



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE MÉTODOS DE INSPECCIÓN INTERNA EN CONCENTRADUCTOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JAVIER HERNÁN PINCHEIRA GUERRERO

PROFESOR GUÍA

MANUEL ALEJANDRO SOTO OLMEDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
SEBASTIÁN GOLDSCHMIDT PINO
GONZALO MONTES ATENAS

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil De Minas
POR: Javier Hernán Pincheira Guerrero
FECHA: 25/03/2019
PROFESOR GUÍA: Manuel Soto Olmedo

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE MÉTODOS DE INSPECCIÓN INTERNA DE CONCENTRADUCTOS

En la gran minería de cobre en Chile, en el año 2015 fueron procesadas 27.650 Mt de mineral de cobre sulfurado (Cochilco, 2016), el cual es tratado por las etapas de chancado, molienda, flotación y filtrado, con el objetivo de producir concentrado de cobre comercializable, el cual es luego transportado para ser fundido y refinado, permitiendo obtener como producto final cátodos de cobre.

El objetivo de esta investigación es evaluar de manera técnica y económica los sistemas de inspección de cañerías existentes, y recomendar un sistema que sea capaz de medir el estado de concentraductos con revestimiento interno de HDPE. Se evalúan los sistemas de acuerdo a capacidad de identificar fallas en HDPE; capacidad de identificar fallas en acero a través del HDPE; si es necesario ingresar el equipo al ducto; si su aplicación es segura; si se encuentra disponible en el mercado; y costo asociado a su uso.

Se realiza la evaluación en el marco de la correcta elaboración de los planes de gestión de integridad de cañerías, los cuales identifican las zonas de alta consecuencia y proponen los planes de mantenimiento e inspección. Considerando los avances en la tecnología de datos, tanto en la medición como en su procesamiento, se propone que el enfoque del mantenimiento debe apuntar a modelos predictivos de falla y al uso de *machine learning*.

Respecto a la evaluación, se concluye que el equipo de ultrasonido es la mejor opción para la inspección del revestimiento interno; y solo el equipo RFT permite la evaluación del acero a través del revestimiento interno. Desde el punto de vista económico se concluye que al utilizar el caso de Minas Rio (Anglo American Brasil), como referencia, se justifica la inspección de los concentraductos, tanto por el impacto de demandas asociadas al derrame de material, como por el costo de no poder producir.

Finalmente se recomienda, promover la correcta elaboración de los planes de gestión de integridad de cañerías y realizar inspecciones con los métodos seleccionados en zonas de alta consecuencia.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Manuel y Sebastián, con su apoyo y paciencia permitieron el correcto desarrollo de este trabajo. También me dieron la oportunidad -o el privilegio- de conocer, compartir y colaborar con excelentes personas.

Agradezco a mi familia por el apoyo incondicional, la paciencia y el cariño infinito; por enseñarme que nada es imposible y que los problemas se enfrentan con una sonrisa.

A los amigos y amigas de siempre, de antes, de ahora, les agradeceré siempre los gratos momentos.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Contexto	1
1.1.1	Producción de concentrado de cobre en Chile.....	1
1.1.2	Efectos de una falla en concentraductos.....	2
1.1.3	Mantenimiento de concentraductos.....	3
1.1.4	Planteamiento del problema y motivación.....	3
1.2	Objetivos generales	3
1.3	Objetivos específicos.....	3
1.4	Alcances	4
2	Antecedentes y marco teórico	4
2.1	Concentrado de cobre	4
2.1.1	Producción	4
2.1.2	Características del concentrado.....	5
2.1.3	Formas de transporte de concentrado de planta a puerto.....	6
2.2	Transporte de concentrado por cañerías.....	7
3	Gestión de integridad de concentraductos	7
3.1	Relación entre riesgo y gestión de integridad.....	8
3.1.1	Evaluación del riesgo	9
3.1.2	Importancia de la adquisición de datos	10
3.1.3	Enfoque del mantenimiento en cañerías.....	12
3.2	Tipos de falla en cañerías.....	13
3.2.1	Pérdida de metal	13
3.2.2	Fractura.....	14
3.2.3	Daño mecánico	15
3.2.4	Falla asociada a la deformación del revestimiento de polímero.....	15
4	Métodos de inspección interna de cañerías.....	17
4.1	Tecnologías utilizadas en inspección interna de cañerías.....	17
4.1.1	PIG Estándar.....	17
4.1.2	Magnetic Flux leakages (MFL).....	19
4.1.3	Herramientas de Ultrasonido - Ultrasonic Tools (UT).....	21
4.1.4	Electromagnetic Acoustic Transducers (EMAT).....	22
4.1.5	Testeo por Corrientes de Eddy - Eddy Currents Testing (ET).....	24
4.1.6	Exploración por tomografía computarizada - CT Scan.....	25
4.1.7	RFT (Remote Field Testing).....	26

4.1.8	Inspección óptica – Robótica	28
5	Evaluación.....	29
5.1	Consulta a proveedores.....	29
5.2	Perfil de solución	30
5.3	Criterios de evaluación	30
6	Evaluación económica	32
6.1	Antecedentes.....	32
6.2	Costos de inspección.....	34
6.2.1	Evaluación.....	35
7	Conclusiones y recomendaciones.....	36
8	Bibliografía	37
9	Anexos	39
9.1	Anexo A: Conceptos generales de la hidráulica de transporte de pulpas.....	39
9.1.2	Sistema de transporte de concentrado.....	41
9.1.3	Materiales utilizados.....	44
9.1.4	Variables de diseño.....	46

Índice de tablas

Tabla 1: Frecuencia de inspección obligatoria. (Fuente: (Singh, 2014))	7
Tabla 2: Ejemplo de información relevante para un programa de gestión de integridad (Fuente: (Singh, 2014))	11
Tabla 3: Parámetros operacionales y su relación con factores estructurales.....	16
Tabla 4: Características sistema MFL	19
Tabla 5: Características sistema UT	22
Tabla 6: Características sistema EMAT	23
Tabla 7: Características sistema ET.....	24
Tabla 9: Características sistema RFT	27
Tabla 8: Tabla resumen tecnología inspección óptica.....	28
Tabla 10: Resultados consulta proveedores	29
Tabla 11: Matriz comparativa de métodos y su uso en concentraductos.	31
Tabla 12: Cálculo de ingresos por venta concentrado	32
Tabla 13: Cálculo de Ingresos por venta por hora y día.....	32
Tabla 14: Estimación de costos asociados a una falla de concentraducto.....	33
Tabla 15: Costo inspección UT	34
Tabla 16: Costo inspección RFT	34
Tabla 17: Costo total Inspección interna	35
Tabla 18: Tabla comparativa de costos.....	35
Tabla 19: Resistencia de materiales utilizados como insertos. (Fuente: (Robert E. Klemm, 1999))	45
Tabla 20: Resumen características de cañerías. (Fuente: (Robert E. Klemm, 1999)) ...	46

Índice de figuras

Figura 1: Porcentaje movilizado de cobre según medio de transporte. (Fuente: Cochilco)	1
Figura 2: Impacto asociado a una falla.....	2
Figura 3: Esquema del proceso productivo de concentrado de cobre. (Fuente: Cochilco)	4
Figura 4: Sistemas de transporte de concentrado en seco. (Fuentes: Elandino.cl, soy-chile.cl)	6
Figura 5: Concentraducto de concentrado de hierro. (Fuente: Ausenco)	6
Figura 6: Esquema Gestión de integridad de cañerías. (Fuente: (DNV and W. Kent Muhlbauer, 2012))	9
Figura 7: Corrosión interna en cañerías. (Fuente: (Universidad de Santiago de Chile, s.f.))	13
Figura 8: Corrosión externa. (Fuente: Procainsa.com)	14
Figura 9: Defecto tipo Gouge. (Fuente: BST-TSB.gc.ca)	15
Figura 10: Ejemplos de falla de revestimiento.....	16
Figura 11: Ejemplo procedimiento de inspección interna de ductos.....	17
Figura 12: PIG Estándar. Fuente: (Tesoro Hawaii)	18
Figura 13: Pig Launcher/Receiver. (Fuente: Metroforensics)	18
Figura 14: Esquema sistema MFL. (Fuente: Baker Hughes)	19
Figura 15: Equipo MFL. (Fuente: Rosen-Group.com)	20
Figura 16: Funcionamiento herramientas de ultrasonido. (Fuente: Rosen-Group.com)	21
Figura 17: Equipos Ultrasonido. (Fuente: Dacon.com)	22
Figura 18: Comparación entre la tecnología de ultrasonido tradicional y EMAT. (Fuente: innerespec.com)	23
Figura 19: Equipo EMAT. (Fuente: Rosen-Group.com)	23
Figura 20: Funcionamiento sistema ET. (Fuente: Zener.in)	24
Figura 21: Equipo ET. (Fuente: IOPscience)	25
Figura 22: Perfil de densidades obtenido por equipo CT-Scan. (Fuente: Tracerco.com)	25
Figura 23: Equipo CT-Scan-Discovery. (Fuente: Tracerco.com)	26
Figura 24: Sistema RFT. (Fuente: Nusatek.com)	26
Figura 25: Equipo RFT. (Fuente: Aegion.com)	27
Figura 26: Robot de inspección. (Fuente: Pure Technologies.com)	28
Figura 27: Imagen derrame Minas Rio. (Mongabay.com)	33
Figura 28: Gráfico de la relación entre velocidad de transporte y distribución de partículas en flujo.....	40
Figura 29: Sistema genérico de transporte de pulpas. (Fuente: (Zunino, 2017))	41
Figura 30: Esquema de tanque mezclador de pulpa mineral (Fuente: galaxyprocess.in)	41
Figura 31: Esquema de bomba centrífuga (Fuente: oempanels.com)	42
Figura 32: Esquema bomba de diafragma. (Fuente: tacmina.com)	43
Figura 33: Estación disipadora. (Fuente: Mogas.com)	43
Figura 34: Anillo cerámico. (Fuente: (Espinoza, 2010))	44

1 Introducción

En el presente estudio se evalúa de manera técnica y económica los métodos de inspección de cañerías de concentrado con revestimiento interno de HDPE. A continuación, se presenta el contexto en que se desarrolla esta memoria, junto con la problemática que la justifica.

1.1 Contexto

1.1.1 Producción de concentrado de cobre en Chile

En la gran minería de cobre en Chile, en el año 2015 fueron procesadas 27.650 Mt de mineral de cobre sulfurado (Cochilco, 2016), el cual es tratado por las etapas de chancado, molienda, flotación y filtrado, con el objetivo de producir concentrado de cobre comercializable, el cual es luego transportado para ser fundido y refinado, permitiendo obtener como producto final cátodos de cobre.

Se estima que la producción de concentrado de cobre en Chile al año 2017 equivale a aproximadamente 2.900 kMT, valor cercano al 50 % del cobre producido en Chile, y un 15% de la producción del metal a nivel mundial (Cochilco, 2018).

Del total de concentrado de cobre transportado, un 50,8% se realiza por medio de concentraductos (Figura 1).

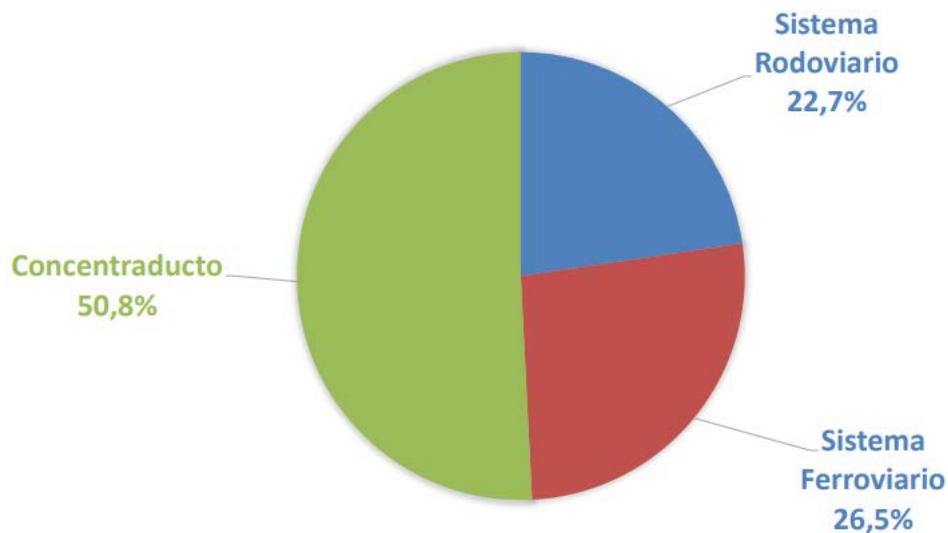


Figura 1: Porcentaje movilizado de cobre según medio de transporte. (Fuente: Cochilco)

En la actualidad, existen al menos 25 ductos mineros activos, de concentrado, mineral o relaves en Chile (Minería Chilena, 2014), los cuales se consideran fundamentales para el negocio minero.

