

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Profesor Patrocinante:  
Dr. Cristian Molina Vicuña

# **EVALUACION DE RIESGOS LABORALES MEDIANTE CALCULO DE ENERGIAS EN CORREAS DE TRASNPORTE**



**Rodrigo Flores Venegas**

Informe de Tesis

Magister en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Mecánica

mayo - 2020

## RESUMEN

El análisis de energías aplicado en una metodología de gestión de riesgos, trae ventajas como la detección temprana de peligros presentes en un equipo y la efectividad de los controles de seguridad. Los que pueden causar un daño hacia trabajadores que manipulen partes de los sistemas mecánicos de una máquina, en este caso, una correa transportadora. Esto es de suma relevancia, dado que las metodologías empleadas para prevenir peligros, están basadas en la experiencia de los operadores y de los encargados de seguridad en una planta. En este escenario, el cálculo de energías presentes en un sistema de correas de transporte (energía potencial, cinética, eléctrica, elástica, etc.), permite graficar un panorama completo de los procesos físicos que están llevando a cabo. Cuantificando la magnitud energética presente que se podría liberar provocando un accidente.

El objetivo principal de este proyecto es la propuesta de una metodología de gestión de riesgos basado en el análisis de energías. Los objetivos específicos son calcular el factor de probabilidad de ocurrencia de un accidente con métodos cuantitativos, entendiendo como accidente la liberación de un tipo de energía y cuantificar la efectividad de los controles de seguridad en base a la cantidad de energía capaz de disipar por parte de una barrera.

La metodología a emplear para alcanzar los objetivos se estructura en hacer una búsqueda bibliográfica o de antecedentes de accidentes en correas de transporte para construir un escenario de las energías presentes en los accidentes que ocurren en una correa. Posteriormente, se realiza un estudio de las horas hombre (HH) de exposición en una correa de transporte en base a los trabajos que se realicen sobre esta, esta tarea se realiza en cooperación con datos reales de una empresa de la gran minería en Chile.

Se estudia todo el funcionamiento del sistema de correa transportadora y se calculan todas las energías presentes, a fin de tener un escenario de la magnitud y el tipo de energías presentes, de esta forma se tienen todas las fuentes de peligro entendidas como liberación de energías sin control.

Para la accidentabilidad se utilizan los datos de accidentes en correas de transporte y se registra que componente de la correa tuvo relación con el accidente y las energías involucradas. Con estos datos se puede establecer por componente de la correa, la probabilidad de que se libere una forma de energía provocando un evento peligroso.

Por último, se revisan los controles de seguridad y se ponen a prueba mediante simulaciones numéricas la cantidad de energía capaz de contener de alguno de los controles encontrados, con esta estrategia se puede tener un control del riesgo residual que deja una barrera de control.

De los resultados de las energías presentes, la energía química destaca respecto de las demás dada su gran magnitud lo cual indica lo peligroso que puede llegar a ser un incendio en la correa. La energía térmica en un polín trabado por efecto del roce con la cinta es muy baja, sin embargo, tiene la capacidad de incendiar la correa por lo que resulta interesante generar controles sobre esta energía en polines a pesar de tener tan baja magnitud. Se encontraron energías vinculadas a casos de peligros no registrados anteriormente como la misma química, la energía elástica y la onda mecánica, las cuales tienen magnitudes altas y en el caso de las dos últimas, las formas de liberación son a través de cortes de correas que alivien las deformaciones elásticas de la cinta.

De los resultados de la probabilidad de ocurrencia de un accidente por liberación o traspaso de energía, los resultados son diferentes dependiendo de la componente de la cinta en que se haga el cálculo. Esto es esperable dado que hay energías de diferente naturaleza implicadas, no obstante, la energía elástico cinética, responsable de atrapamientos en los sistemas mecánicos se reitera en mayor medida que el resto por lo que es una energía de la cual se debe tener especial cuidado.

Como conclusiones, la energía térmica para generar un incendio es muy baja en comparación con la energía química, no obstante, ambas están relacionadas en lo que podría llegar a ser una catástrofe ya que la energía térmica puede llegar a liberar la energía química si se genera la combustión. La energía cinética y potencial gravitatoria están ligadas a los parámetros de operación y ubicación de los trabajos realizados respectivamente, por lo que la escala de riesgo puede variar en razón de las velocidades de operación y ubicación de las actividades de mantenimiento sobre la correa. Por otra parte, existen controles que no están documentados como extintores de incendios, sistemas de control de partida y frenado suave que requieren ser revisados para verificar su correcto funcionamiento y si son capaces de controlar los niveles de energía a los que se exponen los trabajadores.

La accidentabilidad del sistema se ha determinado en base a los accidentes registrados en el pasado, esto ayuda a tener una metodología cuantitativa para calcular la probabilidad de que una forma de energía se libere generando un accidente. Dejando de lado subjetividades por parte de los profesionales a cargo en esta etapa.

Respecto de la efectividad de las barreras de contención simuladas, estas no son suficientes en comparación de la energía total a la que se enfrentan, por lo que merece una revisión desde el punto de vista del diseño de éstas para disminuir los riesgos residuales.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Introducción .....	1
1.1. Marco teórico .....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Metodología.....	3
Proceso minero y selección de equipo .....	5
2.1. Diagrama de procesos y exposición.....	5
2.2 Selección de correa transportadora .....	6
2.3 Modelo simplificado de correa de transporte.....	7
Cálculo de energías presentes .....	9
3.1 Energía cinética.....	10
3.2.1 Energía cinética de la cinta .....	10
3.2.2 Energía cinética de la carga de mineral sobre la cinta .....	11
3.2.3 Energía cinética de los polines.....	11
3.2.4 Energía cinética de las poleas .....	13
3.2.4 Energía cinética en chute de descarga y alimentación.....	13
3.2 Energía eléctrica.....	14
3.2.1 Energía eléctrica de la unidad motriz.....	14
3.3 Energía gravitacional .....	15
3.3.1 Energía potencial gravitatoria en la cinta.....	15
3.3.2 Energía potencial gravitatoria de los polines, poleas y contrapeso.....	16
3.4 Energía química .....	16
3.4.1 Energía química de la cinta.....	17
3.5 Energía elástica .....	18
3.5.1 Energía elástica en la cinta.....	18
3.6 Energía de onda mecánica.....	23
3.6.1 Energía de onda mecánica de la cinta .....	23
3.7 Energía térmica .....	28
3.7.1 Energía térmica en los polines .....	29
Tareas y controles de seguridad .....	32
4.1 Tareas de mantenimiento y operación en la correa transportadora.....	32

4.2 Tiempo de exposición sobre equipos y actividades .....	33
4.3 Controles de seguridad.....	33
4.4 Factor de probabilidad .....	35
4.5 Cálculo del riesgo residual.....	37
Resultados y discusión.....	38
5.1 Gráficas de energías .....	38
5.1.1 Energía cinética.....	38
5.1.2 Energía eléctrica.....	39
5.1.3 Energía gravitacional .....	39
5.1.4 Energía química .....	41
5.1.5 Energía elástica .....	42
5.1.6 Energía de onda mecánica.....	43
5.1.7 Energía térmica .....	44
5.1.8 Energía totales.....	45
5.2 Tareas, energía y controles de seguridad .....	46
5.3 Energías y accidentabilidad .....	50
5.4 Riesgo residual.....	52
Conclusiones y perspectivas .....	57
6,1 Conclusiones .....	57
6,2 Perspectivas.....	58
Referencias.....	59
ANEXO.....	61

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de Reason (Reason, 2000).....	1
Figura 2. Trabajadores fallecidos en minería desde el 2015 al 2019. (Sernageomin, 2019).....	2
Figura 3. Diagrama de procesos de extracción y transporte de mineral. ....	5
Figura 4. Esquema lateral de correa transportadora.....	6
Figura 5. Esquema del sistema tensor de la correa. ....	7
Figura 6. Modelo simplificado de la correa transportadora. ....	8
Figura 7. Definición del largo entre cola y cabeza de una correa. ....	11
Figura 8. Componentes de una polea. Adaptado de (CEMA, 2007). ....	13
Figura 9. Perfil de alturas considerado en el cálculo de energía potencial gravitatoria.....	15
Figura 10. Tensión sobre la cinta. Adaptado de (CEMA, 2007). ....	19
Figura 11. Modelo simplificado de la tensión sobre la cinta. ....	21
Figura 12. Tensiones en la polea motriz. Adaptado de (CEMA, 2007).....	22
Figura 13. Representación unidimensional de la cinta. ....	24
Figura 14. Perfil de velocidad de la cinta en un periodo de partida. Adaptado de (He, Pang, Lodewijks, & Liu, 2018).....	24
Figura 15. Velocidad de la cinta para diferentes configuraciones de correa. ....	26
Figura 16. Relación entre la energía de onda mecánica y la aceleración media en la partida para distintos largos de correa. ....	27
Figura 17. Diagrama de niveles de energía para una reacción exotérmica.....	29
Figura 18. Subunidad de caucho estireno-butadieno (SBR).....	29
Figura 19. Hendidura del polín sobre la cinta. Adaptado de (Drenkelford, 2015). ....	30
Figura 20. Cilindros paralelos en contacto elástico. Adaptado de (Bhushan, 2001). ....	30
Figura 21. Matriz de probabilidad de ocurrencia. (Estandar australiano AS/NZS 4360, 1999).....	36
Figura 22. Barrera de contención de reja soldada.....	37
Figura 23. Energía cinética en el sistema de correa transportadora.....	38
Figura 24. Energía eléctrica en el sistema de correa transportadora.....	39
Figura 25. Modelo simplificado dividido en secciones de acuerdo con el perfil de alturas. ....	40
Figura 26. Energía gravitacional en el sistema de correa de transporte.....	41
Figura 27. Energía química en el sistema de correa transportadora. ....	42
Figura 28. Energía elástica en el sistema de correa transportadora. ....	43
Figura 29. Energía de onda mecánica en el sistema de correa transportadora.....	44
Figura 30. Energía térmica en el sistema de correa transportadora. ....	45
Figura 31. Energías totales en el sistema de correa transportadora. ....	45
Figura 32. Modelo computacional y tipo de elementos utilizados. ....	53
Figura 33. Esfuerzo equivalente máximo para casos de carga distribuida al centro y carga distribuida en toda la malla. ....	54
Figura 34. Esfuerzo equivalente máximo para casos de carga distribuida lateral y carga puntual al centro de la malla. ....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de correa transportadora .....	6
Tabla 2. Tipos de energía.....	9
Tabla 3. Clasificación CEMA para polines. ....	12
Tabla 4. Momento de inercia típico de un polín de carga ( $lb \cdot in^2$ ).....	12
Tabla 5. Factores de masa lineal para diferentes cables de acero trenzados.....	17
Tabla 6. Coeficientes de relleno para diferentes cables de acero trenzados. ....	20
Tabla 7. Módulos de elasticidad para diferentes cables de acero trenzados. ....	20
Tabla 8. Rendimiento mecánico mínimo para motores clase IE3 (rendimiento <i>premium</i> , obligatoria desde 2015 en la UE) de acuerdo con IEC 60034-30-1. ....	22
Tabla 9. Módulo de elasticidad para diferentes cintas <i>Flexsteel</i> de Goodyear. ....	25
Tabla 10. Fuente de ignición de incendios de correa 1980 – 2005. ....	28
Tabla 11. Propiedades elásticas del acero y del caucho estireno-butadieno (SBR). †.....	31
Tabla 12. Porcentaje de HH invertidas en las distintas actividades sobre la correa transportadora. ....	32
Tabla 13. Horas hombre (HH, en porcentaje) por subsistema de la correa transportadora. ....	33
Tabla 14. Tabla de frecuencia de accidentes. (V. Kecojevic, 2008).....	36
Tabla 15. Tabla de probabilidad de ocurrencia. (V. Kecojevic, 2008).....	36
Tabla 16. Matriz de probabilidad de ocurrencia de un accidente (V. Kecojevic, 2008).....	37
Tabla 17. Condiciones de operación para el cálculo de energía cinética.....	38
Tabla 18. Condiciones de operación para el cálculo de energía eléctrica.....	39
Tabla 19. Largos y alturas por tramo de la correa CT-238.....	40
Tabla 20. Características de la cinta.....	41
Tabla 21. Características de operación y diseño de la cinta.....	42
Tabla 22. Energía total por subsistema de la correa transportadora. ....	46
Tabla 23. Resumen de energías totales en el sistema de correa de transporte.....	46
Tabla 24. Tareas sin controles asociados a la energía elástica.....	46
Tabla 25. Tareas sin controles asociados a la energía de onda mecánica. ....	48
Tabla 26. Tareas sin controles asociados a la energía química.....	48
Tabla 27. Tareas sin controles asociados a la energía térmica.....	49
Tabla 28. Probabilidad de ocurrencia y frecuencia de accidentes en la cinta por energía en Cinta. ....	50
Tabla 29. Matriz de probabilidad de ocurrencia de accidentes por energía para Cinta. ....	51
Tabla 30. Probabilidad de ocurrencia y frecuencia de accidentes en la cinta por energía en Poleas.....	51
Tabla 31. Matriz de probabilidad de ocurrencia de accidentes por energía para Poleas. ....	52
Tabla 32. Escala de colores propuesta .....	52
Tabla 33. Propiedades mecánicas de acero SAE 1020. ....	53
Tabla 34. Resultados de energía de deformación simulada. ....	55
Tabla 35. Energía presente por operación en la Cinta del sistema de correa transportadora.....	55
Tabla 36. Controles asociados a las tareas y energías en la correa de transporte .....	61

## NOMENCLATURA

HH	: horas hombre [h]
$d_{sc}$	: diámetro nominal del cable de acero [m]
$E$	: energía [J]
$g$	: aceleración estándar debida a la gravedad ( $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ )
$h$	: altura [m]
HV	: poder calorífico [J/kg]
$I$	: momento de inercia [ $kg \text{ m}^2$ ]
$L$	: distancia entre cola y cabeza de la correa [m]
$m$	: masa [kg]
$n$	: número de cables de acero de la cinta
$P$	: potencia [W]
$Q$	: capacidad de carga [kg/s]
$r$	: radio [m]
$t$	: tiempo [s]
$v$	: velocidad [v]
$W$	: factor de masa lineal del cable de acero [ $kg/m^3$ ]
$W_b$	: peso por metro de la cinta [kg/m]
$W_{sc}$	: peso por metro de los cables de acero [kg/m]
$\epsilon$	: fracción del peso de la cinta que corresponde a caucho [–]
$\varepsilon$	: deformación [–]
$\omega$	: velocidad angular [rad/s]
$\sigma$	: esfuerzo [Pa]





# CAPÍTULO 1

## Introducción

### 1.1.Marco teórico

En los procesos industriales donde coexisten máquinas y operadores, los accidentes asociados a actividades propias del trabajo son eventos que se desean reducir a cero. Sin embargo, aún en la actualidad ocurren situaciones de riesgo, donde los actores vinculados a que ocurran accidentes con consecuencias leves, graves o fatales son: la organización, las tareas mal planificadas, el grupo de personas a cargo o fallas en las barreras físicas que tiene cada equipo para minimizar el riesgo. En el mismo orden se puede esquematizar lo dicho anteriormente como se ve en la Figura 1 con el modelo que queso o de Reason (Reason, 2000), el cual plantea que cuando todas las partes mencionadas fallan ante un peligro, se produce un accidente.



Figura 1. Modelo de Reason (Reason, 2000).

Para manejar los riesgos en faena de trabajo, es necesario identificar los peligros, recopilar antecedentes de la empresa, elaborar un perfil de los trabajadores y establecer la normativa aplicable en el país. Con esa información, una empresa puede intervenir cualquiera de las “láminas de queso” mostradas a fin de hacer prevención de riesgos y mitigar los peligros que existen en el trabajo. Ya sea con capacitaciones, uso de elementos de protección personal, creación de protocolos de seguridad, elaboración de perfiles de trabajadores aptos para un determinado puesto de trabajo, instalación de barreras físicas de protección, señalética adecuada y cualquier otra metodología aplicable para evitar situaciones de riesgo.

En la industria minera, donde se manejan procesos con maquinaria pesada, los accidentes pueden llegar a ser fatales, por lo que es necesario identificar las potenciales fuentes de peligro para reducir al mínimo los riesgos. Dentro de los accidentes registrados entre el 2017 y 2019 (Sernageomin, 2019):

- Electrocución por reparación en torre eléctrica con cable de tierra cortado.
- Golpeado por roca de gran tamaño y aplastado posteriormente al colocar carga explosiva.

- Brazo de levante del alza hombre desciende sin control golpeando al trabajador con la misma estructura.
- Aplastamiento por deslizamiento de material en labores de limpieza.
- Caída desde altura por saltar la barrera de seguridad.
- Aplastamiento por rollos de HDPE por mala sujeción de los rollos en el camión en transporte y posicionamiento del trabajador en una zona insegura como la plataforma del camión junto a los rollos.
- Colisión de camiones por conducción a exceso de velocidad, no uso de cinturón de seguridad, cruce del eje central no demarcado.
- Colapso de terreno en una mina subterránea en explotación cercana al borde de una laguna, inundando zonas de trabajo atrapando a 2 trabajadores.
- Desprendimiento de un bloque de roca (planchón) en labores de perforación en la boca de la mina, cayendo sobre el ayudante perforista provocando su posterior deceso.

Por otra parte, uno de los desastres más grandes en la minería ocurre un 28 de marzo de 1965 con el colapso del relave minero “El Cobre” localidad del Melón en la V región. Más de 350 personas murieron y cientos de kilómetros fueron contaminados producto de los desechos tóxicos de la industria minera (CTCPRENSA, 2016).

La tragedia minera metalífera más grande del mundo, que dejó 355 trabajadores mineros muertos en la mina Sewell, actual división El Teniente de Codelco producto de una explosión al interior de la mina (Federación Minera de Chile, 2017).

Por otra parte, desde el 2015 al 2019 los trabajadores fallecidos clasificados según la categoría de la empresa mandante se muestran en la Figura 2 (Sernageomin, 2019):

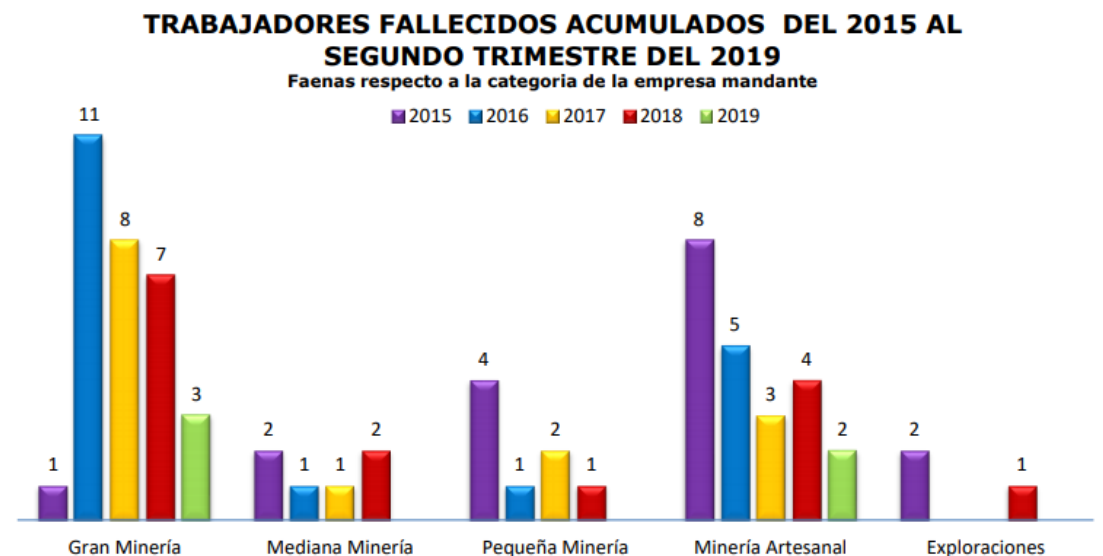


Figura 2. Trabajadores fallecidos en minería desde el 2015 al 2019. (Sernageomin, 2019)

Donde si bien los números son favorables, se exige una mejora continua donde la meta es reducir el número de fallecidos a cero en el periodo de un año.

