes

El flujo de disminución de horas en base a la estrategia se establece de la siguiente forma:

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Etapa de automatización	1	2 y 3	4	4	4	4	4	4	4	4
disminución de horas por intervención	10% a 15%	15% a 20%	20% a 25%							
Molino SAG (horas)	30	64	80	80	80	80	80	80	80	80
Molinos Bolas (horas)	2	13	16	16	16	16	16	16	16	16
Total (horas)	32	77	96							

Tabla 11 Disminución de horas de cambio de revestimiento totales por año

8.1.2. PRODUCCIÓN EQUIVALENTE POR DISMINUCIÓN DE HORAS DE MANTENCIÓN

La disminución de horas de mantención de entregan un aumento en tratamiento de mineral en la planta concentradora a través del aumento de la disponibilidad de la molienda. Para el presente estudio se consideran los datos operacionales referenciales en un horizonte de 10 años sobre el cual se calculará el efecto de las horas ahorradas de la tabla 12.

		Año 01	Año 02	Año 03	Año 04	Año 05	Año 06	Año 07	Año 08	Año 09	Año 10
Mill feed	Kton	48.710	46.699	47.872	46.511	47.112	45.720	44.109	44.302	43.045	43.534
Mill feed	Kthp	5.561	5.331	5.465	5.309	5.378	5.219	5.035	5.057	4.914	4.970
Head Grade	%Cu	0,88%	0,84%	0,80%	1,01%	0,98%	0,84%	0,80%	0,87%	0,72%	0,70%
Contained Fine Copper	Kton	429	392	383	470	462	384	353	385	310	305
Copper Recovery	%	85,80%	83,80%	85,40%	85,20%	86,00%	85,20%	85,70%	85,90%	84,50%	90%
Recovered Fine Copper	Kton	368	329	327	400	397	327	302	331	262	274
Head grade Concentrate	%Cu	28,40%	28,00%	27,80%	31,50%	30,20%	28,40%	27,60%	28,50%	27,50%	28,30%

Tabla 12 plan de datos operacionales planta

Para el cálculo de las toneladas de cobre fino recuperadas se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$Cu \text{ adicional (ton)} = \text{Mill feed (Ktph)} \times \text{Horas adicionales} \times \text{Head Grade (\%Cu)} \times \text{Copper Recovery (\%)}$$

El ingreso será calculado a través del precio del cobre por as toneladas de cobre fino adicionales:

$$\text{Ingreso marginal (USD)} = Cu \text{ adicional (ton)} \times 3 \times 2205 \text{ (USD lbCu)}$$

Los datos obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

		Año 01	Año 02	Año 03	Año 04	Año 05	Año 06	Año 07	Año 08	Año 09	Año 10
Toneladas adicionales tratadas	Ton	179.660	407.817	524.734	509.816	516.403	501.145	483.487	485.603	471.824	477.184
Finos Adicionales Recuperados	Ton Cu	1.356,50	2.870,70	3.584,98	4.387,07	4.352,25	3.586,60	3.314,79	3.629,05	2.870,58	3.006,26
Ingreso Marginal	MUSD	8,973	18,990	23,715	29,020	28,790	23,725	21,927	24,006	18,989	19,886

Tabla 13 Toneladas e ingreso obtenido por disminución de horas de mantención

8.1.3. INVERSIÓN

Para la implementación de los sistemas de robotización de acuerdo a la estrategia planteada en el presente estudio se establece la compra capital de sistemas IMMR y EMMR de acuerdo al siguiente detalle:

- Dos sistemas EMMR más un sistema IMMR para los molinos SAG.
- Un sistema EMMR mas un sistema IMMR para molinos de bolas.
- Ingeniería de detalles

La inversión para implementación de os sistemas descritos requiere un Capex de 16.072.000 MUSD.

8.1.4. CALCULO DE UTILIDADES DEL PROYECTO

Para el cálculo de las utilidades del proyecto se consideran los valores de la inversión capital y el ingreso marginal por aumento de toneladas de cobre fino descritos en la tabla 13.

Los costos se definen de la siguiente forma:

- Costo marginal: corresponden a los costos mina concentradora y comercialización.
- Costo de operación: corresponde al costo por la operación de los nuevos sistemas robotizados los cuales reducen su costo en base al avance de la estrategia de implementación.
- Costo de mantención: costo de mantención de los equipos estimado en un 5% del valor del capital.

