



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

**Determinación de modelo teórico de generación energética  
para el monitoreo del estado de polines de las correas  
transportadoras**

**Joaquín Ignacio Augusto Valderrama**

Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Civil de Minas

PROFESOR GUÍA  
Miguel Ángel Lagos Infante  
CO GUIAS  
Kenji Naito Chiang  
Francisco Rivas Saldana

Universidad de Talca

CURICÓ, CHILE  
AGOSTO 2021

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

## **Resumen**

La presente investigación se enfoca en la industria minera, con el fin de incrementar la confiabilidad de una de las operaciones unitarias más importantes dentro de una faena minera, la cual es el transporte continuo de mineral, mediante la utilización de cintas transportadoras.

Para el desarrollo de esta investigación, se cuenta con los recursos proporcionados por los profesores de la Universidad de Talca, específicamente docentes del área de Física, Mecánica y Electricidad.

Como resultado se logra desarrollar una ecuación física que permite comprobar la factibilidad técnica de generar energía eléctrica usando la rotación de los polines empleando generadores síncronos de imanes permanentes, además de calcular la carga extra que impondría al sistema de transporte de mineral.

Por otro lado, se desarrolla un modelo de simulación para representar el funcionamiento de correas de transporte en zonas críticas de la operación minera, para visualizar el comportamiento de la vida útil de los polines y su monitoreo. Con el fin de cuantificar la confiabilidad de los equipos de transporte de mineral.

## **Abstract**

This research focuses on the mining industry, in order to increase the reliability of one of the most important unit operations within a mining site, which is the continuous transport of ore, through the use of conveyor belts.

For the development of this research, it has the resources provided by the professors of the University of Talca, specifically professors in the area of Physics, Mechanics and Electricity. As a result, it is possible to develop a physical equation that allows to verify the technical feasibility of generating electrical energy using the rotation of the idlers using permanent magnet synchronous generators, in addition to calculating the extra load that it would impose on the mineral transport system.

On the other hand, a simulation model is developed to represent the operation of conveyor belts in critical areas of the mining operation, to visualize the behavior of the useful life of the idlers and their monitoring. In order to quantify the reliability of ore transport equipment.

# Índice

<b>Resumen</b> .....	2
<b>Abstract</b> .....	3
<b>Índice</b> .....	4
<b>Índice de tablas</b> .....	5
<b>Índice de figuras</b> .....	5
<b>Introducción</b> .....	6
<b>Objetivos</b> .....	8
<b>Alcances</b> .....	9
<b>Revisión Bibliográfica</b> .....	10
<b>Metodología</b> .....	21
<b>Resultados</b> .....	23
<b>Cálculo de carga al sistema</b> .....	23
<b>Cálculo de la energía generada.</b> .....	35
<b>Simulación Correa Transportadora software ARENA.</b> .....	36
<b>Modelo de monitoreo de vida útil del Polín</b> .....	39
<b>Conclusiones</b> .....	40
<b>Bibliografía</b> .....	42

## Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de sistemas de transporte de mineral .....	12
Tabla 2. Input de tiempo empleado cambio de polín .....	35

## Índice de figuras

Figura 1. Sistema estándar de correa transportadora, CEMA .....	11
Figura 2. Estructura mecánica de un polín, CEMA .....	13
Figura 3. Gráfico de temperatura de funcionamiento de polines .....	14
Figura 4. Gráfico de temperatura de cada uno de los estados de un polín .....	14
Figura 5. Gráfico de análisis de vibración en eje X de un polín .....	15
Figura 6. Gráfico de análisis de vibración en eje Y de un polín .....	16
Figura 7. Esquema de generación eléctrica .....	17
Figura 8. Estructura de generadores síncronos .....	18
Figura 9. Población de polines defectuosos .....	20
Figura 10. Pilar de investigación .....	21
Figura 11. Vista frontal de correa transportadora de mineral .....	22
Figura 12. Distribución de esfuerzos en correa transportadora .....	23
Figura 13. DCL correa transportadora subida .....	25
Figura 14. DCL Polín o Idler .....	28
Figura 15. DCL correa transportadora bajada .....	31
Figura 16. Estructura de modelo de simulación .....	34
Figura 17. Condición cambio de polines .....	36
Figura 18. Condición para monitoreo de polines .....	36
Figura 19. Visualizador de estado de polines .....	37

## Introducción

En la sociedad actual el enfoque de todas las áreas de la industria es la eficiencia y gestión sobre las operaciones. En particular este trabajo se centra en el estudio de las correas transportadoras en minería para aprovechar el potencial que tienen los polines para generar energía usando la rotación angular de estos con el fin de detectar de manera preventiva los problemas de funcionamiento asociados al mal estado de los polines, procurando un funcionamiento continuo en el transporte de mineral y permitiendo generar estrategias de mantenimiento más eficientes a la hora de realizar intervenciones en el sistema de transporte. De esta manera se alinea con todas las estrategias de grandes empresas en la incorporación de innovación tecnológica para mejoras u optimizar una operación industrial. La motivación para desarrollar esta investigación tiene base en la industria 4.0, que es la industria del futuro, o industria inteligente en la que el uso de tecnología en las aplicaciones industriales permite un mayor control de las variables de operación industrial con el fin de optimizarla.

La minería es una industria tradicional que en muchas ocasiones se resiste a los cambios tecnológicos, por lo que mi incentivo es promover la implementación de tecnología para mejorar una operación minera, en este caso en particular se analiza el sistema de transporte de mineral, enfatizando que una detención no programada en una correa transportadora tiene un costo muy elevado para una faena minera, ya que se detiene todo el proceso de transporte. El enfoque de mi investigación es mixto, ya que esta parte de una idea que se desarrolla de manera secuencial, analizando los sucesos detalladamente y no es fundamentado en la estadística muestral. Se debe determinar un modelo teórico físico-matemático para la generación de energía y para esto se requiere la recolección de información con el fin de dar una base sólida que respalde los resultados finales de la investigación.

El tema central de esta investigación es la determinación de un modelo teórico que pueda cuantificar la generación de energía producida a través de la rotación de los polines y la carga de trabajo que impondrá a un sistema convencional de cinta transportadora. Lo que se pretende es incorporar un generador sincrónico de imanes permanentes [1] acoplado a los polines capaz de generar la energía eléctrica suficiente para alimentar un módulo de detección con el fin de detectar polines en mal estado [2]. Para cuantificar la factibilidad técnica del

sistema detector de polines en mal estado de funcionamiento se implementará una evaluación económica solo para contrastar si económicamente es posible añadirlo a la operación.

La iniciativa de esta investigación parte con la premisa de si es posible optimizar el funcionamiento de la correa transportadora, donde el tiempo empleado en mantenimiento puede ser la respuesta para mejorar el uso de este recurso de transporte de mineral u otra materia prima.

Con esto se busca motivar e incentivar la búsqueda de mejoras dentro del mercado tecnológico actual para optimizar procesos mineros que generalmente tienen un amplio rango de mejoramiento.

De la investigación se espera obtener un modelo que pueda responder, si es posible generar energía aprovechando la rotación de los polines y si esta generación energética afectará el funcionamiento de un sistema de correa transportadora convencional. Obteniendo datos cuantificables mediante la simulación del modelo, que puedan respaldar de manera consistente el modelo planteado.

## Objetivos

El objetivo general que persigue concretar este trabajo es el siguiente:

- Estudiar la factibilidad técnica de generar energía eléctrica utilizando la rotación angular de los polines de un sistema de correa transportadora, a través de la incorporación de un generador síncrono de imanes permanentes, con la finalidad de detectar polines en mal estado de funcionamiento.

Con el fin de llevar a cabo el objetivo antes expuesto, acotando los resultados esperados, se presentan los objetivos específicos del trabajo de título:

- Demostrar mediante una expresión matemática que la incorporación de una carga externa no causa una interrupción de la operación normal de una correa transportadora.
- Describir detalladamente la generación de energía utilizando generadores síncronos de imanes permanentes para auto sustentar un sistema de detección de polines en mal estado en las correas transportadoras de las faenas mineras.
- Construir un modelo físico-matemático para determinar la cantidad de energía generada por los polines de una correa estándar usada en minería.
- Determinar la factibilidad de la incorporación del sistema de detección dentro de una faena minera calculando el aumento de confiabilidad en base a una simulación.

## Alcances

- Investigación con el foco de optimizar un proceso minero aplicando tecnología para lograr una mejora en la eficiencia del funcionamiento continuo de la correa transportadora con el fin de generar intervenciones de mantenimiento más efectivas.
- Plantear una expresión matemática mediante el análisis de fuerza de un sistema de correas transportadoras en subida y bajada, para obtener como resultado la cantidad de energía y carga impuesta sobre el sistema de transporte de mineral.
- Simulación en software ARENA para representar el monitoreo de tres sistemas de correas transportadoras ubicadas en puntos críticos de una operación minera (Chancado, Planta de proceso y StockPile), con el fin de cuantificar el aumento de confiabilidad en el funcionamiento de las correas de transporte de mineral.
- El diseño eléctrico, desarrollo de un prototipo y testeo en terreno no están incluidas en el marco de la investigación.
- No se establece una evaluación económica con el fin de establecer la factibilidad del sistema en alguna faena minera.

## Revisión Bibliográfica

### Estado del arte.

El transporte de mineral procedente de una explotación minera, ya sea a cielo abierto o subterránea, de una pila o una tolva de almacenamiento, es una operación unitaria que corresponde al acarreo o traslado de mineral mediante medios mecánicos de distinta complejidad.

Los sistemas de transporte utilizado en minería se dividen en dos:

- Transporte de mineral por medio continuo
- Transporte mineral por medios discontinuo

Esta investigación se centrará en el medio continuo de transporte empleando sistemas de correas transportadoras, que corresponde un método continuo y muy económico formado básicamente por una cinta de caucho reforzado, que se mueve entre dos poleas. Se utilizan principalmente en el transporte de materiales granulados, siendo su principal aplicación dentro de faenas mineras.