Como se mencionó anteriormente, es necesario reconocer las fuentes de peligro existentes en una faena, esto se realiza a través de los antecedentes de accidentes en una empresa, de la experiencia de los operadores, prevencionistas de riesgo y todo aquel que esté involucrado con el proceso que se lleve a cabo. Es aquí donde se plantea un nuevo método que aporte información para la detección de fuentes de peligro, realizando un estudio de las energías presentes en un sistema, máquina o procedimiento, de esta forma, se puede tener una idea gráfica de las zonas de alta energía que podrían considerarse como zonas de mayor riesgo dado que la energía presente se podría ser liberada y/o traspasada a una persona.

## 1.2. Objetivos

Proponer una metodología para la generación de matrices de riesgo basado en el cálculo de energía para la gestión de riesgos laborales.

Además, como objetivos específicos:

Generar nuevo método para identificar peligros existentes en base las energías presentes en un sistema de correas transportadoras.

Calcular el factor de probabilidad de ocurrencia de un accidente con métodos cuantitativos.

Cuantificar la efectividad de los controles de seguridad en base a la cantidad de energía capaz de disipar por parte de una barrera.



## 1.3. Metodología

En primera etapa se caracteriza todo el proceso minero desde la explotación del mineral en la zona de tronadura, hasta el carguío del producto final como electrodo o concentrado de cobre. Esto es importante para tener un mapa de las labores realizadas a nivel general en una mina, con lo cual se puede visualizar en qué proceso se invierten una mayor cantidad de horas hombre y por tanto se podría concluir que tiene una mayor probabilidad de que ocurra un accidente con consecuencias para los trabajadores.

Posteriormente con información brindada por una empresa de minería, se cuantifican las horas hombre sobre todos los equipos según las horas de trabajo reales registradas por cada trabajo realizado. Con esto se define el equipo con el que se ha de trabajar el cálculo de energías.

Se selecciona un equipo en particular y se identifican las energías presentes según el mecanismo de funcionamiento, los materiales presentes y las ubicaciones geográficas de los elementos del equipo.

Con cada energía reconocida, se realiza el cálculo correspondiente, para en etapas finales del proceso de gestión calcular la energía remanente al implementar un control de seguridad, por ejemplo, una barrera de contención. De esta forma se puede aportar en la gestión de riesgos laborales asociando controles de seguridad para mitigar el peligro de cada una de las energías. De igual forma, queda en evidencia cuando hace existe algún tipo de energía sin control.

Para el cálculo de accidentabilidad, se buscan datos de accidentes en correas transportadoras y se anota el tipo de energía liberada en dicho evento. Para identificar en cada parte del equipo, el nivel de plausibilidad de un accidente proveniente de la liberación de una energía.

Por último, para el cálculo del riesgo residual. Se toma un posible evento peligroso y su medida de mitigación y se pone a prueba mediante simulaciones computacionales el comportamiento de la barrera y la cantidad de energía que podría disipar debido a deformaciones, si la energía disipada es mayor a la energía disponible entonces se entenderá que la barrera tiene una efectividad de un 100%, por otra parte si la energía disipada es inferior a la disponible entonces se tendrá un riesgo residual asociado a la magnitud de energía que puede traspasar las barreras.

De esta forma se abordan 3 tópicos relativos a la gestión de riesgos mediante matrices de riesgos, partiendo de la identificación de peligros, el nivel de accidentabilidad y el cálculo de riesgo residual cuantitativo.



## CAPÍTULO 2

### Proceso minero y selección de equipo

#### 2.1. Diagrama de procesos y exposición

Se estudia todo el proceso minero disponible en el manual de minería chilena y se elabora un diagrama de bloques, el cual muestre cada etapa en la extracción y transporte de mineral de cobre. Tal como se aprecia en la Figura 3.

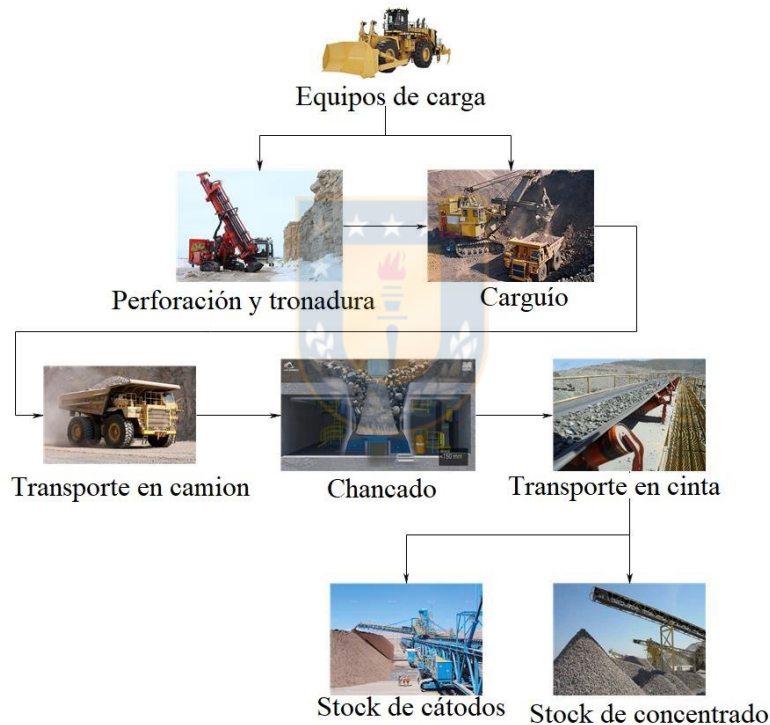


Figura 3. Diagrama de procesos de extracción y transporte de mineral.

Los niveles más altos de exposición en horas hombre, se encuentran en la zona de “chancado” y “transporte en cinta” de mineral con 26.500 horas y 32.993 horas respectivamente, por esta razón se selecciona este último proceso para hacer el estudio de energías. El siguiente paso es seleccionar una correa en particular de interés en todo el proceso ya que en toda la línea de transporte se tiene una gran cantidad de cintas.

## 2.2 Selección de correa transportadora

Se solicitaron diferentes planos de correas de los cuales se selecciona una correa de interés, con la cual se cubren todas las posibles configuraciones más típicas y que puedan mostrar el potencial que tiene este estudio en materia de prevención y seguridad laboral.

Las características de la correa seleccionada se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Características de correa transportadora

<b>Distancia entre poleas [m]</b>	<b>1930</b>
<b>Ancho [m]</b>	1,844
<b>N° de cables</b>	95
<b>Masa polea [kg]</b>	300
<b>Clase de polines (CEMA)</b>	F6
<b>Sist. tensor [kgf]</b>	88.775,51
<b>Masa de cinta lineal [kg/m]</b>	37,8
<b>Tensión máxima [kN]</b>	1.080
<b>Tensión mínima [kN]</b>	435
<b>Diámetro de cables [m]</b>	0.01

Esta correa posee una geometría con secciones a nivel del suelo como también en elevación, en la Figura 4 se muestran algunas de las zonas que se han de considerar en la simplificación del modelo para el cálculo de energías.

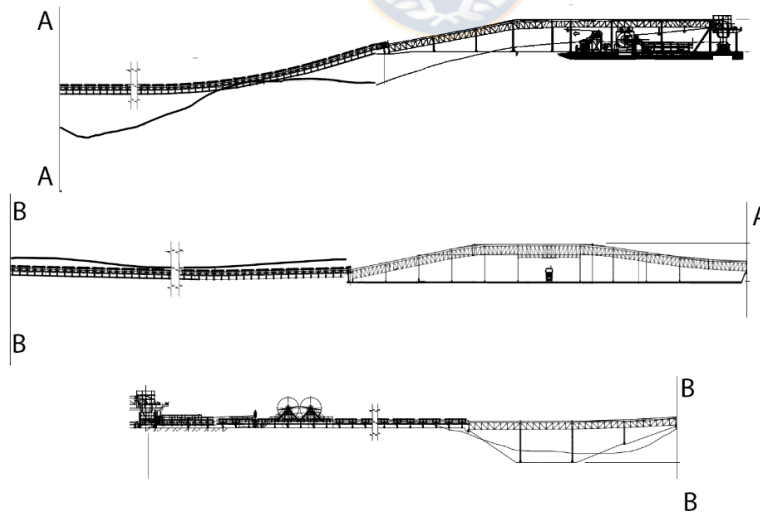


Figura 4. Esquema lateral de correa transportadora.

Esta correa al tener una extensión de 1.98 [km] de largo, secciones en altura y en su gran mayoría tramos a nivel del suelo, ofrece la posibilidad de graficar los efectos de los cambios de cota ante posibles caídas

desde distintos niveles para trabajos que se encuentren en estas partes de la cinta. Adicionalmente, el sistema tensor se compone de un contrapeso gravitacional como se muestra en la Figura 5.

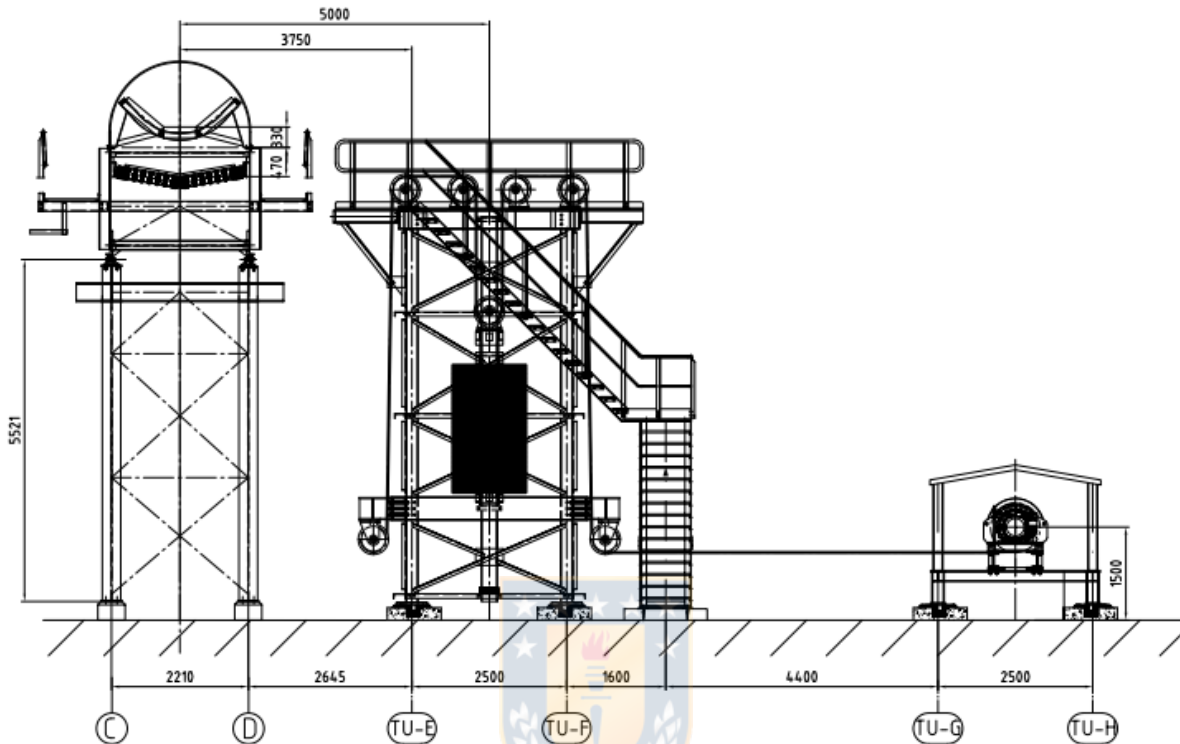


Figura 5. Esquema del sistema tensor de la correa.

### 2.3 Modelo simplificado de correa de transporte

Para realizar un modelo simplificado de la correa donde se puedan ilustrar los niveles de energía, se identifican los componentes más importantes de una correa transportadora, la cual posee los siguientes elementos:

- **Cinta de caucho con cables de acero:** Sobre la cual se deposita el mineral transportado y es trasladado de un punto a otro, consta de 95 cables de acero en su interior con un diámetro de 0.8 cm cada uno.
- **Polines de carga y de retorno:** Sobre éstos corre la cinta con el mineral. Como sus nombres lo indican los polines de carga están en contacto con la cinta cargada y los polines de retorno llevan la cinta de vuelta al punto de alimentación.
- **Polea motriz:** Aquella que traspasa el torque motriz hacia la cinta para transportar el material.
- **Polea de cola:** Polea que se encuentra en la parte trasera del sistema de correa de transporte donde se encuentra el punto de alimentación de mineral en la correa.
- **Polea de punta:** Polea que se encuentra en la parte delantera del sistema de correa de transporte donde se encuentra el punto de descarga del mineral de la correa.

- **Sistema tensor:** Este componente entrega la tensión inicial a la cinta para aumentar la fuerza de roce entre las poleas y la cinta. Dicho sistema se compone de un carro tensor el cual es forzado mediante un sistema motor y un contrapeso gravitacional el cual entrega una fuerza equivalente al peso propio de una masa colgante.
- **Chute de alimentación:** Corresponde a un depósito con flujo de mineral donde se encuentra el material que es depositado sobre la correa para ser transportado.
- **Chute de descarga:** Depósito de mineral donde la correa descarga el material transportado, se ubica en la punta de la correa de transporte.
- **Unidad motriz:** Sistema de motor-reductor, el cual entrega el trabajo necesario para mover la cinta con carga sobre ella.

Con esto, se elabora un modelo sencillo sobre el cual se muestran los niveles de energía presentes en cada componente como se muestra en la Figura 6.

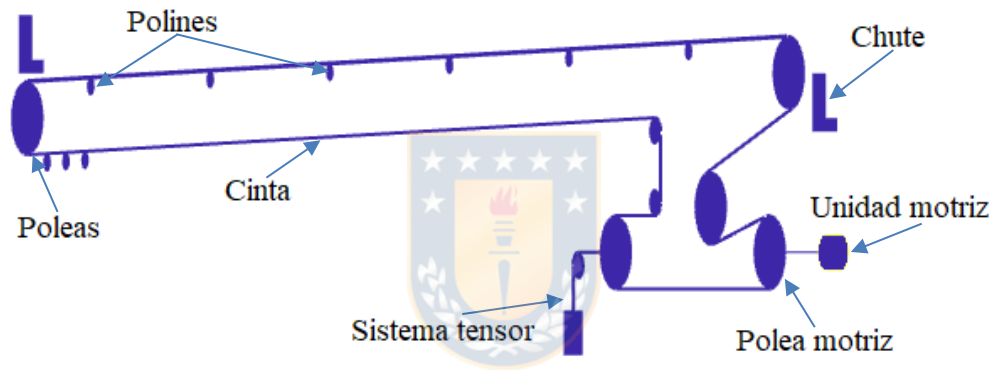


Figura 6. Modelo simplificado de la correa transportadora.



## CAPÍTULO 3

### Cálculo de energías presentes

La energía total de un sistema puede subdividirse y clasificarse en energía potencial, cinética o una combinación de estas. La *energía cinética* es determinada por el movimiento de un objeto y la *energía potencial* refleja el potencial de un objeto a moverse.

Si bien estas categorías son suficientes para describir todas las formas de energía, usualmente es conveniente referirse a alguna combinación particular de energía potencial y cinética como una energía propia.

Algunas formas de energía que puede tener un objeto o sistema como una propiedad medible están resumidas en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de energía.

Tipo de energía	Descripción
Cinética	Por antonomasia, la energía cinética traslacional y rotacional de cuerpos macroscópicos
Eléctrica	Energía potencial debido a o almacenada en campos eléctricos
Magnética	Energía potencial debido a o almacenada en campos magnéticos
Gravitacional	Energía potencial debido a o almacenada en campos gravitacionales
Química	Energía potencial debido a los enlaces químicos
De ionización	Energía potencial que une los electrones a su átomo o molécula
Nuclear	Energía potencial que une los nucleones para formar núcleos atómicos
Cromodinámica	Energía potencial que une los quarks para formar hadrones
Elástica	Energía potencial debido a la deformación de un material
De onda mecánica	Energía potencial y cinética de un material elástico debido a la propagación de una onda mecánica
De onda sonora	Energía potencial y cinética de un fluido debido a la propagación de una onda sonora (una forma particular de onda mecánica)
Radiante	Energía potencial almacenada en los campos de radiación electromagnética
En reposo	Energía potencial debido a la masa en reposo de un objeto
Térmica	Energía cinética del movimiento microscópico de las partículas, una forma equivalente de energía mecánica
(Energy, 2018)	

En los sistemas de correas transportadoras es posible encontrar diferentes energías que se manifiestan de distintas maneras. En este estudio son de particular interés las siguientes formas de energía:

- Energía cinética
- Energía eléctrica

- Energía gravitacional
- Energía química
- Energía elástica
- Energía de onda mecánica
- Energía térmica

Cada una de estas energías puede calcularse a partir de parámetros de diseño de la correa transportadora y datos de operación.

### 3.1 Energía cinética

La energía cinética es la energía que posee un cuerpo debido a su movimiento y es definido como el trabajo requerido para acelerarlo desde el reposo hasta cierta velocidad.

En mecánica clásica, la *energía cinética traslacional*, la que está asociada al movimiento rectilíneo de un cuerpo rígido de masa constante  $m$ , cuyo centro de masa se mueve en línea recta con velocidad  $v$ , es igual a

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Si un cuerpo rígido rota alrededor de cualquier eje que pasa a través de su centro de masa, entonces tiene *energía cinética rotacional* igual a

$$E_c = \frac{1}{2}I\omega^2$$

Donde  $I$  es el momento de inercia del cuerpo y  $\omega$  es la velocidad angular del cuerpo.

En este caso de estudio, la energía cinética se presenta con el movimiento de la cinta, del mineral sobre la correa y en los chutes y con la rotación de las poleas y los polines.

#### 3.2.1 Energía cinética de la cinta

La velocidad recomendada para la cinta depende del mineral a ser transportado junto con el ancho de la cinta, la capacidad, la tensión y el equipamiento de carga y descarga. Todos estos aspectos son evaluados en cada aplicación, considerando también el coste de capital, las condiciones de operación y las consideraciones de mantenimiento (CEMA, 2007). Distintos sensores de velocidad (*encoder*) permiten determinar la velocidad real de la correa  $v_b$ .

El peso por metro de la cinta  $W_b$  puede obtenerse de las especificaciones del fabricante. El largo total de la cinta usualmente puede aproximarse como dos veces la distancia entre cola y cabeza de la correa  $L$  mostrada en la Figura 7.