De acuerdo a lo anterior se establece el siguiente flujo de caja:

		Año 00	Año 01	Año 02	Año 03	Año 04	Año 05	Año 06	Año 07	Año 08	Año 09	Año 10
Inversión	MUSD	-8,036	-8,036									
Ingreso Marginal	MUSD		8,973	18,990	23,715	29,020	28,790	23,725	21,927	24,006	18,989	19,886
Costos Marginales	MUSD		-2,493	-5,566	-7,113	-7,315	-7,369	-6,866	-6,559	-6,722	-6,238	-6,355
Costos de operación	MUSD		-4,500	-3,780	-3,375	-3,375	-3,375	-2,925	-2,925	-2,700	-2,700	-2,700
Costos de mantención	MUSD		-0,804	-0,804	-0,804	-0,804	-0,804	-0,804	-0,804	-0,804	-0,804	-0,804
Utilidades	MUSD		-6,8595	8,8400	12,4229	17,5266	17,2426	13,1305	11,6395	13,7806	9,2472	10,0278

Tabla 14 Flujo de caja del proyecto

9.2.INDICADORES ECONÓMICOS

Para el cálculo del valor actual neto del proyecto se utiliza la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Donde:

V_t = Flujo de caja en el periodo t

n = numero de periodos considerados

I_0 = inversion inicial

k = tasa de descuento

Utilizando los valores del flujo de caja del proyecto a 10 años (número de periodos) y considerando una tasa de descuento del 8% se obtiene el siguiente resultado:

$$VAN = 59,42 \text{ MUSD}$$

El indicador obtenido representa una alta rentabilidad de la propuesta de inversión.

Para el cálculo de la tasa interna de retorno se utiliza la siguiente ecuación:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+TIR)^t} - I_0$$

$$TIR = 61\%$$

La propuesta de automatización representa una inversión importante por lo tanto es importante revisar si es viable este tipo de inversión en un escenario de capitales restringidos, para esto se calcula el índice del valor actual neto midiendo cuanto VAN aporta cada dólar invertido, de la siguiente forma:

$$IVAN = \frac{VAN}{I_0}$$

$$IVAN = \frac{59,42}{16,06} = 3,7$$

De acuerdo al indicador obtenido el proyecto presenta una buena eficiencia de capital considerando su alto nivel de inversión.

Como complemento a los indicadores económicos también se calcula el indicador de riesgo se utiliza la ecuación propuesta en el marco teórico a través de la metodología de gestión de riesgos en la cual se consideran los valores de los riesgos residuales con y sin proyecto en base a la inversión.

A partir de lo anterior se consideran los riesgos residuales obtenidos en la tabla 6 junto con la inversión definida para el proyecto, con lo cual el valor de indicador se obtiene de la siguiente forma:

$$J_{factor} = \frac{(RRR_{sp} - RRR_{cp}^{area}) \times p}{inversion}$$

$$J_{factor} = \frac{(90 - 0,03) \times 1}{16,3} = 5,59$$

El valor obtenido indica que a partir de la inversión para la automatización de la actividad del cambio de revestimiento prácticamente se elimina el riesgo de exposición a los riesgos críticos, aplicando el más alto nivel en el modelo de jerarquía de control.

9.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se desarrolla con el fin de revisar el valor del proyecto frente a los cambios en sus principales variables dejando constante el resto de ellas.

Para este proyecto las variables seleccionadas para el análisis de sensibilidad son la disminución de las horas de cambio de revestimiento y los costos de operación, para las cuales se definieron un escenario favorable y un escenario pesimista.

Para el caso de la disminución de las horas del cambio de revestimiento se utiliza la variación histórica de los cambios de revestimiento por externalidades, estableciendo un valor favorable de 3 a 10 horas adicionales de disminución y un valor pesimista de 15 a 10 horas menos a las comprometidas en el proyecto para los 4 primeros años y 5 horas desde el quinto año en adelante.

Para el costo de operación se establece un escenario favorable con una disminución de un 10% de los costos anuales establecidos en el caso base y un escenario desfavorable el cual considera un aumento de un 20%, debido a un escenario plausible tener la necesidad de aumentar la cantidad de dotaciones por contingencias de la utilización de los nuevos dispositivos.

A partir de los anterior los resultados del análisis de sensibilidad son los siguientes:

Variable Modificada	VAN Caso pesimista (MUSD)	VAN Caso esperado (MUSD)	VAN Caso optimista (MUSD)
Disminución de horas	48,75	59,42	67,83
Costo operacional	54,96	59,42	61,70

Tabla 15 Cuadro de análisis de sensibilidad

Del análisis se establece que, si bien no existen diferencias significativas en los escenarios planteados, la disminución de horas de cambio de revestimiento es la variable más relevante ya que su variabilidad afecta en mayor medida el VAN del proyecto. Esto se explica por qué las horas de disminución de cambio de revestimiento inciden directamente en la disponibilidad de la planta y por lo tanto a la producción de cobre fino. Esto también explica que en el caso del costo operacional se parecía una brecha menor entre los escenarios pesimista y optimista.