1.1.2 Efectos de una falla en concentraductos

El principal riesgo en el uso de concentraductos es la fuga de material, el impacto de una falla de este tipo se observa en todos los actores relacionados a la minería (Stakeholders). Tal como se ve reflejado en las noticias asociadas a fugas. (CAP MINERIA, 2018) (Portal Minero, 2018).



Figura 2: Impacto asociado a una falla.

El costo asociado a una falla es directo e indirecto, el primero se relaciona a la reparación del ducto, donde se incluye el costo asociado a la pérdida de material, al personal necesario para la reparación, los insumos para la reparación y/o los repuestos; el costo indirecto se relaciona principalmente al efecto en la producción, ya que para realizar reparaciones es necesario interrumpir el transporte de la pulpa.

Además, es necesario mencionar el impacto sobre la relación con las comunidades, las cuales han demostrado ser un factor relevante en el negocio minero, afectando directamente la imagen pública de las mineras (licencia social), lo cual repercute en el valor de las acciones de las mineras.

Uno de los casos más relevantes del último tiempo asociado a una falla de mineroducto, corresponde a la falla del ducto de mineral de hierro de Minas-Rio (Brasil) de la minera Anglo American, el cual provocó pérdidas que se estiman entre 300 y 400 millones de dólares, junto con una baja en el valor de las acciones del 1,2% a la fecha de la falla. (Reuters, 2018).

1.1.3 Mantenimiento de concentraductos

El mantenimiento en concentraductos, se encuentra asociado a la llamada “Gestión de integridad de cañerías”, la cual consiste en estandarizar protocolos de diseño, mantenimiento e inspección, con tal de garantizar el buen estado de las cañerías y mitigar el riesgo asociado a las fugas.

Se identifica la existencia de planes de inspección de los concentraductos para verificar el estado de desgaste de los ductos, sin embargo, el enfoque de mantenimiento asociado a las fugas sigue siendo reactivo.

1.1.4 Planteamiento del problema y motivación

Considerando la relevancia de los ductos utilizados en minería, el efecto que una falla puede provocar, y el enfoque asociado al mantenimiento, se plantea el siguiente problema: ¿Cómo se puede determinar de manera confiable el estado de un concentraducto y con esto predecir una falla?

La búsqueda de la respuesta al problema planteado motiva el desarrollo de este estudio, en donde se comparan distintos métodos de inspección de cañerías y se recomienda la o las soluciones que permitan entregar la mejor información del estado de los ductos para su uso en la creación de modelos de mantenimiento predictivo.

1.2 Objetivos generales

Evaluar de manera técnica y económica los sistemas de inspección de cañerías existentes, y recomendar un sistema que sea capaz de medir el estado de concentraductos.

1.3 Objetivos específicos

- Evaluar sistemas de inspección interna según los siguientes parámetros:
 - capacidad de identificar fallas en HDPE;
 - capacidad de identificar fallas en acero a través del HDPE;
 - si es necesario ingresar el equipo al ducto;
 - si su implementación es segura;
 - si se encuentra disponible en el mercado; y
 - costo asociado a su uso.
- Comparar el costo de oportunidad, de no estar transportando concentrado, contra el costo asociado a la implementación de los sistemas a evaluar.
- Recomendar la aplicación de uno o un conjunto de los sistemas de acuerdo con el resultado de la evaluación.

1.4 Alcances

A continuación, se presentan los alcances de esta memoria.

- este estudio se limita a evaluar sistemas utilizados en la inspección de cañerías con revestimiento interno de HDPE;
- se considera solo la inspección interna de la cañería;
- no son considerados métodos de detección de derrames;
- serán evaluados de manera económica aquellos sistemas que presenten las mejores condiciones de factibilidad técnica; y
- la información de costos será recopilada a través de vendedores.

2 Antecedentes y marco teórico

En este capítulo se presenta la información existente relevante a este estudio.

2.1 Concentrado de cobre

2.1.1 Producción

A continuación, se muestran los procesos asociados a la producción de pulpas de concentrados de cobre y su transporte (Figura 3).

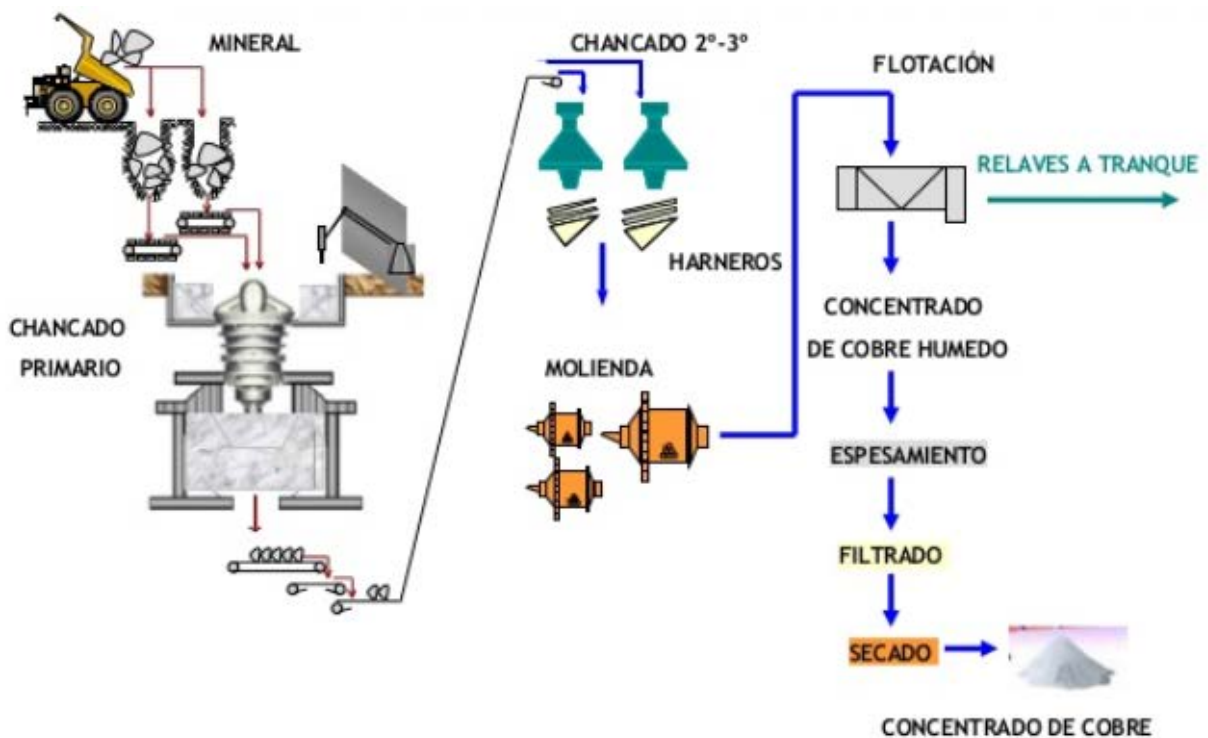


Figura 3: Esquema del proceso productivo de concentrado de cobre. (Fuente: Cochilco)

2.1.1.1 Chancado

En este proceso, rocas de aproximadamente un metro de diámetro, -provenientes de la etapa de tronadura- son reducidas de tamaño; el chancado puede realizarse en una etapa para alimentar un molino semi-autógeno, o en tres etapas (chancado primario, secundario y terciario). El producto final corresponde a rocas de media pulgada de diámetro.

2.1.1.2 Molienda

Esta etapa busca reducir de tamaño el material de la etapa anterior; esto se logra al utilizar etapas consecutivas de molienda, habitualmente se inicia con molinos semi-autógenos o de barras y se termina el proceso con molinos de bolas, los cuales entregan como producto un material de tamaño entre 40 μm y 100 μm .

2.1.1.3 Concentración

En la producción del cobre, una de las formas de concentrar el mineral se realiza por medio de flotación, este proceso se inicia con la hidrofobización del material particulado rico en cobre, logrando que, al agregar burbujas al sistema, los sólidos se adhieran a estas llegando a la superficie de las celdas de flotación. La espuma generada en el proceso descrito anteriormente es recolectada por rebalse, este producto corresponde al concentrado de cobre.

2.1.1.4 Espesamiento

Luego de la etapa de concentración, se busca reducir la cantidad de agua en el concentrado, este proceso es realizado por espesadores, los cuales entregan como producto, agua clara, la cual es recirculada y reutilizada en los procesos; y la pulpa de concentrado, la cual tiene una concentración en peso de sólidos entre 45-65%.

2.1.2 Características del concentrado

Se presenta como ejemplo las características de la pulpa de concentrado de cobre producida por una empresa de la gran minería que opera en el norte de Chile:

- Concentración de sólidos en peso entre 45% y 65%.
- Granulometría: 100% bajo (150 μm), y 80% bajo (53 μm).
- Gravedad específica de sólidos: 4,48.
- Velocidad de depósito: 1,25 m/s.
- Velocidad Transición: 1,01 m/s.
- Ley de cobre: 28 - 35 % Cu.

La composición mineralógica depende de la mina donde se produzca el concentrado. En Chile debido a los tipos de yacimientos presentes, el concentrado está asociado principalmente a sulfuros primarios de cobre como Calcopirita y Bornita. (Cochilco, 2018).

2.1.3 Formas de transporte de concentrado de planta a puerto

El material concentrado puede ser transportado seco (porcentaje de humedad entre 9 y 13%), y en pulpa (concentración de sólidos en peso entre 45% y 65%). El transporte en seco se puede realizar a través de camiones, o ferrocarril, el transporte en pulpa se realiza por medio de cañerías.



Figura 4: Sistemas de transporte de concentrado en seco. (Fuentes: Elandino.cl, soy-chile.cl)



Figura 5: Concentraducto de concentrado de hierro. (Fuente: Ausenco)

2.2 Transporte de concentrado por cañerías

De acuerdo con (Besio, 2014) las principales ventajas de esta forma de transporte son su eficiencia, bajos requerimientos energéticos, bajo impacto ambiental y la capacidad de transportar material de forma continua.

Las condiciones necesarias para poder transportar un sólido como pulpa son las siguientes (Cerde, 2007) :

- El sólido no debe reaccionar químicamente ni con la fase líquida, ni con la tubería.
- No debe existir problemas de aglomeración y posterior obstrucción de la tubería.
- Las partículas de mineral deben poder mezclarse y separarse de la fase líquida.
- El desgaste y ruptura de las partículas producto de su transporte hidráulico no debe afectar las etapas posteriores.

La infraestructura necesaria para al transporte de pulpa se presenta en Anexo A.

3 Gestión de integridad de concentraductos

La gestión de integridad de cañerías busca tener un estándar de diseño, operación y mantenimiento de cañerías, se consideran además como objetivos principales de la gestión, la seguridad del activo, producción continua y eficiente, la utilización correcta de recursos humanos y la mejora en la vida útil y disponibilidad del activo (Iqbal, Tesfamariam, Haider, & Sadiq, 2016).

En este capítulo, se presenta lo expuesto por (Singh, 2014). La gestión de riesgos ha sido adoptada, tanto por la industria de cañerías como por las agencias reguladoras como una forma de mejorar la seguridad pública, además de optimizar todos los aspectos del diseño, operación y mantenimiento de los ductos. El objetivo del control de riesgos es establecer un programa que siga las mejores prácticas de la industria. Entrega al dueño y al operador de la cañería una herramienta de toma de decisiones a largo plazo, junto con entregar seguridad a la comunidad respecto al estado de los ductos que puedan encontrarse en las cercanías.

Como referencia la siguiente tabla muestra la frecuencia de inspección obligatoria de cañerías de petróleo y gas según la norma (ASME B31.8S)

Tabla 1: Frecuencia de inspección obligatoria. (Fuente: (Singh, 2014))

<i>Cañería operando sobre un porcentaje de Límite elástico máximo especificado (SMYS)</i>	<i>Primera inspección luego de la construcción (Años)</i>
<i>Sobre 60</i>	10
<i>Sobre 50, pero menos de 60</i>	13
<i>Sobre 30, pero menos de 50</i>	15
<i>Bajo 30</i>	20

A continuación, se presentan algunos conceptos relevantes en la gestión de riesgos en cañerías.

Riesgo

La definición más común de riesgo es la relación entre la probabilidad de un incidente de ocurrir y la consecuencia de que ocurra. Lo cual puede ser escrito como:

$$R = P \times C$$

Donde R = Riesgo, P = Probabilidad, y C = Consecuencia.

Tal como se observa en la ecuación presentada, se puede notar que solo hay dos componentes en el riesgo y, por lo tanto, eliminando una, se elimina el riesgo; en consecuencia, el objetivo principal de la gestión de riesgos es eliminar o contener el riesgo.

Falla

Se considera que una cañería falla si existe una pérdida no intencional del producto de una cañería, pérdida de integridad de esta, o cuando no funciona como debería.

Probabilidad

Indica con que seguridad existirá una falla, por ejemplo, incluye el nivel de certeza con que puede ocurrir un evento basado en la revisión de riesgos.

Consecuencia

Corresponde al resultado de una falla.