El transporte de material mediante cintas transportadoras data de aproximadamente el año 1795. La mayoría de éstas tempranas instalaciones se realizaban sobre terrenos relativamente plano, así como en cortas distancias. El primer sistema de cinta transportadora era muy primitivo y consistía en una cinta de cuero, lona o caucho que se desplazaba sobre una cama de madera plana o inclinada. Este tipo de sistema no fue calificado como exitoso, pero provocó incentivar a los ingenieros para considerar los transportadores como un rápido, económico y seguro método para mover grandes volúmenes de material de una locación a otra.

Durante los años 20, la instalación de la compañía H. C. Frick, demuestra que los transportadores de cinta pueden trabajar sin ningún problema en largas distancias. Esta instalación se realizó bajo tierra, desde una mina recorriendo casi 8 kilómetros. La cinta transportadora consistía en múltiples pliegues de algodón de pato con cubierta de goma natural, que eran los únicos materiales utilizados en esos tiempos para su fabricación [3].

Durante la Segunda Guerra Mundial, los componentes naturales de los transportadores se volvieron muy escasos, permitiendo que la industria de goma se volcara a crear materiales sintéticos que reemplazaran a los naturales. La ventaja básica de los transportadores de cinta sobre otros tipos de transporte (como lo son camiones, trenes, transporte aéreo, etc.) es su variada aplicabilidad a los diferentes requerimientos de la industria. Diferentes estudios indican que hoy, los transportadores de cinta se han convertido en el primer método utilizado para el transporte de material. [3]

Principales ventajas de este sistema frente a emplear camiones mecanizados:

- El costo de operación y de mantenimiento es mucho menor, en comparación a los costos asociados al uso de camiones fuera de carretera.
- El sistema de correas transportadoras es menos sensible a la inflación con una estimación de incremento del 2% anual.
- Mayor eficiencia en el uso del recurso energético, llegando al orden del 75% del aprovechamiento de la energía empleada en funcionamiento del sistema.
- La capacidad de transporte es independiente de la distancia a trasladar el material.
- Permite transporte de material con una inclinación media de 33%
- La vida operativa de las cintas transportadoras es mayor que la de los camiones.
- Es una solución de transporte más amigable con el ambiente, ya que la emisión de ruidos y polvos es baja.
- El sistema de correas transportadoras es aplicable desde pequeñas capacidades (300 T/h) hasta grandes niveles de producción (23.000 T/h).

A continuación, se muestra una tabla 1 la que muestra una comparación entre ambos métodos de transporte de mineral.

Tabla 1. Comparación de sistemas de transporte de mineral.

Parámetro de comparación	Correa Transportadora	Camión de extracción
<b>Costo de operación y mantenimiento</b>	Menor	Mayor
<b>Mano de obra</b>	Normal	Especializada
<b>N° de operarios</b>	Menor	Mayor
<b>Inflación de costos interanuales</b>	Menos Sensible	Mas sensible

<b>Eficiencia energética</b>	Mayor (motores eléctricos) >75%	Menor (Diesel) <45%
<b>Pendiente</b>	variable >33%	limitada <8%
<b>Construcción y mantenimiento de pistas</b>	Menor	Mayor
<b>Proceso de extracción</b>	Continuo	discontinuo
<b>Condiciones ambientales</b>	Muy buena	Peor
<b>Organización automatización</b>	Alta	Alta
<b>Inversión inicial</b>	Alta	Alta
<b>Versatilidad y adaptabilidad</b>	Baja	Alta
<b>Planificación y calculo</b>	Elevado y riguroso	Riguroso

En la figura 1 se muestran los componentes principales de una cinta transportadora.

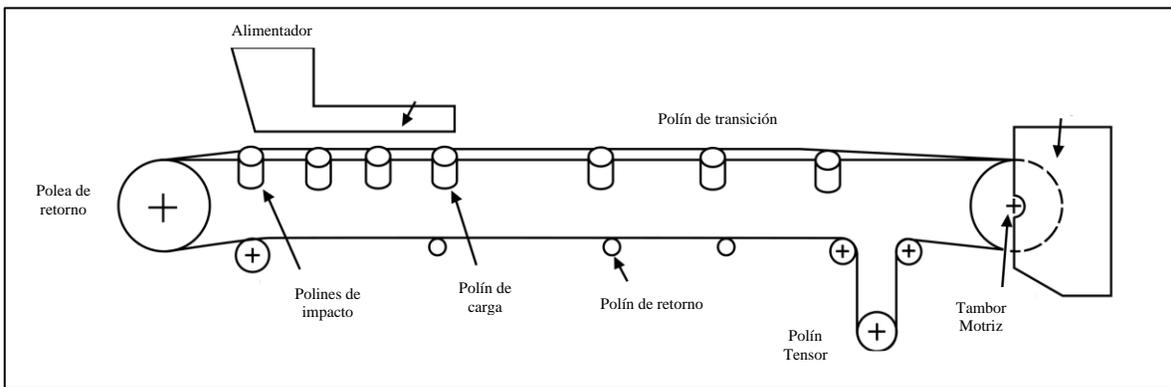


Figura 1: Sistema estándar de correa transportadora, CEMA

- 1) Estructura soportante: la estructura soportante de una cinta transportadora está compuesta por perfiles tubulares o angulares, formando en algunos casos verdaderos puentes que se fijan a su vez en soportes o torres estructurales apernadas o soldadas en una base sólida. [3]
- 2) Elementos deslizantes: son los elementos sobre los cuales se apoya la carga, ya sea en forma directa o indirecta, perteneciendo a estos los siguientes:
  - Correa o banda: la correa o banda propiamente tal, que les da el nombre a estos equipos, tendrá una gran variedad de características, y su elección dependerá en gran parte del material a transportar, velocidad, esfuerzo o tensión a la que sea sometida, capacidad de carga a transportar, etc.

- Polines: generalmente los transportadores que poseen estos elementos incorporados a su estructura básica de funcionamiento son del tipo inerte, la carga se desliza sobre ellos mediante un impulso ajeno a los polines y a ella misma.
- 3) Elementos motrices: el elemento motriz de mayor uso en los transportadores es el del tipo eléctrico, variando sus características según la exigencia a la cual sea sometido. Además del motor, las poleas, los engranajes, el motorreductor, son otros de los elementos que componen el sistema motriz. [3]
  - 4) Elementos tensores: es el elemento que permitirá mantener la tensión en la correa o banda, asegurando el buen funcionamiento del sistema.
  - 5) Tambor motriz y de retorno: la función de los tambores es funcionar como poleas, las que se ubicarán en el comienzo y fin de la cinta transportadora, para su selección se tomarán en cuenta factores como: potencia, velocidad, ancho de banda, entre otros. [3]

Las cintas transportadoras o *belt conveyor* poseen una gran eficiencia de trabajo y una alta vida útil de operación. Pero, en muchas ocasiones los elementos deslizantes conocidos como polines o *Idlers*, son elementos propensos a sufrir averías estructurales que provocan mayor consumo energético al imponer al sistema más carga y pueden causar daños severos a la cinta o banda.

Los polines son los elementos encargados de soportar la cinta transportadora y su carga. Se componen de una estructura base y de uno o más rodillos sobre los que se apoya la cinta. Estos elementos cumplen un rol clave en la eficiencia y durabilidad del transportador, ya que de ellos depende la continuidad del movimiento de materiales. La *Conveyor Equipment Manufacturers Association* (CEMA) de EEUU clasifica los polines de acuerdo a su capacidad de carga desde Clase B, para servicio liviano, a Clase E, para servicio pesado. En la Figura 2 se muestra los principales componentes de un polin o *idler*:

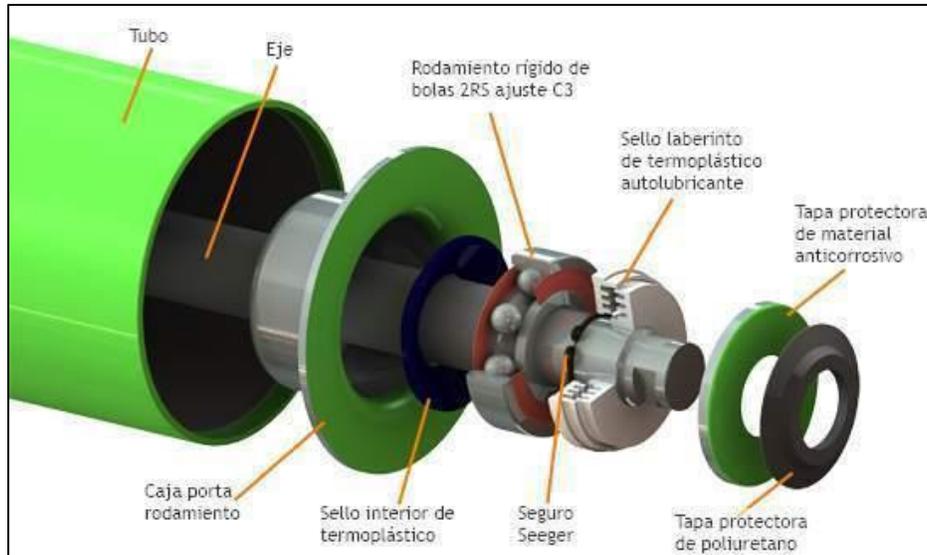


Figura 2: Estructura mecánica de un polín, CEMA

Como los polines son elementos que están en continua operación, están expuestos a sufrir fallas de funcionamiento. Cuando un polín falla y debe ser cambiado, este experimento 3 estados consecutivos, *incipient failure*, *final failure* y *catastrophic failure* [4]. Un *incipient failure* se refiere a la rotura de los rodamientos que alcanzan un área de  $6,25 \text{ mm}^2$ , una *final failure* se define como la pérdida de la idoneidad para operaciones posteriores y, por último, la *catastrophic failure* se presenta cuando los polines no pueden funcionar correctamente y causaran graves daños a la cinta. Generalmente el polín es cambiado cuando ha llegado a la última etapa de falla. Esto es porque no se había logrado determinar parámetros medibles capaces de detectar de manera preventiva o predictiva posibles fallas en los polines.

