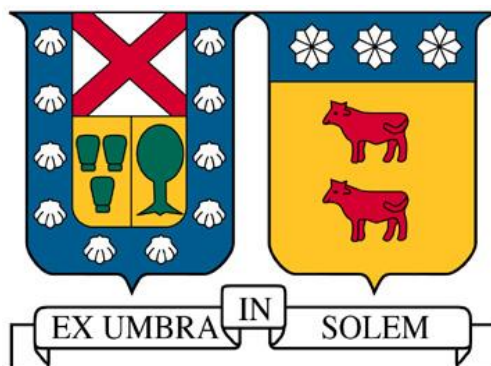


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO – CHILE



DESARROLLO DE ANÁLISIS RAM PARA DEFINICIÓN DE EQUIPOS
EN PROYECTO DE MEJORA PLANTA DE MOLIBDENO.

HUGO FELIPE JARA CARVALLO

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO

PROFESOR GUÍA

: SR. PABLO VIVEROS

JULIO 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título; ☒ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Desarrollo de análisis RAM para definición de equipos en proyecto de mejora Planta de Molibdeno

Nombre del candidato(a): Hugo Jara Carvallo

Carrera / Grado: Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento

Campus: Santiago Vitacura; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Pablo Viveros Gunckel, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 02-09-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha:
02-09-2025

; Firma:

Jara,
Hugo

Digitally signed by Jara,
Hugo
DN: cn=Jara, Hugo, o=BHP
Group Operations Pty Ltd,
ou=MULTI-ALLOWED
Date: 2025.09.02 13:39:10 -
04'00'

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

1. RESÚMEN

El presente documento tiene la intención de dar a conocer el uso de un análisis RAM como metodología de estudio y herramienta que respalde la selección de equipos en un proyecto de una planta de concentrado de molibdeno y dar soporte al caso de negocio.

El objetivo es evaluar la incorporación de nuevos equipos a la planta de concentrado e identificar su impacto, considerando posibles pérdidas y proyectarlas en el tiempo. Esto está enfocado en el cálculo de disponibilidad del sistema, costos de operación, posibles costos de ineficiencia y costo de inversión, para así conseguir el costo global del proyecto y respaldar su implementación.

Como resultado del estudio, se obtiene el impacto despreciable de los costos de ineficiencia por la alta disponibilidad del sistema, entregando de esa manera el soporte a la implementación de los equipos proyectados. También entrega una mirada global del negocio, dando relevancia a las mejoras a nivel de proceso, riesgos y operativos.

Palabras clave: Disponibilidad, Proyectos, Inversión, Costos, Operación.

2. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia, a mi pareja Daniela Azúa, por siempre confiar en mí y mis capacidades, por siempre apoyarme e insistir en ir más allá. Agradezco a los que ya no están en este plano, que estarían muy felices por lo que he podido lograr como persona y también como profesional.

A mis compañeros del postgrado: Max, Yuri, Hernán y Pablo, quienes hicieron que esta experiencia fuese inolvidable, llena de aprendizajes y gratos momentos.

ÍNDICE

1.	RESUMEN	2
2.	AGRADECIMIENTOS.....	3
3.	INTRODUCCIÓN.....	5
4.	OBJETIVOS.....	7
4.1	GENERALES	7
4.2	ESPECÍFICOS	7
5.	DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	8
5.1	ALCANCE DEL ESTUDIO	11
6.	ESTADO DEL ARTE	12
7.	METODOLOGÍA	14
	PASO 1: PLANIFICACIÓN.....	14
	PASO 2: CONSOLIDACIÓN DE DATA OPERACIONAL	14
	PASO 3: DESARROLLO	15
	PASO 4: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	15
8.	DESARROLLO DEL ESTUDIO	17
9.	CONCLUSIONES.....	29
10.	ANEXOS.....	31
	ANEXO A: PLANILLA EXCEL CON PLAN DE PRODUCCIÓN PLANTA DE MOLIBDENO	31
	ANEXO B: DETALLE DE ESTUDIO DE COSTOS DEL PROYECTO	32

3. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de proyectos, la etapa de Definición es la fase final del estudio, y su objetivo principal es definir el alcance, desarrollar la ingeniería de detalle, confirmar el diseño, seleccionar los equipos y lay-out, definir el presupuesto y establecer el programa constructivo, todo esto para pasar a la Ejecución

Sin embargo, recientes proyectos en la industria de uso masivo de activos han fallado en la selección apropiada de equipos y su distribución lógica funcional, donde no se ha considerado el comportamiento de los nuevos equipos, sin analizar posibles fallas y/o anomalías, solamente considerando la variable de cumplir la producción, no considerando el ciclo de vida de los activos y, por otro lado, el impacto económico que estos podrían causar en el negocio.

Ante esta desviación, hace algunos años se ha incorporado en la fase de estudios de proyectos los análisis de confiabilidad, donde la gestión de activos y mantenimiento está cumpliendo un rol clave en validar y respaldar la inversión, siendo un input necesario en la toma de decisiones y definir la mejor opción de inversión.

En esta Tesina, se utiliza el análisis RAM como metodología y herramienta de soporte para la fase de Definición de un proyecto, si bien no es una herramienta nueva, últimamente ha tomado fuerza como justificación técnica para validar un caso de negocio desde la mirada de confiabilidad, análisis de riesgos y costos.

Además, este análisis busca responder interrogantes sobre el nivel de criticidad y focalizar recursos de Ingeniería, Confiabilidad y Ejecución del mantenimiento para mejorar el rendimiento de las instalaciones.

En este caso, el estudio se centra en un proyecto de mejoramiento de una planta concentradora de molibdeno existente, ubicada en la región de Antofagasta, Chile. En el cual se contempla el reemplazo de equipos de impulsión por mayor capacidad e implementación de una nueva etapa de espesamiento previo al filtrado de concentrado (Proyecto Brownfield), se analizará la data operacional disponible para conocer su comportamiento, ya sea como equipo unitario como en el sistema, permitiendo saber el impacto productivo que podría incurrir y como consecuencia en lo económico.

4. OBJETIVOS

4.1 Generales

El objetivo principal de esta Tesina es realizar un análisis RAM (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad por sus siglas en inglés) y evaluar los equipos seleccionados para el proyecto de mejoramiento en la Planta de Molibdeno, de esta manera validar su selección y distribución lógica funcional (layout), con eso también la factibilidad técnico-económica de la promesa de valor del proyecto.

4.2 Específicos:

- Realizar un análisis técnico-económico en la selección de equipos nuevos y su interacción con los equipos existentes para dar cumplimiento al caso de negocio del proyecto con la mirada de Gestión de Activos y Mantenimiento.
- Realizar un diagrama de bloques de confiabilidad (RBD) como herramienta disponible para calcular la disponibilidad del sistema.
- Identificar el impacto económico del negocio por la nueva selección de equipos mediante el análisis de indisponibilidad y costo de ineficiencia para ser input de valor en la planificación de producción general de la planta productiva, teniendo una mirada de Riesgos.
- Evaluar el Costo Global de la inversión y viabilidad del proyecto con la visión de la Gestión de Activos para dar relevancia a la materia.

5. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La Planta de Molibdeno debe procesar el concentrado colectivo Cu-Mo proveniente de la descarga del espesador de concentrado Cu-Mo, alimentando al estanque TK-062 y está compuesta de una etapa de flotación primaria (10 celdas) y tres etapas de limpieza (15 celdas en total), las que operan en circuito en contra corriente, obteniendo un concentrado final de Molibdeno que posteriormente es desaguado mediante filtrado y secado, siendo finalmente envasado en sacos. En la figura 5-1 se identifica la disposición de equipos en la planta existente.

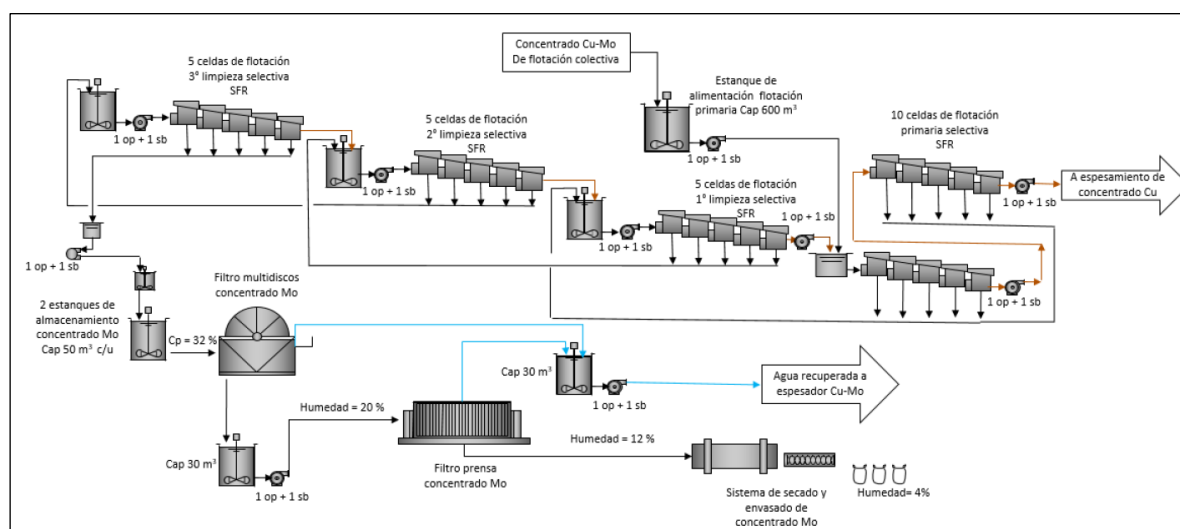


Figura 5-1: Diagrama de flujo de equipos - Planta de Molibdeno; fuente propia.

La Planta de Molibdeno se ha visto enfrentada a tener que procesar mayores flujos respecto al diseño original, producto de un mayor contenido de arcillas en el mineral proveniente de la mina, que ha generado un mayor flujo de concentrado desde la etapa de flotación colectiva, lo que ha generado las siguientes consecuencias:

- Derivación parcial del flujo de concentrado Cu-Mo como concentrado final de Cu, by-paseando la Planta de Molibdeno, por restricción del sistema hidráulico.

La implementación de un nuevo espesador intermedio que aseguraría la correcta concentración de sólidos hacia la etapa de filtrado y por consiguiente, se pueda alcanzar la humedad final del concentrado es la otra mejora relevante del proyecto, incrementando la recuperación de agua respecto a la situación actual. La necesidad está asociada, por una parte, a cubrir la salida de operación del filtro de discos y, por otra, a dar mayor flexibilidad a la planta en sí, permitiendo, en base a necesidad, acumular inventario frente a imprevistos o requerimientos de la operación.

La figura 5-3 nos muestra la posición del espesador de concentrado de molibdeno en el layout de estudio, donde implica considerar un trazado independiente desde la flotación 3^a limpieza a la nueva ubicación, bombas de impulsión y cañerías de descarga del espesador hacia la etapa de filtrado, un nuevo clarificador para el tratamiento del agua recuperada desde el espesador y su posterior retorno al proceso.

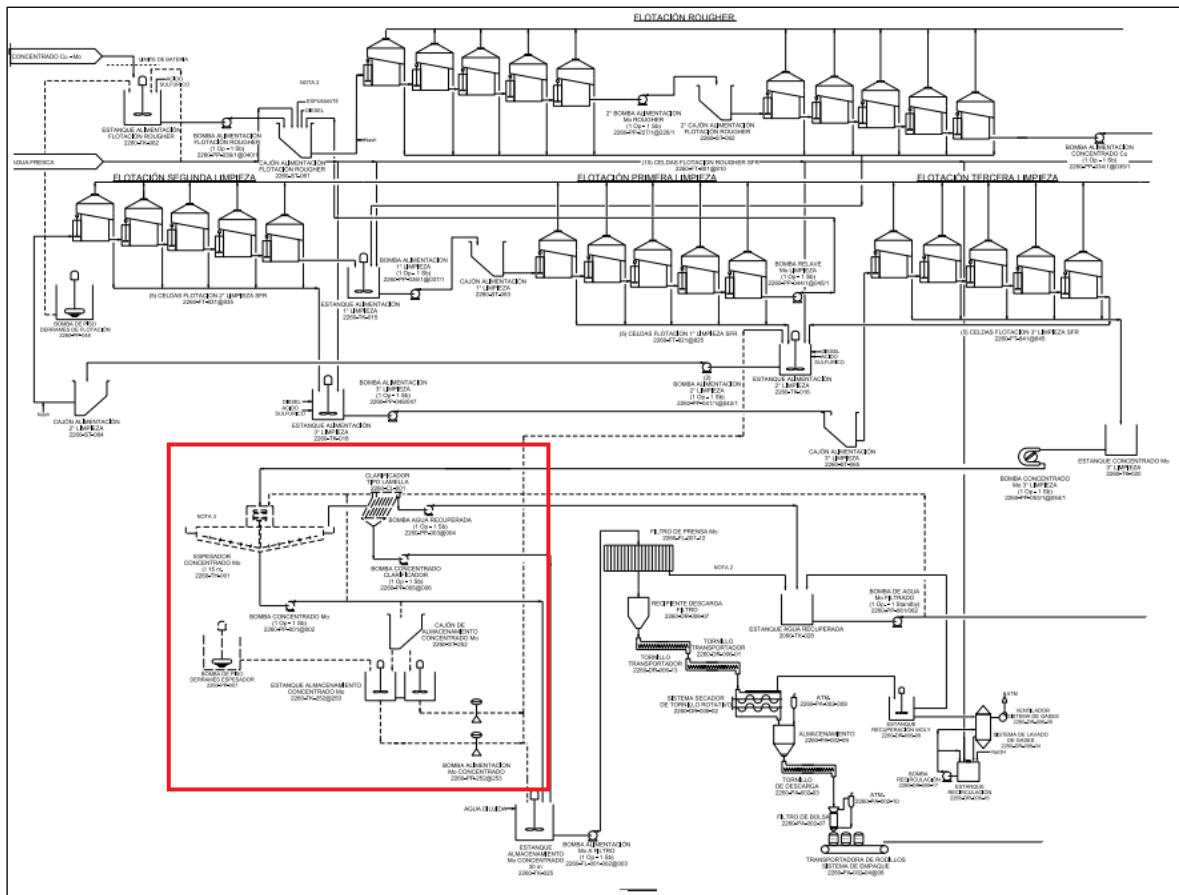


Figura 5-2 Diagrama de flujo Nuevo Espesador de Molibdeno; fuente propia

5.1 Alcance del estudio

Dadas estas soluciones proyectadas en la planta de Molibdeno, se hará reemplazo de equipos existentes y como también equipos nuevos, pero sin la mirada de la gestión de activos, lo que solicita calcular y analizar el impacto que tendría la implementación del proyecto en materia de gestión de activos, disponibilidad y costos del sistema para dar soporte lo suficientemente confiable para cumplir con la planificación de producción proyectada.