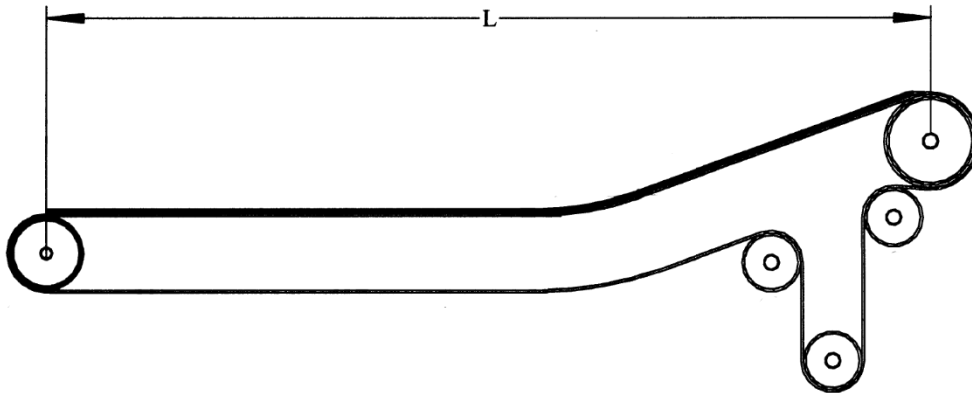


Figura 7. Definición del largo entre cola y cabeza de una correa.

De esta manera, la energía cinética de la cinta está dada por:

$$E_{c,b} = W_b L v_b^2$$

### 3.2.2 Energía cinética de la carga de mineral sobre la cinta

La capacidad de carga  $Q$  de un sistema de correa transportadora es la cantidad de material que mueve por unidad de tiempo. La capacidad real en operación suele ser menor a la capacidad de diseño para poder adaptarse a las cargas de sobretensión y para reducir los derrames y fugas debido a posibles desalineamientos (CEMA, 2007).

Por otra parte, la longitud cargada de mineral sobre la correa  $L_m$  varía entre 0 y la longitud de la correa entre cola y cabeza  $L$ .

Para esta aplicación, se asume que la longitud cargada de mineral coincide con la longitud de la correa, de esta manera, la energía cinética de la carga de mineral sobre la cinta se calcula como

$$E_{c,m} = \frac{1}{2} Q L v_b^2$$

### 3.2.3 Energía cinética de los polines

Existen dos tipos básicos de polines: polines de carga, que apoyan la cinta por su lado cargado y los polines de retorno, que la apoyan por su lado vacío. Idealmente, la velocidad de rotación para estos elementos depende únicamente de la velocidad de la cinta  $v_b$ , sin embargo, la acumulación de material en las estaciones de polines o un mal alineamiento puede interferir en su rotación.

En cualquier caso, se considerará la energía cinética de un polín como aquella dada por

$$E_{c,i} = \frac{I_i}{2r_i^2} v_b^2$$

Donde  $I_i$  es el momento de inercia del polín y  $r_i$  es el radio del polín.

El radio y el momento de inercia del polín pueden estimarse a partir de la clase de polín de acuerdo con la clasificación CEMA. La clase del polín se selecciona en el diseño de una correa transportadora según

el tipo de servicio, las condiciones de operación, la carga transportada y la velocidad de la correa. La Tabla 3 resume esta clasificación.

Tabla 3. Clasificación CEMA para polines.

Clasificación	Diámetro (in)	Ancho de correa (in)
B4	4	18 – 48
B5	5	18 – 48
C4	4	18 – 60
C5	5	18 – 60
C6	6	24 – 60
D5	5	24 – 72
D6	6	24 – 72
E6	6	36 – 96
E7	7	36 – 96
F6	6	60 – 96
F7	7	60 – 96
F8	8	60 – 96

(CEMA, 2007)

La Tabla 4 muestra los momentos de inercia según clasificación del polín y ancho de correa para los polines de carga.

Tabla 4. Momento de inercia típico de un polín de carga ( $lb \cdot in^2$ )

Ancho de la correa (in)	Clasificación CEMA											
	B4	B5	C4	C5	C6	D5	D6	E6	E7	F6	F7	F8
18	43	90	45	90	179							
24	53	116	56	116	224	116	224					
30	65	140	67	140	269	140	269					
36	78	161	79	161	313	161	313	446	801			
42	90	185	91	185	358	185	358	502	876			
48	104	207	105	207	400	207	400	564	1017			
54				223	447	223	447	628	1127			
60				245	493	245	493	589	1234	838	1278	1901
72						266	538	811	1451	967	1481	2208
84								985	1598	1095	1695	2532
96								1114	1804	1224	1921	2870

(CEMA, 2007)

El momento de inercia para anchos de correa que no aparecen en la Tabla 4 se determina por interpolación lineal.

### 3.2.4 Energía cinética de las poleas

Un sistema de correa transportadora cuenta con una polea motriz y una polea de retorno, normalmente del mismo diámetro. En el caso de sistemas de transporte pesado y con gran distancia entre centros, también se cuenta con una polea de estiramiento para mantener el tensado de la correa.

Los componentes básicos de una polea se muestran en la Figura 8.

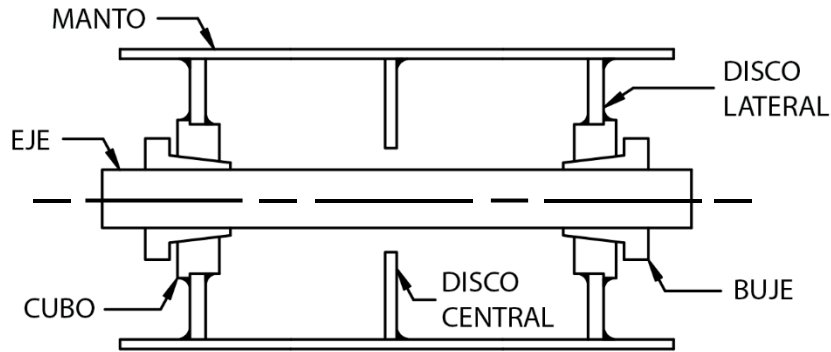


Figura 8. Componentes de una polea.  
Adaptado de (CEMA, 2007).

Suponiendo que la mayor parte de la masa de una polea está concentrada en el manto, el momento de inercia puede aproximarse mediante

$$I_p = m_p r_p^2$$

Donde  $m_p$  es la masa de la polea, la que normalmente está disponible de la información entregada por el fabricante y  $r_p$  es el radio de la polea.

De esta manera, la energía cinética de la polea es

$$E_{c,p} = \frac{1}{2} m_p v_b^2$$

### 3.2.4 Energía cinética en chute de descarga y alimentación

Normalmente la transferencia del material transportado hacia la correa se realiza a través de lo que se conoce como chute de carga. Asumiendo que el mineral ingresa al chute sin velocidad y que la velocidad con que sale es la obtenida solo por la acción gravitatoria, entonces el tiempo que tarda una partícula de mineral en recorrer el chute está dado por:

$$t_{fc} = \sqrt{\frac{2h_{fc}}{g}}$$

Donde  $h_{fc}$  es la altura del chute de descarga y  $g$  es la aceleración de gravedad. Así, una aproximación de la cantidad de material presente en el chute en todo momento se puede estimar como:

$$m_{m,fc} = Q \cdot t_{fc}$$

Donde  $Q$  es el flujo de mineral por unidad de tiempo en la cinta.

Para este estudio, la energía cinética en el chute de carga que se considera es aquella que tiene todo el mineral al interior del chute al desplazarse a la velocidad de salida:

$$E_{c,fc} = \sqrt{2g} Q h_{fc}^{3/2}$$

De manera muy similar, la descarga de mineral de una correa transportadora se realiza a través de una tolva o chute de descarga y a diferencia del caso anterior, el mineral ingresa al chute con la velocidad que le imparte la correa.

Suponiendo que la velocidad a la entrada de la correa no tiene una componente vertical, entonces, análogo a la situación del chute de carga, la cantidad de mineral al interior de chute de descarga en cada momento es:

$$m_{m,dc} = Q t_{dc}$$

$$t_{dc} = \frac{\sqrt{2h_{dc}}}{g}$$

La energía cinética en el chute de descarga es la suma de la energía cinética que porta el mineral al ingresar al chute y la energía cinética que adquiere por la acción gravitatoria (que es igual a la energía potencial gravitatoria a la entrada:

$$E_{c,dc} = Q h_{dc} \left( \frac{V_b}{2} + \sqrt{2gh_{dc}} \right)$$

### 3.2 Energía eléctrica

La energía eléctrica es la energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos y que permite establecer una corriente eléctrica cuando ambos se ponen en contacto mediante un conductor eléctrico.

En un sistema de correa transportadora, la energía eléctrica es evidente en la unidad motriz, aunque también puede estar presente en diferentes sensores y sistemas de control.

#### 3.2.1 Energía eléctrica de la unidad motriz

En los sistemas de correas transportadoras, los motores eléctricos de corriente alterna más comunes son los motores de jaula de ardilla y los motores de rotor bobinado. De corriente continua, en cambio, los más comunes son los motores *shunt* y los motores *compound*. En cualquiera de estos casos, la potencia eléctrica del motor viene especificada por el fabricante en la placa del motor.

En un circuito eléctrico dotado de un dispositivo de protección contra sobrecorrientes, el tiempo que transcurre desde que se inicia el proceso de falla (cortocircuito) hasta la interrupción total de la corriente se conoce como tiempo total de despeje (*clearing*). Este tiempo depende del tipo de dispositivo utilizado y de la intensidad de la sobrecorriente.

La energía eléctrica que se puede liberar en un cortocircuito puede calcularse como

$$E_{elec} = P \cdot t_c$$

Donde  $P$  es la potencia eléctrica del motor y  $t_c$  es el tiempo total de despeje de la línea que, en lo sucesivo, se asumirá igual a  $t_c = 5 \text{ ms}$  como un caso desfavorable (Legrand, 2011).

### 3.3 Energía gravitacional

La energía gravitacional es la energía potencial que un cuerpo con masa tiene en relación con otro cuerpo masivo debido a la gravedad. En condiciones cotidianas, solo es perceptible el campo gravitatorio de la Tierra, de modo que la energía gravitacional de un cuerpo puede reducirse a

$$E_g = mgh$$

Donde  $m$  es la masa del cuerpo,  $g$  es la aceleración estándar debida a la gravedad ( $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ ) y  $h$  es la altura medida desde un nivel de referencia con energía gravitacional nula.

Esta energía está presente en todos los elementos en altura. En un sistema de correa, es posible hallarla en prácticamente todos los componentes.

#### 3.3.1 Energía potencial gravitatoria en la cinta

La gran longitud de la correa permite que la energía potencial gravitatoria alcance distintos valores en diferentes puntos. Para efectos prácticos, se toma como cota inferior donde la energía potencial gravitatoria es nula el nivel del suelo respecto del cual se elevan los componentes de la correa de transporte. A lo largo del trayecto, se seccionó la correa en 6 partes las cuales se diferencian por cambios de altura respecto del suelo que modifican los niveles de energía potencial gravitatoria, como se aprecia en la Figura 9.

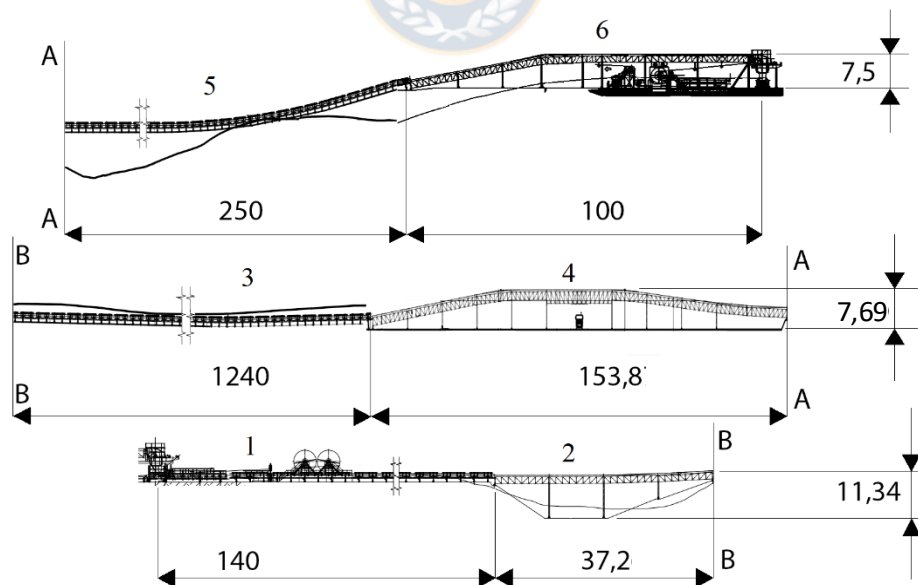


Figura 9. Perfil de alturas considerado en el cálculo de energía potencial gravitatoria.

Para los tramos 1, 3 y 5 la energía potencial gravitatoria se calcula como:

$$E_{p_g, b_i} = W_b L_i g h_i$$

$$i = [1, 3, 5]$$

Donde  $W_b$  es la masa por metro de la correa,  $L_i$  y  $h_i$  corresponden al largo y alto del tramo respectivamente.

Para los tramos 2, 4 y 6 la energía potencial gravitatoria presenta cambios a lo largo de ellos, por lo que es calculada la pendiente con la que la altura cambia en cada uno de ellos, el largo en que se mantiene la altura máxima y la pendiente de bajada de altura como es en el caso del tramo 2 y 4. Así la energía potencial gravitatoria:

$$E_{p_g, b_j} = \left( x_{j_1} \left( \frac{h_{j_{max}}}{L_{j_1}} \right) + h_{1_{min}} \right) g W_b L_{j_1} + W_b L_{j_2} g h_{j_{max}} + \left( h_{j_{max}} - x_{j_3} \left( \frac{h_{j_{max}}}{L_{j_3}} \right) \right) g W_b L_{j_3}$$

$$j = [2, 4]$$

$$E_{p_g, b_6} = \left( x_{6_1} \left( \frac{h_{6_{max}}}{L_{6_1}} \right) + h_{min} \right) g W_b L_{6_1} + W_b L_{6_2} g h_{max}$$

Donde  $x_{j_1}, x_{j_3}, x_{6_1}$  varían entre 0 y el largo que alcanzan las pendientes de cambio de altura en los tramos 1, 3 y 6. Finalmente  $L_{j_1}, L_{j_2}, L_{j_3}, L_{6_1}, L_{6_2}$  corresponden a los largos de los tramos donde la pendiente presenta cambios dentro de los tramos 2, 4 y 6.

El total de energía potencial de la cinta se obtiene como la suma de todas las energías calculadas anteriormente:

$$E_{p_g, b} = E_{p_g, b_i} + E_{p_g, b_j} + E_{p_g, b_6}$$

### 3.3.2 Energía potencial gravitatoria de los polines, poleas y contrapeso

Para estos componentes, la energía potencia gravitatoria se calcula como si se tratase de masas puntuales, así:

$$E_{p_g} = mgh$$

Donde  $m$  es la masa del componente y  $h$  es la altura medida desde el nivel del suelo.

### 3.4 Energía química

La energía química es el potencial de una sustancia química de llevar a cabo una transformación mediante una reacción química para transformarse en otras sustancias. Es de especial importancia la energía química liberada en un proceso de combustión, producida por el rompimiento de enlaces químicos de la sustancia combustible y la formación de los débiles enlaces del oxígeno molecular liberado en la combustión.



La principal carga de fuego presente en un sistema de correa transportadora está presente típicamente en la carga transportada y en la cinta. En este caso de estudio, se asumirá que solo la cinta está constituida de un material combustible.

### 3.4.1 Energía química de la cinta

Las cintas están conformadas por capas de caucho y telas de materiales naturales o sintéticos. Las cintas pueden encenderse fácilmente, propagar el fuego con rapidez y liberar enormes cantidades de humo. Las correas inclinadas además pueden causar un efecto chimenea que acelera la propagación del fuego. (Manojkumar & Shiyam, 2014)

La energía química contenida en la cinta puede calcularse a partir del poder calorífico del caucho mediante la fórmula

$$E_{q,b} = 2L \cdot \epsilon W_b \cdot HV$$

Donde  $\epsilon$  representa la fracción del peso de la cinta que corresponde a caucho y  $HV$  es el poder calorífico del caucho y que varía típicamente entre 30 y 40  $kJ/g$  dependiendo de la composición del caucho (Yuan & Litton, 2007).

La fracción  $\epsilon$  puede estimarse calculando el peso de los cables al interior de la cinta. Conociendo el número de cables  $n$  y el peso por metro de los cables de acero  $W_{sc}$ , entonces la fracción  $\epsilon$  está dada por

$$\epsilon = 1 - \frac{n \cdot W_{sc}}{W_b}$$

Donde el peso por metro de los cables de acero puede calcularse como (Feyrer, 2015)

$$W_{sc} = W \cdot d_{sc}^2$$

Con  $d_{sc}$  es el diámetro nominal del cable y  $W$  es el factor de masa lineal que puede encontrarse en la Tabla 5.

Tabla 5. Factores de masa lineal para diferentes cables de acero trenzados.

Cable	Tipo de construcción	Factor de masa lineal $W$ ( $kg/m^3$ )
Cable de una capa	6 × 7	3.840
	8 × 7	3.910
	6 × 19	4.000
	8 × 19	4.070
	6 × 36	4.090
	8 × 36	4.170
	6 × 35 N	3.920
	6 × 19 M	3.720
	6 × 37 M	3.720
Cable de múltiples capas	18 × 7	4.010
	34 × 7	4.010

(Feyrer, 2015)

Es posible observar de la Tabla 5 que el factor de masa lineal no varía significativamente para diferentes construcciones de cables de acero, por lo que, en lo sucesivo, se asume el valor promedio  $\bar{W} = 3950 \text{ kg/m}^3$  para cualquier tipo de construcción de cable.

De esta manera, la energía química de la cinta puede determinarse como

$$E_{q,b} = 2L \cdot (W_b - n \bar{W} d_{sc}^2) \cdot HV$$

### 3.5 Energía elástica

La energía elástica es la energía almacenada que resulta de aplicar una fuerza para deformar un objeto elástico. Si la deformación ocurre dentro del límite elástico, entonces la energía de deformación viene dada por

$$E_{elas} = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV$$

Donde  $V$  es el volumen del cuerpo,  $\sigma$  es el tensor esfuerzo y  $\varepsilon$  es el tensor deformación.

En el caso de elasticidad lineal de un sólido homogéneo e isótropo, el esfuerzo y la deformación se relacionan mediante las ecuaciones de Lamé – Hooke, que en el caso unidimensional se reducen a

$$\sigma = E \varepsilon$$

Donde  $E$  es el módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young.

Bajo estas asunciones, la energía elástica puede calcularse como

$$E_{elas} = \frac{1}{2E} \int_V \sigma^2 dV$$

Todos los cuerpos sometidos a cargas presentan algún grado de deformación y, en consecuencia, acumulan energía elástica. Sin embargo, en componentes como la cinta, que pueden sufrir importantes deformaciones, esta energía se manifiesta en mayor medida.

#### 3.5.1 Energía elástica en la cinta

El movimiento de la cinta produce cambios en la tensión a lo largo de esta. Las tensiones asociadas a los cambios de energía del material, la fricción y los distintos componentes se acumulan en la cinta en la dirección de su movimiento (ver Figura 10).