Uno de los grandes contratiempos a la hora de implementar tecnología dentro del sistema de correa transportadora es la gran cantidad de polines que puede llegar a tener el sistema, por lo que esto presenta grandes desafíos de ingeniería a la hora de insertar un sistema de monitoreo en los polines [4].

Dentro de los parámetros más importantes que se pueden observar y medir en la cinta transportadora, destacan 2 de ellos:

- Temperatura
- Vibración

Estos dos parámetros entregan información confiable y medible acerca del estado de los polines en operación. La temperatura es un parámetro medible que permite diferenciar entre un polín intacto y uno defectuoso. A continuación, en la Figura 3 se presenta un gráfico en el que se observa el comportamiento de 2 polines en estado de funcionamiento. [4]

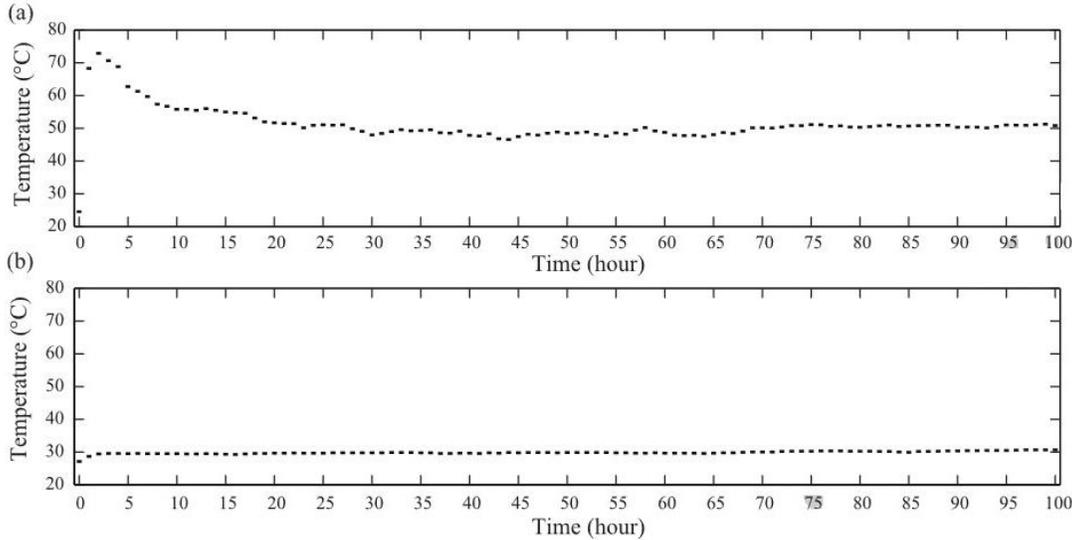


Figura 3: Gráfico de temperatura de funcionamiento de polines [4]

Donde se observa que el gráfico (a) corresponde a un polín defectuoso donde la temperatura de operación a comienzo es elevada para luego, al cabo de 30 horas de operación, se mantiene en un valor aproximadamente de 50°C. En cambio, un polín intacto, no presenta una alta temperatura al inicio de la operación de la cinta, en cambio aumenta gradualmente hasta mantenerse en un valor estable de aproximadamente 30°C. Pero este parámetro entre temperaturas solo es posible cuando el polín entra en la etapa final de fallo. Para contrastar, en la Figura 4 se muestra un gráfico con las etapas previas.[4]

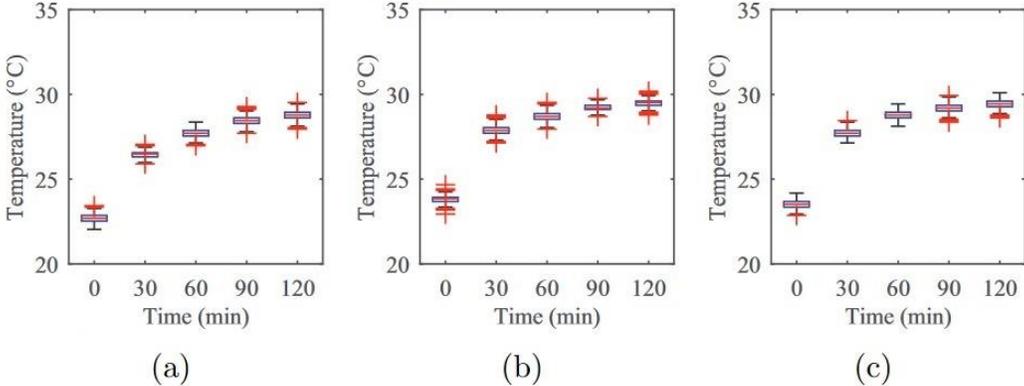


Figura 4: Gráfico de temperatura en cada uno de los estados de un polín [4]

El gráfico (a) corresponde a un polín intacto y los gráficos (b) y (c) corresponden a polín en etapa *incipient failure* y *final failure* respectivamente. En ellos se puede observar que no existe mucha variación de temperatura por lo que es muy difícil evaluar el estado del polín. Aun así, la variable temperatura brinda información valiosa para poder detectar polines defectuosos. [4]

El siguiente parámetro que se estudia a la hora de detectar fallas en los polines es la vibración que experimenta la estación de polines. El estudio de la vibración se hace tanto en el eje X, como en el eje Y. Esto se muestra en la Figura 5.

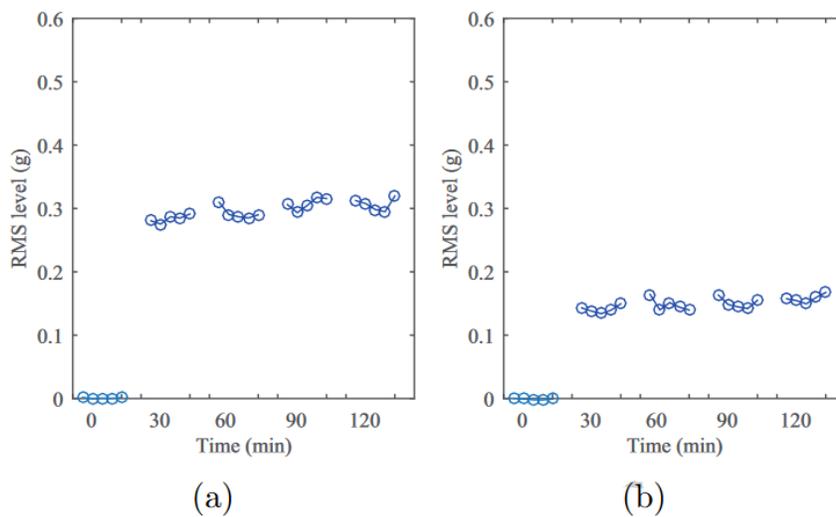


Figura 5: Gráfico de análisis de vibración en eje X de un polín [4]

Los gráficos representan la medición de vibración en el eje X, donde (a) y (b) corresponde a la medición de vibración en un polín intacto y uno defectuoso respectivamente. Donde se nota una evidente diferencia en los niveles de RMS, que representa una medida de la amplitud de una onda, siendo una de las medidas de vibración más importante ya que tienen incorporada la historia de la señal proporcionando un valor que está directamente relacionado con el contenido energético de la vibración. En cambio, para los datos obtenidos desde el eje Y del polín no hay mayor diferencia entre un polín intacto y uno defectuoso, el gráfico es presentado en la Figura 6.

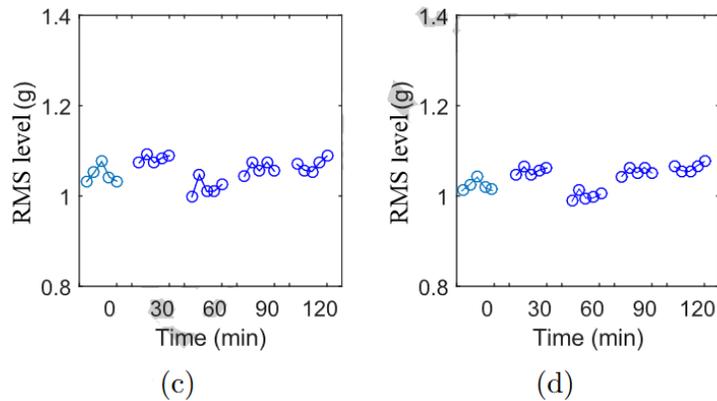


Figura 6: Gráfico de análisis de vibración en eje Y de un polín [4]

Esto se explica porque la vibración en las cintas transportadoras es más intensa en la dirección de movimiento del mineral, que es el eje X. En cambio, la vibración en el eje Y es mucho menor y no entrega información útil para la detección del estado del polín. [4]

Por lo tanto, sí existen parámetros medibles y cuantificables para la detección de polines defectuosos. Ahora bien, una de las grandes preguntas es como hacer sustentable energéticamente la medición de estos parámetros dentro del sistema de correa, sin recurrir a conectar baterías para alimentar algún tipo de sensor. Para esto recurrimos al uso de una fuente energética basada en electromagnetismo, cuyos fundamentos fueron presentados por Michael Faraday y formulados por primera vez en 1865 por James Clerk Maxwell. Cabe mencionar que existen otras formas de generar energía, pero todas tienen restricciones propias para ser aplicadas prácticamente en un sistema de correas real.