6. ESTADO DEL ARTE

Conociendo la problemática expuesta en el capítulo anterior, se hace necesario realizar una investigación y análisis de las herramientas y metodologías utilizadas para ejecutar este estudio. A continuación, se mencionan diferentes fuentes y su relevancia.

El artículo “Guidelines for integrating RAM considerations into an engineering Project” (1990)¹ es la primera referencia relacionada con la aplicación del análisis RAM en todas las fases de un proyecto, dando a conocer la contribución de esta materia para garantizar que los objetivos del proyecto se cumplan y que la información relacionada a mantenimiento es necesaria para la toma de decisiones del proyecto.

El enfoque que entrega Adolfo Arata en el libro “Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad Operacional en Plantas Industriales” (2009)² se ajusta a la necesidad de comprobar o dar soporte en la selección de equipos en un proyecto, identificando cuáles son las variables para considerar en los cálculos y poder avanzar en la decisión del proyecto.

Además, referido a la metodología para implementar este tipo de estudio, el artículo “RAM analysis of mining process: a case study of a Copper Smelting Process in the field of mining, Chile” (2012)³ menciona los pasos propuestos para desarrollar un análisis RAM y, dando énfasis en la calidad de la información disponible para poder gestionar la data y así ejecutar los cálculos específicos con análisis correspondiente de acuerdo con el caso de estudio.

¹ V. H. Guthrie, J. A. Farquharson, R. W. Bonnett and E. F. Bjoro, (1990) "Guidelines for integrating RAM considerations into an engineering project," in *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 39, no. 2, pp. 133-139.

² Arata, A. (2009). Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. 1ra Edición. RIL editores.

³ Barberá, L., A. Crespo, P. Viveros, F. Kristjanpoller et al. 2012. “RAM Analysis of Mining Process: A Case Study of a Copper Smelting Process in the Field of Mining, Chile.”

Por último, en el paper denominado “The Integration of Reliability, Availability, and Maintainability into Model-Based Systems Engineering” (2022)⁴, identifica la integración de un análisis RAM en los diseños de ingeniería como una herramienta que simplifica los sistemas complejos y agrega valor en obtener diseños robustos y acertados para cumplir el objetivo del negocio.

⁴ Diatte, K., O’Halloran, B.M., & Bossuyt, D.L. (2022). The Integration of Reliability, Availability, and Maintainability into Model-Based Systems Engineering. *Syst.*, 10, 101.

7. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del cálculo y análisis, se realizó una serie de pasos para el cálculo de los indicadores clave de mantenimiento, los que serán utilizados para la evaluación del proyecto.

Los pasos son los siguientes:

Paso 1: Planificación

Se debe realizar la identificación de los equipos que serán parte del estudio, destacar tipo de equipo, cantidad, tag number, función y alguna otra característica que sea relevante para el caso. Tener claridad del límite de batería para así también poder tener las consideraciones necesarias al momento de realizar los cálculos.

Por otro lado, el período de estudio debe ser representativo para definir las métricas necesarias y que éstas puedan ser utilizadas para proyectar la implementación del proyecto.

Paso 2: Consolidación de data operacional

Una vez definido el período de estudio, se debe recolectar la data operacional de los equipos existentes y/o similares, por un lado, lo oficial desde la base de datos del software R-MES implementado en la planta concentradora de molibdeno y, además confirmación de tiempos fuera de servicio en PI-Vision, descargando los datos según Tag Number. Además, la identificación de los equipos según el alcance, el tipo de detención, cantidad de fallas y su duración con la información en SAP de las órdenes de trabajo.

Tratamiento de datos

El proceso de recopilación de datos es complejo dado que generalmente la calidad de la información disponible es baja y hace necesario realizar un tratamiento para buscar y consolidar la data obtenida en las distintas fuentes mencionadas anteriormente.

Para el tratamiento de datos es importante considerar lo siguiente:

- Fuente de datos
- Calidad de los datos
- Cantidad
- Análisis.

Este tratamiento puede significar invertir tiempo en “limpiar” la data, verificando los tiempos fuera de servicio duplicados o mal imputados en el sistema, las órdenes de trabajo con horas reportadas sub y sobredimensionadas, dar formato para poder realizar cálculos precisos y que agreguen valor al estudio.

Paso 3: Desarrollo

Generar un diagrama de bloques del sistema como herramienta clave para visualizar la distribución lógico-funcional del sistema, de esa manera ordenar los equipos nuevos y existentes y su relación entre ellos y así incorporar la data consolidada, de esta manera poder calcular la disponibilidad de los equipos, subsistemas y sistema. Esto de acuerdo con las fórmulas establecidas en el libro “Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad Operacional en Plantas Industriales, Adolfo Arata, 3ra Edición.

Paso 4: Evaluación y análisis de resultados

Evaluar los resultados obtenidos con la proyección de producción de acuerdo con el plan minero. Analizar el Costo Global⁵ de la inversión y viabilidad de implementación.

En la figura 6-1 se puede visualizar el esquema de las etapas a seguir.

⁵ Arata, A. (2009). Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. 1ra Edición. RIL editores. Capítulo 3. Pág. 100.
Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento
Universidad Técnica Federico Santa María

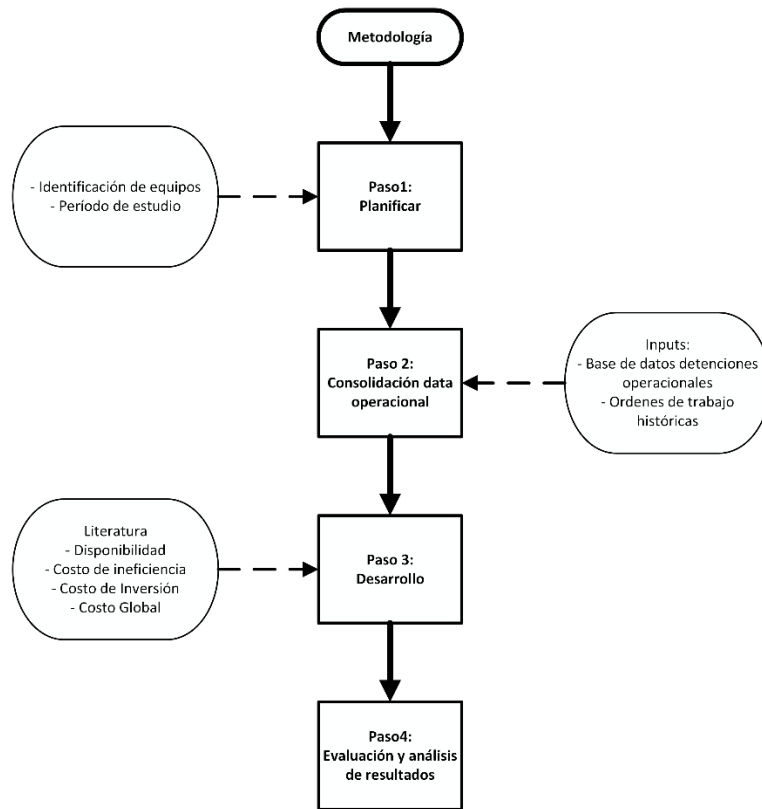


Figura 7-1 Esquema de metodología de estudio, fuente propia.