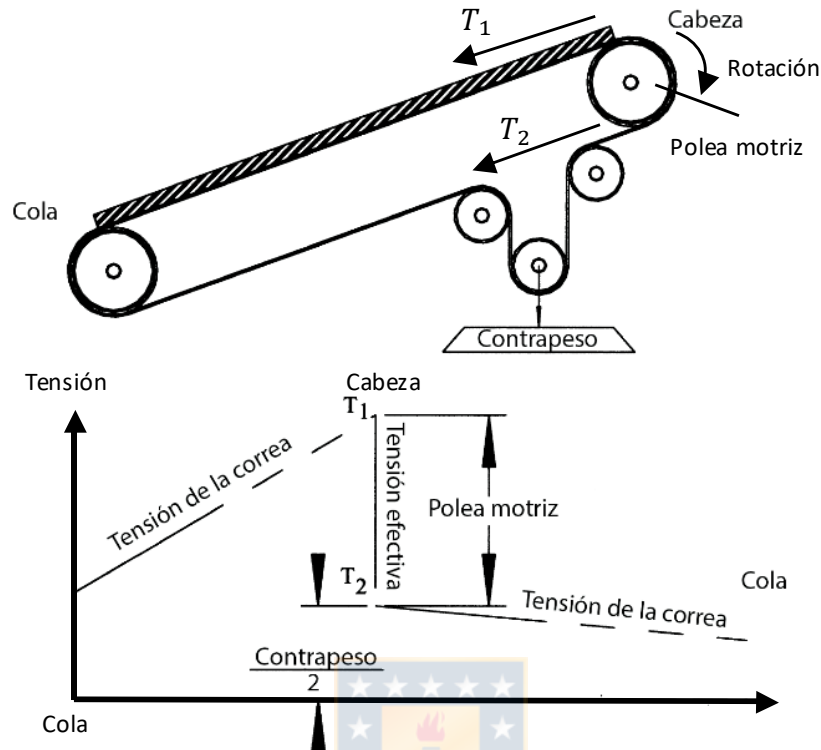


Figura 10. Tensión sobre la cinta.  
Adaptado de (CEMA, 2007).

El correcto cálculo de las tensiones sobre la cinta en la etapa de diseño del sistema de la correa transportadora tiene directa influencia sobre diferentes aspectos, tales como el tamaño de los componentes (incluyendo la cinta misma), la energía requerida en el sistema motriz y la confianza y eficiencia de la operación de transporte (CEMA, 2007).

Suponiendo que la tensión es soportada por los cables de acero al interior de la correa, el esfuerzo en un punto de la correa está dado por

$$\sigma = \frac{T}{n \cdot A_{sc}}$$

Donde  $A_{sc}$  es el área metálica de la sección transversal del cable y que puede calcularse a partir del diámetro nominal como (Feyrer, 2015)

$$A_{sc} = f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{sc}^2$$

Donde  $f$  es el coeficiente de relleno y  $d_{sc}$  es el diámetro nominal de los cables de acero. Valores de coeficientes de relleno para diferentes construcciones de cables se pueden ver en la Tabla 6.

Tabla 6. Coeficientes de relleno para diferentes cables de acero trenzados.

Tipo de construcción	Coeficiente de relleno	
Cable de 6 torones	<i>Filler</i>	0,627
	<i>Seale</i>	0,616
	<i>Warrington</i>	0,623
	<i>Warrington – Seale</i>	0,628
Cable de 8 torones	<i>Filler</i>	0,631
	<i>Seale</i>	0,620
	<i>Warrington</i>	0,625
	<i>Warrington – Seale</i>	0,630
(Feyrer, 2015)		

Es posible observar de la Tabla 6 que el coeficiente de relleno no varía significativamente para diferentes construcciones de cables de acero, por lo que, en lo sucesivo, se asume el valor promedio  $\bar{f} = 0,625$  para cualquier tipo de construcción de cable.

Por lo tanto, el esfuerzo en cada punto de la correa está dada por

$$\sigma = \frac{4T}{n\pi \cdot \bar{f} \cdot d_{sc}^2}$$

La densidad de energía elástica (energía por unidad de volumen) en cada punto de la cinta se encuentra mediante

$$e_{elas,b} = \frac{1}{2E_{sc}} \left( \frac{4T}{n\pi \cdot \bar{f} \cdot d_{sc}^2} \right)^2$$

Donde  $E_{sc}$  es el módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young de los cables de acero. Este módulo es diferente al módulo de Young de los alambres de acero por la configuración geométrica del cable. La Tabla 7 muestra algunos valores del módulo de elasticidad longitudinal para distintos cables metálicos.

Tabla 7. Módulos de elasticidad para diferentes cables de acero trenzados.

Cable	Módulo de elasticidad (Mpsi)
De arrastre de 6 × 7	14
De izar o estándar de 6 × 19	12
Flexible especial de 6 × 37	11
Extraflexible de 8 × 19	10
(Budynas & Nisbett, 2008)	

En lo sucesivo, se asume un valor para el módulo de elasticidad de  $\bar{E}_{sc} = 14 \text{ Mpsi} \approx 96,5 \text{ GPa}$  para cualquier tipo de construcción de cable.

De esta manera, la densidad de energía elástica en cada punto de la cinta está dado por

$$e_{elas,b} = \frac{1}{2E_{sc}} \left( \frac{4T}{n\pi \cdot \bar{f} \cdot d_{sc}^2} \right)^2$$

Un elemento diferencial de volumen de cables de acero puede ser descrito como

$$dV = n \cdot A_{sc} \cdot dx$$

Donde  $dx$  es un elemento diferencial de longitud en la dirección longitudinal de la correa.

Integrando la densidad de energía elástica en todo el volumen de cables de acero, se tiene que la energía elástica de la cinta es

$$E_{elas,b} = \frac{1}{n\pi} \cdot \frac{2}{E_{sc} \cdot \bar{f} \cdot d_{sc}^2} \cdot \int_0^{2L} T^2 dx$$

Para la tensión de la cinta se asume un modelo simplificado mostrado en la Figura 11, donde la tensión en el lado de carga aumenta linealmente entre dos valores y en el lado de retorno es constante.

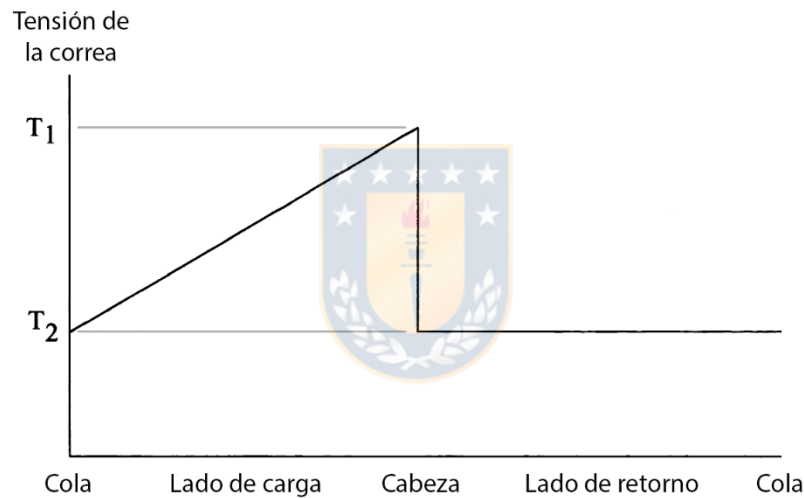


Figura 11. Modelo simplificado de la tensión sobre la cinta.

Resolviendo la integral se tiene que

$$E_{elas,b} = \frac{1}{n\pi} \cdot \frac{2L}{3E_{sc} \cdot \bar{f} \cdot d_{sc}^2} \cdot (T_1^2 + T_1T_2 + 4T_2^2)$$

La tensión en el lado de retorno  $T_2$  está dada por el sistema tensor mediante

$$T_2 = \frac{W_g}{2}$$

Donde  $W_g$  es tensión ejercida por el sistema tensor (en el caso de un sistema tensor gravitacional, corresponde al peso del contrapeso).

En la cabeza, la diferencia de tensión entre el lado de carga y el lado de retorno se debe al torque ejercido por la polea motriz  $\tau$  (ver Figura 12).

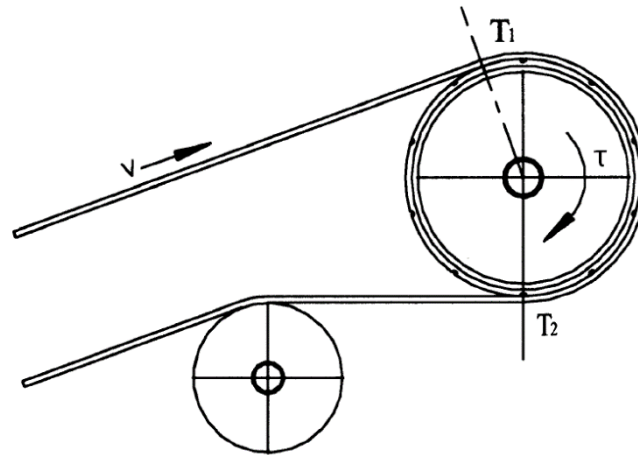


Figura 12. Tensiones en la polea motriz.  
Adaptado de (CEMA, 2007).

La relación entre el torque y las tensiones es

$$\tau = (T_1 - T_2)r_{dp}$$

Donde  $r_{dp}$  es el radio de la polea motriz.

Por otra parte, la potencia desarrollada por el par motor está dada por

$$P = \frac{\tau \omega_{dp}}{\eta}$$

Donde  $\omega_{dp}$  es la velocidad angular de la polea motriz y  $\eta$  es el rendimiento mecánico de la unidad motriz. Los rendimientos mecánicos mínimos exigidos para algunos motores eléctricos se muestran en la Tabla 8.

De esta manera,

$$T_1 - T_2 = \frac{\eta P}{\omega_{dp} r_{dp}} = \frac{\eta P}{v_b}$$

Luego, la tensión máxima en el lado de carga  $T_1$  es

$$T_1 = \frac{\eta P}{v_b} + \frac{W_g}{2}$$

Tabla 8. Rendimiento mecánico mínimo para motores clase IE3 (rendimiento *premium*, obligatoria desde 2015 en la UE) de acuerdo con IEC 60034-30-1.

Potencia eléctrica (kW)	Número de polos			
	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
55	94,3	94,6	94,1	92,5
75	94,7	95,0	94,6	93,1
90	95,0	95,2	94,9	93,4
110	95,2	95,4	95,1	93,7
132	95,4	95,6	95,2	94,0

160	95,6	95,8	95,6	94,3
200 o más	95,8	96,0	95,8	94,6
(IEC, 2014)				

En lo sucesivo, se asumirá un rendimiento mecánico igual a  $\bar{\eta} = 95\%$  para cualquier caso.

### 3.6 Energía de onda mecánica

Una onda mecánica es una perturbación que viaja por un material o una sustancia que es el medio de la onda. Al viajar la onda por el medio, las partículas que constituyen el medio sufren desplazamientos de varios tipos, dependiendo de la naturaleza de la onda.

Todo movimiento ondulatorio tiene energía asociada a él. Al propagarse la onda, cada porción del medio ejerce una fuerza y realiza trabajo sobre la porción adyacente. De este modo, una onda puede transportar energía de una región del espacio a otra (Young & Freedman, 2009).

Un medio unidimensional puede representarse mediante un dominio  $\Omega = [0, L] \in \mathbb{R}$ . Si  $u(x, t)$  representa el desplazamiento de una partícula de este medio que se halla en una posición  $x \in \Omega$  en el tiempo  $t$ , la energía total asociada a la onda mecánica está dada por (Potencia y energía en una onda, s.f.)

$$E_{mw} = \frac{1}{2} \int_0^L \left( \mu \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + F_T \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) dx$$

Donde  $\mu$  es la densidad lineal del medio y  $F_T$  es la fuerza que ejerce una porción del medio sobre la porción adyacente y que se relaciona con la velocidad de la onda mecánica  $c$  mediante

$$c^2 = \frac{F_T}{\mu}$$

#### 3.6.1 Energía de onda mecánica de la cinta

Durante los periodos de partidas y paradas de la correa transportadora se induce una carga dinámica en la cinta producida por la aceleración de la polea motriz. Estas perturbaciones en las tensiones son ondas de compresión y tracción que viajan a lo largo de la cinta. La onda mecánica que viaja a la velocidad del sonido en la cinta ejerce una fuerza sobre cada elemento de la correa. Estas ondas pueden romper la correa, separar los empalmes y destruir los rodamientos de las poleas (Harrison, 1983).

La cinta puede representarse como un medio unidimensional  $\Omega = [-L, L]$  como el mostrado en la Figura 13. El punto  $x = 0$  corresponde a la porción de cinta sobre la polea de cola y los puntos  $x = L$  y  $x = -L$ , a la porción sobre la polea motriz.

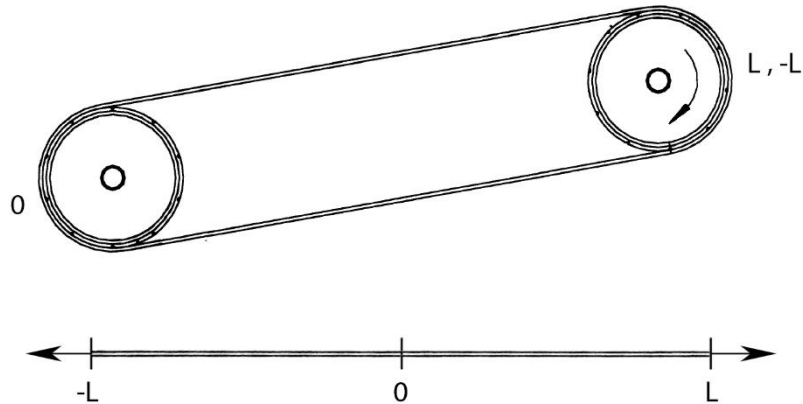


Figura 13. Representación unidimensional de la cinta.

Durante una operación de partida, la polea motriz imparte a la cinta una aceleración dada por un determinado perfil de velocidad. En este caso, se supondrá un perfil sinusoidal (ver Figura 14) descrito por la fórmula

$$v(t) = \begin{cases} \frac{v_b}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi t}{t_a} \right), & 0 \leq t < t_a \\ v_b, & t \geq t_a \end{cases}$$

Donde  $v_b$  es la velocidad nominal de la cinta (la velocidad en operación estacionaria) y  $t_a$  es el tiempo de aceleración.

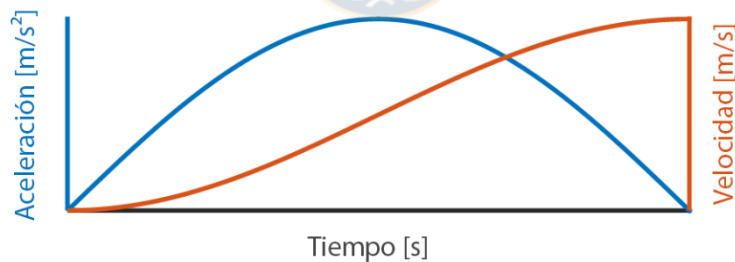


Figura 14. Perfil de velocidad de la cinta en un periodo de partida.  
Adaptado de (He, Pang, Lodewijks, & Liu, 2018).

El tiempo de aceleración  $t_a$  puede determinarse a partir de (Pascual, Meruane, & Barrientos, 2005)

$$t_a = \frac{m_{eq} v_b}{T_1 - T_2} = \frac{m_{eq} v_b^2}{\eta P}$$

Donde  $m_{eq}$  es la masa equivalente del sistema y que considera tanto las masas en traslación como las inercias de las partes rotatorias. Como simplificación, se asume como masa equivalente solo la de la cinta junto con el mineral. De esta manera



$$t_a = \frac{\left(2W_b L + \frac{Q}{v_b} L\right) v_b^2}{\eta P} = \frac{2W_b L v_b^2 + Q L v_b}{\eta P} = \frac{2(E_{c,b} + E_{c,m})}{\eta P}$$

Donde  $E_{c,b}$  y  $E_{c,m}$  son las energías cinéticas de la cinta y de la carga de mineral, respectivamente.

La propagación de las ondas mecánicas en una cinta se puede modelar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} && \text{en } [-L, L] \times [0, \infty[ \\ u(-L, t) &= u(L, t) && \text{en } [0, \infty[ \\ \frac{\partial u}{\partial t}(x, t) &= v(t) && \text{en } \{-L, L\} \times [0, \infty[ \\ u(x, 0) &= 0 && \text{en } [-L, L] \\ \frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) &= 0 && \text{en } [-L, L] \end{aligned}$$

Donde  $u(x, t)$  representa el desplazamiento de la porción de cinta sobre  $x \in [-L, L]$  en el tiempo  $t$  y  $c$  es la velocidad de propagación de la onda mecánica.

La solución de este sistema de ecuaciones depende del largo  $L$ , la velocidad de propagación  $c$  y el perfil de velocidad  $v(t)$ , el que, a su vez, depende de la velocidad de la cinta  $v_b$  y el tiempo de aceleración  $t_a$ .

La velocidad de propagación de la onda mecánica  $c$  es difícil de predecir de forma precisa, sin embargo, puede ser estimada como (CEMA, 2007)

$$c = \sqrt{\frac{BW \cdot E_b}{W_b}}$$

Donde  $BW$  es el ancho de la cinta y  $E_b$  es el módulo de elasticidad de la cinta. La ticidad para diferentes cintas.

Tabla 9 muestra módulos de elasticidad para diferentes cintas.

Tabla 9. Módulo de elasticidad para diferentes cintas *Flexsteel* de Goodyear.

Designación de la cinta	Módulo de elasticidad (kN/m)
<i>Flexsteel</i> ST800	58.000
<i>Flexsteel</i> ST1000	72.000
<i>Flexsteel</i> ST1250	90.000
<i>Flexsteel</i> ST1600	115.000
<i>Flexsteel</i> ST2000	144.000
<i>Flexsteel</i> ST2500	180.000
<i>Flexsteel</i> ST3150	227.000
<i>Flexsteel</i> ST3500	252.000
<i>Flexsteel</i> ST4000	288.000

<i>Flexsteel</i> ST4500	324.000
<i>Flexsteel</i> ST5000	360.000
<i>Flexsteel</i> ST5400	389.000
(Goodyear, 2006)	

Típicamente la velocidad de propagación de onda toma valores cercanos a  $1.000 \text{ m/s}$  para cintas de telas sintéticas y a  $2.500 \text{ m/s}$  para cintas con cables de acero (Lodewijks, 2002). Con el ánimo de reducir los parámetros independientes del sistema, se asume una velocidad de propagación de onda  $c$  igual a  $2.500 \text{ m/s}$  para cualquier configuración de correa.

La Figura 15 muestra la solución de estas ecuaciones para la velocidad de la cinta  $\frac{\partial u}{\partial t}$  en distintas configuraciones de correa.