Área de alta consecuencia o HCA (High Consequence Area)

Se definen como Áreas de Alta Consecuencia aquellas zonas en donde el riesgo asociado a la falla de un ducto es mayor debido a la consecuencia, ya sea por la cercanía de la cañería a una zona poblada, a fuentes de agua como ríos o mares, a zonas de rica flora y fauna, o zonas protegidas.

3.1 Relación entre riesgo y gestión de integridad

El concepto de gestión de integridad está basado en el control y eliminación del riesgo, evaluando la probabilidad de falla. Tal como se mencionó anteriormente, la probabilidad de falla y su consecuencia establecen el nivel de riesgo. En otras palabras, la gestión de integridad es una forma de enfrentar la probabilidad de una falla que pueda generar daño a un área de alta consecuencia. Cualquier condición que genere una amenaza a la integridad de una cañería, aumenta la probabilidad de falla y por lo tanto es un riesgo.

Una falla en una zona de alta consecuencia es probable que cause más daño a la vida y la propiedad; por lo tanto, su consecuencia es mayor y por consiguiente presenta mayor riesgo. Considerando lo anterior, se le otorga mayor prioridad en la gestión de integridad a la correcta identificación de las HCA's.

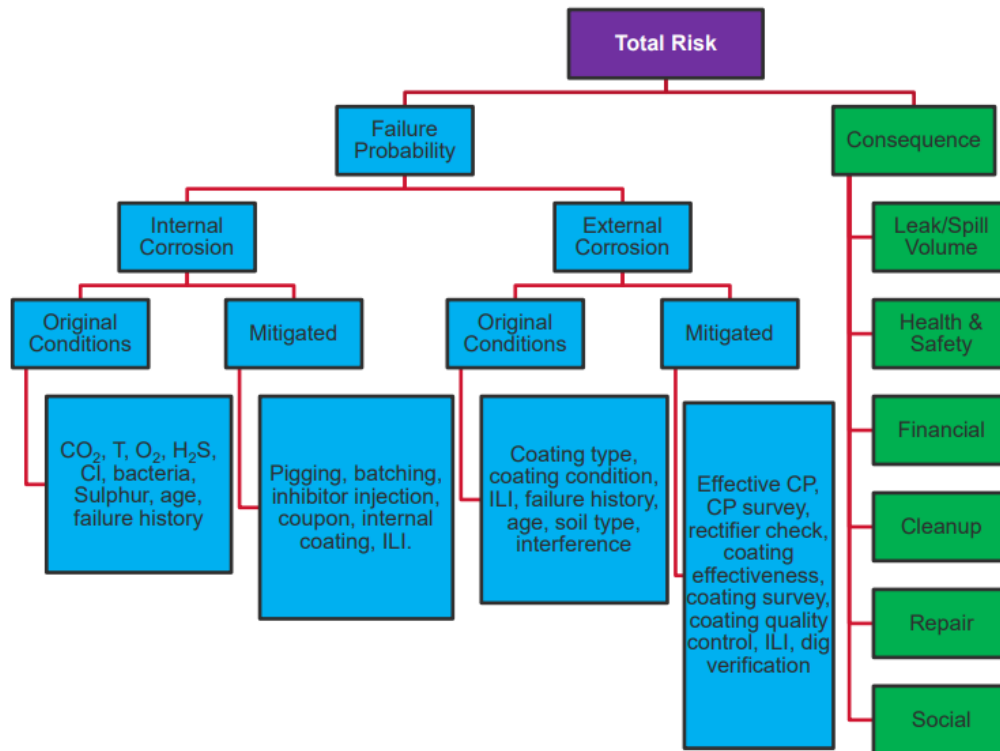


Figura 6: Esquema Gestión de integridad de cañerías. (Fuente: (DNV and W. Kent Muhlbauer, 2012))

3.1.1 Evaluación del riesgo

Existen distintas visiones respecto a la evaluación del riesgo, en este estudio se considera más acertado el programa basado en rendimiento, el cual apunta a los siguientes objetivos:

- 1) Organiza la información y prioriza un plan de acción.
- 2) Decide cuando efectuar inspecciones y que métodos utilizar, además de planes de prevención o mitigación.

Es importante identificar los límites y posibilidades de cualquier proceso de evaluación de riesgos. La mayoría de los accidentes de cañerías corresponden al resultado de distintos problemas en los sistemas de la operación; la evaluación del riesgo busca que exista el correcto monitoreo del sistema.

En el mejor de los casos, una correcta metodología de evaluación de riesgos presenta una manera indirecta de predecir una probabilidad de falla, sin embargo, está sujeta a la calidad de los datos ingresados al modelo predictivo.

3.1.2 Importancia de la adquisición de datos

Para un programa exitoso de evaluación de riesgos y gestión de integridad, la calidad de los datos recolectados es fundamental.

Los datos cruciales para un programa de gestión de integridad son:

- Información de la ubicación.
- Información operacional.
- Reportes del diseño original.
- Información de inspecciones previas (Pigging).
- Datos del programa químico.

Se consideran cuatro pilares en un correcto programa de integridad:

1. Identificación de riesgos.
2. Recolección de datos.
3. Análisis detallado.
4. La consecuencia de una falla.

El plan debe ser capaz de priorizar la información recolectada para análisis posteriores y se debe recolectar información para cada amenaza identificada.

En Tabla 2, se presenta un ejemplo de la información relevante para un correcto programa de gestión de integridad.

Tabla 2: Ejemplo de información relevante para un programa de gestión de integridad (Fuente: (Singh, 2014))

Información de diseño	Datos operacionales	Datos de inspección	Datos de construcción
➤ Espesor de paredes de diseño	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad del fluido 	➤ Test de presión	➤ Año de instalación
➤ Diámetro	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal 	➤ Inspección interna (II)	➤ Métodos de unión
➤ Sistema de unión	<ul style="list-style-type: none"> • MAOP 	➤ Inspección geométrica	➤ Detalles de soldadura e inspección
➤ Fabricante	<ul style="list-style-type: none"> • Historial de fallas 	➤ Inspección bell hole	➤ Profundidad
➤ Fecha de fabricación	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de revestimiento y condición 	➤ Inspección de protección catódica	➤ Tipos de cruces
➤ Calidad del material/propiedades	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de protección catódica 	➤ Condición del revestimiento	➤ Test de presión
➤ Propiedades del equipamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de las paredes de la cañería 	➤ Auditoria y revisión	➤ Tipo de revestimiento y método de aplicación
	<ul style="list-style-type: none"> • Reportes de inspección 		➤ Reportes de reología
	<ul style="list-style-type: none"> • Reportes de corrosión interna y externa 		➤ Instalación de sistema de protección catódica
	<ul style="list-style-type: none"> • Subidas de presión 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Invasiones 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Reparaciones pasadas 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Vandalismo 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerzas externas 		

3.1.3 Enfoque del mantenimiento en cañerías

Respecto al mantenimiento de cañerías, los estándares se iniciaron con la industria de gas y petróleo, donde existe transporte de un producto de alto valor, por largas distancias, y muchas veces de manera submarina, por lo que los riesgos e impactos asociados a una fuga son considerables.

Estos estándares de mantenimiento fueron adaptados a cañerías de pulpa, donde la principal diferencia es el efecto abrasivo de los sólidos transportados, por lo que es factible utilizar los mismos conceptos asociados; a continuación se muestra lo presentado por (Iqbal, Tesfamariam, Haider, & Sadiq, 2016), quienes desarrollaron un estado del arte del mantenimiento de cañerías de gas y petróleo.

Para tomar decisiones efectivas respecto al mantenimiento de cañerías, es necesario considerar dos factores fundamentales, la evaluación de la condición y la probabilidad de falla. Según sus objetivos, es posible clasificar 3 tipos de mantenimiento: Correctivo, Preventivo y Predictivo.

Mantenimiento correctivo

También conocido como mantenimiento reactivo, es un tipo de mantenimiento que se basa en reparar las averías a medida que van ocurriendo. No requiere ninguna planificación, su principal desventaja y la razón por la que se debe evitar es que en la mayoría de los casos es necesario interrumpir la producción, limitando la capacidad de cumplir planes y compromisos. (Lean Manufacturing 10 , s.f.)

Mantenimiento preventivo

Su objetivo es seguir consiguiendo las mismas prestaciones de los equipos y máquinas y compensar el desgaste que van sufriendo con el paso del tiempo. Este mantenimiento se realiza siempre antes de que ocurra una avería, tiene carácter sistemático, es decir, se realiza cada cierto tiempo establecido, (Lean Manufacturing 10 , s.f.) normalmente se seleccionan periodos de tiempo con menor carga de trabajo, en el caso de la minería se utiliza la parada de planta general para la mantención.

Mantenimiento predictivo

Se basa en el uso de la relación de variables físicas o químicas con el estado que se encuentra la máquina (Lean Manufacturing 10 , s.f.), es por lo anterior que la base del mantenimiento predictivo es conocer el estado de los equipos (inspección), y las características del sistema en línea (variables de estado).

El mantenimiento predictivo, requiere de modelos probabilísticos de falla, se identifica un modelo presentado por (Parvizedghy & Zayed, 2014); este modelo está enfocado en cañerías de petróleo y gas, sin embargo, se menciona en este estudio debido a la metodología utilizada respecto a la identificación de variables relevantes, además del completo desarrollo del modelo. Los modelos de fallas probabilísticos permiten predecir fallas que sean dependientes del tiempo, es decir, que tienen asociado un desgaste por uso o, un desgaste natural como la corrosión externa.

Es necesario mencionar el trabajo realizado por (An, Choi, & H. Kim, 2011), en donde se utiliza una combinación de propiedades físicas e información de equipos de inspección para crear un modelo de propagación de fracturas.

Los trabajos anteriores son mencionados ya que representan la factibilidad técnica y teórica de desarrollar modelos predictivos de falla en cañerías, además, ambos trabajos muestran lo fundamental de la correcta adquisición de datos.

3.2 Tipos de falla en cañerías

En el contexto de los tipos de falla en cañerías es necesario identificar las fuentes de desgaste que producen dichas fallas, a continuación, se presenta lo desarrollado en (Xie & Tian, 2018).

3.2.1 Pérdida de metal

La pérdida de metal se considera la mayor amenaza en el uso de cañerías, la pérdida de metal puede llevar a la fractura o el colapso del ducto, esta se debe principalmente a corrosión o erosión.

Corrosión interna

La corrosión se produce por la inestabilidad termodinámica presente en la materia de los metales, los cuales tienden a formar óxidos liberando parte del metal de la cañería, y por lo tanto se adelgazan las paredes del ducto.

La corrosión interna se produce por el transporte de electrones entre el fluido transportado (agua y oxígeno) y la cañería.



Figura 7: Corrosión interna en cañerías. (Fuente: (Universidad de Santiago de Chile, s.f.))

Corrosión externa

La corrosión externa es un proceso natural que ocurre cuando el acero de la cañería interactúa con suelo y agua.



Figura 8: Corrosión externa. (Fuente: Procainsa.com)

Erosión

El efecto de la erosión en cañerías de transporte de pulpas se desarrolla en (LP, 2016), se aborda el efecto de las partículas sólidas sobre el revestimiento de polímero. Existen algunas correlaciones generales entre las propiedades de la pulpa y el incremento o disminución del desgaste mecánico sobre la cañería. Primero, la tasa de desgaste aumenta a medida que la dureza de las partículas aumenta. Segundo, mientras más grandes sean las partículas de los sólidos, hay mayor desgaste y viceversa. Tercero, partículas redondeadas producen menos desgaste que las partículas angulosas.

3.2.2 Fractura

Existen principalmente dos fuentes de falla por fractura, la primera se produce por fatiga y la segunda se produce por la debilidad de las paredes por corrosión o erosión. La propagación de falla por fatiga se define como el proceso de desgaste por la variación de presión o el efecto de las vibraciones sobre las uniones del ducto.

Es posible separar el desarrollo de una fractura en tres etapas, la primera es el inicio de la fractura, donde la tasa de crecimiento es baja y es altamente dependiente del efecto medioambiental, la segunda etapa es el crecimiento estable de la fractura y presenta una alta dependencia temporal. La tercera etapa es considerada la etapa de falla, tiene un crecimiento inestable y no es factible de predecir; por lo anterior el enfoque de los modelos predictivos de este tipo de falla se concentra en las primeras 2 etapas.

De acuerdo con (Barrera, 2013), existe falla por fatiga en concentraductos cuando el espesor de la cañería utilizada no se encuentra en el estándar de fabricación de ductos de pulpas (ASME 31.11S), los peak de presión producen deformaciones excesivas en las uniones cañería/flange, la dificultad que existe con este tipo de falla, es que no presenta un desgaste predecible en el tiempo.

Existen variados modelos de predicción de falla por erosión, sin embargo, es necesario hacer notar que, a la fecha de este estudio, no se identifica un modelo específico para fallas en cañerías de doble pared de transporte de pulpa de cobre.

3.2.3 Daño mecánico

Existen dos tipos de daño mecánico en cañerías, abolladuras (dents) y rayaduras (gouge), estos se producen por daño externo debido principalmente a excavaciones (en que no se conoce la posición de la cañería).