- **Generación solar:** Requiere paneles externos de alto costo.
- **Generación mecánica:** Es de difícil acoplamiento a un sistema de correas.
- **Generación: biomecánica:** tiene muy baja eficiencia
- **Generación térmica:** Necesita alta temperatura para proporcionar suficiente energía.
- **Generación electromagnética:** Dependiente del tamaño de bobinas y de la velocidad

En este caso de investigación, se pretende aprovechar el giro del polín que tiene una velocidad lineal de 20 [m/s] aproximadamente. Por lo que esta velocidad de giro es capaz de generar la energía suficiente para alimentar un sensor. Esta sería una combinación de un método mecánico y electromagnético de generar energía.

El generador síncrono también se los conoce como Máquinas Síncronas es un tipo de máquina eléctrica rotativa capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica, la razón por la que se llama generador síncrono es la igualdad entre la frecuencia eléctrica como la frecuencia angular, es decir, el generador gira a la velocidad del campo magnético, por lo que a esta igualdad de frecuencias se le denomina sincronismo. Los generadores constan fundamentalmente de un rotor y un estator. [1]

El generador síncrono está compuesto principalmente de una parte móvil o rotor y de una parte fija o estator, el principio de funcionamiento de un generador síncrono se basa en la ley de Faraday.

### **Clases de generadores de imanes permanentes.**

El Generador síncrono es una maquina eléctrica rotativa con la capacidad de transformar la potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna. En la Figura 7 se presenta un esquema simplificado de explicación.

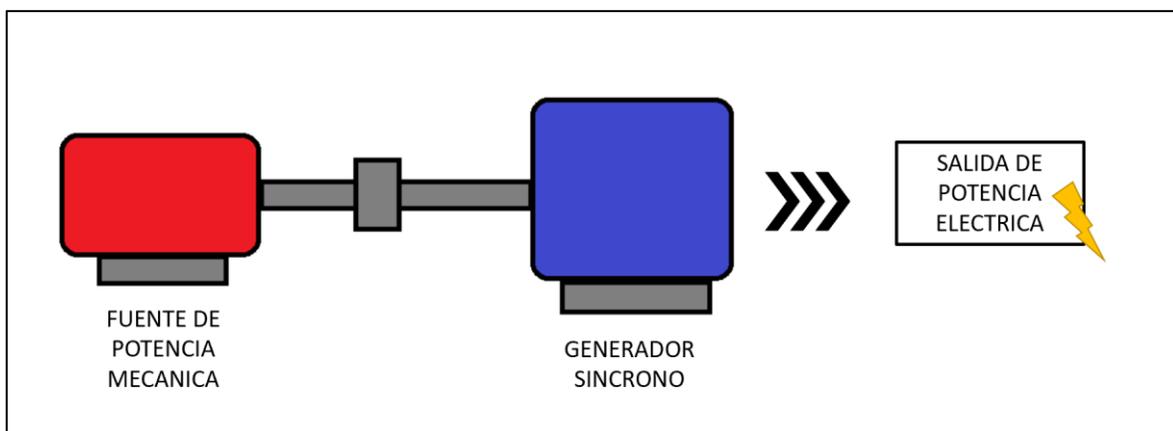


Figura 7: Esquema de generación eléctrica, Elaboración Propia

Un generador sincrónico normal necesita la aplicación de corriente continua para inducir el campo magnético, en cambio un generador que posee imanes permanentes no necesita de dicha carga energética para la inducción del campo magnético, esto se debe a que los imanes son los encargados de la inducción del campo magnético. Mecánicamente un generador síncrono de imanes permanentes es una fila de imanes que se mueve con velocidad “lineal” frente a un grupo de espiras. Dicha situación no es la que se da en los generadores eléctricos,

sino que los imanes se mueven con velocidad “circular”. Según sea el eje de giro, los generadores son de dos tipos, de flujo axial y de flujo radial.

- Generadores de flujo axial: el eje de giro es paralelo al campo magnético de los imanes.
- Generadores de flujo radial: el eje de giro es perpendicular al campo magnético de los imanes.

En los generadores de flujo axial, los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro. Así pues, el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro, y de ahí la frase “flujo axial” que realmente significa campo magnético paralelo al eje de giro.

En los generadores de flujo radial, los imanes se colocan sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje. En este caso el campo magnético de los imanes es perpendicular al eje de giro, y por tanto va en dirección radial, y de ahí la frase “flujo radial” que realmente significa campo magnético en dirección radial o perpendicular al eje de giro. En la Figura 8 se representan los dos tipos de generadores que existen.

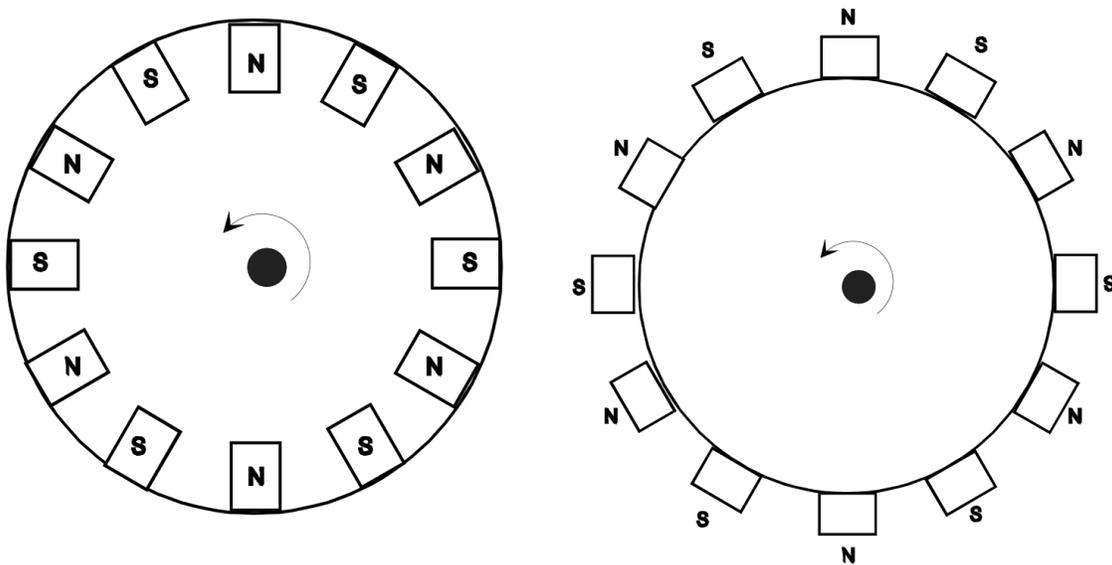


Figura 8: Estructura de generadores síncronos

Cuando se trata de generadores sincrónicos se introduce el concepto de imanes permanentes, en el mercado existe dos tipos principalmente. Por un lado, el imán de neodimio NIB y por otro, el llamado imán de ferrita. Ambos son imanes fuertes y tienen varias propiedades diferentes.

Los imanes de neodimio son imanes de metal puro. Sus principales componentes son el neodimio, el hierro y el boro. Durante la producción, los diferentes metales se mezclan y luego se funden. A partir de entonces, el producto obtenido se pulveriza de nuevo y se presiona en moldes. Bajo la influencia de la presión y la temperatura (proceso de sinterización), el neodimio adquiere la resistencia necesaria. Después del proceso mecánico, el neodimio se magnetiza. Los imanes de neodimio son los imanes permanentes más fuertes del mercado. Además, este tipo de súper imán es resistente a cualquier tipo de desmagnetización por campos magnéticos externos.

Por otra parte, los imanes de cerámica o imanes de ferrita consisten esencialmente en ferrita de bario en polvo y ferrita de estroncio. Juntos, estos materiales se mezclan y se presan en diferentes formas. Después del proceso de prensado, la mezcla de polvo se dispara. No es necesario un procesamiento adicional de la superficie. Los imanes de ferrita son resistentes a la corrosión, incluso sin post tratamiento galvánico.

Para mejorar la capacidad del campo producido, los generadores síncronos traen incorporados imanes NIB de última generación. [5]

## Metodología

Esta investigación es un desarrollo no experimental cuantitativo, por un lado, no contempla la fabricación de prototipo del sistema para obtener datos. En vez de eso, se basa netamente en un desarrollo teórico que analiza el sistema de correas transportadoras para determinar la factibilidad de incorporar un sistema de medición del estado de los polines. Fabricando un modelo teórico que permita deducir si es posible integrar un sistema acoplado al polín, y la cantidad de energía que teóricamente generaría.

El enfoque que lleva esta investigación es mixto, la investigación parte de una idea para mejorar la eficiencia de un sistema en la minería actual, el cual es desarrollado secuencialmente hasta la obtención de los resultados y objetivos planteados, pero además deja abierta la posibilidad de ir cuestionando y generando nuevas hipótesis a medida que avanza la investigación, pudiendo ir realizando etapas de control para ir corrigiendo ciertos puntos de la investigación, ya sea revisando nuevamente la literatura o incorporando nuevos conocimientos dentro de la investigación.

Como no se realizará un experimento para obtener un set de datos, no se determina la forma de la muestra y todos sus otros parámetros. Pero si se tiene la población que se desea muestrear, los cuales son los polines en estado de falla que se muestran en la Figura 9.

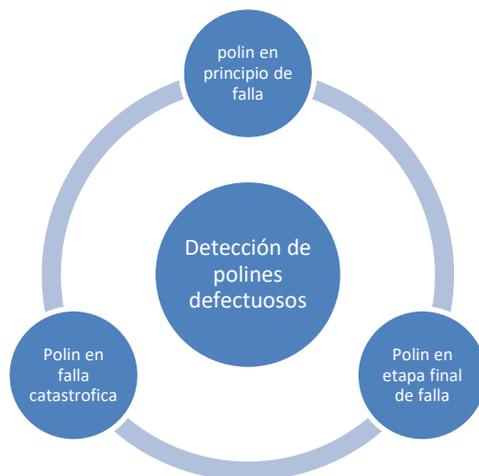


Figura 9: Población de polines defectuosos

Estos tres tipos de fallas detectadas en los polines corresponden a la población relevante considerada dentro de la investigación. Esto además tiene fundamento en gran cantidad de literatura, ya que como se mencionó, realizar una predicción sintomática del estado de los

polines es un tema relevante dentro de ámbito de la innovación, en este caso dando énfasis en aumentar la confiabilidad de los sistemas de correas transportadoras usadas en minería. En el marco de la investigación, esta es dirigida y orientada por profesionales de las áreas insertas en este campo, la que se sintetiza en la Figura 10.