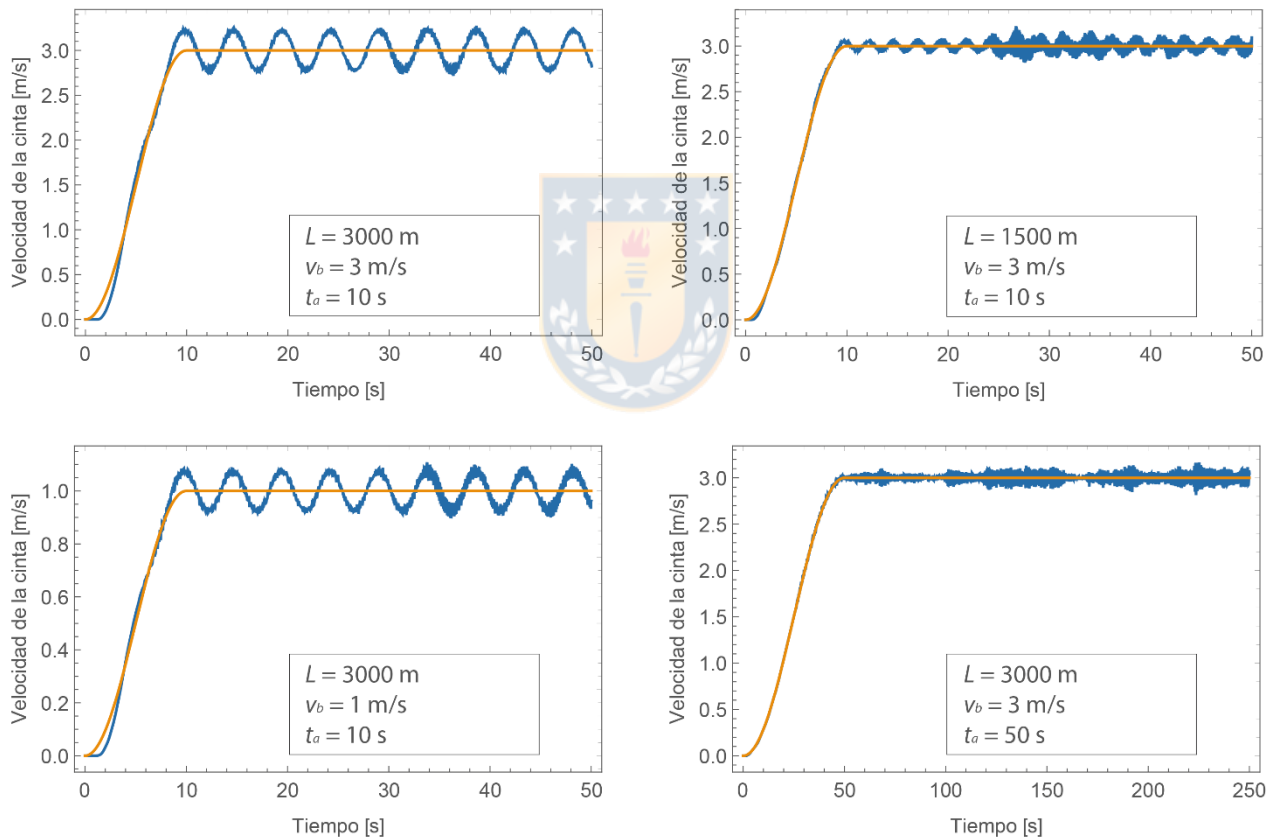


Figura 15. Velocidad de la cinta para diferentes configuraciones de correa.  
En naranja: velocidad en la polea motriz; en azul: velocidad en la polea de cola.

La energía de onda mecánica puede calcularse como

$$E_{mw} = \frac{1}{2} \rho_{sc} \int_{-L}^L \overline{\left( \frac{\partial u}{\partial t} - v_b \right)^2} dx + \frac{1}{2} c^2 \rho_{sc} \int_{-L}^L \overline{\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} dx$$

Donde  $\rho_{sc}$  es la densidad de los cables de acero y la barras sobre las integrales representan el valor medio de estas en un intervalo de tiempo donde las ondas elásticas se hayan desarrollado para reducir errores numéricos.

La densidad de los cables de acero puede determinarse a partir de su peso por metro  $W_{sc}$  y del área metálica de su sección transversal  $A_{sc}$  como

$$\rho_{sc} = \frac{W_{sc}}{A_{sc}}$$

Empleando los valores medios para el factor de masa lineal  $\bar{W}$  y el factor de relleno  $\bar{f}$  se tiene que

$$\rho_{sc} = \frac{\bar{W} \cdot d_{sc}^2}{\bar{f} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{sc}^2} = 8.047 \text{ kg/m}^3$$

Para disminuir el costo computacional del cálculo de energía de onda mecánica, en lugar de resolver el sistema de ecuaciones del modelo para cada configuración de correa, se resuelve solo para algunos valores de los parámetros independientes identificados y se construye una regresión.

Se espera que, si el largo de la correa es menor, *ceteris paribus*, el efecto de la onda mecánica sea también menor al permitir que los desplazamientos en la cola y cabeza se produzcan con mayor simultaneidad, acercando el comportamiento al de un cuerpo rígido. Por otra parte, si la aceleración media en la partida (definida como  $v_b/t_a$ ) es mayor, se esperan ondas elásticas más pronunciadas. Estos efectos pueden verificarse en la Figura 16.

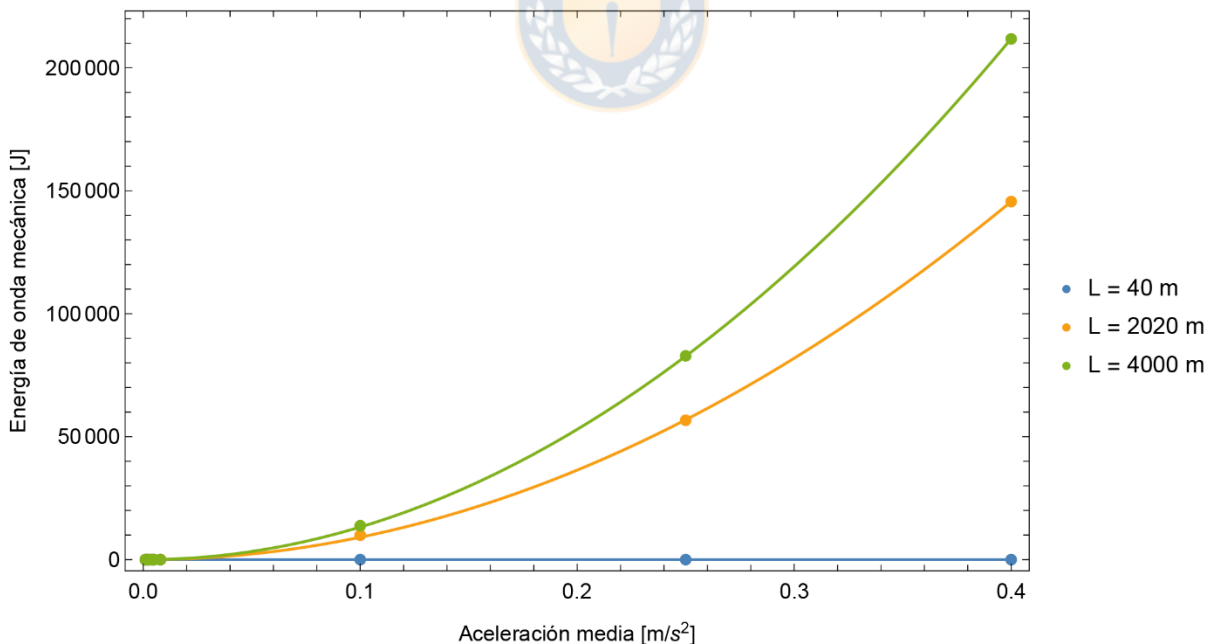


Figura 16. Relación entre la energía de onda mecánica y la aceleración media en la partida para distintos largos de correa.

Las curvas de la Figura 16 se ajustan bien a expresiones de la forma

$$E_{mw} = \alpha_L \left( \frac{v_b}{t_a} \right)^2$$

Donde  $\alpha_L$  es un coeficiente que depende del largo de la correa. Un ajuste lineal para este coeficiente permite establecer la siguiente relación

$$\alpha_L = \left( 355,2 \frac{kg \ s^2}{m} \right) L$$

De esta manera, la energía de onda mecánica puede calcularse como

$$E_{mw} = \left( 88,8 \frac{kg \ s^2}{m} \right) \left( \frac{\eta P v_b}{E_{c,m} + E_{c,m}} \right)^2 L$$

### 3.7 Energía térmica

La energía térmica puede significar tanto la energía interna de un sistema, vale decir, la energía cinética y potencial microscópica promedio de la colectividad de partículas que conforman un sistema, como la energía transferida en procesos de transferencia de calor entre dos o más cuerpos.

En un sistema de correa transportadora, existen diferentes fuentes de calor producto de la fricción entre sus componentes. Si la energía térmica de estos elementos alcanza valores elevados podría incendiar la cinta. La Tabla 10 resume las fuentes de ignición de correas transportadoras en minas de carbón de EE. UU entre los años 1980 y 2005.

Tabla 10. Fuente de ignición de incendios de correa 1980 – 2005.

Fuente de ignición	Número de incendios	Porcentaje del total
Corte y soldadura	5	8 %
Fricción en la polea	11	18 %
Fricción a lo largo de la cinta	11	18 %
Polines calientes	6	10 %
Eléctrico	8	13 %
Diésel e hidráulico	2	3 %
Indeterminable	18	30 %
(Francart, 2006)		

En el caso de los polines, cuando alguno de estos se traba en funcionamiento, se produce un roce constante con la cinta que eleva la temperatura de la superficie de contacto. Sin embargo, el movimiento de la cinta permite que esta se enfríe antes de alcanzar la temperatura de ignición. No obstante, una vez que la correa se detiene, el contacto constante con la superficie caliente del polín podría incendiar la correa.

Para este estudio, se considera únicamente como energía térmica, aquella energía que debe transferir un polín caliente para encender la cinta.

### 3.7.1 Energía térmica en los polínes

La energía térmica que debe transferir un polín a la cinta para poder incendiarla corresponde a la energía de activación de la reacción de combustión del material que constituye la cinta. Esta energía es la energía mínima requerida para poder iniciar la combustión.



Figura 17. Diagrama de niveles de energía para una reacción exotérmica.

La composición de las cintas puede ser muy diversa e incluir materiales como caucho natural, caucho estireno-butadieno (SBR), caucho etileno-propileno-dieno (EPDM), neopreno, polipropileno, entre otros (CEMA, 2007). Con ánimo de simplificar los cálculos, en lo sucesivo, se asume una cinta constituida únicamente por caucho estireno-butadieno.

La energía de activación de la combustión del caucho estireno-butadieno es  $E_a = 104,8 \text{ kJ/mol}$  (Ramesan & Kumar, 2009).

Un monómero de caucho estireno-butadieno se observa en la Figura 18. Su composición química es  $C_{40}H_{39}$ , luego, su masa molar es  $MM_{SBR} = 519,75 \text{ g/mol}$ .

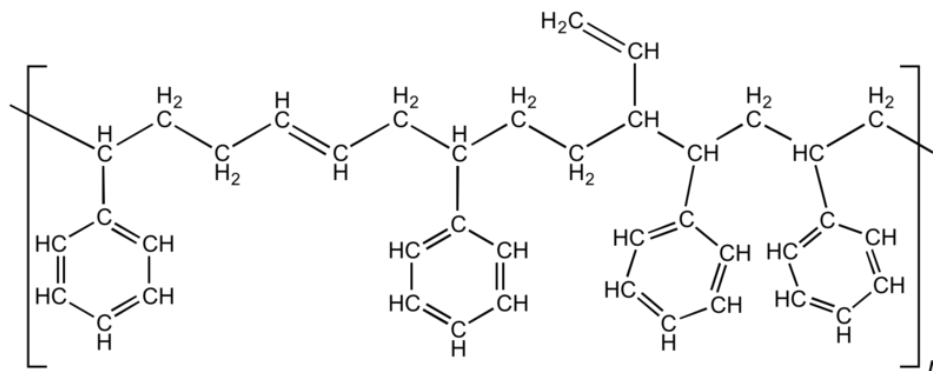


Figura 18. Subunidad de caucho estireno-butadieno (SBR).

La densidad del caucho estireno-butadieno es  $\rho_{SBR} = 950 \text{ kg/m}^3$  (AZoM, 2003).

La densidad de energía térmica (energía por unidad de volumen) puede calcularse como

$$e_t = E_a \frac{\rho_{SBR}}{MM_{SBR}} = 1,92 \times 10^8 \text{ J/m}^3$$

El volumen de cinta que se ve sometido a la transferencia de calor desde el polín caliente se asume como el volumen desplazado por la hendidura del polín sobre la cinta (ver Figura 19).

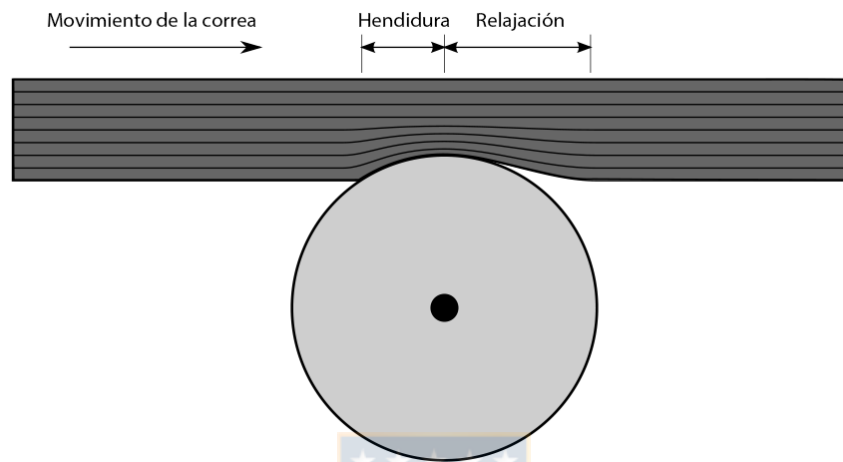


Figura 19. Hendidura del polín sobre la cinta.  
Adaptado de (Drenkelford, 2015).

Este volumen puede aproximarse mediante la teoría de contacto de Hertz. La Figura 20 muestra dos cilindros paralelos en contacto elástico, donde  $W$  es una carga distribuida y  $b$  es el semiancho de la región de contacto. La cinta plana puede representarse haciendo el radio de uno de los cilindros infinitamente grande.

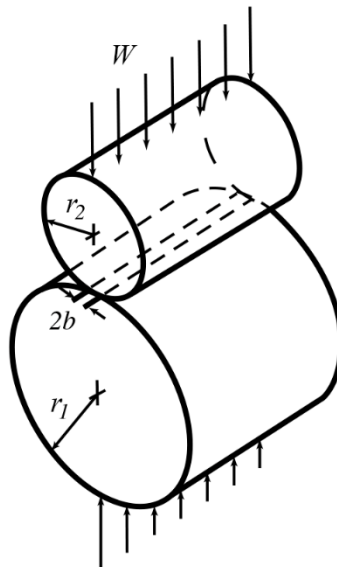


Figura 20. Cilindros paralelos en contacto elástico.  
Adaptado de (Bhushan, 2001).

La carga distribuida puede hallarse a partir de:

$$W = \left( W_b + \frac{Q}{v_b} \right) \frac{S_i}{BW}$$

donde  $S_i$  es la distancia entre estaciones de polines.

El módulo de contacto  $E^*$  está definido mediante

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_{SBR}^2}{E_{SBR}}$$

donde  $\nu_i$  y  $\nu_{SBR}$  es el coeficiente de Poisson del material del polín y del caucho estireno-butadieno (de la cinta), respectivamente. Similarmente,  $E_i$  y  $E_{SBR}$  es el módulo de elasticidad longitudinal del material del polín y del caucho estireno-butadieno, respectivamente.

Suponiendo que el material del polín en contacto es acero, el módulo de contacto resulta  $E^* = 9,07 \text{ MPa}$  (ver Tabla 11).

Tabla 11. Propiedades elásticas del acero y del caucho estireno-butadieno (SBR). †

Material	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Acero	210.000	0,3
Caucho estireno-butadieno (SBR)	6,895	0,49
† (CES EduPack, 2013)		

El semi-ancho de la región de contacto  $b$  está dado por:

$$b = \sqrt{\frac{2Pr_i}{\pi E^*}}$$

Donde  $r_i$  es el radio del polín.

El desplazamiento del eje del polín  $\Delta$  se calcula mediante

$$\Delta = \frac{1}{E^*} \ln \left( \frac{4r_i}{b} - \frac{1}{2} \right)$$

De esta manera, el volumen desplazado puede aproximarse como:

$$V_{desp} = 2bL_i\Delta$$

Donde  $L_i$  es el largo del polín.

Luego, la energía térmica del polín se calcula como

$$E_t = e_t V_{desp}$$

## CAPÍTULO 4

### Tareas y controles de seguridad

#### 4.1 Tareas de mantenimiento y operación en la correa transportadora

De las órdenes de trabajo registradas sobre la correa, se clasificó cada una de ellas en base a la locación en donde se realizó (chute, cinta, polea motriz, polea de cola, etc) y el verbo clave que identifica la orden de trabajo. Por ejemplo: Si la orden de trabajo tiene el siguiente enunciado “*Se realizó un cambio de polea motriz*” la ubicación “polea motriz” y el verbo es “cambiar”. Este procedimiento se repitió en todas las órdenes de trabajo registradas los últimos 2 años en la correa transportadora y adicionalmente se acumuló el total de horas invertidas en cada actividad, los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Porcentaje de HH invertidas en las distintas actividades sobre la correa transportadora.

Chute	Cambiar placas de chute	11,2 %
	Cambiar chute	5,8 %
	Asear chute	1,5 %
Cinta	Cambiar cinta	12,6 %
	Reparar cinta en frío	6,9 %
	Asear cinta	6,1 %
	Reparar cinta en caliente	3,4 %
	Alinear cinta	2,0 %
	Empalmar cinta	1,9 %
	Medir espesor de cinta	0,3 %
Polea	Cambiar polea	11,2 %
	Lubricar polea	3,8 %
	Asear polea	0,5 %
	Medir vibraciones de polea	0,4 %
	Colocar sensores en polea	0,3 %
Polín	Cambiar polín	20,7 %
	Asear polín	0,3 %
	Inspeccionar polín	0,2 %
Sistema tensor	Inspeccionar sistema tensor	0,1 %
Unidad motriz	Cambiar unidad motriz	5,1 %
	Lubricar unidad motriz	2,1 %
	Inspeccionar unidad motriz	2,0 %
	Limpiar <i>housing</i> de unidad motriz	1,1 %
	Medir vibraciones de unidad motriz	0,2 %
	Tomar termografías de unidad motriz	0,2 %
	Alinear unidad motriz	0,1 %



Esta clasificación de tareas y componentes de la correa transportadora, son de utilidad para correlacionar los niveles de energía a los cuales se exponen las personas que se encuentren realizando estas actividades y el nivel de exposición que tienen con esos niveles de energía.

#### 4.2 Tiempo de exposición sobre equipos y actividades

De los datos mostrados en la Tabla 12 se tiene el porcentaje de HH sobre cada actividad por locación, la actividad que mayor cantidad de HH invierte es el cambio de polines con un 20,7 % del total de HH registradas los últimos dos años.

Si bien la mayor cantidad de actividades se encuentran en la cinta y en la unidad motriz, el porcentaje de HH invertidas es mayor para la cinta. En la Tabla 13 se detalla el porcentaje de horas invertido por componente.

Tabla 13. Horas hombre (HH, en porcentaje) por subsistema de la correa transportadora.

Subsistema	HH
Cinta	33,2 %
Polín	21,2 %
Chute	18,5 %
Polea	16,2 %
Unidad motriz	10,8 %
Sistema tensor	0,1 %

Esto es interesante considerando que la tarea con mayor porcentaje de HH es el cambio de polines, ya que se podrían tener diferentes criterios para calificar los niveles de exposición en la gestión de riesgos, si se considera la cantidad de HH por componente o por actividad realizada. Es importante conocer ambos datos para implementar los controles de seguridad, puesto que en los procedimientos que implican una tarea pueden ser necesarias medidas de control que no sean visibles al analizar los riesgos en base al tiempo de exposición desde los componentes.