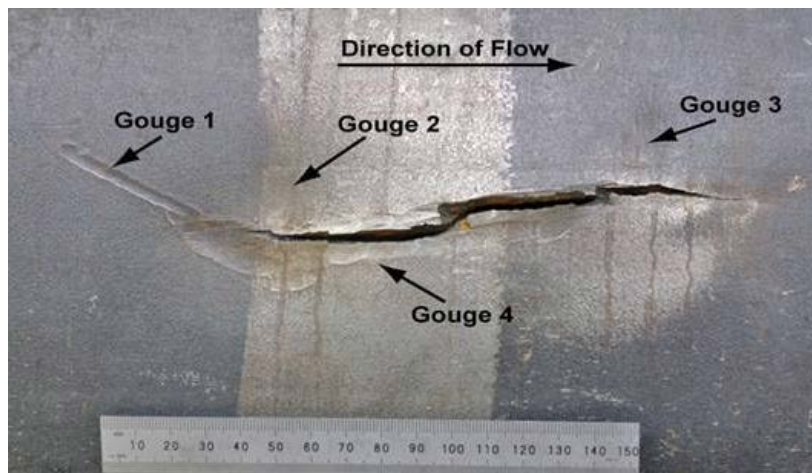


Figura 9: Defecto tipo Gouge. (Fuente: BST-TSB.gc.ca)

3.2.4 Falla asociada a la deformación del revestimiento de polímero

En Figura 8, se muestran ejemplos de falla del revestimiento de cañerías (Canada's Oil & Natural Gas Producers , 2017), principalmente el modo de falla corresponde a una deformación producto del aumento de presión en la zona entre la cañería y el revestimiento.



Figura 10: Ejemplos de falla de revestimiento.

La tabla siguiente presenta factores que influyen de la posible falla en una cañería, incluye la dependencia de la operación, la fabricación y la instalación de los ductos (Abulnaga, 2002).

Tabla 3: Parámetros operacionales y su relación con factores estructurales

Parameter		Structural Integrity Issues
Working Stress	MAOP	Maximum allowable internal operating pressure (MAOP)
	Temperature	Thermal stress load
	Stress	Membrane (i.e. in-plane) stress due to internal and external pressure
Strain Limit State	Rupture	Membrane tensile strain limit due to primary and secondary loads
	Combined Strain	Membrane strain due to combined differential displacements and/or rotations
Stress Limit State	Burst (Yield)	Maximum internal pressure limit
	Combined Stress	Membrane stress due to differential loads, pressure distributions or moment couples
Stability	Buckling	Loss of global or local structural stability due to bending moment, internal or external pressure, excess temperature differential
	Ovalization	Local sectional collapse due to effects such as overburden pressure, or interaction between carrier and outer pipe
Integrity	Weld CTOD	Interaction of weld defects with tensile strain and accumulated plastic strain

Los modelos predictivos basados en propiedades físicas pueden no servir en todas las situaciones, debido a la dificultad de obtener los parámetros necesarios para crear el modelo. Para obtener los datos del estado de los ductos se utilizan métodos de inspección interna (ILI), sin embargo, son caros de utilizar y muchas veces no proveen la cantidad de información necesaria para crear un modelo basado en datos. (Abulnaga, 2002).

4 Métodos de inspección interna de cañerías

En este capítulo se desarrolla la revisión de los equipos utilizados en la inspección interna en cañerías; se presenta la revisión del estado del arte de la tecnología de inspección existente de acuerdo con (Xie & Tian, 2018).

Las características presentadas se enfocan en la información que cada tecnología es capaz de recolectar, la distancia que es capaz de recorrer el equipo y la factibilidad técnica de su utilización.

4.1 Tecnologías utilizadas en inspección interna de cañerías

En general los sistemas de inspección interna de cañerías requieren algún tipo de limpieza previa del ducto, por lo que se utilizan PIG's estándar -los cuales no tienen tecnología adicional de inspección-. A continuación, se presenta un procedimiento de inspección.

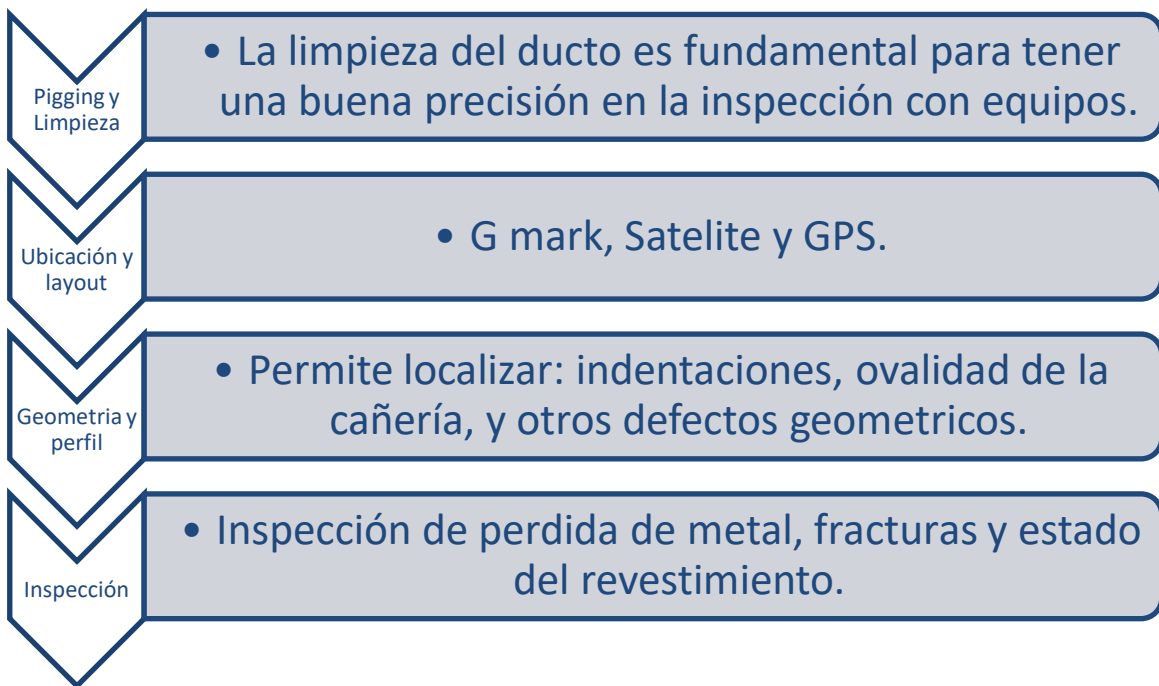


Figura 11: Ejemplo procedimiento de inspección interna de ductos.

4.1.1 PIG Estándar

Los PIG's (Pipeline Inspection Gauge) son dispositivos que se introducen en las cañerías con distintos objetivos, habitualmente son impulsados por agua o arrastrados por cable. Los PIG estándar, son un conjunto de PIG's los cuales no presentan sensores o tecnología adicional de inspección, se ingresan en los ductos de manera secuencial con los siguientes objetivos: determinar si las dimensiones del ducto son adecuadas, determinar si existe algún posible problema de estancamiento, realizar limpieza del ducto con escobillas metálicas y recuperar posibles fragmentos metálicos con imanes de gran tamaño.



Figura 12: PIG Estándar. Fuente: (Tesoro Hawai)

Sistema de ingreso de PIG's

El ingreso de PIG's o sistemas de inspección interna de cañerías se realiza por infraestructura propia de los sistemas de cañerías diseñados específicamente para este propósito, llamados "Pig Launcher" y "Pig Receiver".



Figura 13: Pig Launcher/Receiver. (Fuente: Metroforensics)

El sistema de lanzamiento y recepción de los PIG, crea un "bypass" al flujo habitual de producción, permite el ingreso y el transporte del equipo de inspección; al final del recorrido del equipo de inspección se retira el equipo utilizando el PIG Receiver.

En caso en que no exista la infraestructura necesaria, existe la posibilidad de acoplar un ingreso de PIG provisorio, sin embargo, este sistema aumenta considerablemente la complejidad y los costos del proyecto de inspección.

4.1.2 Magnetic Flux leakages (MFL)

Las herramientas más usadas en inspección interna de cañerías utilizan esta tecnología. El uso de MFL permite detectar distintos defectos, como pérdidas de material y daño mecánico, además, es ampliamente utilizado en los programas de integridad de cañerías.

Estas herramientas permiten detectar fallas en cañerías identificando modificaciones en un campo magnético artificial saturado, el cual es generado por imanes de gran tamaño (Song, 2018).

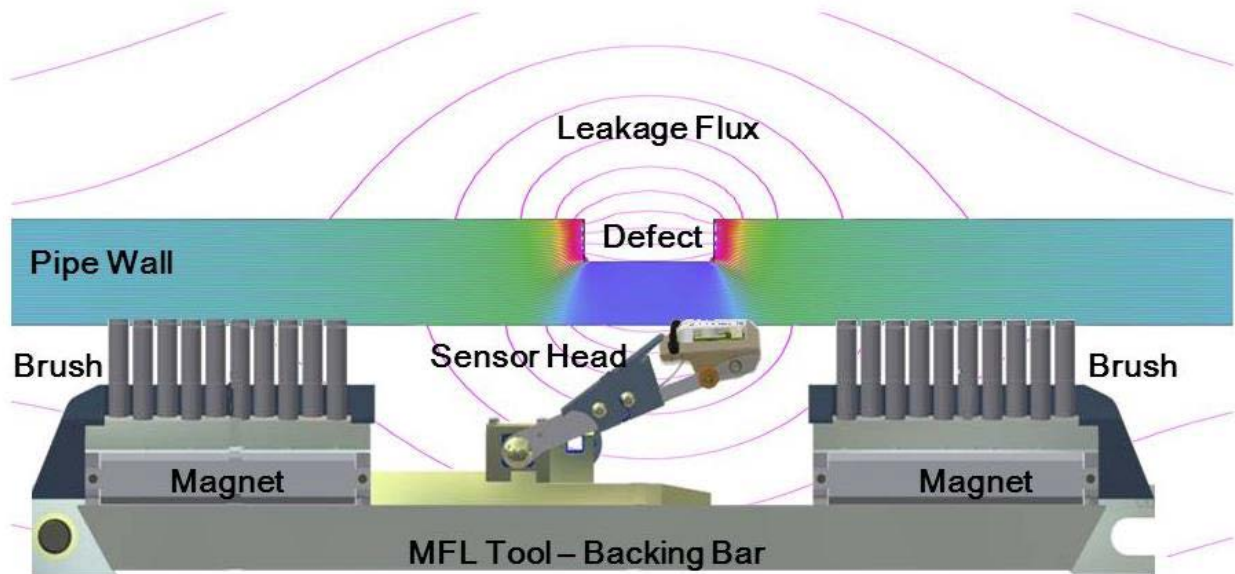


Figura 14: Esquema sistema MFL. (Fuente: Baker Hughes)

El desarrollo de esta técnica a llevado a la creación de modelos de detección de fallas avanzados, utilizando redes neuronales para analizar la señal producida por los imanes (Carvalho et al., 2013). Los defectos principales de esta técnica son la posible magnetización permanente de la cañería, limitando su uso en transporte de sustancias susceptibles a magnetismo y su uso no es factible cuando existe revestimiento interno, ya que no es posible magnetizar la cañería.

Tabla 4: Características sistema MFL

<i>Criterio</i>	<i>Característica</i>
<i>Tipo de Cañería capaz de inspeccionar</i>	Solo Ferromagnéticas
<i>Presión máxima</i>	Hasta 230 bar
<i>Velocidad de inspección</i>	2 m/s
<i>Largo máximo de Inspección</i>	500 km
<i>Principal desventaja en el uso de concentraductos</i>	No permite la inspección de la cañería a través del revestimiento de HDPE



Figura 15: Equipo MFL. (Fuente: Rosen-Group.com)

4.1.3 Herramientas de Ultrasonido - Ultrasonic Tools (UT)

Hasta el momento se considera el ultrasonido como la técnica más confiable para la inspección interna de cañerías (proveedores). La inspección ultrasónica genera pulsos de alta frecuencia y una corta longitud de onda para detectar defectos en las cañerías o medir el espesor de esta. Este sistema tiene mejores resultados que la técnica MFL, según la resolución y la calidad de los datos obtenidos.