10. CONCLUSION

El cambio de revestimiento es una de las actividades más críticas de las estrategias de mantenimiento de las plantas concentradoras ya que requiere un número significativo de personas para su ejecución, lo cual representa un alto nivel de exposición a riesgos de alto potencial como fatalidades, y constituye uno de los principales impactos en la disponibilidad del proceso productivo.

Se puede observar que el mercado no ofrece una gran variedad de alternativas tecnológicas que enfrenten de manera concreta la automatización del cambio de revestimiento, en gran medida porque requiere de un desarrollo extenso para reemplazar un gran número de tareas manuales de alta complejidad.

Las dos alternativas analizadas entregan un muy buen nivel de solución a las problemáticas planteadas, sin embargo, el desarrollo de sistemas robotizados tanto para el interior como el exterior del molino permite eliminar la exposición a los riesgos aplicando la más alta jerarquía de control de riesgos, junto con un aumento considerable de la productividad del proceso. A esto se suma los siguientes elementos:

- una estrategia de operación simple
- No se visualizan riesgos importantes en el desarrollo de las competencias requeridas para los nuevos equipos.
- Estrategia de implementación que controla de manera correcta los riesgos.

La estrategia de implementación es muy relevante, en este caso la alternativa seleccionada cuenta con un plan bien estructurado el cual considera etapas de pruebas en laboratorio y en la operación con el fin identificar y controlar de manera efectiva los riesgos de la implementación. Adicionalmente establece un plan de escalamiento, esto es importante al momento de implementar una nueva tecnología ya que permite evaluar los resultados y capturar los aprendizajes de manera sistemática, todo bajo el modelo de gestión de cambio presentado en el presente estudio.

Un aspecto importante a desarrollar para esta tecnología es que los brazos robotizados para el interior del molino requieren de revestimientos de menor tamaño, sin embargo, esto no representa un problema complejo para los principales fabricantes de revestimientos en el mercado.

Las mejoras que entrega una nueva tecnología se reflejan principalmente en la disminución del personal requerido ya que queda acotado solo a tareas de supervisión y operación de los sistemas robotizados junto con la disminución de los tiempos de cambio de revestimiento, ajustado a la estrategia de mantenimiento de la planta concentradora.

Si bien los nuevos dispositivos representan una inversión importante y requieren de un servicio de mantenimiento de un costo mayor al convencional, las disminuciones de horas de mantenimiento entregan un beneficio por aumento de tratamiento que se refleja en indicadores de una a la rentabilidad económica para el negocio.

Actualmente esta iniciativa se encuentra en la etapa de pruebas de laboratorio y planificando las pruebas en terreno, para luego ejecutar el plan de escalamiento el que contempla una implementación total fines del 2021, con esto se busca establecer un proceso de innovación que permita eliminar los riesgos de alto potencial, mejorar la productividad, incorporar nuevas competencias en el personal y obtener un proceso estandarizado.

11. BIBLIOGRAFÍA

- International Standard ISO 10218 – 1 (2011). Robots and robotic devices — Safety Requirements for industrial robots. Part 2: Robot
- International Standard ISO 10218 – 2 (2011). Robots and robotic devices — Safety Requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration
- Manual metodológico de evaluación Multicriterio para programas y proyectos (Santiago 2008). Juan Francisco Pacheco, Eduardo Contreras. Cepal.
- Técnicas participativas para la planeación. Gabriel Sánchez Guerrero
- Manual de gestión de riesgos de BHP (documento interno).
- Estrategia de mantención. Gerencia de mantención Concentradoras –Escondida (documento interno)
- Hacia la robotización y nueva forma de hacer los recambios. Revista Nueva Minería & Energía 17 de agosto de 2015.
- Designing liners for performance not life. Minerals Engineering. Paul Toor, Jochen Franke, Malcolm Powell b, Matthew Bird, Thomas Waters. 2012.
- Impacto de las nuevas tecnologías en las competencias requeridas por la industria minera. Concejo de competencias mineras. Abril de 2018.
- Propuesta de servicios MIRS Robotices. 2020 (documento confidencial).