#### 4.3 Controles de seguridad

Para las actividades mencionadas existen controles de seguridad, los cuales han sido asignados para proteger a los operadores de los peligros detectados y de accidentes ocurridos en el pasado. Se busca vincular las energías presentes en los componentes de la correa de transporte, con las actividades y los controles. De esta forma será posible evidenciar aquellas actividades están carente de controles sobre las energías presentes en ella, lo cual representa un aporte a la gestión de riesgos laborales de salud y seguridad.

Los controles están clasificados en cuatro categorías, las que se revisarán a continuación:

1. Riesgo de atrapamiento y/o aplastamiento: este riesgo incluye las actividades donde una o varias partes del cuerpo quedan expuestas entre un elemento móvil y un elemento fijo o entre dos ele-

mentos móviles, con el potencial de oprimir, aplastar, apretar o comprimir o donde existe potencial de quedar enganchado hacia un objeto que sobresale causando un accidente. Además, incluye elementos que pueden caer sobre personas durante actividades de mantenimiento.

Dentro de esta categoría los controles presentes son:

- Examen de condiciones médicas físicas y psicológicas aptas.
  - Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual.
  - Protecciones físicas (barrera física que impide la interacción entre hombre máquina).
  - Dispositivos de seguridad.
  - Operador/mantenedor autorizado y competente para el trabajo.
  - Señalización para advertir sobre el riesgo de atrapamiento/aplastamiento en equipos.
  - Comunicación efectiva para zona segura de trabajo.
  - Demarcación/delimitación/segregación/observador de seguridad de zona segura de trabajo y actividades con puntos ciegos.
  - Plan de respuesta ante emergencia.
2. Riesgo de caída de objetos: este riesgo incluye el impacto a personas por objetos en movimiento por caída o desprendimiento desde su posición estática, además de caída de objetos en maniobras de izaje manual con potencial de causar una o más fatalidades. El alcance excluye caída de objetos durante maniobras de izaje no manuales, falla o colapso estructural, caída de roca por falla de terreno, almacenamiento en rack/estantes de bodegaje, perforación de sondaje, proyección de rocas por tronaduras, elementos o materiales que puedan caer masivamente sobre personas durante actividades de mantenimiento.

Dentro de esta categoría los controles presentes son:

- Delimitación de áreas expuestas a caída de objetos.
  - Limpieza área de trabajo niveles superiores (material acumulado en estructuras o plataformas).
  - Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico.
  - Accesorios de izaje manuales certificados y revisados.
  - Plan de acción ante condiciones climáticas adversas.
  - Elementos de contención para caída de objetos.
  - Mantenimiento de estructuras menores.
3. Riesgo de caída de personas desde alturas: este riesgo incluye cualquier caída desde un borde abierto donde exista potencial de caída desde 1,8 metros. Por su parte, integra las caídas desde un nivel a otro en excavaciones o zanjas. Este riesgo material excluye las caídas de un mismo nivel y el uso de escaleras de tránsito.

Dentro de esta categoría los controles presentes son:

- Arnés de seguridad y accesorios, incluyendo punto de anclaje.
- Plataformas y superficies de trabajo.
- Segregar áreas para borde abierto o zonas de trabajo.
- Examen de condiciones médicas físicas y psicológicas aptas para trabajo en alturas.
- Autorización para trabajos en altura.

- *Housekeeping* zona de trabajo.
  - Certificación para operadores de plataformas móviles.
  - Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión.
4. Riesgo por contacto con energía eléctrica: este riesgo incluye la intervención de líneas subterráneas, aéreas y superficiales sobre 50 V, considera el acceso a las instalaciones eléctricas y maniobras eléctricas en equipos de baja, media y alta tensión que puedan provocar la electrocución o la quemadura por relámpago de un arco eléctrico. Este riesgo también considera generadores eléctricos portátiles, soldadoras, torres de iluminación, herramientas eléctricas manuales, entre otros. Por su parte, el riesgo material excluye actividades de geofísica y eventos de persona impactada por rayo en exploraciones.

Dentro de esta categoría los controles presentes son:

- Herramientas y equipos aislados eléctricamente.
- Aislamiento, bloqueo y prueba de energía cero.
- Acceso controlado y restringido a instalaciones eléctricas
- Autorización para trabajos eléctricos.
- Certificación para personal eléctrico.
- Examen de condiciones médicas físicas y psicológicas aptas para trabajos eléctricos.
- Planos y señalización de líneas eléctricas energizadas.
- EPP dieléctrico e ignífugo.
- Distancia de acercamiento a partes eléctricas energizadas.

Estos controles son de los que se tiene un registro formal y que deben ser asociados a las tareas y sus respectivas energías presentes. En el capítulo 5 se mostrará en detalle los resultados y discusión de los controles respecto de las energías, aunque en este punto, es claro que la energía química no está relacionada con ninguna de las categorías mencionadas.

#### 4.4 Factor de probabilidad

Para la elaboración de matrices de riesgo (Estandar australiano AS/NZS 4360, 1999) es necesario determinar distintos factores. En primer lugar, escalar el factor de consecuencia el cual se entiende como el nivel de gravedad de un accidente, el cual puede ir desde heridas leves hasta pérdidas fatales. Para esta propuesta de metodología se plantea trabajar este concepto desde las partes que componen un equipo, en este caso las correas de transporte (poleas, polines, chute, cinta, motor, tensor, etc) y las consecuencias que han tenido los accidentes ahí ocurridos. De esta forma, se evita pensar en situaciones de peligro que podrían ocurrir y se trabaja en base a los elementos conocidos que componen un equipo y sus consecuencias por energías liberadas en accidentes registrados. Luego, el factor de probabilidad, es determinado desde el cruce de las horas hombre invertidas en alguna tarea versus la posibilidad de que el accidente ocurra como se ve en la Figura 21 a modo de ejemplo citado.

		FACTOR DE POSIBILIDAD (posibilidad de que ocurra una consecuencia como resultado del evento indeseado)				
		Muy difícil de imaginar cómo podría ocurrir	Imaginable, pero sólo bajo circunstancias extremas	Se sabe que ha ocurrido	Podría fácilmente ocurrir	Se espera que ocurra siempre
Factor de exposición (frecuencia de exposición al evento indeseado)	Continuo (siempre)	Improbable (D)	Posible (C)	Probable (B)	Probable (B)	Casi cierto (A)
	Frecuente (una vez al mes o más o menos)	Improbable (D)	Posible (C)	Posible (C)	Probable (B)	Probable (B)
	Ocasional (una o dos veces al año)	Raro (E)	Improbable (D)	Improbable (D)	Posible (C)	Posible (C)
	Inusual (una o dos veces cada 10 años)	Raro (E)	Raro (E)	Improbable (D)	Improbable (D)	Improbable (D)
	Remoto (una o dos veces en 100 años)	Raro (E)	Raro (E)	Raro (E)	Raro (E)	Raro (E)

Figura 21. Matriz de probabilidad de ocurrencia. (Estandar australiano AS/NZS 4360, 1999)

De esta matriz, el factor de posibilidad no tiene una definición clara, se trabaja en base a conceptos subjetivos tales como “podría ocurrir fácilmente” o “Imaginable, bajo ciertas circunstancias” sujetos a la experiencia de las personas a cargo de la gestión de riesgos. Lo que se propone, es determinar este factor de posibilidad (utilizado para determinar la probabilidad de ocurrencia de un accidente) mediante la metodología propuesta por (V. Kecojevic, 2008) en donde mediante un registro histórico de accidentes sobre un equipo (Labor, s.f.) “determinar” la posibilidad de ocurrencia de un accidente. Ésta se calcula como el número de años en que hubo al menos un accidente asociado al factor de riesgo sobre el total de años en estudio (en este caso, 9 años), mientras que la “gravedad” es la frecuencia de accidentes asociada al factor en el período de estudio. La Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 muestran cómo se propone la escala.

Tabla 14. Tabla de frecuencia de accidentes. (V. Kecojevic, 2008)

Frecuencia	
Alta	mayor a 9
Media	entre 4 y 8
Baja	menos de 4

Tabla 15. Tabla de probabilidad de ocurrencia. (V. Kecojevic, 2008)

Probabilidad	
Casi cierto	$p=1$
Muy probable	$0.5 < p < 1$
Probable	$0.16 < p < 0.5$
Posible	$p < 0.16$

Tabla 16. Matriz de probabilidad de ocurrencia de un accidente (V. Kecojevic, 2008).

Probabilidad	Casi seguro	Muy alta	Muy alta	Alta
	Muy probable	Muy alta	Alta	Media
	Probable	Alta	Media	Media
	Posible	Media	Media	Baja
		Alta	Media	Baja
		Frecuencia		

Para cada componente de la cinta se realiza este trabajo, se calcula la probabilidad de ocurrencia de un accidente asociado a un tipo de energía. Como se ha estudiado una base de datos de accidentes, a cada uno de ellos se le ha reconocido la energía que ha sido responsable del evento. Con esta metodología se calcula el “factor de posibilidad” que se integra en el proceso de gestión de riesgos como se ha mostrado en la Figura 21.

#### 4.5 Cálculo del riesgo residual

Cuando se instalan controles de seguridad, como barreras de protección, es necesario saber cuál es el riesgo remanente que deja este control el cual busca disminuir los peligros existentes. Para esto, se propone calcular la efectividad de estas barreras físicas mediante simulaciones numéricas que cuantifiquen la cantidad de energía que éstas pueden disipar.

Para efectos de esta investigación, se toma como ejemplo una barrera de contención de mineral bajo las cintas transportadoras tal como se ve en la Figura 22.



Figura 22. Barrera de contención de reja soldada

Si la energía capaz de contener la barrera es inferior a la energía que puede estar presente frente a ella, en este caso particular la energía cinética cuando de la cinta en movimiento podrían caer minerales. Entonces la barrera puesta no es suficiente para mantener un entorno seguro. El caso esperable es que la energía capaz de contener la barrera sea superior a las energías que puede tener frente a ella.

## CAPÍTULO 5

### Resultados y discusión

#### 5.1 Gráficas de energías

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos del cálculo de energías presentes en el sistema de correa de transporte.

##### 5.1.1 Energía cinética

La energía cinética en los componentes de la correa se muestra en la Figura 25, donde la cinta concentra la magnitud más alta dada su gran envergadura. Las condiciones de operación consideradas para este cálculo están en la Tabla 17.

Tabla 17. Condiciones de operación para el cálculo de energía cinética

Velocidad de la cinta ( $v_b$ )	6,42	$m/s$
Capacidad de carga ( $Q$ )	12.550	$ton/h$

Estas condiciones corresponden a las nominales de operación. Esto implica que, en labores de inspección, se debe tener especial cuidado con la cinta en movimiento, ya que posee un alto nivel de energía cinética pudiendo atrapar a un operador de sus extremidades y arrastrarlo aguas abajo produciendo lastimaduras graves.

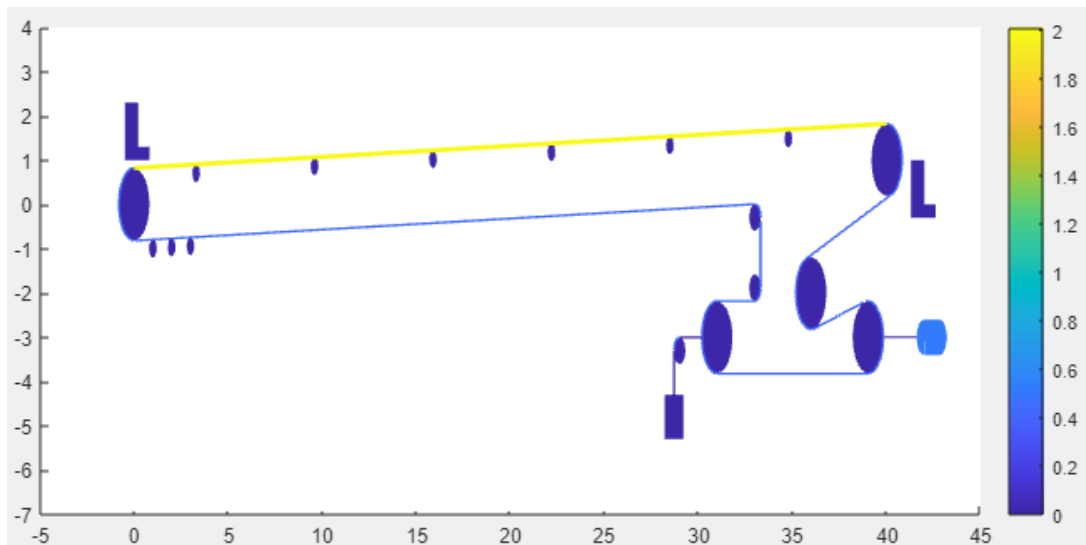


Figura 23. Energía cinética en el sistema de correa transportadora.

### 5.1.2 Energía eléctrica

La energía eléctrica está presente en la unidad motriz tal como se ve en la Figura 24 y para efectos de este estudio se considera como la energía que se podría liberar en un accidente de electrocución. Esta energía es bien conocida por su peligrosidad y existen medidas de seguridad comunes las que hacen tomar conciencia de las consecuencias que puede traer un mal manejo de ella.

Tabla 18. Condiciones de operación para el cálculo de energía eléctrica.

<b>Potencia eléctrica (<math>P</math>)</b>	6792.27	HP
--	---------	----

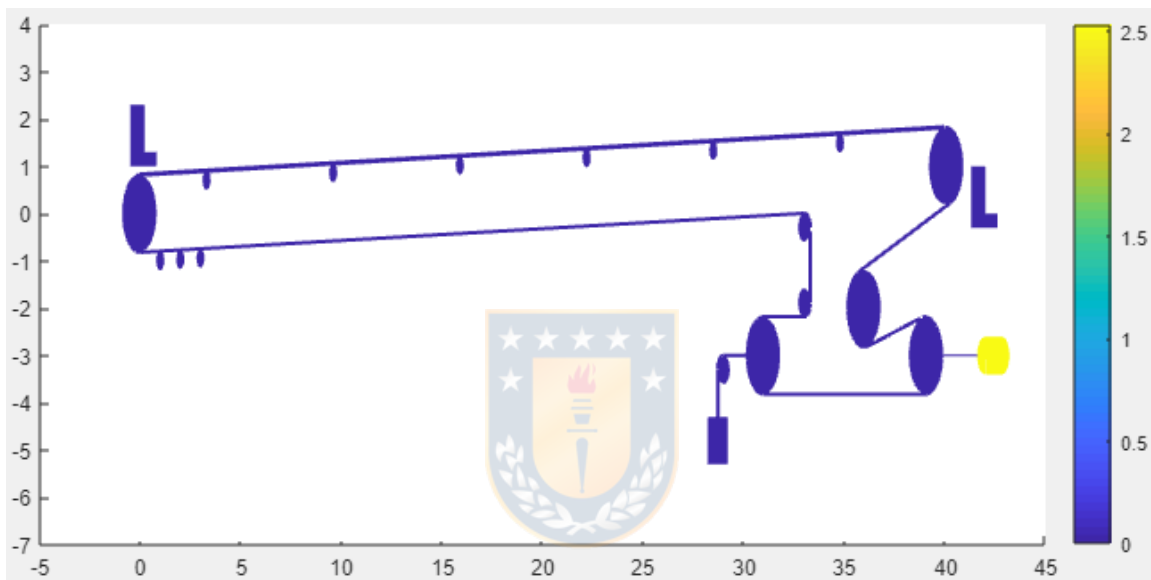


Figura 24. Energía eléctrica en el sistema de correa transportadora.

### 5.1.3 Energía gravitacional

La energía potencial gravitatoria de los componentes depende completamente de la altura a la que estos se encuentren y por tanto, la energía se verá aumentada cuando la correa se encuentre en altura respecto de suelo, por lo que se requiere conocer las dimensiones de la correa por tramo que se especifican en la Tabla 19. Tal como lo indican las zonas marcadas con un cuadro en la Figura 26, los tramos donde hay un aumento de altura el nivel de energía crece, esto se grafica en las zonas número 2, 4 y 6 que se muestran en la Figura 25, la cual es una representación simplificada de la correa de transporte de acuerdo a lo indicado en la Figura 9. Estas son zonas que están en altura en la correa y que por tanto en caso de que se caiga un objeto, mineral, herramienta, incluso una persona, el nivel de energía al cual se está expuesto es más alto que en las zonas de color azul donde se encuentran a nivel del suelo. La mayor cantidad de energía potencial gravitatoria se encuentra en la masa del sistema tensor, esto debido a su gran masa.

Tabla 19. Largos y alturas por tramo de la correa CT-238

Largo (m)		Altura (m)	
$L_1$	140	$h_1$	2,1
$L_{21}$	7,88	$h_{2max}$	11,34
$L_{22}$	12,31	$h_{2max}$	11,34
$L_{23}$	24,61	$h_{2max}$	11,34
$L_3$	1248,26	$h_3$	2,1
$L_{41}$	48,07	$h_{4max}$	7,69
$L_{42}$	42,69	$h_{4max}$	7,69
$L_{43}$	55,96	$h_{4max}$	7,69
$L_5$	246,34	$h_5$	2,1
$L_{61}$	36,53	$h_6$	7,5
$L_{62}$	64,76	$h_6$	7,5

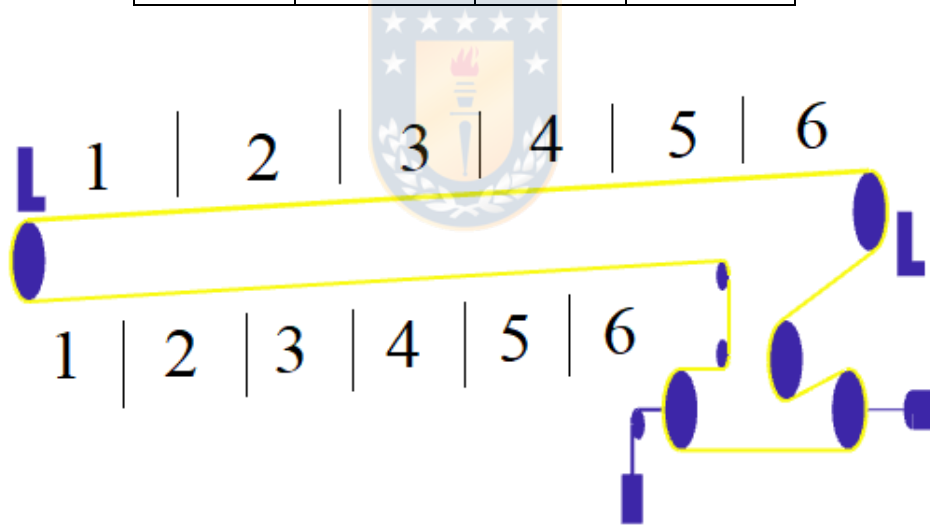


Figura 25. Modelo simplificado dividido en secciones de acuerdo con el perfil de alturas.