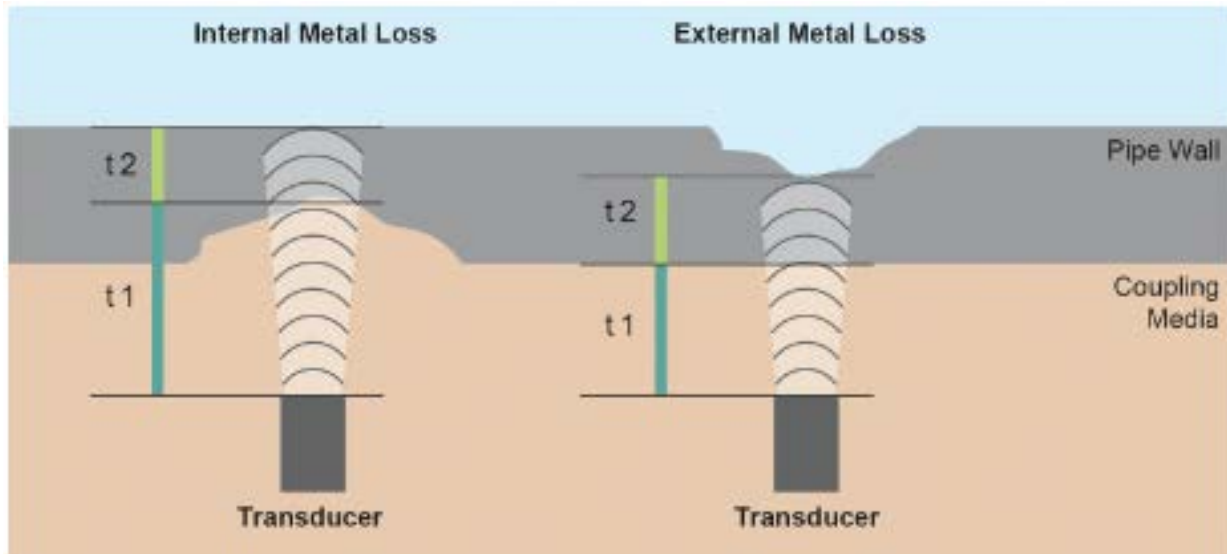


Figura 16: Funcionamiento herramientas de ultrasonido. (Fuente: Rosen-Group.com)

Las herramientas de ultrasonido pueden detectar pérdidas de metal interna o externa, fracturas, variaciones en espesores de cañerías, etc.

Permite detectar defectos producidos por corrosión desde 0,3 mm a 0,6 mm, respecto a la resolución longitudinal y circunferencial se encuentra entre 3 mm y 8 mm respectivamente. El nivel de confianza de la medición está en el 95%, respecto al correcto posicionamiento de la falla y su dimensión.

Su principal desventaja es la necesidad de utilizar un líquido para acoplar la herramienta con la pared de la cañería, además, no permite la evaluación de la parte metálica en cañerías de doble pared con revestimiento interno como las utilizadas en concentraductos de pulpa de concentrado de cobre.

El sistema de pigging por ultrasonido, tiene las siguientes características.

Tabla 5: Características sistema UT

<i>Criterio</i>	<i>Característica</i>
<i>Tipo de Cañería capaz de inspeccionar</i>	Se puede utilizar en todos los materiales
<i>Presión máxima</i>	Hasta 50 bar
<i>Velocidad de inspección</i>	0,5 - 10 m/min
<i>Largo de Inspección</i>	50 km
<i>Principal desventaja en el uso de concentraductos</i>	No permite la inspección del acero de la cañería a través del revestimiento del HDPE



Figura 17: Equipos Ultrasonido. (Fuente: Dacon.com)

4.1.4 Electromagnetic Acoustic Transducers (EMAT)

Este tipo de tecnología consiste en una bobina en la pared interna de la cañería, esta genera ondas de ultrasonido a través de las fuerzas de Lorentz, sin la necesidad del líquido para acoplar utilizado en UT, al utilizar ultrasonido como propiedad física, permite detectar el mismo tipo de fallas que la tecnología de ultrasonido tradicional, sin embargo, necesita ubicarse a menos de 1 mm a la pared de la cañería, detecta con una menor resolución que el UT tradicional y no permite la inspección de materiales no metálicos.

La Figura 17, muestra la comparación entre la tecnología de ultrasonido tradicional y la tecnología EMAT, su principal ventaja es que no requiere material de acople.

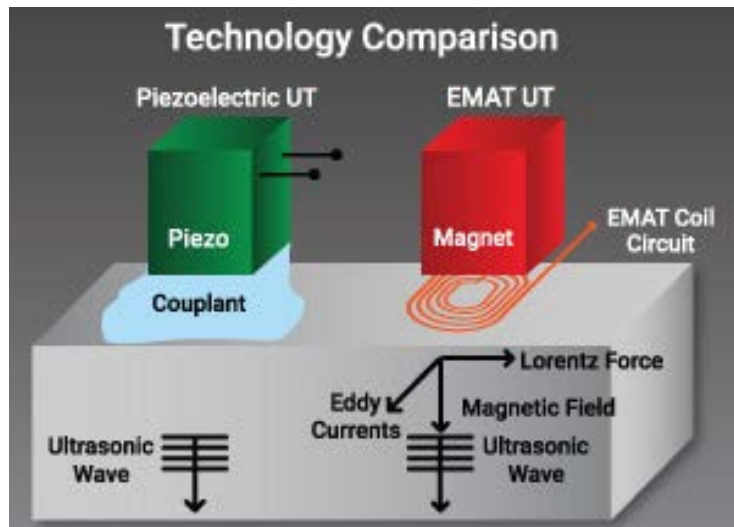


Figura 18: Comparación entre la tecnología de ultrasonido tradicional y EMAT. (Fuente: innerespec.com)

Tabla 6: Características sistema EMAT

Criterio	Característica
Tipo de Cañería capaz de inspeccionar	Solo metálicas
Presión máxima	Hasta 100 bar
Velocidad de inspección	0,5 m/s
Largo de Inspección	40 km
Principal desventaja en el uso de concentraductos	No permite la inspección de la cañería a través del revestimiento de HDPE



Figura 19: Equipo EMAT. (Fuente: Rosen-Group.com)

4.1.5 Testeo por Corrientes de Eddy - Eddy Currents Testing (ET)

El testeo por corrientes de Eddy es ampliamente utilizado en la industria del automóvil, aeroespacial y de manufactura. Cuando una bobina energizada es llevada cerca de la superficie metálica de la cañería, las corrientes de Eddy responden a las deformaciones de la cañería, y con esto también reacciona la impedancia sobre la cañería y por lo tanto es posible medir los cambios físicos producidos por una falla.

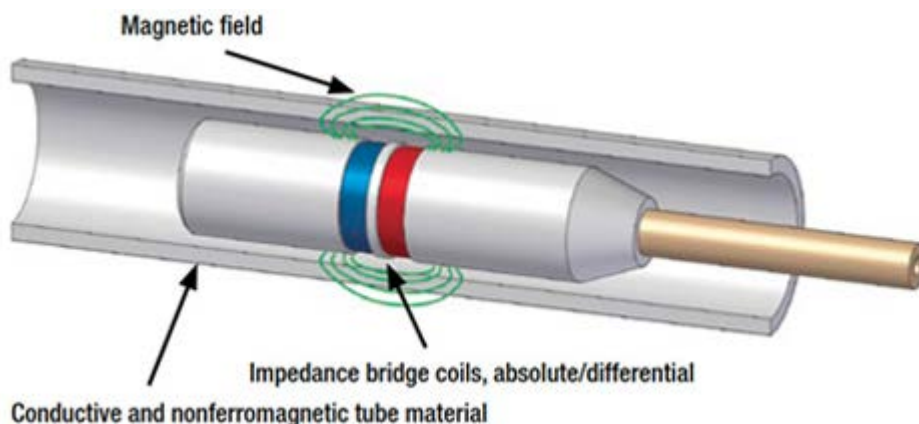


Figura 20: Funcionamiento sistema ET. (Fuente:Zener.in)

No genera el magnetismo residual de la tecnología MFL, sin embargo, tiene respuesta más lenta respecto a las velocidades de inspección de los métodos tradicionales en cañerías metálicas.

Tabla 7: Características sistema ET

<i>Criterio</i>	<i>Característica</i>
<i>Tipo de Cañería capaz de inspeccionar</i>	Solo metálicas
<i>Presión máxima</i>	Hasta 100 bar
<i>Velocidad de inspección</i>	1,5 m/s
<i>Largo de Inspección</i>	50 km
<i>Principal desventaja en el uso de concentraductos</i>	No permite la inspección de la cañería a través del revestimiento de HDPE



Figura 21: Equipo ET. (Fuente: IOPscience)

4.1.6 Exploración por tomografía computarizada - CT Scan

El Sistema CT Scan -proveniente de la medicina-, permite obtener el perfil de densidades de las cañerías, lo cual permite la inspección no invasiva de las mismas sin las dificultades asociadas a los métodos tradicionales utilizando radiación. En esencia corresponde a un sistema de rayos x alrededor de la cañería, por lo que permite obtener la misma información que una radiografía, en particular, permite obtener un modelo en tres dimensiones de la zona inspeccionada, entregando claramente información de fallas, espesores de las paredes y la distribución de densidades en el ducto (Figura 23).

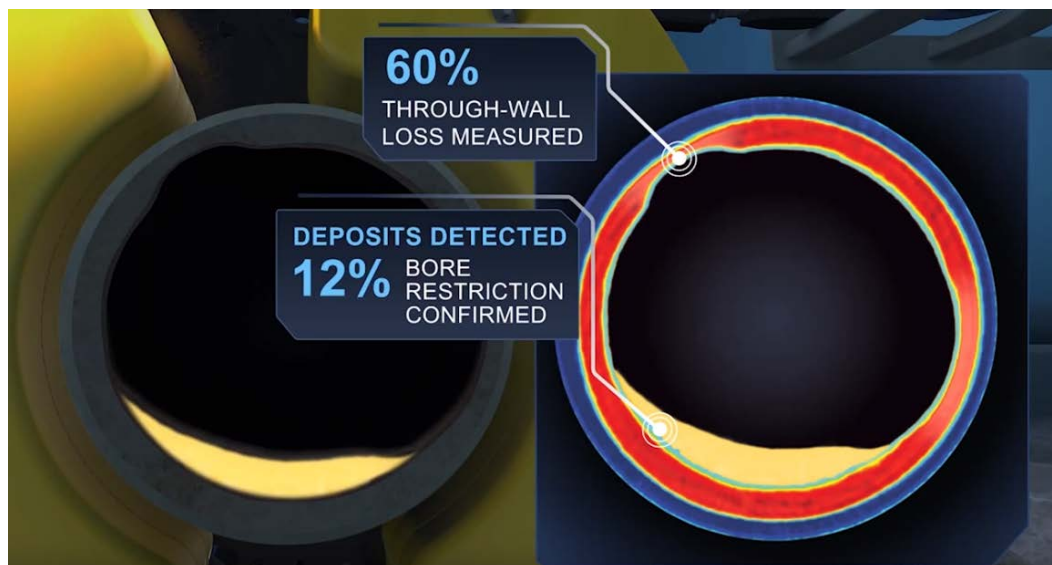


Figura 22: Perfil de densidades obtenido por equipo CT-Scan. (Fuente: Tracerco.com)

Su desventaja es que ha sido utilizado solo en cañerías submarinas, por lo que su uso en tierra no se encuentra disponible en el mercado, además el uso de radiación puede ser una limitante en algunas faenas mineras.

En Figura 22, se muestra el uso del equipo Discovery™, en instalaciones submarinas.



Figura 23: Equipo CT-Scan-Discovery. (Fuente: Tracerco.com)

4.1.7 RFT (Remote Field Testing)

La tecnología RFT permite la evaluación del estado de la cañería, obteniendo resultados similares a los del sistema MFL, su ventaja respecto al anterior es que no requiere que el equipo tenga contacto o se encuentre a corta distancia de la pared de la cañería, por lo que su uso no requiere la limpieza completa del ducto.

Este sistema utiliza campos magnéticos para provocar la propagación de corrientes de Eddy en la cañería y con esto identificar el cambio en la impedancia generada cuando existe una falla. La diferencia con la inspección por corrientes de Eddy tradicional es que la bobina receptora de la señal se encuentra a mayor distancia que el sistema tradicional aumentando el radio de inspección.

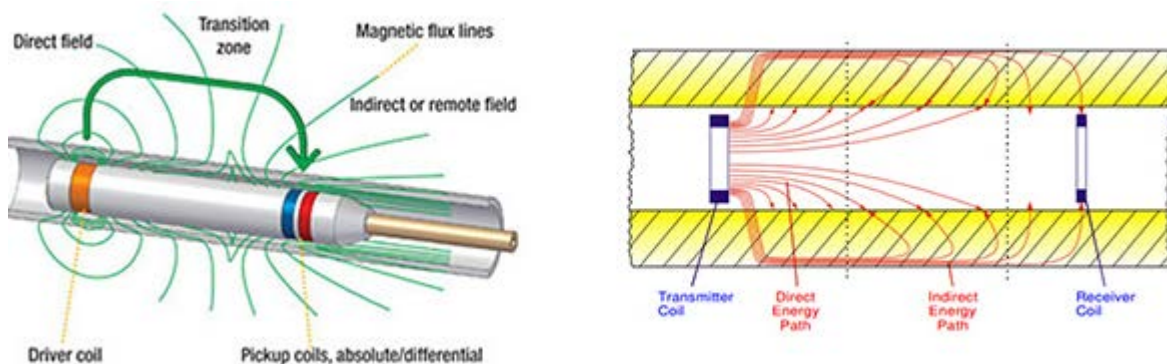


Figura 24: Sistema RFT. (Fuente: Nusatek.com)

En particular, su uso en concentraductos permite la inspección del acero de la cañería a través del revestimiento de HDPE.