8. DESARROLLO DEL ESTUDIO

Según lo especificado en la metodología del estudio, el desarrollo está enmarcado en los pasos antes mencionados.

Paso 1: Planificación

- Período de estudio: Datos recolectados desde el 01 de enero hasta el 31 de diciembre del 2023.
- Listado de equipos en alcance es el siguiente:

Área	Equipo	Descripción	Estado
Flotación Selectiva Rougher	TK-062	Estanque Alimentación Flotación Rougher	Existente
	PP-039	Bomba Alimentación Flotación Rougher 1ra mitad	Repotenciar
	PP-040	Bomba Alimentación Flotación Rougher 1ra mitad (Stand-by)	Repotenciar
	FT-801/805	Celdas Flotación SFR Rougher 1ra mitad	Existente
	PP-227	Bomba Alimentación Flotación Rougher 2da mitad	Repotenciar
	PP-228	Bomba Alimentación Flotación Rougher 2da mitad (Stand-by)	Repotenciar
	FT-806/810	Celdas Flotación SFR Rougher 2da mitad	Existente
Flotación Primera Limpieza	TK-015	Estanque Alimentación Flotación 1ra Limpieza	Existente
	PP-036	Bomba Alimentación Flotación 1ra Limpieza	Repotenciar
	PP-037	Bomba Alimentación Flotación 1ra Limpieza (Stand-by)	Repotenciar
	FT-821/825	Celdas Flotación SFR 1ra Limpieza	Existente
Flotación Segunda Limpieza	TK-016	Estanque Alimentación Flotación 2da Limpieza	Existente
	PP-041	Bomba Alimentación Flotación 2da Limpieza	Repotenciar
	PP-042	Bomba Alimentación Flotación 2da Limpieza (Stand-by)	Repotenciar
	FT-831/835	Celdas Flotación SFR 2da Limpieza	Existente
Flotación Tercera Limpieza	TK-018	Estanque Alimentación Flotación 3ra Limpieza	Existente
	PP-046	Bomba Alimentación Flotación 3ra Limpieza	Repotenciar
	PP-047	Bomba Alimentación Flotación 3ra Limpieza (Stand-by)	Repotenciar
	FT-841/845	Celdas Flotación SFR 3ra Limpieza	Existente
Alimentación Filtros	TK-020	Estanque Receptor Concentrado Molibdeno	Existente
	PP-053	Bomba Descarga Concentrado Molibdeno	Repotenciar
	PP-054	Bomba Descarga Concentrado Molibdeno (Stand-by)	Repotenciar
Espesamiento Concentrado Mo	TH-001	Espesador de Concentrado Molibdeno	Proyectado
	PP-001	Bomba Descarga Espesador	Proyectado
	PP-002	Bomba Descarga Espesador (Stand-by)	Proyectado
	CL-001	Clarificador Overflow	Proyectado
	PP-005	Bomba Descarga Clarificador	Proyectado
	PP-006	Bomba Descarga Clarificador (Stand-by)	Proyectado
	TK-025	Estanque Acumulador Concentrado Molibdeno	Existente

Área	Equipo	Descripción	Estado
Filtrado y Secado	Filtrado y Secado	Etapa de Filtrado y Secado de Molibdeno	Existente

Tabla 8-1 Listado de equipos en estudio; fuente propia

Donde se identifican equipos repotenciados las bombas (PP) y también el Espesador de concentrado de Molibdeno con sus periféricos.

Paso 2: Consolidación de data operacional

Para recolectar la data operacional desde la base de datos del software R-MES implementado en la planta concentradora de molibdeno y, además, confirmación de tiempos fuera de servicio en PI-Vision. Además, revisión de órdenes de trabajo de los equipos según el alcance, el tipo de detención, cantidad de fallas y su duración.

Se debe realizar el tratamiento de datos con el siguiente detalle:

- Fuente de datos: R-MES, SAP, Pi-Vision.
- Calidad de los datos: errores en puntuación, números negativos, null, entre otros.
- Cantidad: Se recopilan 159 imputaciones de acuerdo con los equipos en estudio
- Análisis: los datos obtenidos se evidencian.

A continuación, se muestra la tabla 8-2 con los resultados de estadística descriptiva que ayuda a visualizar de primera medida las características del grupo de datos y cómo también esto podría impactar en el análisis y las conclusiones.

<i>Estadística Descriptiva</i>	<i>Valor</i>	<i>Comentario</i>
Media	5,496	Promedio general de los datos.
Mediana	0,667	La mitad de los datos está por debajo de este valor. Muy inferior a la media, lo que indica asimetría positiva.
Desviación Estándar	18,364	Alta dispersión respecto a la media.
Varianza Muestral	337,253	Medida cuadrática de la dispersión.
Curtosis	46,602	Extremadamente leptocúrtica: hay muchos valores extremos (colas pesadas).
Asimetría	6,434	Fuertemente sesgada a la derecha (asimetría positiva).
Rango	164,993	Gran diferencia entre el valor mínimo y máximo.
Mínimo	0,007	Valores extremos que refuerzan la alta dispersión.
Máximo	165	Valores extremos que refuerzan la alta dispersión.
Suma	873,880	El total de los datos y cantidad de observaciones.
Conteo	159	

Tabla 8-2 Estadística Descriptiva de los datos

En este caso, los datos muestran alta dispersión respecto a la media, existe gran diferencia entre el valor máximo y mínimo (rango).

Paso 3: Desarrollo

De acuerdo con lo mencionado, desarrollamos el diagrama RBD detallado en Figura 6-2, se identifican los equipos nuevos (color naranja) y el flujo de proceso para realizar los cálculos requeridos.