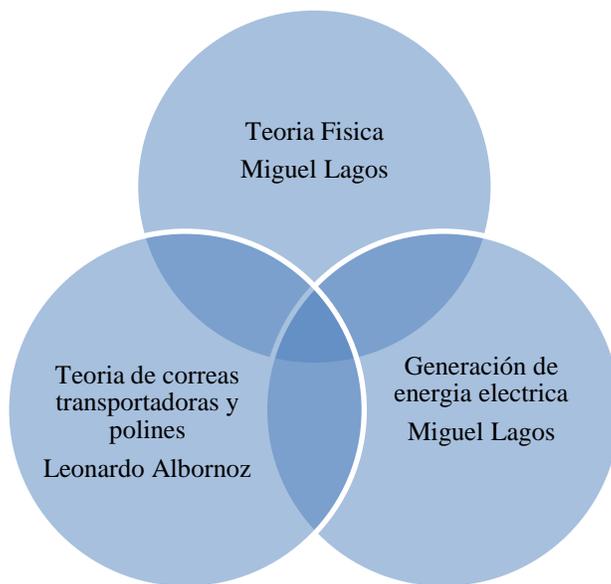


Figura 10: Pilar de investigación, elaboración propia

La forma de obtención de información es mediante el uso directo de estos profesionales, a través de reuniones de trabajo, obteniendo información de primera fuente, orientada a las tendencias actuales de la industria.

La información obtenida es analizada, filtrada y discutida tanto con profesor guía y co-guía para determinar la relevancia que tiene para la investigación.

Una vez determinada una expresión teórica que compruebe la factibilidad técnica de generar energía eléctrica, se utilizan los datos del proyecto de instalación de una correa transportadora en la mina “El tesoro” ubicada en la región de Antofagasta, la que actualmente opera como minera centinela de Antofagasta Minerals.

Por último, se realiza una representación del funcionamiento de un sistema de monitoreo de la vida útil de los polines de una cinta transportadora se utiliza el software de simulación de procesos ARENA.

## Resultados

### Cálculo de carga al sistema

El caso de estudio comprende al funcionamiento de una correa transportadora de mineral en condiciones estándar ideales. Por lo que este modelamiento de la situación queda abierto a mejoras ya que hay consideraciones que pudiesen estar quedando fuera del análisis físico. El estudio considera dos análisis teóricos de la situación. Primero se considera la correa transportadora en subida y luego en bajada, en el cual son consideradas todas las fuerzas que están presente en la situación a estudiar.

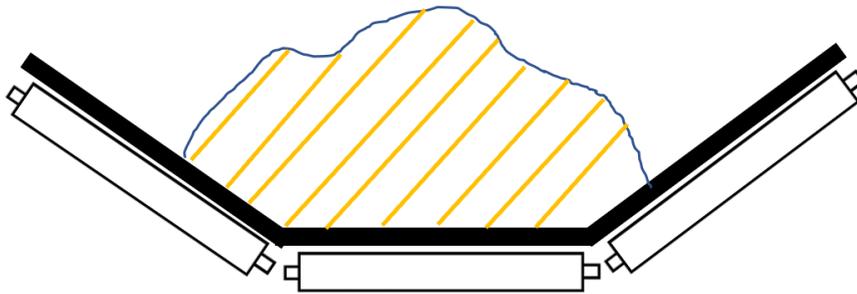


Figura 11: Vista frontal de correa transportadora de mineral

En el sistema de transporte mediante el uso de correas transportadoras el parámetro más relevante es la tensión de transporte con la que la correa trabaja. Donde este debe ser considerado a la hora de plantear un modelo teórico.

Un detalle importante previo a la modelación es analizar cómo es el esfuerzo de tensión al que está sometido la correa al transporta material, en el cual se plantea que la distribución de esfuerzos dentro de la correa es totalmente uniforme en cualquier punto de estudio del sistema

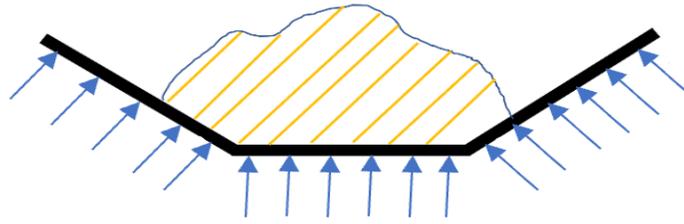


Figura 12: Distribución de esfuerzos en correa transportadora.

Este fenómeno se debe a las propiedades de la cinta transportadora que es capaz de distribuir la carga uniformemente, para evitar deformaciones plásticas dentro del material y también evitando que se formen esfuerzos de corte en la cinta. Los polines averiados que no giran son los causantes de dañar la cinta transportadora y afectar las propiedades de deformación natural del sistema.

Como la tensión de la correa se distribuye de manera uniforme dentro del sistema, se puede establecer un modelo teórico analizando linealmente el caso.

Consideraciones previas a la modelación teórica del caso de estudio:

- Peso de correa
- Flujo de alimentación de mineral
- Velocidad de la correa transportadora constante
- No es considerado factor de resistencia de la cinta ( $K_y$ )
- No es considerado factor de corrección por temperatura ( $K_t$ )
- No es considerado tensiones adicionales por acción de otros accesorios.

Para determinar la energía que se puede generar mediante los polines de una correa transportadora, se necesita poner la premisa que la energía siempre se conserva, en cualquier simetría diferenciable, proveniente de un sistema físico, tiene su correspondiente ley de conservación (Teorema de Noether). Por lo tanto, la carga eléctrica que se puede producir por un generador usando la velocidad de rotación de los polines es directamente proporcional a la potencia eléctrica del motor usado en el sistema de correa transportadora.

## Planteamiento teórico general del sistema

Para calcular la carga de energía que será posible generar usando la rotación de los polines, se necesita analizar la potencia eléctrica que entrega el motor del sistema de correa, ya que como se mencionó anteriormente está relacionada directamente con la cantidad de energía que se podrá generar con el uso de los polines. Por lo tanto, se plantea lo siguiente:

$$P = \frac{W}{T} \quad (1)$$

P = Potencia del sistema (Watt)

W = Trabajo realizado por el sistema (Nm)

T = Tiempo en el que se realiza el trabajo (s)

Analizando la ecuación, vemos que la potencia del sistema es equivalente al trabajo W realizado por el sistema en un determinado tiempo T. Pero se sabe que el trabajo de una fuerza que permanece constante en el tiempo se define:

$$W = FX \quad (2)$$

F = Fuerza empleada por el sistema en la dirección del desplazamiento (N)

X = Desplazamiento (m)

Combinando las ecuaciones (1) y (2), se obtiene que:

$$P_i = \frac{FX}{T} \quad (3)$$

Ahora, analizando la ecuación (3) en donde se muestra la relación entre distancia y tiempo, se puede suponer que una partícula de mineral va desde un punto  $x_0$  hasta un punto  $x_1$ , y se puede plantear de la siguiente manera:

$$P_i = \frac{F(x_1 - x_0)}{T}$$

$$P_i = \frac{F\Delta x}{t}$$

$$P_i = Fv \quad (4)$$

Esta última expresión obtenida corresponde a la potencia instantánea del sistema, como en este caso la velocidad  $v$  del sistema es constante y la fuerza con la que se mueve el mineral es constantes, la potencia se expresa de la siguiente forma:

$$P = Fv \quad (5)$$

Donde,

$P$ = Potencia del sistema (Watt)

$F$ = Fuerza aplicada por el sistema cte (N)

$v$ = velocidad del sistema cte (m/s)

Teniendo definido la ecuación (5), se analiza sus componentes donde la fuerza  $F$  surge de la segunda ley de Newton como:

$$F = \frac{d(Mv)}{dt} \quad (6)$$

Como la velocidad es una constante, la expresión (6) se puede escribir de la siguiente manera:

$$F = \frac{dM}{dt} v \quad (7)$$

El termino  $dM/dt$  es definido como  $\mu$ [Kg/s], reemplazando en la ecuación (7):

$$F = \frac{M}{t} v = \mu v \quad (8)$$

## Correa transportadora en subida

El primer planteamiento del funcionamiento del sistema es cuando la correa va subiendo carga de mineral.

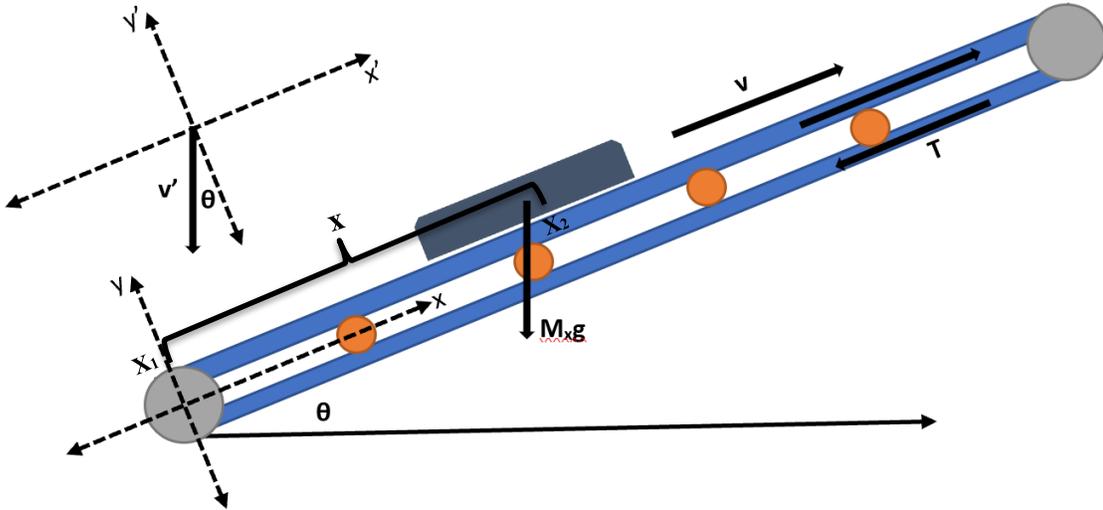


Figura 13: DCL correa transportadora subida.