Tabla 8: Características sistema RFT

<i>Criterio</i>	<i>Característica</i>
<i>Tipo de Cañería capaz de inspeccionar</i>	Solo Ferromagnéticas
<i>Presión máxima</i>	Hasta 150 bar
<i>Velocidad de inspección</i>	1 – 2 km/h
<i>Largo de Inspección</i>	10 km, escalable
<i>Principal desventaja en el uso de concentraductos</i>	Tecnología relativamente nueva en inspección de cañerías



Figura 25: Equipo RFT. (Fuente: Aegion.com)

4.1.8 Inspección óptica – Robótica

La inspección óptica consiste en realizar una inspección visual de las cañerías, además es factible crear un perfil laser del interior de los ductos. Con el uso de la tecnología LIDAR, es posible generar una nube de puntos de la cañería con resolución bajo 1 mm, permitiendo obtener con gran detalle el estado de la pared interna de la cañería; también es factible añadir módulos al equipo de inspección como por ejemplo el sistema RFT. Su uso está limitado debido al alcance máximo que es capaz de recorrer el equipo en la cañería, ya que requiere alimentación directa de energía por cable.

Tabla 9: Tabla resumen tecnología inspección óptica

<i>Criterio</i>	<i>Característica</i>
<i>Tipo de Cañería capaz de inspeccionar</i>	Todo tipo de material, con diámetro mayor a 100 mm
<i>Presión máxima</i>	- No requiere fluido de transporte
<i>Velocidad de inspección</i>	26 m/min
<i>Largo de Inspección</i>	5 km (máximo técnico con cable)
<i>Principal desventaja en el uso de concentraductos</i>	Largo máximo de inspección limitado al uso de cable



Figura 26: Robot de inspección. (Fuente: Pure Technologies.com)

5 Evaluación

5.1 Consulta a proveedores

Para determinar la disponibilidad de soluciones de inspección interna de concentraductos es realizada una consulta a proveedores en Chile y el extranjero. El contacto se realizó por medio de correo electrónico o llamada telefónica, y se solicitó el mismo servicio a cada proveedor.

Las características del servicio solicitado son las siguientes:

1. Inspección interna de un ducto de pulpa con revestimiento interno de HDPE.
2. 6" de diámetro interno efectivo.
3. Longitud del ducto de 40 km.
4. Con infraestructura de entrada y salida de PIG's (PIG launcher/receiver).
5. 870 psi / 60 Bar presión.
6. Identificar desgaste en el revestimiento interno (Liner).
7. Identificar desgaste en el acero.

Se solicita una cotización formal a 9 empresas, de las cuales se obtiene respuesta de 5 y se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 10: Resultados consulta proveedores

Empresa	Recomendación técnica / Servicio disponible	Información obtenida
A	Ultrasonido (Desgaste Liner) – Sin servicio para la evaluación del acero.	Limpieza PIG 90,000 USD.
B	Ultrasonido (Desgaste Liner) – Sin servicio para la evaluación del acero.	450,000-500,000 USD. Incluye limpieza del ducto.
C	Ultrasonido (Desgaste Liner) – Inspección externa para la evaluación del acero (Ultrasonido).	Sin Información de costos.
D	Ultrasonido "Doblecapa" para la inspección del liner y el acero. Se indica que se requiere prueba técnica para comprometer resultados.	1,000,000 USD Como mínimo para un ducto de 100 km.
E	Equipo RFT para la evaluación del acero.	260,000 USD.

Comentarios adicionales como resultado de las consultas:

- De las empresas anteriores, ninguna asegura un resultado óptimo, se sugiere una prueba previa a la inspección.
- La empresa E trabaja exclusivamente con el sistema RFT, y no tiene proveedores en Chile.
- Los costos presentados son aproximados, ya que los proveedores requieren información detallada de los ductos para realizar una cotización completa del servicio.
- Los proveedores indican que no es factible obtener un costo por kilómetro de ducto inspeccionado, ya que la revisión depende de distintos factores (Diseño, infraestructura, presión, velocidad, etc) y cada proyecto tiene complejidades distintas.

5.2 Perfil de solución

El perfil de solución depende directamente del tipo de falla que se espera encontrar, ya que cada sistema presenta características de medición específicas. De acuerdo a lo presentado en (An, Choi, & H. Kim, 2011), para la correcta elaboración de un modelo predictivo, es necesario que la información recopilada del estado de la cañería tenga la mejor calidad posible (Resolución, error asociado a la toma de datos, velocidad, etc).

Una correcta evaluación de la cañería debe ser capaz de identificar desgaste (deformaciones, fracturas, adelgazamientos, etc), en el revestimiento interno de la cañería (liner), y el acero. Su uso debe ser seguro y sus resultados confiables.

5.3 Criterios de evaluación

Para realizar la evaluación se consideran los siguientes criterios:

1. Permite identificar desgaste en el revestimiento interno de HDPE.
 - Buena resolución de adquisición, bajo error de posición, factibilidad técnica en HDPE.
2. Permite identificar desgaste en la cañería considerando un espesor mínimo del revestimiento.
 - Buena resolución de adquisición, bajo error de posición, factibilidad técnica para evaluar la cañería a través del HDPE.
3. Es segura.
 - Los riesgos asociados a su uso se encuentran mitigados o eliminados.
4. Se encuentra disponible en el mercado.
 - Es factible adquirirlo de manera simple, y su desarrollo está completo (Tecnología probada).
5. Es necesario ingresar el equipo en el ducto.
 - Si permite la inspección interna desde el exterior del ducto.

Tabla 11: Matriz comparativa de métodos y su uso en concentraductos.

CRITERIO	UT	MFL	RFT	ROBÓTICA	EMAT	CT SCAN
SEGURIDAD	✓	✓	✓	✓	✓	✗
PERMITE EVALUAR EL LINER	✓	✗	✗	✓	✗	✓
PERMITE EVALUAR EL ACERO	✗	✗	✓	✓	✗	✓
SE ENCUENTRA DISPONIBLE EN EL MERCADO	✓	✓	✓	✓	✓	✗
ES NECESARIO INGRESAR EL EQUIPO EN EL DUCTO	✓	✓	✓	✓	✓	✗

Considerando los resultados de la matriz, para la evaluación integral de la cañería (tanto revestimiento como acero), es factible utilizar la inspección robótica y el equipo CT - Scan, sin embargo, el primero se encuentra limitado por la distancia máxima que es capaz de recorrer el equipo (5 km), el cual representa -por ejemplo- solo el 3% de un concentraducto de 170 km.

El sistema CT- Scan permite identificar desgaste tanto en el revestimiento como en el acero, y es la única tecnología que no requiere ser introducida en el ducto para realizar la inspección, sin embargo, este método presenta dos desventajas, la primera es el uso de radiación en la inspección, lo cual limita su uso en algunas faenas mineras, la segunda es que este equipo aún no se encuentra disponible en el mercado para su uso en concentraductos.

Respecto a la evaluación del revestimiento interno, solo el equipo ultrasonido presenta las características necesarias para realizar la inspección; respecto a la evaluación del acero, solo el equipo RFT permite la evaluación del acero a través del revestimiento. Es necesario mencionar que, durante el desarrollo de este estudio, no se identifica una clara factibilidad técnica de los métodos presentados, y existe una incongruencia entre lo existente en los catálogos de los equipos y lo que puede promover un proveedor del servicio; se propone una prueba técnica previa a la evaluación.

6 Evaluación económica

6.1 Antecedentes

Previo a la evaluación económica es necesario mencionar algunos antecedentes.

Valor de una tonelada de concentrado

A continuación, se presenta el cálculo aproximado y simplificado del valor de venta de una tonelada de concentrado, considera un “peor caso” respecto a su ley, además de presentar castigos en su valor por costos de transporte, fundición y refinería.

Tabla 12: Cálculo de ingresos por venta concentrado

Concepto	Valor
Ley de Cu	28%
Cu en 1 ton concentrado	280 kg / 617,264 lb
Precio por venta a la fecha (LME 07-01-19)	264,9 cUSD/lb
Valor de Cu en 1 ton concentrado	1.635,13 USD
Flete	6,6 cUSD/lb
FURE	30 cUSD/lb
Ingreso por venta 1 ton concentrado	1.409,21 USD

Ingresos por venta de concentrado por hora y día

Considerando la información anterior y la tasa de transporte de un concentrado de una empresa de la gran minería que opera en el norte de Chile, se realiza el siguiente cálculo.

Tabla 13: Cálculo de Ingresos por venta por hora y día

Concepto	Valor
Ingreso por venta 1 ton concentrado	1.409,21 USD
Producción de diseño concentrado	323 tph
Ingresos por hora	455.174,83 USD
Ingresos por día	10.924.195,92

Costo asociado a una falla

Para representar el costo asociado a una falla, se utilizan como referencia las fugas producidas en el mineroducto de Minas Rio (Anglo American, Brasil), de acuerdo a lo presentado en la noticia de (Reuters, 2018) y (London mining Network, 2018), se producen dos fugas (12 y 29 de marzo), donde se vierten 1.121 toneladas de pulpa, hubo una demora de 25 minutos en responder a la falla y 11 horas en total en contener el material. Es necesario considerar además el efecto posterior ya que el estado de Brasil y el ministerio de medio ambiente, demandaron a la compañía por los daños a comunidades y medio ambiente, la cual represento una multa de 52.8 millones de dólares y se limitó el permiso para operar por aproximadamente 7 meses.



Figura 27: Imagen derrame Minas Rio. (Mongabay.com)

Considerando los datos presentados se realiza el siguiente cálculo.

Tabla 14: Estimación de costos asociados a una falla de concentrado

Concepto	Valor	Costo equivalente	
Tiempo sin producir por falla	7 días (168 h)	76.469.371,44 (oportunidad)	USD
Toneladas de mineral derramado	1.121 ton	1.579.724,41 (directo)	USD
Costo por pérdida de licencia	7 meses	2.294.081.143,2 (oportunidad)	USD
Multa	-	52.800.000 (directo)	USD

Existe un costo de al menos 54.379.724,41 dólares; es necesario hacer notar que, el 97% corresponde a la multa impuesta por el gobierno, identificando así, la necesidad de entender la falla como un efecto que influye en todos los agentes asociados a la minería y no es aislado.

6.2 Costos de inspección

Los costos asociados a la inspección están relacionados principalmente por la dificultad de realizar el estudio, el tipo de tecnología a utilizar no presenta mayor impacto en el costo (Proveedores).

Los valores presentados a continuación corresponden a presupuestos y estimaciones entregados por proveedores; y corresponden a aquellos métodos que se recomiendan según su factibilidad técnica.

Tabla 15: Costo inspección UT

<i>Inspección UT</i>	<i>Valor [USD]</i>
<i>Limpieza con PIG</i>	90.000
<i>Inspección UT</i>	230.000
<i>Elaboración informe resultados</i>	40.000
<i>Utilidades</i>	71.250
<i>Total Directo</i>	431.250
<i>Duración estudio</i>	6 días
<i>Total indirecto(oportunidad)</i>	65.545.175,52

Tabla 16: Costo inspección RFT

<i>Inspección RFT</i>	<i>Valor [USD]</i>
<i>Limpieza con PIG</i>	-
<i>Inspección RFT</i>	260.000
<i>Elaboración informe resultados</i>	40.000
<i>Utilidades</i>	75.000
<i>Total Directo</i>	375.000
<i>Duración estudio</i>	6 días
<i>Total indirecto(oportunidad)</i>	65.545.175,52

No se incluye el costo de la limpieza del ducto con PIG´S estándar en el sistema RFT, ya que de acuerdo con la bibliografía no se requiere. (Russell NDE Systems inc., 2013)

6.2.1 Evaluación

Utilizando la información presentada anteriormente se compara el costo directo de la inspección con el costo directo asociado a una posible falla. Se considerará el uso de los dos métodos de inspección de manera simultánea, considerando la suma de sus costos directos.

Tabla 17: Costo total Inspección interna

Inspección UT	Valor [USD]	Inspección RFT	Valor [USD]	Valor Compuesto [USD]
Limpieza con PIGs	90.000	Limpieza con PIGs	-	90.000
Inspección UT	230.000	Inspección RFT	260.000	490.000
Elaboración informe	40.000	Elaboración informe	40.000	80.000
Utilidades	71.250	Utilidades	75.000	146.250
Total Directo	431.250	Total Directo	375.000	806.250

El costo total de 806.250 USD corresponde a la inspección de 40 km de cañería, sin embargo, de acuerdo a la información recopilada en las entrevistas con proveedores, no existe una relación lineal entre el número de kilómetros y el costo, por lo que no es posible escalar directamente el costo final para un concentraducto completo. Se estima que el costo total será de al menos el doble debido a las características del mercado minero. La elaboración de un estudio de modelos predictivos adicionales se considera de costo marginal respecto al costo total de inspección.

Finalmente se presenta la tabla comparativa entre el costo directo asociado a la falla y el costo de inspección.