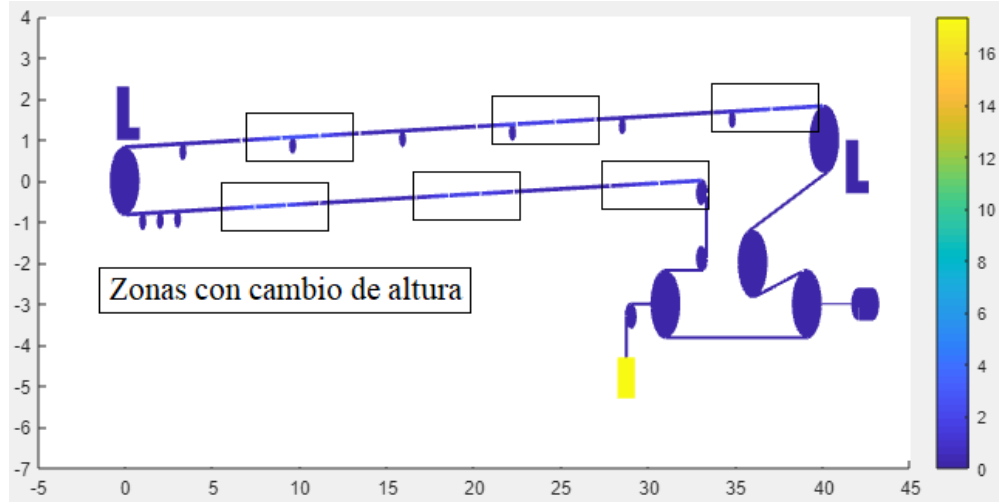


Figura 26. Energía gravitacional en el sistema de correa de transporte.

#### 5.1.4 Energía química

La energía química está presente en la cinta del sistema de correa de transporte tal como se ve en la Figura 27 y entrega un total de  $5,989 \times 10^{10} \text{ MJ}$  de energía disponible a liberar en caso de que se produzca un incendio de la correa. En la Tabla 20 se detallan las características de la cinta con las que se realizan los cálculos.

Tabla 20. Características de la cinta.

Propiedad	Valor	Nomenclatura
Poder calorífico del caucho ( $HV$ )	42.000	$PCI \text{ [kJ/kg]}$
Peso por metro de cinta ( $W_b$ )	37,8	$W_b \text{ [kg/m]}$
Peso por metro de cables de acero ( $W_{sc}$ )	0,25	$W_{sc} \text{ [kg/m]}$
Largo entre cola y cabeza ( $L$ )	1.930	$L \text{ [m]}$
Número de cables de acero ( $n$ )	95	
Diámetro del cable de acero ( $d_{sc}$ )	0.008	$d_{sc} \text{ [m]}$

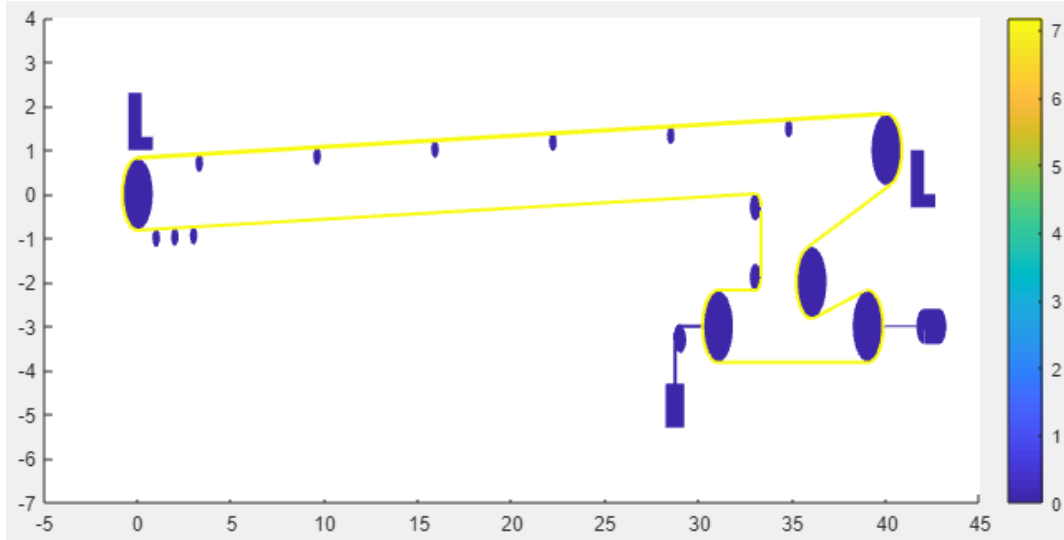


Figura 27. Energía química en el sistema de correa transportadora.

Es claro que el nivel de energía química en la correa es alto y que representa un alto riesgo para los operadores que realicen tareas de mantenimiento con la correa detenida. En ese caso, si uno de los polines de la correa se encuentra a una temperatura suficiente para incendiar la correa, el riesgo de accidentes por incendio es alto, más aún si se encuentra en espacios confinados donde el peligro de asfixia se hace presente.

### 5.1.5 Energía elástica

La energía elástica está concentrada únicamente en la cinta y tiene un total de 7460 [kJ] como se ve en la Figura 28, dado que este elemento se deforma producto del torque aplicado por la polea motriz que genera una tensión de 1080 [kN] en la parte con carga de la correa, sumado a la tensión inicial de 435 [kN] aplicada por el sistema tensor. Esta energía es la que se puede liberar cuando se produce un corte de correa y también es la que podría causar amputaciones parciales o totales de extremidades en el caso de atrapamiento en las poleas. Si bien en magnitud es menor que otras energías, el ancho de banda por el cual se libera esta energía es reducido al ancho de la correa y la siguiente contracción del largo que puede ser violenta y causar daños permanentes en personas hasta pérdidas fatales. Para este caso particular los cables en la cinta son los elementos que acumulan la energía elástica producto de las deformaciones por las tensiones, en la Tabla 21 se muestran los parámetros de la cinta para el cálculo de la energía elástica.

Tabla 21. Características de operación y diseño de la cinta

Propiedad	Magnitud
$T_1$ [kN]	1.080
$T_2$ [kN]	435
$L$ [m]	1.930
$E_{cinta}$ [PSI]	14

$d_{sc}$ [m]	0,008
$n$ [-]	95

Para el lado con carga de la cinta se modela la tensión como una carga lineal desde la polea de cola hacia la polea de punta:

$$T_{up,c} = \frac{T_1 - T_2}{L} x + T_2$$

Donde  $T_1$  corresponde a la tensión proporcionada por la polea motriz,  $T_2$  corresponde a la tensión en la polea de cola la cual es entregada por el sistema tensor como tensión mínima sobre la cinta y  $x$  es la distancia que recorre la cinta desde la polea de cola hacia la polea de punta.

Para el lado de la cinta sin carga, la tensión se considera como constante, igual a la mitad de la masa del contrapeso, esta carga es aplicada desde la polea que resiste la tensión del sistema tensor. Donde la masa del sistema tensor  $W_g$  es igual a 88775,512 [kg] y la tensión máxima alcanzada es calculada mediante parámetros como la velocidad de la cinta, el voltaje, la corriente y potencia del motor. Ahora bien, para efectos de los resultados mostrados a continuación se trabaja con las tensiones de diseño de la cinta las cuales han sido indicadas en la Tabla 21. No obstante, el programa computacional permite el cálculo para diferentes condiciones de operación.

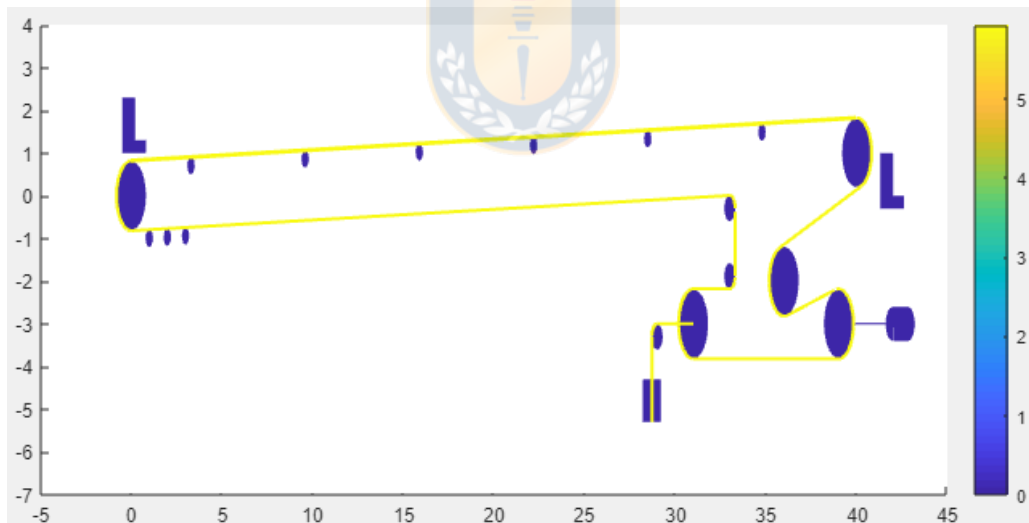


Figura 28. Energía elástica en el sistema de correa transportadora.

### 5.1.6 Energía de onda mecánica

La energía de onda mecánica se presenta en toda la cinta tal como se muestra en la Figura 29, esta energía es la que tiene como consecuencia cortes de cinta y mediante la cual se puede liberar toda la energía elástica almacenada en la correa producto de las deformaciones de los cables al interior de esta sumado a la energía de onda mecánica.

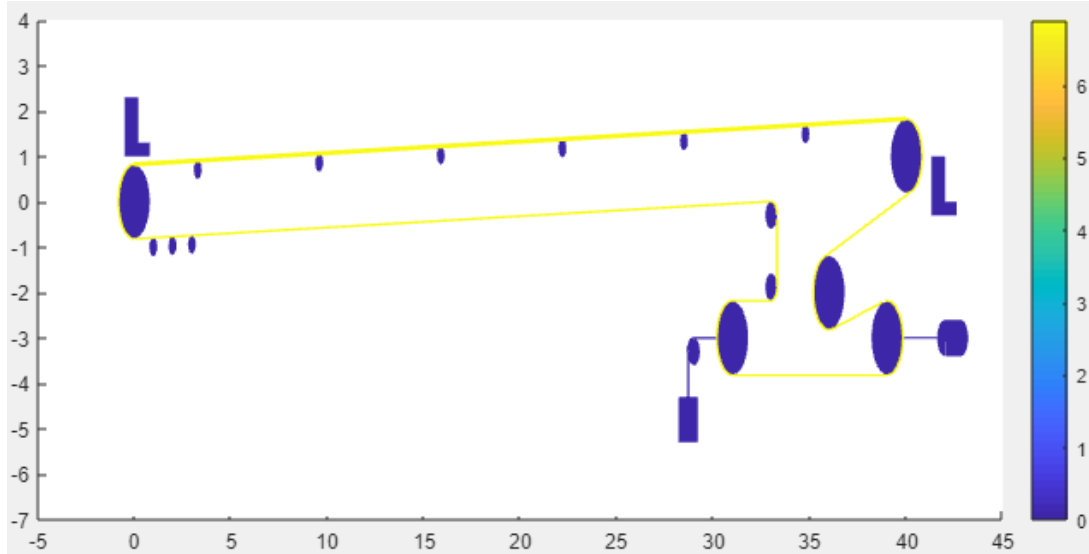


Figura 29. Energía de onda mecánica en el sistema de correa transportadora.

Esta energía se hace presente durante partidas o paradas de la correa transportadora y los controles para ella son los sistemas de control de partida suave y los frenos ABS de las correas transportadoras que hacen un frenado suave. Sin embargo, es necesario visualizar el peor de los escenarios donde los sistemas de control fallan y se produce un corte de correa ya que la energía llega a valores de 210 [kJ] los cuales son suficientes para cortar una cinta o un empalme de esta. En este escenario se debe plantear cuáles son los controles de seguridad que existen, cual es/son las últimas barreras físicas y si éstas son suficientes para mantener a salvo a quienes se encuentren cerca.

### 5.1.7 Energía térmica

La energía térmica está representada como la energía que un polín debe entregar a la cinta para que esta se incendie y libere la energía química descrita anteriormente, para esto el radio y largo del polín:

$$R_1 = 0,152 [m]; L_i = 0,6 [m]$$

La elasticidad de la cinta y polín respectivamente (CES EduPack, 2013):

$$E_c = 6,895 [MPa]; E_i = 210.000 [MPa]$$

El coeficiente de poisson de la cinta y polín respectivamente (CES EduPack, 2013) :

$$\nu_c = 0,49; \nu_i = 0,3$$

La masa molar y densidad de la cinta respectivamente:

$$MM_{SBR} = 519.75 \left[ \frac{ton}{mol} \right]; \rho_{SBR} = 950 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

Así, la energía térmica de un polín para incendiar la correa es igual a:

$$E_t = 0,463 [J]$$

En el Figura 30 se observa el mapa de calor de energía que representa a la energía térmica en los polines, asumiendo que estos se encuentran trabados y han aumentado su temperatura.

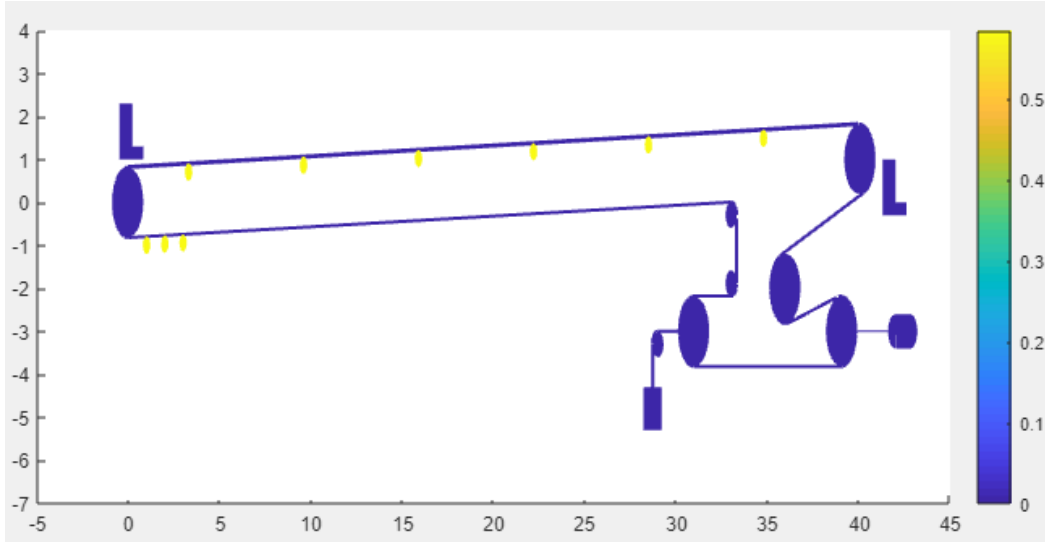


Figura 30. Energía térmica en el sistema de correa transportadora.

El valor de esta energía es bajo en comparación al resto, pero tiene un nivel de riesgo alto por la cantidad de energía que puede liberar posterior a alcanzar la energía de activación de la cinta. Es por esto, que el monitoreo sobre los polines debe ser una prioridad para prevenir trabas de polines y paradas de la cinta, ya que bajo esas condiciones se puede producir un incendio (ver sección 3.7 y 3.7.1).

### 5.1.8 Energía totales

A modo de resumen, se hace una gráfica con la suma de todas las energías presentes como se ve en la Figura 31, esta suma no incluye ni la energía térmica ni la de onda mecánica, dado que se refieren ambas a casos particulares fuera de operaciones normales en la correa transportadora. La energía química si está considerada ya que la ignición de esta puede provenir de otra fuente y no necesariamente de un polín trabado al detener la cinta.

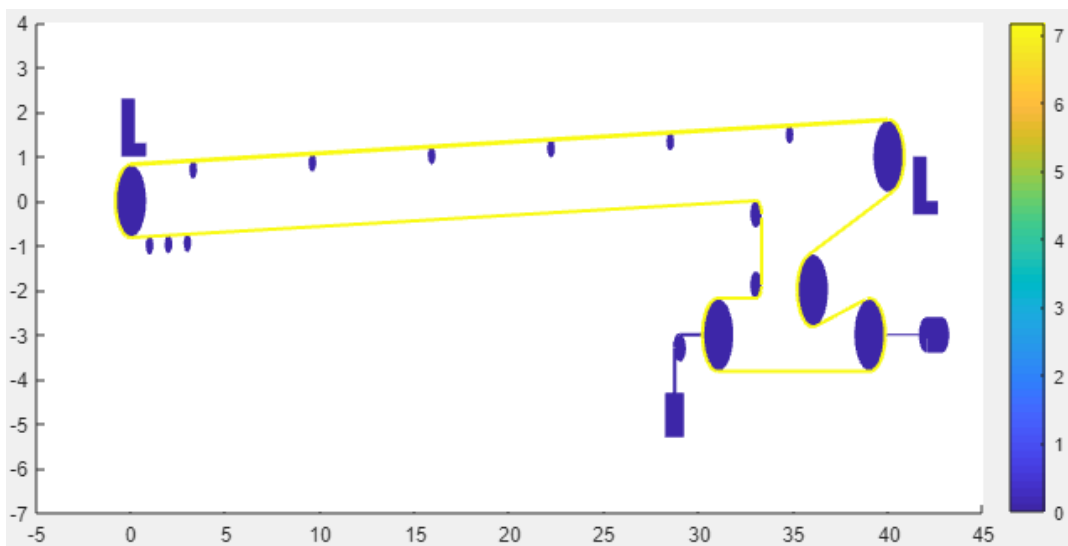


Figura 31. Energías totales en el sistema de correa transportadora.

De la Tabla 22, es claro que la mayor cantidad de energía está presente en la cinta del sistema de correa, lo cual es esperable considerando que es el elemento de gran masa y que está en toda la extensión del sistema. Además, su potencial químico para incendiarse es muy alto en comparación a las demás energías presentes, en la Tabla 23 se detalla la magnitud de cada energía presente en la correa transportadora.

Tabla 22. Energía total por subsistema de la correa transportadora.

<b>Subsistema</b>	<b>Energía (kJ)</b>
Chute alimentador	136.4
Chute de descarga	136.4
Cinta	$5.99 \times 10^{13}$
Masa de mineral	21489.0
Masa tensora	1740.0
Unidad motriz	25691.0
Polea de punta	103.5
Polea motriz	63.1
Polea de cola	45.3
Polines	5.9

Tabla 23. Resumen de energías totales en el sistema de correa de transporte.

<b>Tipo de energía</b>	<b>Magnitud (MJ)</b>
Cinética	50.15
Eléctrica	$8.20 \times 10^{-3}$
Gravitacional	210.07
Química	$5.99 \times 10^{10}$
Elástica	7.46
De onda mecánica	0.21
Térmica	$5.40 \times 10^{-7}$

## 5.2 Tareas, energía y controles de seguridad

Como se vio en la sección 4.3, es necesario realizar un análisis de tareas, energías y controles en la correa transportadora, de esta forma se puede evidenciar sobre que tareas y cuales energías en dichas tareas no poseen controles asociados los cuales se pueden transformar en situaciones de riesgo que comprometan la salud y seguridad de los operadores de la correa. En la Tabla 24 se muestran las tareas sin control con energía elástica, en la Tabla 25 para energía de onda mecánica, en la Tabla 26 para la energía química y en Tabla 27 para la energía térmica. Es claro que también existen tareas que tienen asociados controles para sus energías las cuales se detallan en el anexo.

Tabla 24. Tareas sin controles asociados a la energía elástica.