$v'$  = Velocidad de descarga de mineral [m/s].

$v$  = Velocidad de mineral sobre la cinta transportadora [m/s].

$T$  = Tensión de la cinta transportadora [N].

$g$  = Aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ].

$R$  = Fuerza de Resistencia de los polines [N].

$n_x$  = Numero de polines por metro.

$M_x$  = Masa transportada [Kg].

$X$  = Desplazamiento [m].

$\mu$  = Flujo másico de mineral [Kg/s].

$\theta$  = ángulo de inclinación [grados].

$m_c$  = masa de la correa [kg].

Teniendo las variables que intervienen en el funcionamiento del sistema de correa, se analizan las fuerzas, aplicando la ley fundamental de la dinámica de un objeto o segunda ley de Newton:

$$\sum F = Ma,$$

Donde:

F = Fuerza [N]

M = Masa [Kg]

a = Aceleración [ $m^2/s$ ]

Ahora llevando esta ecuación a sus componentes vectoriales, se tiene lo siguiente:

$$\sum F_y = Ma_y = 0$$
$$\sum F_x = Ma_x$$

Para esta aplicación no existe aceleración o cambio de velocidad en el eje y, por lo tanto, la sumatoria de las fuerzas en este eje son iguales a cero, y no serán estudiadas ya que no aportan información útil para determinar la potencia entregada por el motor. Planteando la ecuación de fuerza para el eje x queda de la siguiente manera:

$$\sum F_x = T - (M_x + m_c X)g \sin \theta - F_r = \mu \Delta v_x \quad (9)$$

Teniendo la ecuación de fuerza planteada, cada término de esta se llevará a su expresión fundamental para que el análisis del sistema sea fácil de comprender y estudiar, la componente velocidad ( $\Delta v_x$ ), corresponde a la variación de velocidad que sufre un diferencial de masa, cuando pasa del estado de alimentación de mineral a ser transportado por la correa, expresado matemáticamente:

$$\Delta v = (v - v') \quad (10)$$

Al vector velocidad  $v'$  de la ecuación (10), se le debe calcular su componente en el eje x, que es la proyección de este vector en dicho eje, del esquema se obtiene que esta proyección corresponde a  $-v' \sin(\theta)$ , incorporándolo a la ecuación (10):

$$\Delta v = (v - (-v' \sin \theta))$$
$$\Delta v = (v + v' \sin \theta) \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (11)$$

Esta expresión corresponde a una sumatoria de velocidades,

Se debe obtener una expresión para el cálculo de la masa. Para esto se considera que el sistema es alimentado con un flujo de mineral  $\mu$  [Kg/s] el cual por el sistema de correas se

desplaza a una velocidad  $v$ [m/s] entre los puntos  $x_1$  y  $x_2$  recorriendo una distancia  $x$ [m] en un tiempo  $t$ [s]. Expresado matemáticamente:

$$\mu = \frac{\text{Masa transportada}}{\text{Tiempo}} = \frac{M_x \left[ \frac{Kg}{s} \right]}{t} \quad (12)$$

Ahora bien, podemos relacionar el tiempo con la velocidad y la distancia, mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{X \left[ \frac{m}{s} \right]}{t}$$

Despejando el tiempo en función de la distancia y la velocidad:

$$t = \frac{X}{v} [s] \quad (13)$$

Combinando las ecuaciones (12) y (13) se puede definir el flujo másico sin depender de la variable  $t$ , quedando de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{M_x}{\left[ \frac{X}{v} \right]} = \frac{(M_x v)}{X} \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

Despejando la masa de la ecuación:

$$M_x = \frac{\mu X}{v} [Kg] \quad (14)$$

Este diferencial de masa es transportado por la correa en una distancia  $x$ , con velocidad  $v$  aportado por un flujo másico  $\mu$ .

Por último, se teniendo en cuenta el principio de acción y reacción o tercera ley de Newton, se analiza el polín y cómo afecta al sistema:

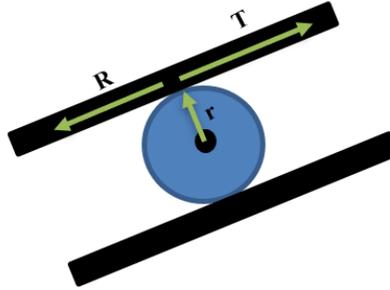


Figura 14: DCL Polín o Idler

Donde,

$r$  = Radio [m]

$R$  = Fuerza de Roce [N]

$T$  = Tensión [N]

La fuerza que interesa, es la fuerza de roce que aplica el polín al sistema, donde unitariamente la fuerza es  $R$ , expresado en forma matemática:

$$F_r = R$$

Incorporando que existen  $n$  polines por unidad de distancia  $x$  en una correa transportadora, la ecuación anterior queda con la siguiente forma:

$$F_r = Rnx \quad (15)$$

Ya habiendo analizado todos los componentes las ecuaciones, las ecuaciones (8), (11), (14) y (15) son incorporadas a la ecuación (9):

$$\sum F_x = T - \left(\frac{\mu}{v}x + m_c x\right) g \sin \theta - Rnx = \mu(v + v' \sin \theta)$$

$$T - \left(\frac{\mu}{v} + m_c\right) gx \sin \theta - Rnx = \mu(v + v' \sin \theta)$$

$$T - \left[\left(\frac{\mu}{v} + m_c\right) g \sin \theta + Rn\right] x = \mu(v + v' \sin \theta)$$

$$T = \mu(v + v' \sin \theta) + \left[\left(\frac{\mu}{v} + m_c\right) g \sin \theta + Rn\right] x \quad (16)$$

Por último, se encuentra una ecuación que representa las fuerzas del sistema, pudiendo despejar la fuerza más importante en el sistema que es la tensión de la correa, la ecuación (16) se reemplaza en la ecuación (5):

$$P = \left\{ \mu(v + v' \sin \theta) + \left[ \left( \frac{\mu}{v} + m_c \right) g \sin \theta + Rn \right] x \right\} v$$

$$P = \mu(v + v' \sin \theta)v + \left[ \left( \frac{\mu}{v} + m_c \right) g \sin \theta + Rn \right] xv \quad (17)$$

Esta ecuación (17) es fundamental para calcular la potencia suministrada por el motor al sistema de correa transportadora, con ella es posible determinar si el sistema es capaz de operar añadiendo una carga extra en los polines, para ellos se debe expresar el aporte de carga que aportara un polín. Se sabe que la potencia está definida por la ecuación (5):

$$P = Fv$$

Ahora bien, el polín experimenta 2 fuerzas, Tensión y Roce con la correa, lo que interesa es calcular el aporte de carga, por lo que tomamos en consideración la fuerza de roce que está definida por la ecuación (15), considerando  $n = 1$ ,  $x$  en este análisis corresponde a el radio del polín y la velocidad  $v$  corresponde a la velocidad angular que experimenta el polín, expresado matemáticamente:

$$P_{polin} = Rnxv = Rr\alpha \quad (18)$$

Pero la velocidad angular se puede definir mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\text{velocidad lineal}}{\text{radio}} = \frac{v_l}{r} = \frac{v}{r} \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (19)$$

Ahora reemplazando la ecuación (19) en la (18), se obtiene lo siguiente:

$$P_{polin} = Rr \frac{v}{r} = Rv \quad (20)$$

Despejando la fuerza de roce del polín:

$$R = \frac{P_{polin}}{v} [N] \quad (21)$$

Esta expresión se reemplaza en la ecuación (17),

$$P = \mu(v + v' \sin \theta)v + \left[ \left( \frac{\mu}{v} + m_c \right) g \sin \theta + \frac{P_{polin}}{v} n \right] xv$$

Despejando la diferencia entre potencia entregada por el motor y la potencia de carga impuesta por los polines se define la siguiente expresión:

$$[P_{motor} - P_{polin}nx] = \mu(v + v' \sin \theta)v + (\mu + m_c v)gx \sin \theta \quad (22)$$

Siendo esta la ecuación final, que permite analizar si la carga impuesta a los polines para generar energía no permite que la correa transportadora funcione normalmente.