Tabla 18: Tabla comparativa de costos

Concepto	Valor [USD]
Costo directo de inspección	1.612.500
Costo directo asociado a falla	1.579.724
Costo directo asociado a multa	52.800.000

Por lo tanto, considerando lo anterior, el costo asociado a la inspección es similar al estimado por falla según el caso real presentado, sin embargo, el factor que hace relevante y justifica la inversión de la inspección es el posible daño a comunidades y medio ambiente representado en la multa.

7 Conclusiones y recomendaciones

Según la información recopilada y los resultados obtenidos es posible concluir:

- La base del correcto mantenimiento de ductos, son los planes de gestión de integridad en cañerías, con enfoque en las zonas de alta consecuencia y el mantenimiento enfocado en datos y mediciones.
- La falla de un ducto de concentrado de gran longitud presenta un riesgo para todos los actores asociados a la minería, y por lo tanto las mineras deben hacerse cargo de la gestión del riesgo, ya sea por mitigación o eliminación.
- El uso de mantenimiento reactivo no es suficiente para tener control de los riesgos asociados al uso de concentraductos.
- El uso de mantenimiento predictivo permite un mejor control de procesos y un mejor control de costos, pero requiere una mayor inversión.
- El uso de mantenimiento predictivo solo es factible cuando existen los datos suficientes para los modelos, por lo que un aumento en la calidad de la inspección implica una disminución en la variabilidad de los procesos y el mantenimiento, lo cual se traduce en un aumento de disponibilidad mecánica.
- Respecto a los métodos de inspección, se concluye que no existe una tecnología 100% efectiva y factible de utilizar en concentraductos con revestimiento interno de HDPE, por lo que los proveedores indican que es necesario realizar pruebas previas a la inspección.
- Respecto al análisis de costos asociados a la inspección, se consideran bajos respecto a los posibles costos asociados a una fuga, es necesario destacar que, en caso de no existir una demanda, el costo de inspección es similar al de la falla, sin embargo, considerando el clima actual de la relación entre las comunidades y la minería no se debe omitir este factor.

Finalmente se recomienda, promover la correcta elaboración de los planes de gestión de integridad de cañerías; realizar inspecciones con los métodos seleccionados en las zonas de alta consecuencia; y continuar el seguimiento de los métodos CT SCAN e Inspección Robótica, ya que sus restricciones para su uso en la actualidad pudieran no existir en un futuro.

8 Bibliografía

- Abulnaga, B. (2002). *Slurry Systems Handbook*. McGraw-Hill.
- An, D., Choi, J.-H., & H. Kim, N. (2011). *Identification of Correlated Damage Parameters Under Noise and Bias Using Bayesian Inference*.
- Besio, J. (2014). *Caracterización Del Transporte de Pulpa de Cobre en Tuberías*.
- Canada's Oil & Natural Gas Producers . (2017). Use of HDPE Lined Pipelines. *Best Management Practice*.
- CAP MINERIA. (19 de marzo de 2018). *Capmineria*. Obtenido de <http://www.capmineria.cl/comunicado-rotura-de-la-linea-del-concentraducto-a-la-llegada-del-ppt/>
- Cerda, I. (2007). Transporte de pulpas [Material de Clase - Análisis de sistemas particulados].
- Cochilco. (2016). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2016 – 2027*.
- Cochilco. (2018). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1998 - 2017*. Santiago.
- DNV and W. Kent Muhlbauer. (2012). Pipeline Risk Assessment - The Essential Elements. *Pipeline & Gas Journal*.
- Engineering ToolBox*. (23 de agosto de 2004). Obtenido de https://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d_798.html
- EPA. (2014). *Bristol Bay assessment - Final Report*.
- Espinoza, F. (2010). *Descripción de una Estacion Disipadora*. Santiago.
- Iqbal, H., Tesfamariam, S., Haider, H., & Sadiq, R. (2016). Inspection and Maintenance of Oil & Gas Pipelines: A Review of Policies .
- Lean Manufacturing 10 . (s.f.). *lean manufacturing 10*. Obtenido de <https://leanmanufacturing10.com/mantenimiento-correctivo-preventivo-y-predictivo-definiciones-y-diferencias>
- LP, C. P. (2016). Technical Note PP 844-TN, Slurry Abrasion Resistance in Polyethylene Pipe. *Performance Pipe*.
- Lukáš Mikšík, K. F. (s.f.). Basic principles of computed tomography.
- Minería Chilena. (2014). Transporte de fluidos: La confiabilidad es la clave. *Minería Chilena*.
- Parvizedghy, L., & Zayed, T. (2014). *Failure Prediction Model of Oil and Gas Pipelines*.

- Paterson, A. (2011). The pipeline transport of high density slurries, a historical review of past mistakes, lessons learned and current technologies. *Paste 2011*, (págs. 351-365). Perth.
- Performance Pipe. (2016). *Technical Note PP 844-TN Slurry Abrasion Resistance in Polyethylene Pipe*.
- Portal Minero. (4 de Abril de 2018). Mina Caserones, Tribunal Ambiental orden cierre temporal del ducto tras derrame de relaves. Chile.
- Reuters. (24 de abril de 2018). Anglo American's Minas-Rio delay hits earnings by \$300-400 million. LONDON.
- Robert E. Klemm, P. (1999). *Abrasion Resistant Steel Piping Systems*.
- Russell NDE Systems inc. (2013). Inspection of “unpiggable” pipelines. *Conventional Energy Seminar*. Alberta.
- Singh, R. (2014). *Pipeline Integrity Handbook - Risk Management and Evaluation* . Oxford: Elsevier.
- Song, H. e. (2018). *Comparative Analysis of In-line Inspection Equipements and Technologies*. Shengyang.
- Tracerco. (2015). *Tracerco Discovery -The World's First Subsea Pipeline Computed*.
- Xie, M., & Tian, Z. (2018). *A Review on Pipeline Integrity Management Utilizing In-Line Inspection Data* .
- Zunino, P. N. (2017). *Efecto del Tiempo de Detención en la Seguridad Operacional en Concentraductos: Hacia la Determinación de un Tiempo Máximo*. Santiago, Chile.

9 Anexos

9.1 Anexo A: Conceptos generales de la hidráulica de transporte de pulpas

De acuerdo con lo presentado por (Abulnaga, 2002), una pulpa (slurry en inglés), consiste en una mezcla de sólidos y líquido; el fluido más utilizado es agua, pero se han realizado intentos de utilizar aceites o transporte neumático; sus propiedades físicas dependen de distintos factores, tales como:

- tamaño y distribución de partículas;
- concentración de sólidos en la fase líquida;
- tamaño del conducto en que se transporta;
- nivel de turbulencia;
- temperatura; y
- viscosidad absoluta (o dinámica) del fluido.

El flujo de una pulpa en una cañería es muy distinto al flujo de un líquido de una fase. Teóricamente, un líquido de una fase puede comportarse con flujo laminar o flujo turbulento; sin embargo, una mezcla bifásica, tal como una pulpa, debe tener una velocidad crítica de transporte, tal que no permita la decantación de los sólidos transportados.

9.1.1.1 Flujo homogéneo

Los sólidos se encuentran distribuidos de manera uniforme en el fluido. Un ejemplo de flujo homogéneo corresponde a la pulpa de concentrado de cobre; luego de la molienda y espesamiento, la pulpa presenta material bastante fino y una alta concentración de sólidos en peso (50-60%). A medida que la concentración en peso de sólidos aumenta (sobre 40%), la mezcla se vuelve más viscosa y muestra propiedades no-newtonianas. Los tamaños de partícula de mezclas homogéneas son menores a 40 μm - 70 μm .

9.1.1.2 Flujo heterogéneo

Los sólidos no se encuentran distribuidos de manera uniforme en el plano horizontal; existe un gradiente de concentración en el plano vertical, con las partículas más pesadas en el fondo y las más livianas en suspensión, en particular en velocidad crítica de deposición.

9.1.1.3 Flujos intermedios

Se consideran flujos intermedios, aquellos en que algunas de las partículas en suspensión se encuentran homogéneamente distribuidas y otras de manera heterogénea.

9.1.1.4 Velocidad crítica de flujo

Corresponde a la velocidad mínima en que la pulpa fluye, al menos, en flujo intermedio. Se considera como una buena práctica que el material fluya a una velocidad de un 30% mayor a la velocidad crítica. (LP, 2016)

Tal como se muestra en Figura 6, existe una relación directa entre la velocidad del flujo, la distribución de partículas de sólido en la fase líquida, y el perfil de distribución de concentración de partículas.

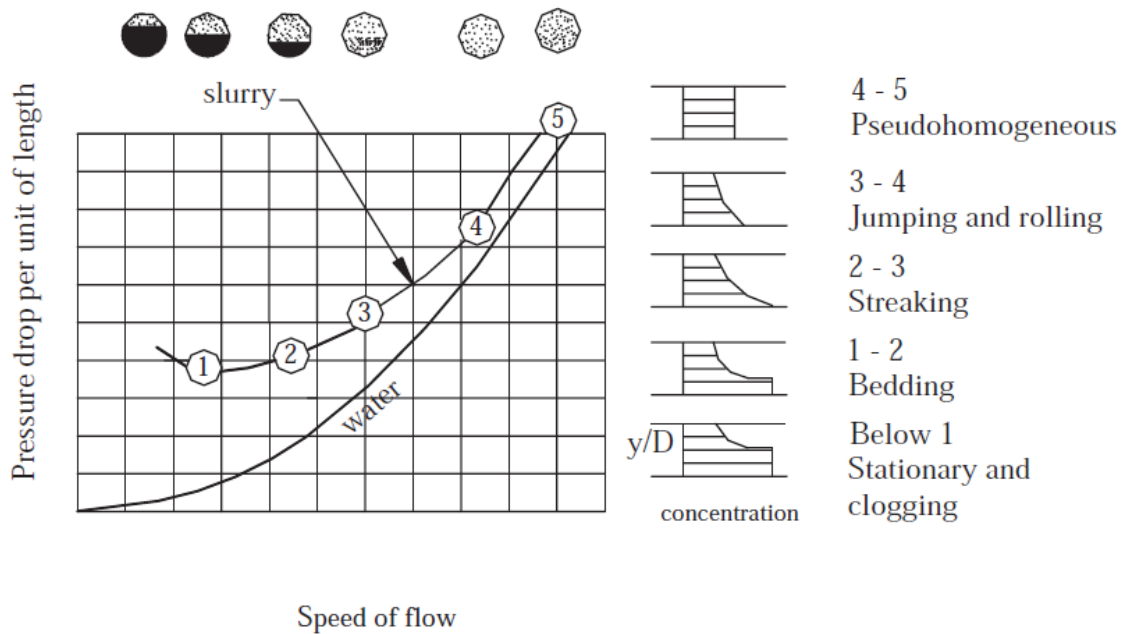


Figura 28: Gráfico de la relación entre velocidad de transporte y distribución de partículas en flujo.

(Fuente: Albuñaga, 2002)

9.1.1.5 Viscosidad dinámica de una pulpa newtoniana

A pesar de que la densidad es en esencia una propiedad estática, la viscosidad absoluta (o dinámica) es una propiedad dinámica y tiende a reducir su magnitud a medida que la tasa de corte aumenta.

9.1.2 Sistema de transporte de concentrado

En Figura 7, se presenta un diagrama genérico de un sistema de transporte de pulpa.

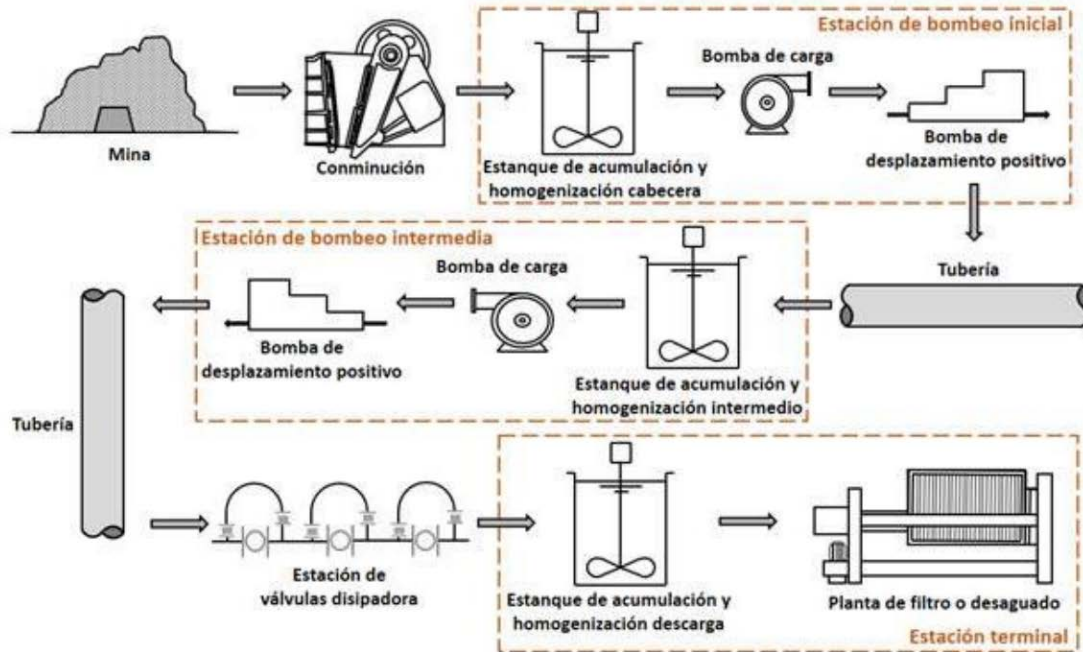


Figura 29: Sistema genérico de transporte de pulpas. (Fuente: (Zunino, 2017))

9.1.2.1 Estanques de acumulación y homogenización

Tal como dice su nombre, la función de estos estanques es ser un stock de pulpa al inicio y al final del circuito, además de homogeneizar la mezcla, esta etapa es necesaria para permitir la distribución de velocidades correcta en el transporte de sólidos.