12. ANEXOS

12.1. Anexo 1: Configuración de revestimientos molinos SAG

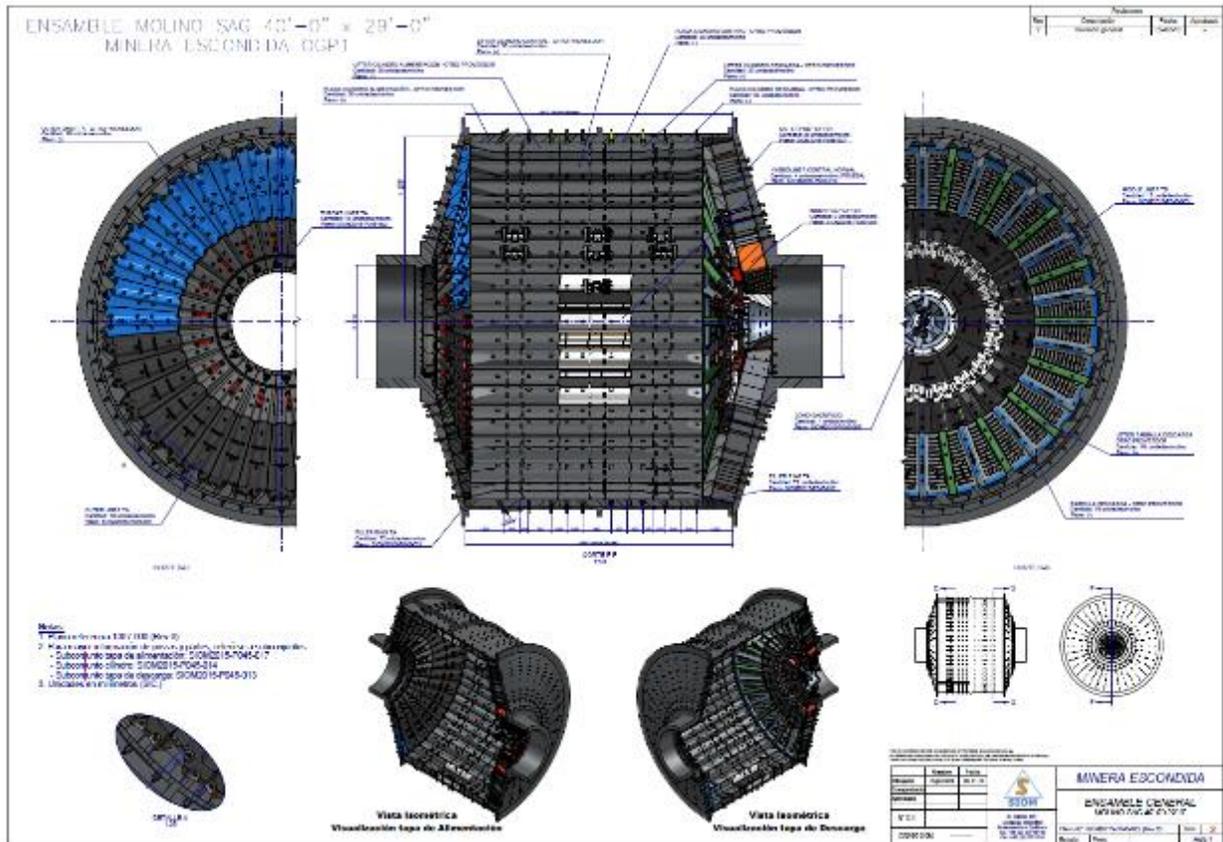


Ilustración 25 Descripción de configuración de revestimientos para molinos SAG 4 y SAG

12.2. Anexo 2: Data de accidentabilidad

Fecha	Título de evento sin intercambio de energía	Nivel Real	Nivel Pot.	Empresa es Spot / Permanente	Riesgo identificado	Nombre del Control Crítico
23-08-18	Potencial caída de altura desde plataforma de lainera	0	4	Spot	Caída de persona desde altura	Arnés de seguridad y accesorios
14-10-18	Herramienta Neumática sin dispositivo giro 360°	0	4	Spot	Liberación descontrolada de energía	N/A
15-10-18	Personal expuesto a potencial de caída de bolas	0	4	Spot	Caída de objetos	Delimitación de áreas expuestas a caída de objetos
26-10-18	Potencial volcamiento de máquina lainera.	0	4	Permanente	Aplastamiento por máquina lainera	N/A
08-04-2019	Caída persona desde distinto nivel	3	4	Spot	Caída de persona desde altura	Segregar áreas para borde abierto y/o zonas de trabajo
29-07-2019	Medidor de gases con certificación no legible	0	4	Permanente	Espacios confinados/ Atmosfera contaminada	Instrumento de medición de gases
16-08-2019	Potencial caída de persona desde altura	0	4	Permanente	Caída de persona desde altura	Arnés de seguridad y accesorios
19-09-2019	Manguera sin dispositivo de seguridad	0	4	Permanente	Liberación descontrolada de energía	Dispositivo mitigador de energía