### Correa de transporte en bajada

El siguiente caso de análisis es cuando la correa de transporte de mineral va en dirección de bajada, para ello se muestra el siguiente esquema:

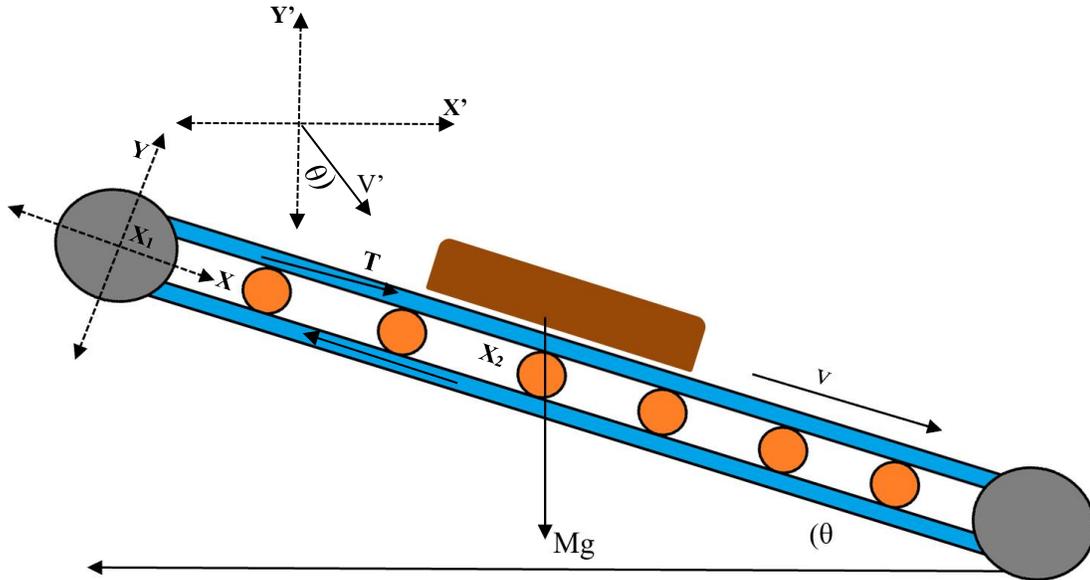


Figura 15: DCL correa transportadora bajada.

Se plantea las ecuaciones de fuerza para este sistema, que es muy similar a la ecuación (9), quedando expresada de la siguiente forma:

$$\sum F_x = T + (M_x + m_c x)g \sin \theta - F_r = \mu \Delta v_x \quad (23)$$

El cambio se contempla en dirección del vector peso  $Mg$ , en este caso la proyección sobre el eje  $X$  es positiva, las demás fuerzas permanecen igual que en la ecuación (9).

Otro cambio importante en este análisis es el cálculo de la variación de velocidad que en este caso queda expresado de la siguiente forma:

$$\Delta v = (v - (v' \sin \theta))$$

$$\Delta v = (v - v' \sin \theta) \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (24)$$

Como se puede apreciar, la proyección de la velocidad de alimentación sobre el eje X es positiva por lo que en la ecuación de variación de velocidad queda como la resta entre velocidad de transporte y la velocidad de alimentación. Por lo que combinando la ecuación (23) y (24) queda la siguiente expresión:

$$T = \mu(v - v' \sin \theta) - \left[ \left( \frac{\mu}{v} + m_c \right) g \sin \theta - Rn \right] x \quad (25)$$

A continuación, se aplica la ecuación para calcular la potencia:

$$P = \mu(v - v' \sin \theta)v - \left[ \left( \frac{\mu}{v} + m_c \right) g \sin \theta - Rn \right] xv \quad (26)$$

Por último, aplicando, el torque generado por el polín e incorporando la ecuación (21) en la ecuación (26), se obtiene la siguiente expresión:

$$P = \mu(v - v' \sin \theta)v - \left[ \left( \frac{\mu}{v} + m_c \right) g \sin \theta - \frac{P_{polín}}{v} n \right] xv \quad (27)$$

Ahora despejando la ecuación se obtiene la expresión para calcular la carga que impone al sistema de correa transportadora de mineral en bajada:

$$[P_{motor} - P_{polín}nx] = \mu(v - v' \sin \theta)v - (\mu + m_c v)gx \sin \theta \quad (28)$$

Siendo esta la ecuación que impone que el sistema no pueda funcionar de manera correcta en bajada.

Con estas ecuaciones finales tanto para la correa en subida, bajada o horizontal, se encontró una forma de cuantificar la potencia que es capaz de llegar a producir la rotación de los polines teóricamente. Realizando un análisis previo de la ecuación por la naturaleza de las fuentes primarias de energía mecánica que en este caso son potentes motores eléctricos en promedio de 350 kW o superiores no será significativo incorporar una carga adicional al sistema de correas transportadoras.

Para ilustrar se usan los datos de un sistema de correas transportadoras de la mina “El Tesoro”, la cual es el modelo Overland 400-CV-003 usada para transportar ripios lixiviados con un funcionamiento continuo 24 hrs, con una temperatura de funcionamiento oscilando entre 40°C y -1°C que corresponden a la máxima y mínima respectivamente y esta operación

se lleva a cabo a una altura geográfica de 2.200 msnm. Las características de la correa son los siguientes:

- Largo correa: 1.900 [m]
- Ancho correa: 1.067 [mm]
- Velocidad de la correa: 4,67 [m/s]
- Tensión nominal de correa: 800 [N/mm]
- Peso contrapeso: 168 [kN]
- Potencia motor eléctrico: 400 [kW]
- Capacidad de transporte 2.230 [tph]

Se indica que la potencia que debe tener el sistema de correa para transportar el ripio lixiviado es de 340 kW lo cual corresponde a un 85% de la potencia instalada. Llegado a obtener una potencia máxima de generación de 294,4 w, pero se debe considerar un factor de reducción por condiciones ideales de 40%

### **Cálculo de la energía generada.**

Para asegurar el funcionamiento continuo y aumentar la confiabilidad de la correa transportadora se implementa un dispositivo generador de energía que alimenta un sensor transformándolo en un detector de funcionamiento incorrecto de los polines autosustentable energéticamente, ya que no es alimentado externamente, sino que, se usa el giro de los polines para la generación propia de energía. El sistema generado contiene un devanado fijo, un par de imanes permanentes unidos en el lado interno en contra del devanado. El circuito de salida de energía eléctrica es conectado al sistema de detección de polines en mal estado. La generación de energía se produce cuando el devanado corta el campo magnético producido por los imanes. La ecuación que explica este fenómeno es:

$$e = NBlv \quad (29)$$

Donde:

e = Fuerza electromotriz inducida (Voltios).

N = Giros del embobinado del estator (n° de vueltas).

l = Longitud del embobinado(metros).

$B$  = Densidad de flujo del campo magnético (Webers/m<sup>2</sup> o Tesla).

$v$  = Velocidad de corte del campo magnético (m/s).

Por regla general, en generadores síncronos de imanes permanentes la velocidad lineal es convertida a velocidad angular (rad/s).

### Simulación Correa Transportadora software ARENA.

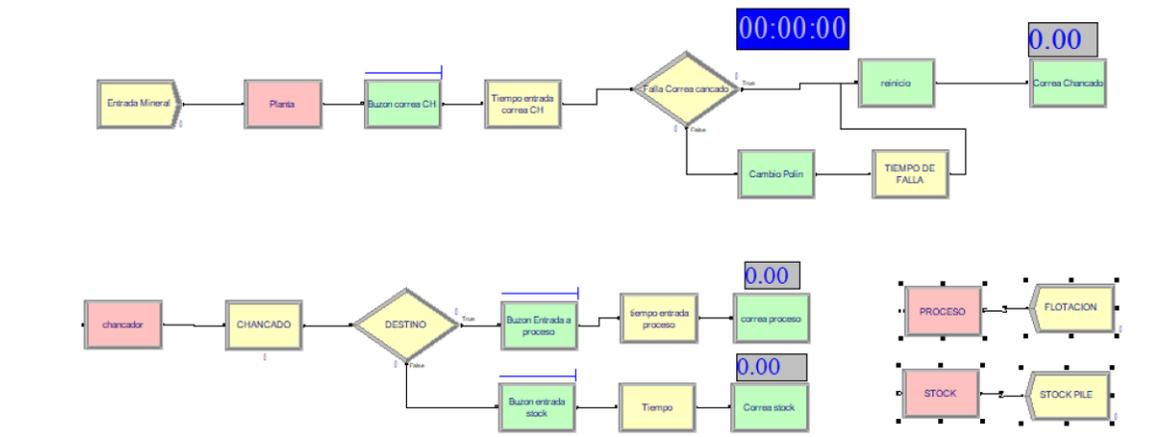


Figura 16: Estructura de modelo de simulación.

En la Figura 16 se muestra la disposición de los bloques utilizados en el software ARENA para simular el funcionamiento de tres correas transportadoras de mineral

- Correa principal de Chancado
- Correa planta Proceso
- Correa StockPile

Cada correa cuenta con distancias de transporte variables con el fin de analizar distintos escenarios de comportamiento. Misma situación se da en el ingreso de mineral, para permitir ver distintos grados de carga en los sistemas de transporte. Cada bloque de entrada cuenta con un retraso promedio de 30 segundos con una desviación estándar de 5 segundos, y los buzones de entrega de mineral a cada correa, también cuentan con un tiempo de espera promedio de 3 segundos y una desviación estándar de 1 segundo.

El sistema de simulación como se mencionó, cuenta con una correa principal o correa de chancado. La correa principal o correa de chancado se le induce una parada de emergencia

para el cambio de polines la cual tiene una probabilidad de ocurrencia de un 0,01%. Este porcentaje representa la baja frecuencia con la que se realiza una parada de sistema.

Los bloques que simulan una falla en la que se deben cambiar polines averiados, donde se pueden cambiar de 6, 10 y 15 polines, cada cambio de polines conlleva un tiempo de mantenimiento de 10 minutos, por ende, se tiene el siguiente recuadro de tiempo de mantenimiento:

Tabla 2. Input de tiempo empleado cambio de polín.

Tiempos de cambio de polines	
N° de Polines	Tiempo(min)
3	30
5	50
6	60

En un periodo de simulación de 5 días ocurren 6 paradas en promedio por cada detención de emergencia con un total de tiempo de parada de 250 minutos como media, los cuales corresponden a 4,16 horas de no utilización de la correa transportadora.

Con estos datos se analiza la criticidad del equipo calculando su confiabilidad. Donde la confiabilidad es la habilidad de un sistema o componente para desarrollar sus funciones en un tiempo establecido, esa decir es la probabilidad de que el sistema tenga éxito en desempeñar sus funciones en el tiempo establecido sin fallar.