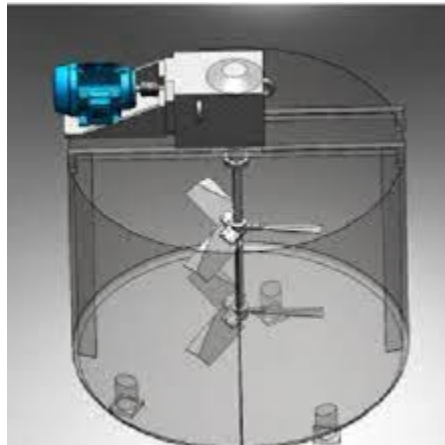


Figura 30: Esquema de tanque mezclador de pulpa mineral (Fuente: galaxyprocess.in)

9.1.2.2 Bombas de pulpa

De acuerdo con (Cerde, 2007), cuando las condiciones topográficas no son adecuadas (pendientes en contra del flujo, distancias muy grandes, etc.), se requiere mover la pulpa con un sistema de bombeo. Las bombas utilizadas para esto son de características distintas a las bombas para agua pura, dada la alta densidad, viscosidad y abrasividad de la pulpa.

Bombas centrífugas

Son las bombas más utilizadas sobre todo para distancias cortas o circuitos de planta. Son similares a las bombas de agua, pero están revestidas interiormente con goma, materiales sintéticos, poliuretano o hechas con aleaciones con níquel (Cerde, 2007).

Características principales:

- Altura de impulsión < 60 m.
- La presión de varias bombas en serie no debe superar los 600 psi.
- Velocidad periférica del rodete del impulsor límite 25 m/s (600 a 1800rpm).

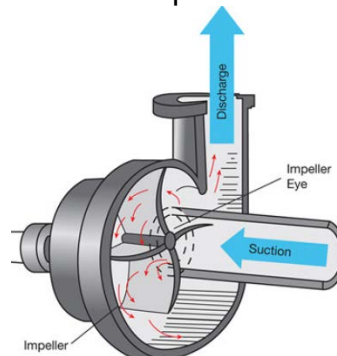


Figura 31: Esquema de bomba centrífuga (Fuente: oempanels.com)

Bombas de desplazamiento positivo

De acuerdo con (Abulnaga, 2002), las bombas de pulpa de desplazamiento positivo juegan un rol importante en un gran número de industrias, tales como la minera, de procesos metalúrgicos, la química, generación de energía, porcelanas y cerámicas, y refinamiento del azúcar.

Estas bombas son versátiles, eficientes y se pueden utilizar con presiones hasta 17.3 MPa (2500 psi). El uso de bombas de desplazamiento positivo a ganado aceptación en conductos de larga distancia, ya que su alto costo de capital es recuperado con el menor costo de instalación de sistemas eléctricos, la eliminación de estaciones intermedias, y una alta eficiencia hidráulica, la cual es superior a las bombas centrífugas; las bombas de desplazamiento positivo pueden desplazar pulpas con concentraciones de 70% de sólidos en peso.

Existen distintos tipos de bombas de desplazamiento positivo, en minería son más utilizadas las bombas de pistón y de membrana o diafragma.

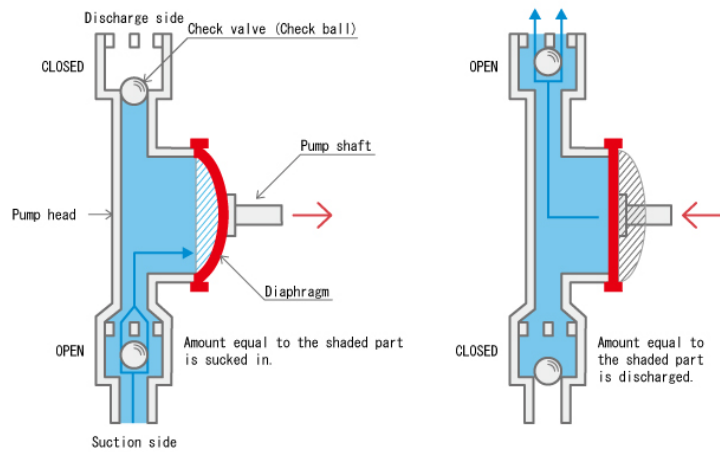


Figura 32: Esquema bomba de diafragma. (Fuente: tacmina.com)

9.1.2.3 Estación de válvulas disipadoras

Una estación disipadora, es un componente que trabaja en conjunto con el mineroducto, y en cierta medida comparte muchos de sus requerimientos y problemas técnicos; su función principal es la de disipar la presión extra que se genera sobre el fluido transportado, debido a la diferencia de cota entre la entrada y la salida del tramo de tubería que recorre el mismo. Dentro de sus componentes, se encuentran una serie de tuberías (las que son de similares características a las del mineroducto), válvulas de paso, válvulas de desvío (para baipás), sistemas de medición de presión y velocidad (instrumentación), y unos anillos cerámicos. El principal componente de la estación, son los anillos cerámicos, ya que cuando el fluido pasa a través de estos, se produce la pérdida de carga. (Espinoza, 2010)



Figura 33: Estación disipadora. (Fuente: Mogas.com)



Figura 34: Anillo cerámico. (Fuente: (Espinoza, 2010))

9.1.3 Materiales utilizados

Afortunadamente, existen distintos tipos de materiales que pueden ser utilizados en la fabricación de cañerías de pulpa. Estos sistemas van desde aceros de alta resistencia, hasta cañerías bimetálicas y revestidas de plásticos. La mejora de los materiales tiene 3 distintos enfoques: 1) Aleación de materiales, 2) modificar la microestructura del material (trabajo en frío, endurecimiento, etc.) o 3) materiales compuestos. (Robert E. Klemm, 1999)

9.1.3.1 Aleación de material

La dureza y resistencia al desgaste pueden ser mejorados con la adición de elementos de aleación al hacer durante el proceso de manufactura. Típicamente la adición de mayores niveles de carbono y manganeso incrementa la resistencia total sobre el acero, en un 70%, desde 55000-psi, de resistencia al rango de 90-100000 psi, e incrementa la dureza en 200 Brinell.

9.1.3.2 Modificación de microestructura

Es posible aumentar la dureza y resistencia al desgaste, con un segundo procesamiento del acero, así como trabajo en frío o tratamiento de calor. El trabajo en frío produce un material más resistente, sin embargo, el tratamiento de calor produce mejores resultados. Desafortunadamente, las mejoras de dureza en el acero generan una menor ductilidad, y con esto una mayor fragilidad del material.

9.1.3.3 Placas de desgaste e insertos

Es posible agregar a las cañerías placas de desgaste o insertos de distintos materiales, con el objetivo de aumentar la resistencia al desgaste producido por materiales abrasivos. Estos insertos pueden ser fundidos como anillos y luego unidos a la cañería por pegamento epoxi o mortero; la resistencia asociada al inserto se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 19: Resistencia de materiales utilizados como insertos. (Fuente: (Robert E. Klemm, 1999))

Material	Kg/mm ²
Diamante	7000 – 8000
Carburo de silicio	2300
Oxido de aluminio	2100
Carburo de tungsteno	2000
Carburo cementado	1800
Carburo de cromo	1600
Basalto	1500
Acero endurecido	600 – 850
Acero dulce	200

9.1.3.4 Cañería de dos paredes

Estas cañerías son una combinación de una cañería resistente a la abrasión, pero con baja resistencia a los impactos, cubierta con otra de mayor resistencia. Esta combinación produce un sistema de transporte de pulpa mineral ideal, una de las principales ventajas de este tipo de cañerías es que su calidad no depende del proceso de manufactura, tales como los tratamientos de calor o aleaciones.

Tienen dos desventajas a considerar, la cañería interna no está adherida a la capa si no que se mantiene en su lugar de manera mecánica. Por lo tanto, la falla de la cañería interna por desgaste está acompañada del desprendimiento del revestimiento, produciendo una obstrucción en el canal. La segunda, no es posible medir el espesor de las paredes de la cañería de la manera tradicional (MFL).

9.1.3.5 Cañerías bimetálicas

Es posible producir, cañerías con las ventajas del uso de dos paredes, pero sin sus desventajas, estas cañerías, dependen de la fusión de dos materiales metálicos, estas pueden ser producidas por los siguientes métodos:

- 1) durante la fabricación de la cañería de acero,
- 2) después de la cañería fue formada, como por ejemplo soldadura superpuesta,
- 3) modificada por proceso metalúrgico posterior.

Estos tipos de sistemas tienen una mayor ventaja respecto a la resistencia al desgaste y vida útil. Los materiales internos pueden ser seleccionados específicamente para el tipo de pulpa que se está transportando, independiente de la condición del material exterior. Disponibilidad, limitaciones de tamaño y el costo son los factores relevantes en la selección de sistemas de cañerías bimetálicas.

La tabla siguiente presenta las características de las cañerías utilizadas, sus ventajas y desventajas.

Tabla 20: Resumen características de cañerías. (Fuente: (Robert E. Klemm, 1999))

	MILD STEEL	FIBERGLASS PLASTIC	"AS-RUN" PIPE	INDUCTION HARDENED PIPE	WELD OVERLAY	CAST / LINED PIPE
HARDNESS	120 - 150 BHN	N/A	180 - 220 BHN	480 - 650 BHN	> 600 BHN	300 - 700 BHN
ABRASION RESISTANT	POOR	Can be impregnated with abrasion resistant "beads"	Moderate	Very Good	Excellent	Excellent
IMPACT RESISTANT	Good	Good	Moderate	Low Marginal	Low Moderate	Poor
STRENGTH	Good	Poor can crush	Moderate	Excellent	Good	Excellent
SIZES	Unlimited	Limited	100'	50'	Limited to 50'	18'
HANDLING & INSTALLATION	Excellent	Excellent	Excellent	Very Good	Very Good	Very Heavy Very Brittle
FABRICATION	Unlimited	Limited (special equip.)	Unlimited	Some limitations	Some limitations	Very Limited (to patterns)
WEAR MONITORED	Readily with Ultrasonic	No	Readily with Ultrasonic	Readily with Ultrasonic	No	No
EMERGENCY REPAIR	Easily completed	Limited (special equip.)	Easily completed	Easily Patched	Easily Patched	No
INITIAL COST		Less than Mild Steel	10-25% above Mild Steel	50-100% above Mild Steel	4 - 5 times Mild Steel	3 - 6 times Mild Steel
LIFE EXPECTANCY		2-4 times Mild Steel	1.5 - 2 times Mild Steel	3 - 8 times Mild Steel	6 - 20 times Mild Steel	10 - 20 times Mild Steel
ADVANTAGES	Low cost Readily available	Lightweight Corrosion resistant Lengths to 100'	Improvement in wear over mild steel Lengths to 100'	Excellent combination of abrasion & impact resistant	Excellent for abrasion wear	Excellent for abrasion wear
DISADVANTAGES	Poor abrasion resistance; Costly change-out	Difficult repairs, Thermal movement	Limited in wear, No corrosion resistance	No corrosion resistance, Low ductility	Limited length and diameter	Very heavy; supports req'd Very Brittle Costly

9.1.4 Variables de diseño

Según lo presentado por (Robert E. Klemm, 1999), los distintos tipos de sistemas de transporte de pulpa tienen ventajas y desventajas. Dentro de las consideraciones principales para el diseño de cada sistema se encuentran: 1) Tamaño, forma y dureza de partícula, 2) Velocidad de partículas, 3) Presión máxima esperada del sistema, y, 4) Puntos de mayor desgaste (impacto y turbulencia del flujo).

Tamaño, forma y dureza de una partícula

La dureza del material transportado es uno de los mayores indicadores del potencial desgaste abrasivo. Por ejemplo, el carbón y la caliza son materiales blandos, y es difícil que generen daños por abrasión; sin embargo, la presencia de pequeños porcentajes de materiales altamente abrasivos causara desgaste por abrasividad severo. El sistema debe tener mayor dureza que el material transportado para minimizar el desgaste por abrasividad.

Velocidad de partícula

De todas las variables que influyen en la tasa de desgaste de cañerías, la velocidad es la más importante. La tasa de desgaste es exponencial, respecto a la velocidad; duplicar la velocidad incrementara la tasa de desgaste en 4 – 6 veces, sin embargo, reducirla puede causar separación y segregación del material en la cañería.