Tabla 16 Eventos sin intercambio de energía asociados al cambio de revestimiento

12.3. Anexo 3: Tablas de probabilidad de ocurrencia y severidad.

Incertidumbre	Negocio	Proyectos	Factor de probabilidad
	Con base en la experiencia de BHP y la industria y las condiciones esperadas a futuro, el evento de riesgo:	Con base en la experiencia de BHP y la industria y las condiciones esperadas a futuro, en estudios o proyectos similares, el evento de riesgo:	
Casi seguro	Podría ocurrir más de una vez al año.	Podría esperarse que ocurra más de una vez durante el estudio o la entrega del proyecto.	10
Probable	Podría ocurrir durante un período de presupuesto de 1 - 2 años.	Podría ocurrir fácilmente y ha ocurrido generalmente en estudios o proyectos similares.	3
Posible	Podría ocurrir durante un período de planificación estratégica de 5 años.	Ocurrió en una minoría de estudios o proyectos similares.	1
Improbable	Podría ocurrir en un plazo de 5 a 20 años.	Se tiene conocimiento de que ha ocurrido, pero muy rara vez.	0,3
Inusual	Podría ocurrir en un plazo de 20 a 50 años.	No ha ocurrido en estudios o proyectos similares, pero podría ocurrir.	0,1
Muy inusual	Para fallas de sistema: <ul style="list-style-type: none"> • Esta consecuencia no ha ocurrido en la industria en los últimos 50 años. Para peligros naturales: <ul style="list-style-type: none"> • El período de recurrencia pronosticado para un riesgo de esta fuerza/magnitud es uno en 100 años o más. 	Concebible, pero únicamente en circunstancias extremas.	0,03