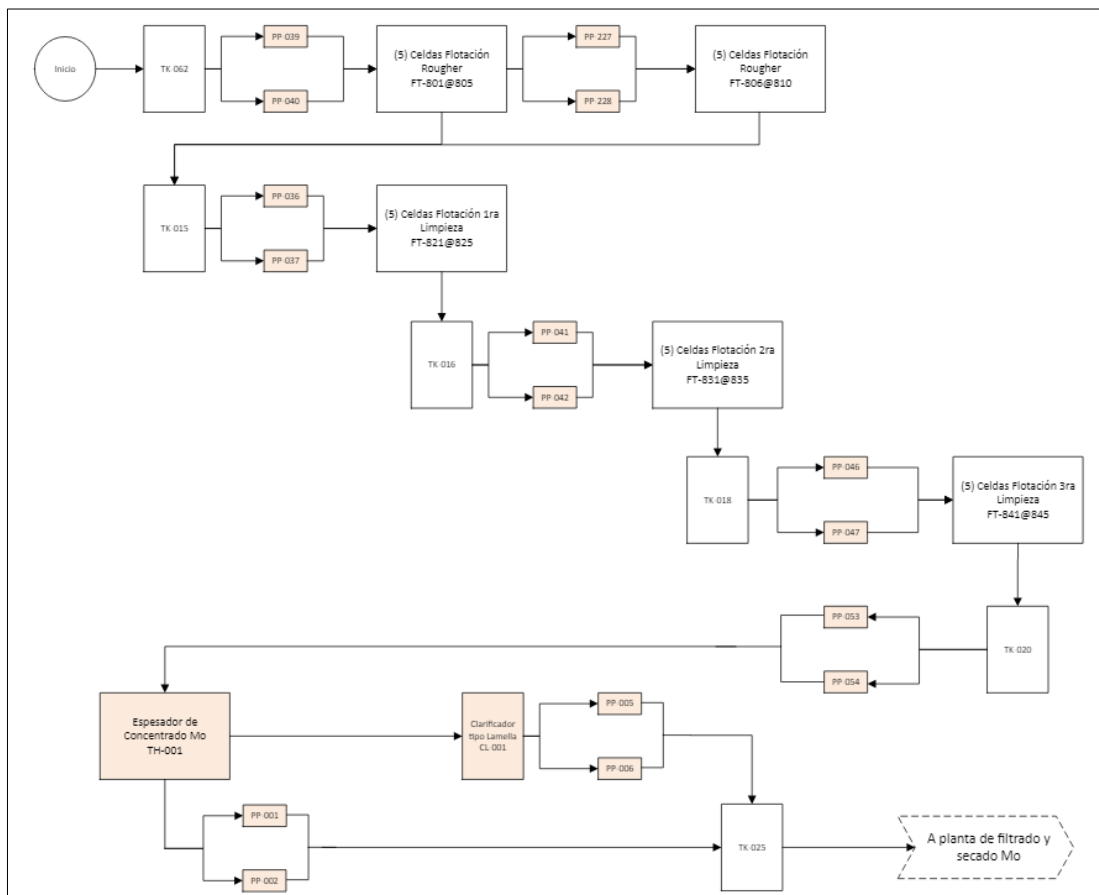


Figura 8-2 Diagrama de Bloques Funcionales o Confiabilidad (RBD); fuente propia

Además, se realizan las siguientes consideraciones:

- 1.- Para las celdas de flotación, en todas sus etapas, no se consideran las colas de relave que retornan al Espesador de Cu-Mo que está previo al sistema en estudio, por lo cual quedan fuera del alcance del estudio. Además, cada banco o grupo de 05 celdas se considera como valor único para efectos del cálculo, es decir, como sólo un elemento.
- 2.- En la Flotación Rougher, el flujo va directamente al primer banco de celdas SFR (FT-801@805) y luego, el relave de estos pasa al segundo banco de 05 celdas (FT-806@810). Con esto, se realiza una ponderación en la capacidad de producción, del 70/30 de cada banco.
- 3.- Dado que el concentrado de molibdeno recuperado en el clarificador tipo Lamella CL-001, corresponde aproximadamente al 1%, queda fuera para el cálculo de disponibilidad del sistema por ser despreciable.
- 4.- Las áreas de filtrado y secado de concentrado de Molibdeno no son consideradas en el alcance del estudio ya que el proyecto no contempla cambio de equipos.

Paso 3: Desarrollo “Cálculo de Disponibilidad y Costo Global”

Para efectos de cálculo, se consideraron las siguientes fórmulas que están referenciadas en la literatura antes mencionada y también a pie de página:

a.- Disponibilidad esperada⁶:

$$\text{Disponibilidad esperada} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (6.1)$$

Donde:

MTBF: Mean Time Between Failure (Tiempo Medio Entre Fallas)

MTTR: Mean Time To Repair (Tiempo Medio Para Reparar)

⁶ Arata, A. (2009). Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. 1ra Edición. RIL editores. Capítulo 3. Pág. 135.
Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento
Universidad Técnica Federico Santa María

Además, consideramos que los equipos están en etapa de vida útil, o de otra manera, están con tasa de falla (λ) constante, por lo que podemos utilizar lo siguiente:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (6.2)$$

Donde:

λ : Tasa de fallas [1/hr]

b.- Disponibilidad en Serie

$$A_{sistema} = 1 - \prod A_i \quad (6.3)$$

c.- Disponibilidad en Paralelo

$$A_{sistema} = 1 - \prod (1 - A_i) \quad (6.4)$$

Dado esto, utilizando la ecuación 6.3 y 6.4, los cálculos realizados quedan reflejados en la tabla siguiente:

Área	Equipo	Tasa de falla [1/hr]	MTBF [hr]	MTTR [hr]	Ai	Asubs 1	Asubs 2	Asubs 3
Flotación Selectiva Rougher	TK-062	0,00048	2088,00	2,08	99,90%	99,90%	99,89%	100,00%
	PP-039	0,00263	379,64	1,76	99,54%	100,00%		
	PP-040	0,00120	835,20	1,01	99,88%			
	FT-801/805	0,000125	8000	1	99,99%	99,99%		
	PP-227	0,00051	1967,03	3,05	99,85%	100,00%		
	PP-228	0,00051	1967,03	3,05	99,85%			
	FT-806/810	0,000125	8000	1	99,99%	99,99%		
Flotación Primera Limpieza	TK-015	0,00084	1193,14	0,82	99,93%	99,93%	99,92%	99,92%
	PP-036	0,00012	8352,00	0,06	100,00%	100,00%		
	PP-037	0,00012	8352,00	0,06	100,00%			
	FT-821/825	0,000125	8000	1	99,99%	99,99%		
Flotación Segunda Limpieza	TK-016	0,00010	9777,25	0,14	100,00%	100,00%	99,99%	99,99%
	PP-041	0,00024	4176,00	1,00	99,98%	100,00%		
	PP-042	0,00012	8352,00	0,04	100,00%			
	FT-831/835	0,000125	8000	1	99,99%	99,99%		

Área	Equipo	Tasa de falla [1/hr]	MTBF [hr]	MTTR [hr]	Ai	Asubs 1	Asubs 2	Asubs 3
Flotación Tercera Limpieza	TK-018	0,00024	4176,00	1,15	99,97%	99,97%	99,96%	99,96%
	PP-046	0,00395	253,09	2,39	99,06%	100,00%		
	PP-047	0,00012	8352,00	1,25	99,99%			
	FT-841/845	0,000125	8000	1	99,99%	99,99%		
Alimentación Filtros	TK-020	0,00036	2784,00	0,48	99,98%	99,98%	99,98%	99,98%
	PP-053	0,00024	4176,00	3,87	99,91%	100,00%		
	PP-054	0,00048	2088,00	0,66	99,97%			
Espesamiento Concentrado Mo	TH-001	0,00058	1731,63	0,52	99,97%	99,97%	99,97%	99,97%
	PP-001	0,00051	1967,03	3,05	99,85%	100,00%		
	PP-002	0,00051	1967,03	3,05	99,85%			
	CL-001	0,00010	9777,25	0,14	100,00%	100,00%	100,00%	
	PP-005	0,00030	3363,70	0,89	99,97%	100,00%		
	PP-006	0,00030	3363,70	0,89	99,97%			
Acumulación de Concentrado Mo	TK-025	0,00009	10557,10	0,12	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 8-3 Tabla de resultados, Disponibilidad de sistema; fuente propia

Con esto, obtenemos una Disponibilidad del sistema de **99,82%**

d.- Costo Global

El **costo global**⁷ es la cuantificación de todos los costos incurridos en el ciclo de vida de un proyecto o instalación, y puede ser descrito por la relación siguiente:

$$\text{Costo Global} = \text{Costo capital fijo} + \text{Costo Operacional} + \text{Costo de ineficiencia} \quad (6.5)$$

Donde, el costo de capital fijo es la inversión proyectada, ya sea en equipos, instalaciones u otros. El costo operacional es el total de costos de un sistema, tales como insumos, energía, mano de obra, entre otros. Por último, el costo de ineficiencia está dado por la indisponibilidad del sistema durante el período de evaluación.