Se calcula la confiabilidad del equipo mediante la siguiente formula:

$$TMEF = \frac{N^{\circ} \text{ total de horas analizadas} - \text{horas de correa detenida}}{N^{\circ} \text{ detenciones}} = 19,31 \text{ horas}$$

$$\text{Confiabilidad} = e^{-\left(\frac{\text{tiempo total cambio de polines}}{TMEF}\right)} = 80,6\%$$

Para el resto de los servidores que son Chancado, Proceso y StockPile significa déficit de cantidad de mineral, es decir la simulación muestra dos escenarios:

- a) El servidor StockPile no acumuló la cantidad necesaria de mineral, por lo que, el servidor Planta y el resto de las correas quedan inactivas por falta de mineral.
- b) El servidor StockPile acumuló la cantidad necesaria de mineral para complementar la alimentación del servidor Chancado hasta el reinicio de la correa principal.

Por esta situación, se hace evidente que las detenciones por cambio de polines en una correa de transporte en algún punto crítico, requiere una medida de control adicional con el fin de mejorar la confiabilidad del sistema de correas y disminuir costos de mantenimiento. A continuación, en la Figura 17 se muestran la disposición de los bloques utilizados en el software ARENA para simular la parada por cambio de polines.

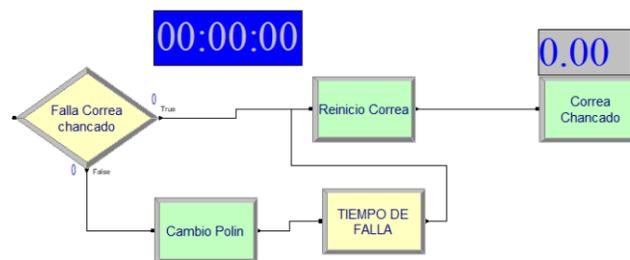


Figura 17: Condición cambio de polines.

Por esta razón a usar un bloque con la función de monitorear y reducir las intervenciones de mantenimiento programadas en un 30% en promedio ocurren 4 paradas en un periodo de tiempo de 5 días, con un tiempo de reparación de 130 minutos es decir 2,3 horas. Aplicando las fórmulas anteriores, da como resultado un 92,48% de confiabilidad. A continuación, en la Figura 18 se muestra la disposición de los bloques en ARENA para representar el monitoreo de los polines.

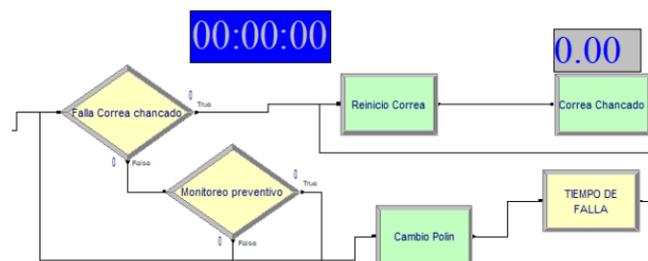


Figura 18: Condición para monitoreo de polines.

## Modelo de monitoreo de vida útil del Polín

Se crea una base de datos para albergar los valores de 4 generadores conectados a polines, los datos son generados de manera controlada y en ciertos periodos de tiempo se le induce una falla, lo que genera una conducta decreciente de los datos con el fin de representar la disminución constante en la generación de un polín dañado. Este modelo de una aplicación de monitoreo de polines permite la visualización de los datos de generación en un gráfico, una identificación de los polines asociados en la BD y por último una alerta del estado del polín. La visualización de los datos se construye en Exel, la cual se muestra en la Figura 19.



Figura 19: Visualizador de estado de polines.

Para esto se pobló con un set de 800 datos para cada generador de monitoreo sobre el estado del polín con desfases de tiempo, como se mencionó anteriormente se inducen fallas que provocan que la potencia de generación decreciera de manera sutil, con el fin de maximizar la vida útil del polín y tener control para planificar de manera preventiva en un momento oportuno para el cambio de los polines averiados, con esto no se afecta el estado de la banda de la correa, aumentando su confiabilidad y disminuyendo la cantidad de detenciones no programadas en correas críticas de transporte de mineral.

## Conclusiones

Para finalizar esta investigación se comienza mencionado los resultados obtenidos a lo largo de todo el trabajo de título.

Primero, se demostró que un sistema de correas de transporte de mineral puede mantener su funcionamiento normal al incorporar un sistema de monitoreo en los polines, para esto se planteó un modelo teórico físico-matemático que demostró que la carga administrada al incorporar un generador síncrono de imanes permanentes es despreciable comparada con la potencia que posee un motor de una cinta transportadora. Se usaron los datos de una correa transportadora Overland 400-CV [2] de 350[kW] de 1.900[m], la que produjo una potencia generada de 294[W] como máximo de generación. Se debe recordar que este dato es en condiciones ideales de funcionamiento por lo que se considera un factor de reducción 50%, obteniendo 147[kW] de potencia generada en cada polín. Por otro lado, se debe mencionar que hay zonas de velocidad dentro de un sistema de correas transportadoras por lo que la generación puede variar dependiendo de la zona en la que se esté midiendo y la carga de mineral que esté pasando por dicho lugar. Por lo tanto, es posible incorporar un sistema de monitoreo con base de medición en la generación eléctrica, el cual no impondrá una carga significativa a la potencia del motor, solo aumentará la potencia real utilizada de un 1 a 2% dependiendo de factores de diseño, tipo de carga, factores del terreno y tipo de correa a utilizar.

Segundo, utilizando el software de simulación ARENA, se diseña un sistema de correas transportadoras para dimensionar los tiempos muertos totales al presentarse una parada del sistema de correas para el cambio de polines y las implicancias que tiene en el resto del sistema. Para ello se usó una probabilidad de 0,01% de que ocurriera en un intervalo de tiempo, lo que trajo tiempos de detención de 1,3 horas en promedio, y generaba dos casos de ocurrencia frente a estas detenciones. La confiabilidad del equipo para este periodo de análisis es de 80,6%, por tanto, al agregar un sistema de monitoreo con la capacidad de reducir entre un 10% a un 20% la cantidad de paradas, el índice de confiabilidad del equipo aumenta en 11,88%. Lo que implica inmediatamente una disminución en los costos de mantenimiento y aumento de utilidad para la faena minera.

Por último, se diseña sistema para visualizar el comportamiento de la vida útil de un polín, con el fin de ver el comportamiento gráfico que debiese mostrar una vez se haya implementado el monitoreo a un sistema de correas transportadoras en condiciones de operación real. La gráfica posee un comportamiento constante en el inicio de la vida útil del polín en generación de energía, una vez llegado a cierto uso en el tiempo que vería dependiendo de factores de carga, ambientales, diseño entre otros, comienza a decrecer a un ritmo constante por lo que es muy práctico y fácil determinar que polines deben ser cambiados y cuales pueden seguir en funcionamiento.

En síntesis, esta investigación logra demostrar la factibilidad de generar energía usando los polines de las correas transportadoras para implementar un sistema de monitoreo de la vida útil de los polines de una correa transportadora. Además, de que existe la tecnología necesaria para complementar los procedimientos actuales de monitoreo de polines y el aumento de la confiabilidad de las correas transportadoras frente a paradas no programadas por cambios de polines en mal estado, aunque un polín en mal estado es considerada una reparación menor, puede traer como consecuencia un daño crítico sobre las cintas de los sistemas de transporte, la que implica a su vez un tiempo de reparación mayor, que en resumen es un costo mayor para la empresa. Y en estos tiempos de la industria minera chilena lo que se requiere es la reducción de costos dentro una faena minera.

El aporte de esta investigación es conectar con otras investigaciones, incorporando un nuevo método para la medición y monitoreo del estado de los polines, además de demostrar tras varias horas de simulaciones que un sistema monitor aumenta la confiabilidad de un sistema de transporte de mineral mediante cintas transportadoras, sobre todo si se trata de correas instaladas en zonas críticas de producción, disminuyendo significativamente las detenciones no programadas.

Para finalizar esta investigación y lograr cuantificar valores reales, este sistema de monitoreo en base a generadores síncronos de imanes permanentes debe ser instalado en alguna cinta transportadora, con el fin de obtener valores de generación de energía, bajo las condiciones reales de operación dentro de una faena minera. Por lo que, el contenido de esta investigación puede seguir siendo desarrollado por otro investigador y llevarla al nivel de aplicación en terreno, que se reconoce como el real desafío de cualquiera de los métodos de monitoreo de polines.

## Bibliografía

- [1] Young Jin Hwang, Min Cheol Ahn, Jiho Lee, Yong Soo Yoon, Ho Min Kim, Yoon Do Chung, Young-Sik Jo, Tae Jung Kim, and Tae Kuk Ko. (2014). Electromagnetic Design of a 15 MW-Class HTS Flux Switching Synchronous Generator Considering Mechanical Stress of the Rotor Core. Transactions on applied superconductivity, 24, 5. 2019, De IEEE Base de datos.
- [2] Frank Hochhaus, Jaro Kubic and Frank König. (2004). DEVICE FOR SENSING THE WEAR STATE OF WHEELS OR ROLLERS. United States Patent, 1, 5. 2019, De IEEE Base de datos.
- [3] Precision Pulley & Idler. (2008). Belt Conveyors for Bulk Materials. USA: CEMA Sexta Edición.
- [4] X. Liu, Y. Pang, G. Lodewijks, D. He. (2018). Experimental research on condition monitoring of belt conveyor idlers. Measurement, 1, 17. 2019, De Web of Science Base de datos.
- [5] A. Qui-ling Deng, B. Shoudao Hong and C. Feng Xiao. (2010). Influence of design parameters on cogging torque in directly driven permanent magnet synchronous wind generators. Electric and information engineering, 1, 5. 2019, De IEEE Base de datos.
- [6] CAD CAE Ingeniería Ltda. (2009). Estudio correa transportadora 400-CV-003 para operación reversible y extensión. MINERA EL TESORO, 1, 44. 2019, De MINERA EL TESORO Base de datos.