Tabla 17 Tabla de probabilidad de ocurrencia

Nivel de severidad	Tipos de impacto						Factor de severidad
	Salud ¹ y seguridad	Medioambiente	Comunidad	Reputación	Legal	Finanzas ³	
7	>50 muertes. Discapacidad permanente de >30% del cuerpo en más de 500 personas.	Uno o más impactos severos permanentes a la tierra, biodiversidad, servicios del ecosistema, recursos hídricos o aire.	Impactos severos y generalizados a la salud, seguridad o protección de la comunidad (>1000 hogares) o violaciones a los derechos humanos; destrucción total de >1000 hogares o infraestructuras comunitarias; profanación total irreversible de múltiples estructuras, objetos o lugares de importancia mundial.	Evento de crisis o publicación de información privilegiada altamente confidencial que resulten en campañas internacionales de los medios de comunicación, gobiernos, entes reguladores u ONG y condena por parte de los empleados de la compañía (>6 meses). Daño de largo plazo a la reputación de la compañía.	Quiebra que afecte al Negocio o múltiples Assets . No otorgamiento o pérdida del derecho legal de desarrollar u operar el Negocio o múltiples Assets . Investigación ² por supuesto incumplimiento normativo, delito o violación al derecho internacional severo con impacto de largo plazo para toda la compañía. Ser demandado en uno o más procesos civiles de alto perfil con impacto de largo plazo para toda la compañía.	≥ US\$2,5 billones (Participación de BHP)	1000
6	>20 muertes. Discapacidad permanente en >30% del cuerpo de más de 100 personas.	Uno o más impactos severos (>20 años) a la tierra, biodiversidad, servicios del ecosistema, recursos hídricos o aire.	Impactos extensos a la salud, seguridad o protección de la comunidad (>200 hogares) o violaciones a los derechos humanos; perturbación grave y prolongada a la vida de las personas (>1000 hogares); daños extensos a >1000 hogares o infraestructuras o estructuras comunitarias, objetos o lugares de importancia cultural mundial.	Evento de crisis o publicación de información privilegiada confidencial que resulten en campañas internacionales de los medios de comunicación, gobiernos, entes reguladores u ONG y condena por parte de los empleados de la compañía (<6 meses). La condena continua resulta en daños a la reputación de la compañía.	La quiebra que afecte a un Asset . No otorgamiento o pérdida del derecho legal de desarrollar u operar un Asset . Investigación ² por supuesto incumplimiento normativo, delito o violación severa al derecho internacional. Demanda en contra en múltiples procesos civiles de alto perfil.	≥ US\$1 billón a <US\$2,5 billones (Participación de BHP)	300
5	2-20 muertes. Discapacidad permanente de >30% del cuerpo en más de 10 personas.	Uno o más impactos graves o extensos (<20 años) a la tierra, biodiversidad, servicios del ecosistema, recursos hídricos o aire.	Impactos graves a la salud, seguridad o protección de la comunidad (>50 hogares) o violaciones a los derechos humanos; perturbación prolongada a la vida de las personas (>200 hogares); daños extensos a >200 hogares o estructuras comunitarias, objetos o lugares de importancia cultural nacional.	Cobertura negativa grave en medios de comunicaciones nacionales e internacionales. Reacción adversa del público en general y ONG con interés de los entes reguladores (< 3 meses). Campañas estructuradas por empleados , ONG o comunidades con un impacto significativo sobre la reputación del Negocio o Asset .	Impedimento del derecho legal de desarrollar u operar un Asset . Investigación ² por supuesto incumplimiento normativo, delito o violación al derecho internacional de alto perfil. Un supuesto incumplimiento de leyes relacionadas con el cumplimiento se considerará un incumplimiento normativo de alto perfil. Demanda en contra en un proceso civil de alto perfil. Investigación pública a BHP o sobre un asunto crítico para la industria de recursos naturales.	≥ US\$250 millones a <US\$1 billón (Participación de BHP)	100
4	Una muerte. Discapacidad permanente en >30% del cuerpo de una o más personas.	Impacto(s) mayor(es) (<5 años) a la tierra, biodiversidad, servicios del ecosistema, recursos hídricos o aire.	Impactos graves a la comunidad en materias de salud, seguridad o protección (<50 hogares). Múltiples denuncias de violaciones a los derechos humanos; perturbación prolongada a la vida de las personas (>50 hogares); daños extensos a >50 hogares; daño irreversible moderado a estructuras, objetos o lugares de importancia cultural nacional.	Cobertura adversa en los medios de comunicación nacionales. Reacción adversa del público en general y ONG con interés por parte de entes reguladores sin resultados materiales. Campañas estructuradas por empleados , ONG o comunidades con un impacto significativo sobre la reputación del Negocio o Asset .	Investigación ² por supuesto incumplimiento normativo mayor. Demanda en contra en un proceso civil mayor.	≥ US\$25 millones a <US\$250 millones (Participación de BHP)	30
3	Discapacidad permanente en <30% del cuerpo de una o más personas. Restricción o pérdida de días por motivo de lesión o enfermedad.	Impacto(s) moderado(s) (<1 años) a la tierra, biodiversidad, servicios del ecosistema, recursos hídricos o aire.	Impactos moderados a la comunidad en materias de salud, seguridad o protección (<50 hogares). Una denuncia de violación a los derechos humanos; perturbación moderada a la vida de las personas (<50 hogares); daños extensos a <50 hogares; daño reversible moderado a estructuras, objetos o lugares de importancia cultural nacional.	Cobertura por los medios de comunicación regionales o elevada preocupación en la comunidad local. Críticas por parte de la comunidad, ONG o activistas. Efecto adverso en la reputación del Asset .	Asunto legal solucionable con consecuencias moderadas. Pérdida o no obtención del derecho legal de desarrollar u operar (o aprobación de) una actividad no principal.	≥ US\$2,5 millones a < US\$25 millones (Participación de BHP)	10
2	Discapacidad objetiva pero reversible. Tratamiento médico por lesión o enfermedad.	Impacto(s) menor(es) (<3 meses) a la tierra, biodiversidad, servicios del ecosistema, recursos hídricos o aire.	Impacto(s) menor(es) a la comunidad en materias de salud, seguridad y protección (<10 hogares) o vulneraciones a los derechos humanos; inconvenientes a medios de sustento <50 hogares o infraestructura comunitaria, daños menores reversibles a estructuras, objetos o lugares de importancia cultural regional.	Opinión pública local desfavorable o cobertura adversa en los medios de comunicación locales y quejas. Mayor escrutinio por parte de los entes reguladores. La reputación del Asset se ve afectada adversamente ante un número pequeño de gente.	Asunto legal solucionable con consecuencias menores.	≥US\$250.000 a <US\$2,5 millones (Participación de BHP)	3
1	Síntomas o inconvenientes subjetivos de bajo nivel y a corto plazo. Sin tratamiento médico.	Uno o más impactos de bajo nivel a la tierra, biodiversidad, servicios del ecosistema, recursos hídricos o aire.	Impacto único de bajo nivel a la comunidad en materias de salud, seguridad y protección; inconveniente de bajo nivel <2 semanas; molestia o daño menor reversible de bajo nivel a un solo hogar o estructura, objeto o lugar de importancia cultural regional.	Preocupación pública limitada a quejas locales. Interés de bajo nivel por parte de los medios de comunicación local o entes reguladores.	Asunto legal de bajo nivel solucionable sin procesos jurídicos o participación sustantiva de terceros.	<US\$250.000 (Participación de BHP)	1