⁷ Arata, A. (2009). Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. 1ra Edición. RIL editores. Capítulo 3. Pág. 140.

e.- Costo Ineficiencia

Para obtener el Costo de ineficiencia del sistema, consideramos las horas potenciales de detención por subsistema en un año, tomando para el cálculo 360 días por año y operación 24 horas por día. Además, el costo de ineficiencia por hora, según el valor de mercado de la libra de concentrado de molibdeno es de 24,14 [USD/lb]⁸, dando como resultado para el año 2024 de **\$3.716 [USD/hr]**.

Con esto, complementamos la Tabla 6-3 con el costo de ineficiencia anual o destrucción de negocio esperada.

Área	Equipo	Ai	Asubs 1	Asubs 2	Asubs 3	Tiempo esperado fuera de servicio por fallas h/año	Destrucción de negocio esperada anual USD/año
Flotación Selectiva Rougher	TK-062	99,90%	99,90%	99,89%	100,00%	9,22	\$ 23.980
	PP-039	99,54%	100,00%				
	PP-040	99,88%					
	FT-801/805	99,99%	99,99%				
	PP-227	99,85%	100,00%	99,99%		1,05	\$ 1.165
	PP-228	99,85%					
	FT-806/810	99,99%	99,99%				
Flotación Primera Limpieza	TK-015	99,93%	99,93%	99,92%	99,92%	6,70	\$ 24.879
	PP-036	100,00%	100,00%				
	PP-037	100,00%					
	FT-821/825	99,99%	99,99%				
Flotación Segunda Limpieza	TK-016	100,00%	100,00%	99,99%	99,99%	1,14	\$ 4.235
	PP-041	99,98%	100,00%				
	PP-042	100,00%					
	FT-831/835	99,99%	99,99%				
Flotación Tercera Limpieza	TK-018	99,97%	99,97%	99,96%	99,96%	3,30	\$ 12.266
	PP-046	99,06%	100,00%				
	PP-047	99,99%					
	FT-841/845	99,99%	99,99%				
Alimentación Filtros	TK-020	99,98%	99,98%	99,98%	99,98%	1,40	\$ 5.212
	PP-053	99,91%	100,00%				
	PP-054	99,97%					
Espesamiento Concentrado Mo	TH-001	99,97%	99,97%	99,97%	99,97%	2,49	\$ 9.248
	PP-001	99,85%	100,00%				
	PP-002	99,85%					
	CL-001	100,00%	100,00%	100,00%			\$ -

⁸ COCHILCO (2023) Precio del Molibdeno. [Cochilco - Estadísticas - Precios de los Metales](#)

Área	Equipo	Ai	Asubs 1	Asubs 2	Asubs 3	Tiempo esperado fuera de servicio por fallas h/año	Destrucción de negocio esperada anual USD/año
	PP-005	99,97%	100,00%				
	PP-006	99,97%					
Acumulación de Concentrado Mo	TK-025	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	0,09	\$ 340

Tabla 8-4 Tabla de resultados, Costo Ineficiencia; fuente propia

De esta manera, el costo de ineficiencia del sistema es de **\$81.325 [USD/año]** por concepto de indisponibilidad de equipos según datos de estudio.

f.- Costo de inversión

Para el proyecto, se ha hecho estudios de costos considerando la ingeniería de detalle, requisición de equipos nuevos (Precommitment), montaje, costos indirectos, entre otros.

En la Tabla 6-4, se muestra el resumen de costos de acuerdo con el alcance. Ver detalle en Anexo B.

PRESENTACIÓN RESUMEN DE COSTOS		
ITEM	TOTAL MUSS	TOTAL USD
STUDY PHASE SPS CLASS 2	7,94	7.940.921
ENGINEERING	4,59	4.588.801
MANAGEMENT	2,24	2.243.162
ESCALATION-CONTINGENCY	1,11	1.108.958
PRECOMMITMENT	5,28	5.283.707
PRECOMMITMENT	3,66	3.657.810
ESCALACIÓN (PRECOMMITMENT)	7,0%	256.047
CONTINGENCIA (PRECOMMITMENT)	35,0%	1.369.850
FASE DE EJECUCIÓN	19,90	19.904.583
CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	7,82	7.824.356
OTROS DIRECTOS	1,77	1.773.263
COMMON DISTRIBUTABLE	0,54	536.845
ENGINEERING AND PROJECT MANAGEMENT	1,98	1.980.004
INDIRECT COST (OWNER)	1,67	1.665.098
ESCALACIÓN	7,0%	964.570
CONTINGENCIA	35,0%	5.160.447
TOTAL COSTOS DE ESTIMACIÓN	33,13	33.129.211

Tabla 8-5 Estimación de costos; fuente propia

Con esta información, para el cálculo de Costo Global, consideramos Costo de inversión fijo de **\$33.129.211 [USD]**

g.- Costo de operación

Para calcular el costo de operación de concentrado de molibdeno, se toma el costo unitario por libra \$2,2 [USD/lb]⁹, multiplicado por la producción proyectada de Molibdeno pagable según el plan minero en la Tabla 6-5.

⁹ Valor referencial histórico en Planta de concentrado de Molibdeno.
Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento
Universidad Técnica Federico Santa María

Plan de Producción	UOM	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Inputs											
Throughput	tm	34.049.390	34.361.082	34.361.082	34.723.817	37.907.485	38.156.370	38.156.370	38.156.370	38.156.370	38.156.370
Grade Mo	ppm	226,65	215,19	214,83	195,62	184,13	191,61	132,78	95,35	237,81	304,13
Recovery Mo	%	40	60	60	60	60	61,68	60,86	59,59	62,40	62,88
Mo Payable	%	95	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5
Mo grade in Concentrate	%	40	49,05	49,26	49,29	49,43	49,73	49,81	49,92	49,36	49,45
Run time	%	93,60%	94,30%	94,30%	94,40%	95,00%	95,00%	95,00%	95,00%	95,00%	95,00%

Outputs											
Mo Payable	tm	2932,51	4325,68	4318,32	3973,66	4083,18	4397,06	3006,38	2113,86	5520,25	7114,84

Período		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costo Inversión	\$ 33.129.211										
Costo Operación		\$14.226.057	\$ 20.984.544	\$20.948.871	\$19.276.831	\$19.808.167	\$ 21.330.821	\$14.584.418	\$10.254.651	\$26.779.613	\$34.515.235
Costo ineficiencia	\$ 81.325	\$ 119.961	\$ 119.757	\$ 110.199	\$ 113.236	\$ 121.941	\$ 83.374	\$ 58.622	\$ 153.090	\$ 197.312	
Co + Ci	\$ 33.129.211	\$14.307.382	\$ 21.104.505	\$21.068.628	\$19.387.030	\$19.921.403	\$ 21.452.761	\$14.667.792	\$10.313.273	\$26.932.703	\$34.712.546
Total, Actual	\$ 33.129.211	\$13.006.711	\$ 17.441.740	\$15.829.172	\$13.241.602	\$12.369.624	\$ 12.109.525	\$ 7.526.897	\$ 4.811.218	\$11.422.095	\$13.383.189

Costo Global	\$ 154.270.984
---------------------	----------------

Tabla 8-6 Plan de producción a 10 años y cálculo de Costo Global, Planta de Molibdeno; fuente propia

Paso 4: Evaluación y análisis de resultados

El resultado obtenido de disponibilidad del sistema (98,99%) habla de un sistema robusto en cuanto a continuidad operacional y cumpliría con lo prometido en el proyecto (disponibilidad esperada de 95% solo por Mantenimiento). Del mismo modo, el sistema de espesamiento también tiene una configuración lógica que otorga alta disponibilidad de operación, lo cual permitiría lograr el objetivo productivo. Además, el mismo espesador puede ser considerado un “buffer”, en caso de tener detenciones no programadas en la flotación selectiva, el filtrado y secado podrán seguir operando por algunas horas con el inventario en el espesador (cama) hasta la detección y solución de la falla.

El costo de ineficiencia depende directamente del valor comercial de la libra de molibdeno y está ajeno a una gestión propia de la organización, el cual, a mayor valor de mercado, el costo de ineficiencia también será mayor por lo que, de modo inverso, si el valor de mercado es muy bajo, el costo de ineficiencia también será bajo, pero puede llegar a ser poco atractivo producir este commodity por el menor retorno de la inversión. El costo de ineficiencia por indisponibilidad del sistema en estudio es despreciable (\$81.325 [USD/año]) en comparación a los costos operacionales, lo que indica que son las toneladas de concentrado de molibdeno fino las que conducen el éxito económico del negocio.

En relación con el costo de inversión, son valores reales utilizados con denominación Clase 4 (Variabilidad de +20% y -10%) y también considera un alto porcentaje de Contingencia (35% dada la variabilidad que pudiesen tener los datos), lo cual encarece el proyecto y da foco a poder gestionar de mejor manera los recursos. Es parte del proceso de ingeniería de un proyecto ir avanzando en selecciones y definiciones que puedan disminuir el porcentaje de variabilidad en el costo de inversión, dando así mayor certeza al momento de tomar la decisión de invertir.

Con los resultados obtenidos, considerando las horas de pérdida de producción por indisponibilidad como constante, pero generando el impacto según los valores proyectados año por año, obtenemos que el Costo Global del proyecto es de **\$154.270.984 [USD]**. Donde, contrastado con el plan de producción y tomando como valor constante el precio de la libra de concentrado de molibdeno fino, se proyecta un retorno de **\$457.467.907 [USD]**, lo que significa una rentabilidad del 196% acumulada a 10 años, siendo un atractivo para implementar el proyecto.

Incertidumbre de los resultados

Dada la naturaleza de los datos obtenidos de la planta de Molibdeno en estudio, se evidenció una alta variabilidad en los tiempos fuera de servicio, lo cual genera incertidumbre según el cálculo estadístico del intervalo de confianza, donde con 95% de confianza, se estima que la media se encuentra entre 2,64 y 8,35 hrs. lo que confirma la variabilidad y además, la presencia de “outliers” o valores muy extremos que inflan la variabilidad y, ensanchan el intervalo.

Para poder comparar, también se realizó el cálculo sin “outliers”, que fueron identificados por el método de Rango intercuartil y entrega un intervalo de confianza de 1,12 y 1,78 hrs al 95%. Lo que daría mayor precisión a los resultados obtenidos y mejoraría la calidad de la estimación.

Si bien existe una alta variabilidad de los datos, el resultado del cálculo del sistema no se ve afectado de manera significativa por su robustez y alta confiabilidad.

9. CONCLUSIONES

El análisis RAM como herramienta para confirmar que la disposición de equipos en el proyecto de la planta de molibdeno cumple su objetivo, entrega un valor de disponibilidad proyectado con valores reales y de estudio (para equipos nuevos) que se ajusta a lo requerido para cumplir con el plan de producción proyectado. El impacto de incorporar nuevas bombas de impulsión en el área de flotación (mayor capacidad de flujo) y además el Espesador de concentrado de molibdeno, permitiría lograr el objetivo propuesto por la compañía cumpliendo los estándares de diseño e ingeniería.

El uso de un diagrama RBD da claridad de cómo realizar el cálculo de indicadores de disponibilidad por sistemas y subsistemas, lo que también es útil para proponer diferentes disposiciones de equipos cuando sea requerido y también en búsqueda de tener flexibilidad operacional. Como oportunidad también se tiene que este análisis puede ser llevado a un nivel probabilístico realizando simulaciones y obtener casos optimistas/pesimistas para sensibilizar los resultados y posteriores tomas de decisiones.

Al realizar el estudio, también da la oportunidad de identificar equipos críticos del sistema, para así focalizar esfuerzos en mejorar su rendimiento, ya sea por aumentar el tiempo de operación, como también disminuir los tiempos de mantenimiento correctivo, agregando así valor al negocio. El cálculo de impacto y de indisponibilidad por equipo da el foco para generar mejoras específicas y llegar a niveles de excelencia operacional.

Por otro lado, el análisis da énfasis a generar mejoras en el proceso, por ejemplo, el porcentaje de recuperación de molibdeno es bastante menor a lo esperado por diseño (90% diseño vs 40% real). Evidenciando que no solamente es importante tener los equipos “disponibles” para operar, si no también es relevante tener un control del proceso y conocer

las variables que pudiesen afectar la producción. Esto ayuda además a tener una visión global del negocio.

La importancia del análisis RAM como input en un Análisis de Riesgos, donde si bien no fue parte del alcance de esta Tesina, se podría utilizar el valor de indisponibilidad del sistema para identificar el costo de pérdida del negocio global por cada posible causa existente y priorizar tareas de control/mitigación de riesgos. Junto con eso, el OPEX (Operative Expenditure) de Mantenimiento también se puede alimentar de este análisis en etapa de Definición de un proyecto y eventualmente sustentar un aumento en la dotación por necesidad de personal dadas las nuevas tareas de mantenimiento proyectadas. Por último, en la misma línea de OPEX, los repuestos que debiesen ser presupuestados de acuerdo con una posible estrategia de mantenimiento (por ejemplo: cambio cíclico de componentes de desgaste) de los equipos que nuevo proyecto.

En resumen, el objetivo general como los objetivos específicos propuestos en esta Tesina se cumplen con el uso de la herramienta de análisis RAM dando el foco de la gestión de activos, utilizando el diagrama de bloques RBD y obtener resultados para el análisis técnico económico para el proyecto, impacto de indisponibilidad y costo global de la inversión.