Tabla 18 Tabla de indicadores de severidad

12.4. Anexo 4: Escala de Saaty

A continuación, se debe construir una matriz, a partir de la comparación de los criterios con el propósito de estimar la importancia de cada uno de ellos. La escala de Saaty es una herramienta propuesta para establecer la importancia o preferencia de criterios y alternativas en la matriz de comparaciones.

intensidad de la importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio están moderadamente a favor de una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio están fuertemente a favor de una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte	Una actividad está muy fuertemente favorecida y su dominio ha sido demostrado en la práctica
9	Importancia extrema	Es máxima la importancia de una actividad sobre la otra
2,4,6,8	Valores intermedios entre los dos juicios contiguos	Cuando un término medio es necesario
Recíproco de los números de arriba	Si al elemento i le fue asignado alguno de los números de arriba al compararse con el elemento j, entonces j tiene el recíproco al compararse con el elemento i.	-

Tabla 19 Escala de Saaty

Fuente: Técnicas participativas para la planeación. Capítulo 16: "Jerarquización Analítica", Gabriel Sánchez Guerrero.

12.5. ANEXO 5: Matrices de comparación de criterios

De acuerdo al proceso analítico jerárquico, una vez construido se establece desarrolla la matriz de comparación a pares de los criterios y sub-criterios definidos utilizando la escala de Saaty del anexo 4 para calificar la importancia relativa entre ellos.

Comparación de Criterios	Disminución de exposición a riesgos críticos	Disminución de tiempo de revestimiento	Implementación	Mantenibilidad	Operación
Disminución de exposición a riesgos críticos	1,0	2,0	3,0	5,0	3,0
Disminución de tiempo de revestimiento	0,5	1,0	2,0	5,0	3,0
Implementación	0,3	0,5	1,0	3,0	1,0
Mantenibilidad	0,2	0,2	0,3	1,0	0,5
Operación	0,3	0,3	1,0	2,0	1,0
Total $\sum r_i$	2,4	4,0	7,3	16,0	8,5

Tabla 20 Matriz de comparación de criterios

Una vez completada la matriz, se establece el problema en base a vectores y valores propios con la ecuación:

$$A * W = \lambda * W \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

A : Matriz recíproca de comparación de criterios

W : Vector propio o de prioridades que representa los pesos de los criterios.

λ : Máximo valor propio que representa la media de consistencia.

A partir de la matriz recíproca de comparaciones de criterios debemos obtener el vector de prioridades a través del cálculo de la matriz normalizada de la siguiente forma:

$$N_i = \frac{r_i}{\sum r_i} \quad \text{Ecuación 2}$$

Una vez obtenida la matriz normalizada se obtiene el vector propio o de prioridades, calculando el promedio simple de cada fila. El vector de prioridades corresponde a los pesos de cada de cada criterio para el proceso de análisis jerárquico.

Comparación de Criterios	Disminución de exposición a riesgos críticos	Disminución de tiempo de revestimiento	Implementación	Mantenibilidad	Operación	Vector de prioridades	Peso W (%)
Disminución de exposición a riesgos críticos	0,42	0,50	0,41	0,31	0,35	0,399	40%
Disminución de tiempo de revestimiento	0,21	0,25	0,27	0,31	0,35	0,279	28%
Implementación	0,14	0,12	0,14	0,19	0,12	0,141	14%
Mantenibilidad	0,08	0,05	0,05	0,06	0,06	0,060	6%
Operación	0,14	0,08	0,14	0,13	0,12	0,121	12%

Tabla 21 matriz normalizada y vector de prioridades de criterios.

Principio de consistencia lógica

Este principio busca establecer comparaciones entre los criterios de manera consistente, es decir que se cumpla la transitividad y proporcionalidad.

El AHP mide la inconsistencia global de los criterios a través de la Proporción de consistencia que es el resultado de la relación de entre el índice de consistencia y el índice aleatorio. Donde el valor de este valor de consistencia no debe superar el 10% para que el criterio se cumpla.

Para el cálculo del índice inconsistencia se realiza a partir del principio establecido en la ecuación 1, sin embargo, Saaty establece una relación que facilita los cálculos:

$$\lambda_{max} = V * B \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

λ : es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares.

V : es el vector de prioridades o vectores propios, que ya obtuvimos, de la matriz de comparaciones.

B : es una matriz fila, correspondiente a la suma de los elementos de cada columna de la matriz de comparaciones a pares. Es una matriz de $n \times 1$, donde m es el número de columnas de la matriz de comparaciones.