10. ANEXOS

ANEXO A: Planilla Excel con plan de producción Planta de Molibdeno



Plan de producción
Tesina MGA.xlsx

ANEXO B: Detalle de estudio de costos del proyecto

A- STUDY PHASE (SPS/DPS)														
STUDY PHASE SPS/DPS CLASS 2						TOTAL USD	% OF DIRECT	% OF TIC						
1	Engineering & Studies	38.536				4.588.801	34,62%	13,9%						
2	Management	15.525				2.243.162	16,92%	6,8%						
3	Escalation					204.959	1,55%	0,6%						
4	Contingency					903.999	6,82%	2,7%						
TOTAL STUDY PHASE						7.940.921	209,58%	23,97%						
B- EXECUTION PHASE														
CONSTRUCTION DIRECT COST						Mhours	Labor	Eq Usage	Material	Plant Eq	Others	TOTAL USD	% C.Direct	% OF TIC
A	Earthworks	848	16.383	27.131	31.632	-	-					75.146	2,0%	0,2%
C	Concrete	14.643	295.870	366.067	210.262	-	-					872.200	23,0%	2,6%
D	Structural Steel	6.069	130.756	109.245	203.401	-	-					443.403	11,7%	1,3%
M	Mechanical Bunks	3.820	85.655	68.754	109.841	-	-					264.250	7,0%	0,8%
N	Mechanical Equipment	15.813	341.433	284.631	-	2.077.405	-					626.063	16,5%	1,9%
P	Piping	17.604	378.384	316.873	353.390	-	-					1.048.647	27,7%	3,2%
T	Electrical Equipment	2.956	63.824	53.206	-	986.593	-					117.030	3,1%	0,4%
U	Raceway	2.949	63.234	53.075	32.318	-	-					148.627	3,9%	0,4%
W	Electrical Cable	1.916	41.079	34.480	48.416	-	-					123.975	3,3%	0,4%
X	Instrumentation and Control	1.610	34.773	28.988	5.932	236.920	-					69.693	1,8%	0,2%
TOTAL DIRECT COST						68.227	1.451.391	1.342.449	995.194	3.300.918	-	3.789.034	100,00%	11,44%
										Including Plant Equipment		7.089.952		
CONTRACTOR DISTRIBUTABLES (GG+Util)										MH Operators	Mhours	TOTAL USD	% C.Direct	% OF TIC
1	Movilización / Desmovilización	Mobilization/ Demobilization	7,0%								265.232	7,0%	0,8%	
2	Instalación de Faena	Temporary Facilities, Utilities, Travel	8,0%								303.123	8,0%	0,9%	
3.1	Supervisión en Terreno	Direct Supervision and Management	28,0%								1.060.930	28,0%	3,2%	
3.2	Personal Tecnico de Apoyo	Construction Support	26,5%								1.004.094	26,5%	3,0%	
4	Equipos Indirectos (Arriendos y Combustible)	Indirect Construction Equipment	12,0%								454.684	12,0%	1,4%	
5	Seguros, Garantías y Financiamiento	Insurance, Warranty and finance	3,0%								113.671	3,0%	0,3%	
6	Gastos Oficina Central	Operational Cost and logistics	6,0%								227.342	6,0%	0,7%	
7	Utilidades e Imprevistos	Fees and uncertainties	16,0%								606.245	16,0%	1,8%	
8	Covid - 19										-	0,0%	0,0%	
TOTAL CONTRACTOR DISTRIBUTABLES											4.035.321	106,5%	12,18%	
Other Directs										Mhours		TOTAL USD	% OF DIRECT	% OF TIC
	Pre-Commissioning	Pre-commissioning (not included in Direct)									42.912	0,32%	0,1%	
	Catering Construcción	Camp and Catering			15						1.023.401	7,72%	3,1%	
	Bonos MEL	Bonus									-	0,00%	0,0%	
	Vendor (Soporte Const)										360.921	2,72%	1,1%	
	Repuestos Suministros										346.030	2,61%	1,0%	
	Transporte, Fletes y Seguros (Suministro Dueño)										356.893	2,69%	1,1%	
TOTAL OTHER DIRECTS											2.130.156	16,07%	6,43%	
TOTAL DIRECT COST												13.255.429		
INDIRECT COST - Common Distributable										Mhours		TOTAL USD	% OF DIRECT	% OF TIC
61000	Instalaciones Temporales (HoP)	Temporary Construction Facilities and Utilities									218.715	1,65%	0,7%	
62000	Soporte Construcción	Construction Support (free issued by BHP)									318.130	2,40%	1,0%	
63000	Equipos de Construcción	Construction Equipment (free issued by BHP/ not included in Direct)									-	0,00%	0,0%	
64000	Pre comisionamiento	Pre-commissioning (free issued by BHP/ not included in Direct)									-	0,00%	0,0%	
65000	Transporte Personal BHP	Workforce transport (free issued by BHP)									-	0,00%	0,0%	
66000	Construcción Campamento	Project Accomodation (camp rental or construction)									-	0,00%	0,0%	
TOTAL INDIRECT COST - Common Distributable											536.845	4,05%	1,62%	
INDIRECT COST - Engineering and Project Managements										Mhours		TOTAL USD	% OF DIRECT	% OF TIC
71000	Ingenierías Residente	Engineering & Project Management - Project Office			5.001						550.100	4,15%	1,7%	
72000	Ingeniería Detalle (EP)	Engineering & Project Management - Home Office			5.272						579.925	4,38%	1,8%	
73000	Adm. de la Construcción (PMO)	Engineering & Project Management - Site Office			5.140						319.372	2,41%	1,0%	
74000	Overhead and Fee (EPC)	Overhead and Fee (if not included in hourly charge rates)			-						-	0,00%	0,0%	
75000	Adm. de la Construcción (ITO)	Engineering & Project Management - Site Office			11.856						530.607	4,00%	1,6%	
TOTAL INDIRECT COST - Engineering and Project Managements											1.980.004	14,94%	5,98%	
INDIRECT COST (OWNER)										Mhours		TOTAL USD	% OF DIRECT	% OF TIC
81000	Owners Management Team	Owners Management Team			6.923						589.277	4,45%	1,8%	
82000	Corporate Overheads	Corporate Overheads			-						-	0,00%	0,0%	
84000	Seguros, Garantías, Impuestos, Derivados	Legal, Insurances, Bonds, Fees and Financing Costs, Taxes, Duties, & Licenses			-						66.277	0,50%	0,2%	
87000	Comunidades, servidumbres.	Communities, Land & rights of Way			-						-	0,00%	0,0%	
88000	Comisionamiento / Puesta en Marcha	Commissioning			10.800						546.800	4,13%	1,7%	
89000	Operational Readiness	Pre-Production Costs			-						462.744	0,00%	1,4%	
TOTAL INDIRECT COST (OWNER)											1.665.098	9,07%	5,03%	
TOTAL INDIRECT COST												4.181.947		
SUBTOTAL												17.437.376	131,55%	52,63%
C- CONTINGENCY AND OTHER COST														
91000	Escalación						7%				1.220.616	9,21%	3,68%	
92000	Contingencia (Ejecución)						35,0%				6.530.297	49,27%	19,71%	
D- TOTAL ESTIMATE														
TOTAL EXECUTION												25.188.290	190,02%	131,53%
TOTAL INVESTMENT COST												33.129.211	249,93%	100,00%