Con el máximo valor propio obtenido se calcula el índice de consistencia a través de la siguiente ecuación:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para el índice aleatorio existe una tabla elaborada por Saaty que muestra los índices de consistencia de acuerdo al tamaño de la matriz:

Tamaño de la Matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tabla 22 Tabla de índices aleatorios por tamaño de matriz

Finalmente, la relación de consistencia se define como:

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad \text{Ecuación 5}$$

Aplicando las ecuaciones con los datos de las matrices normalizadas de la tabla 21 se obtienen los siguientes valores para la matriz de curación de criterios:

$$\lambda_{max} = 5,081$$

$$CI = \frac{5,081 - 5}{5 - 1} = 0,1831$$

$$RC = \frac{0,1831}{1,12} = 0,016 = 1,6 \%$$

Por lo tanto, se cumple con el principio de consistencia.

Las operaciones específicas para cada criterio y sub-criterios en base al desarrollo planteados.

Implementación: Relación de consistencia: 1,6 %

Comparación de Criterios	Tiempo de implementación	Riesgo de implementación	Flexibilidad
Riesgo de implementación	1,0	2,0	3,0
Tiempo de implementación	0,5	1,0	1,0
Flexibilidad	0,3	1,0	1,0

Mantenibilidad: Relación de consistencia: 0 %

Comparación de Criterios	Tiempo de implementación	Riesgo de implementación	Flexibilidad	Vector de prioridades	Peso W (%)
Riesgo de implementación	0,55	0,50	0,60	0,55	55%
Tiempo de implementación	0,27	0,25	0,20	0,24	24%
Flexibilidad	0,18	0,25	0,20	0,21	21%

Tabla 23 Matriz normalizada para relación de consistencia de la variable implementación

Comparación de Criterios	Estrategia de mantención	Servicio post venta
Estrategia de mantención	1,0	1,0
Servicio post venta	1,0	1,0

Comparación de Criterios	Estrategia de mantención	Servicio post venta	Vector de prioridades	Peso W (%)
Estrategia de mantención	0,50	0,50	0,50	50%
Servicio post venta	0,50	0,50	0,50	50%

Tabla 24 Matriz normalizada para relación de consistencia de la variable Mantenibilidad

12.6. Anexo 6: Escala de evaluación de criterios y sub criterios.

Criterio	Escala	Detalle asignación
Disminución de exposición a riesgos críticos	5	Elimina en su totalidad la exposición a los riesgos críticos asociados al cambio de revestimiento RRR = 0.9
	3	Elimina de forma de forma parcial la exposición a los riesgos críticos asociados al cambio de revestimiento RRR = 30
	1	No logra eliminar la exposición a los riesgos críticos asociados al cambio de revestimiento RRR >30
Disminución de tiempo de revestimiento	5	La implementación de la nueva tecnología logra disminuir los tiempos de cambios de revestimiento
	3	La implementación mantiene los tiempos actuales de cambio de revestimiento
	1	La implementación aumenta los cambios de revestimiento
Riesgo de implementación	5	La alternativa se ha implementado en otras operaciones y cuenta con pruebas pilotos para controlar riesgos
	3	La alternativa cuenta con pruebas pilotos en laboratorio
	1	La alternativa solo se encuentra en etapa de desarrollo
Tiempo de implementación	5	La estrategia de implementación considera un tiempo inferior a 2 dos años
	3	La estrategia de implementación considera un tiempo mayor a 2 año y menor a 3 años
	1	La estrategia de implementación considera un tiempo mayor a 3 años
Flexibilidad	5	EL nuevo sistema es capaz de entregar flexibilidad para ser utilizado en cualquier molino
	3	los equipos solo tiene una flexibilidad limitada por tipo de molino.
	1	los equipos solo pueden ser utilizado para un molino específico
Estrategia de mantención	5	Cuenta con una estrategia controlada con frecuencias y repuestos críticos definidos
	3	cuenta con una estrategia en desarrollo
	1	No tiene una estrategia de mantención definida
Servicio post venta	5	La alternativa cuenta con servicio técnico, personal capacitado con un buen tiempo de repuesta y la no obsolescencia de sus componentes
	3	La alternativa cuenta con un servicio técnico limitado con una bajo tiempos de repuesta
	1	La alternativa no puede asegurar el soporte técnico ni una rápida disponibilidad de repuestos
Operación	5	La operación de los nuevos dispositivos cuenta con estrategias de capacitación y bajo riesgo de contar con personal con las competencias necesarias
	3	La operación requiere de una estrategia compleja para asegurar una correcta operación e los nuevos sistemas.
	1	La operación no cuenta con una estrategia definida para la operación y un alto riesgo de contar con personal con las competencias requeridas

Tabla 25 Escalas de evaluaciones criterios y sub criterios