<b>Chute</b>	Asear chute
	Cambiar placas de chute
<b>Cinta</b>	Alinear cinta

	Medir espesor de cinta
	Reparar cinta en frío
	Cambiar cinta
<b>Polea</b>	Asear polea
	Cambiar polea
	Colocar sensores en polea
	Medir vibraciones de polea
	Lubricar polea
<b>Polín</b>	Asear polín
	Inspeccionar polín
	Cambiar polín en altura
	Cambiar polín a nivel de suelo
<b>Sistema tensor</b>	Inspeccionar sistema tensor
<b>Unidad motriz</b>	Alinear unidad motriz
	Cambiar unidad motriz
	Inspeccionar unidad motriz
	Lubricar unidad motriz
	Medir vibraciones de unidad motriz
	Tomar termografía de unidad motriz
	Limpiar housing de la unidad motriz

Para la energía elástica no existen controles evidentes que se puedan relacionar con los mencionados en la sección 4.3, esto es preocupante dado que se encuentran tareas como cambiar polines que poseen una alta exposición en horas hombre, al igual que la polea donde en ambos casos los riesgos de atrapamiento son los más comunes en correas de transporte los cuales pueden terminar en amputaciones o laceraciones de extremidades como se verá más adelante en la sección 5.3. Aun cuando estos trabajos en la cinta se realizan con la detención de la misma, la cinta sigue en tensión producto del sistema tensor, por lo que es una energía con la que se debe tener los cuidados necesarios.

Se recomienda uso de barreras de seguridad que impidan la cinta se salga de su zona de operación al igual que el mineral sobre ella producto de la liberación de energía elástica.

Tabla 25. Tareas sin controles asociados a la energía de onda mecánica.

<b>Cinta</b>	Alinear cinta
<b>Polea</b>	Medir vibraciones de polea
	Lubricar polea
<b>Polín</b>	Inspeccionar polín
<b>Sistema tensor</b>	Inspeccionar sistema tensor
<b>Unidad motriz</b>	Alinear unidad motriz
	Inspeccionar unidad motriz
	Lubricar unidad motriz
	Medir vibraciones de unidad motriz
	Tomar termografía de unidad motriz

En este caso, si bien no se encontraron controles evidentes es conocido el uso de partidores y frenados suaves para las correas transportadoras. Sobre estos equipos se debiese documentar las mantenciones pertinentes como un procedimiento formal asociado a un riesgo de corte de correa. Dado que una parada de emergencia por accionamiento del pull cord (el cual frena la correa de forma inmediata) puede ocurrir con personas a un costado de la correa.

Tabla 26. Tareas sin controles asociados a la energía química.

<b>Cinta</b>	Alinear cinta	Sin control explícito (Extintor)
	Empalmar cinta	Sin control explícito (Extintor)
		Sin control explícito (Termografía)
	Medir espesor de cinta	Sin control explícito (Extintor)
		Sin control explícito (Termografía)
	Reparar cinta en caliente	Sin control explícito (Extintor)
		Sin control explícito (Termografía)
	Reparar cinta en frío	Sin control explícito (Extintor)
		Sin control explícito (Termografía)
	Cambiar cinta	Sin control explícito (Extintor)
<b>Polea</b>	Asear polea	Sin control explícito (Extintor)
	Cambiar polea	Sin control explícito (Extintor)
	Medir vibraciones de polea	Sin control explícito (Extintor)
	Lubricar polea	Sin control explícito (Extintor)
<b>Polín</b>	Asear polín	Sin control explícito (Extintor)



		Sin control explícito (Termografía)
	Inspeccionar polín	Sin control explícito (Extintor)
		Sin control explícito (Termografía)
	Cambiar polín en altura	Sin control explícito (Extintor)
		Sin control explícito (Termografía)
	Cambiar polín a nivel de suelo	Sin control explícito (Extintor)
		Sin control explícito (Termografía)
<b>Sistema tensor</b>	Inspeccionar sistema tensor	Sin control explícito (Extintor)
<b>Unidad motriz</b>	Alinear unidad motriz	Sin control explícito (Extintor)
	Inspeccionar unidad motriz	Sin control explícito (Extintor)
	Lubricar unidad motriz	Sin control explícito (Extintor)
	Medir vibraciones de unidad motriz	Sin control explícito (Extintor)
	Tomar termografía de unidad motriz	Sin control explícito (Extintor)
	Limpiar housing de la unidad motriz	Sin control explícito (Extintor)

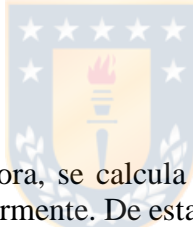
Es una de las energías más altas en el sistema de correas, sin embargo, no existen controles explícitos sobre esta energía, aun cuando en terreno se aprecian extintores cada cierta cantidad de metros. Evitar un incendio de una correa transportadora con extintores no representa una medida de control suficiente, se recomienda tener mejor control de la temperatura de los polines o en su defecto trabajar en la detección de polines trabados. Por otra parte, se puede mejorar la detección de incendio temprana con sensores de humo y redes húmedas a lo largo de la cinta para detectar el incendio en forma automática.

Tabla 27. Tareas sin controles asociados a la energía térmica.

<b>Cinta</b>	Empalmar cinta	Energía térmica	Sin control
	Reparar cinta en caliente	Energía térmica	Sin control
	Cambiar cinta	Energía térmica	Sin control
<b>Polea</b>	Asear polea	Energía térmica	Sin control
	Cambiar polea	Energía térmica	Sin control
	Medir vibraciones de polea	Energía térmica	Sin control
	Lubricar polea	Energía térmica	Sin control
<b>Polín</b>	Asear polín	Energía térmica	Sin control
	Inspeccionar polín	Energía térmica	Sin control
	Cambiar polín en altura	Energía térmica	Sin control
	Cambiar polín a nivel de suelo	Energía térmica	Sin control

<b>Sistema tensor</b>	Inspeccionar sistema tensor	Energía térmica	Sin control
<b>Unidad motriz</b>	Alinear unidad motriz	Energía térmica	Sin control
	Cambiar unidad motriz	Energía térmica	Sin control
	Inspeccionar unidad motriz	Energía térmica	Sin control
	Lubricar unidad motriz	Energía térmica	Sin control
	Medir vibraciones de unidad motriz	Energía térmica	Sin control
	Tomar termografía de unidad motriz	Energía térmica	Sin control
	Limpiar housing de la unidad motriz	Energía térmica	Sin control

Si bien es una energía de baja magnitud, puede desencadenar un evento de alto riesgo como un incendio. Es vital para este caso tener control sobre los polines, tanto en la detección de polines trabados y del aumento de su temperatura, más aún si se acerca una detención de la correa donde las probabilidades de incendio aumentan en el caso que un polín se encuentre a altas temperaturas en contacto con la cinta.



### 5.3 Energías y accidentabilidad

Por cada locación de la correa transportadora, se calcula la probabilidad de que ocurra un accidente vinculado a las energías encontradas anteriormente. De esta forma, se tiene por cada locación en la cinta la posibilidad de que una energía se vincule con un accidente.

Los resultados obtenidos sólo para la cinta y polea se muestran en la Tabla 28, Tabla 29, Tabla 30 y Tabla 31 donde se calcula por cada componente del sistema de correa transportadora (ver Anexo para el resto de las componentes) la posibilidad de ocurrencia de un accidente provocado por cada energía presente en él de acuerdo a los datos recopilados de accidentes de los últimos años (Labor, s.f.) aplicando el método de cálculo propuesto por Kecojevic (V. Kecojevic, 2008).

Tabla 28. Probabilidad de ocurrencia y frecuencia de accidentes en la cinta por energía en Cinta.

Año	CINTA		
	Cinética	Elástico / Cinética	Potencial gravitatoria
2010		1	
2011		3	1
2012	1	8	3
2013	1	4	
2014		2	4
2015		1	2

2016		1	
2017		10	3
2018		1	
<b>Total</b>	2	31	13
<b>Probabilidad</b>	0,22	1,00	0,56
<b>Frecuencia</b>	2	31	13

Tabla 29. Matriz de probabilidad de ocurrencia de accidentes por energía para Cinta.

<b>CINTA</b>			
Casi cierto	Elástico/Cinética		
Muy probable	Potencial gravitatoria		
Probable			Cinética
Posible			
	Alta	Media	Baja

Tabla 30. Probabilidad de ocurrencia y frecuencia de accidentes en la cinta por energía en Poleas.

<b>POLEAS</b>			
<b>Año</b>	Cinética	Elástico / Cinética	Potencial gravitatoria
2010		1	
2011		5	
2012	1	9	
2013		13	2
2014		5	
2015		1	
2017	1	47	4
2018		3	
<b>Total</b>	2	84	6
<b>Probabilidad</b>	0,22	0,89	0,22
<b>Frecuencia</b>	2	84	6

Tabla 31. Matriz de probabilidad de ocurrencia de accidentes por energía para Poleas.

<b>POLEAS</b>			
Casi cierto			
Muy probable	Elástico/Cinética		
Probable		Potencial gravitatoria	Cinética
Posible			
	Alta	Media	Baja

Donde en la Tabla 32 se muestra la escala de colores que se utilizan en las tablas Tabla 29 y Tabla 31.

Tabla 32. Escala de colores propuesta

<b>Escala</b>	<b>Color</b>
Muy alta	Rojo
Alta	Lila
Media	Amarillo
Baja	Celeste

Con esta metodología quedan fuera conceptos subjetivos en el factor de probabilidad de un accidente, siendo necesaria la búsqueda o elaboración de una base de datos sólida de accidentes referidos a una máquina o proceso. Ya que, en el caso de no existir accidentes vinculados a energías, la posibilidad de ocurrencia del accidente relacionado a una energía será siempre baja. Aunque, a diferencia de otros métodos, con el cálculo de energías se adquiere una visión de donde pueden ocurrir accidentes sin la necesidad de suponer situaciones que no han ocurrido.

## 5.4 Riesgo residual

Para el cálculo del riesgo residual, se trabaja con un barrera de contención inferior escogida como ejemplo, la cual es utilizada para correas de al menos 90'' de ancho y tiene dimensiones de 101.4'' de largo y 25'' de ancho. Se modela mediante elementos finitos de viga, los cuales para el marco tienen perfil rectangular con un ancho 25.4 [mm] y de espesor 6 [mm]. Para el acero que conforma la malla soldada se han utilizado elementos finitos de viga al igual que en el caso anterior pero con forma circular maciza con un radio igual a 1.6 [mm]. De esta forma realizando la unión de los elementos coincidentes entre el marco y la malla y de cada línea que conforma la malla se logra modelar una estructura sólida como se aprecia en la Figura 32.

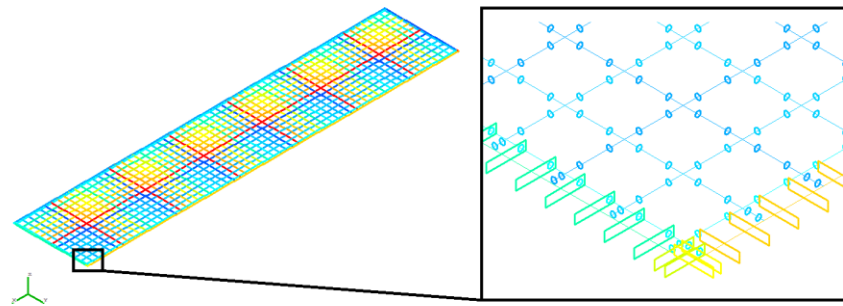


Figura 32. Modelo computacional y tipo de elementos utilizados.

Se simulan 4 casos de carga, el primero donde toda la carga se distribuye a lo largo de la malla, el segundo donde la carga se concentra al centro de esta, el tercero donde la carga se concentra a un costado de esta y por último un caso de carga puntual.

El material utilizado para la simulación corresponde a un acero estructural SAE-1020 (Cia. General de aceros S.A, 2007) con comportamiento elástico-perfectamente plástico con deformación máxima del 2% considerada para la ruptura, las propiedades mecánicas se listan en la Tabla 33.

Tabla 33. Propiedades mecánicas de acero SAE 1020.

	Acero SAE-1020
Módulo de elasticidad (MPa)	21000
Esfuerzo de fluencia (MPa)	300
Elongación máxima (%)	2
Módulo de poisson (-)	0.3

En las figuras Figura 33 y Figura 34 se muestran los resultados de las simulaciones numéricas para 4 casos de carga diferentes sobre la malla.

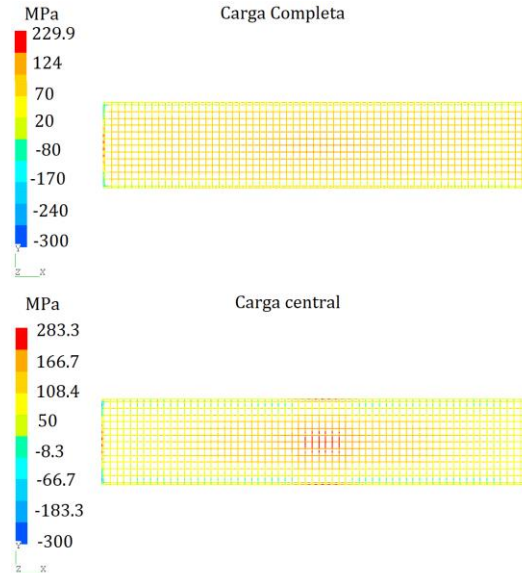


Figura 33. Esfuerzo equivalente máximo para casos de carga distribuida al centro y carga distribuida en toda la malla.

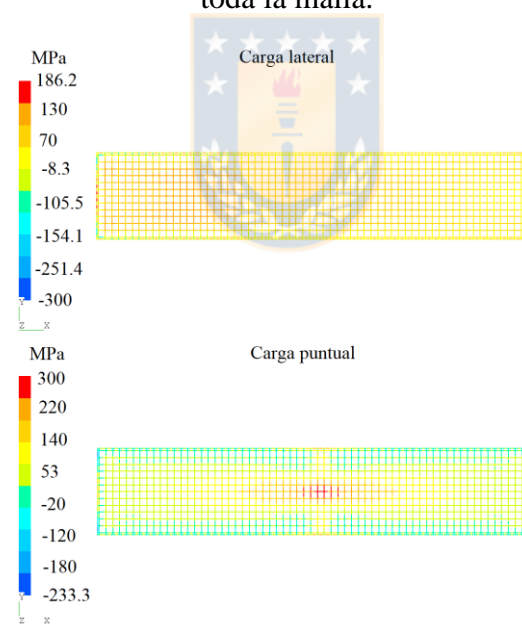


Figura 34. Esfuerzo equivalente máximo para casos de carga distribuida lateral y carga puntual al centro de la malla.

De las simulaciones realizadas, los casos de carga distribuida al centro, al costado (lateral) y carga completa. El límite de ruptura se alcanza en los puntos de anclaje de la barrera, donde se infiere que de ocurrir esta falla todo el mineral sería dejado en caída libre al suelo. Caso distinto el de una carga puntual en la reja, donde el esfuerzo máximo se encuentra al centro donde de producirse la falla solo una fracción de la protección quedaría expuesta.

En la Tabla 34, se muestran las magnitudes de las cargas aplicadas y la energía de deformación elástica que se presentó en la malla hasta llegar al límite de fluencia del material.

Tabla 34. Resultados de energía de deformación simulada.

Carga	Fuerza máxima (N)	Energía total (J)
1.- Completa	13,123.1	86.47
2.- Central	11,457.6	104.6
3.- Lateral	7,681.15	32.56
4.- Puntual	5,298.88	63.24

De los resultados obtenidos, la energía máxima contenida por la barrera protectora es diferente para cada caso y esto se relaciona con las zonas que se ven deformadas en ella. En base a la disposición de las cargas, la barrera podría funcionar de mejor o peor forma. Esto es, que algunas zonas de la barrera de contención llegan a su límite de energía de deformación máxima antes que otras.

La energía máxima de deformación para el caso de la carga completa es superior a la energía del caso de carga lateral y lo mismo ocurre con las fuerzas máximas. Esto se explica dado que, en el caso de carga lateral, la deformación y esfuerzo de la malla es mayor en un solo lado de ella tal como se observa en la Figura 34. Ocasionando la falla sólo en la zona de mayor esfuerzo, siendo necesaria una menor fuerza y también menor energía. A diferencia del caso de carga completa donde toda la extensión de la malla se deforma para contener la carga.

Para los casos de carga central y puntual, las magnitudes de fuerza y energía presentan diferencias, lo cual se explica dado que para una carga situada en la zona centro de la malla se tiene una mayor área de influencia. Por lo que la tensión será repartida entre más elementos alrededor de la carga. Contrario al caso de una carga puntual, donde existen menos elementos alrededor y éstos son deformados con mayor facilidad llegando a su límite de ruptura con una menor carga y por tanto soportan una menor cantidad de energía.

Las energías a las que se expone una barrera de contención, son las energías asociadas a la cinta y polímeros. Los valores de estos se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Energía presente por operación en la Cinta del sistema de correa transportadora

	Energía (J)			
	Cinética	Gravitatoria	Elástica	Onda mecánica
Empalmar cinta	2,61E+07		7.462.100	
Reparar cinta en frío	2,61E+07		7.462.100	
Reparar cinta en caliente	2,61E+07		7.462.100	
Inspeccionar cinta	2,61E+07	2,10E+08	7.462.100	215.180
Medir espesor de cinta	2,61E+07		7.462.100	215.180
Alinear cinta	2,61E+07		7.462.100	215.180
Cambiar polín	2,61E+07	2,10E+08	7.462.100	

Asear polín	2,61E+07	2,10E+08	7.462.100	
Inspeccionar polín	2,61E+07	2,10E+08	7.462.100	215.180
Inspeccionar sistema tensor	2,61E+07	2,10E+08	7.462.100	215.180
Cambiar celda de carga de sistema tensor	2,61E+07	2,10E+08	7.462.100	

Es claro, al ver los órdenes de magnitud que la barrera está muy por debajo de la cantidad de energía a la que se puede ver enfrentada. Considerando sólo la energía cinética que incluye la energía del mineral sobre ella y fraccionada por la longitud de la cinta (2000 m aprox.) la cantidad de energía capaz de contener, sigue siendo inferior por lo que la barrera puesta no está en condiciones de soportar un posible accidente.





## CAPÍTULO 6

### Conclusiones y perspectivas

#### 6,1 Conclusiones

Esta metodología propuesta para un sistema de gestión de riesgos presenta ventajas en la identificación de peligros, pues al utilizar el cálculo de energías aparecen nuevas fuentes que no son evidentes por simple inspección. Esto permite una visión completa de los peligros latentes para su posterior análisis de plausibilidad. En este punto se trabajó sobre el concepto de probabilidad de ocurrencia de un accidente propio de un peligro, entendiendo este como una forma de energía que se puede liberar, se aplicó un método para cuantificar la posibilidad de ocurrencia de un accidente dejando de lado los conceptos subjetivos que se manejan típicamente.

Del análisis de energías realizado, un aspecto relevante tiene que ver con la identificación y cálculo de energías elástica, química, térmica y de onda mecánica, las cuales no se observan a simple vista. Estas energías representan peligros para quienes trabajan en la correa transportadora, ya que, si se liberan en forma de un corte de correa o de un incendio, los daños pueden ser fatales. Además, existe una relación directa entre la energía de onda mecánica y elástica, dado que, si la onda mecánica provoca un corte en la cinta, la energía elástica acumulada se libera al instante. Lo mismo ocurre con la energía térmica, si esta alcanza la energía de activación del caucho de la cinta, la energía química es liberada en la combustión.

Respecto de las energías cinética, potencial gravitatoria y eléctrica, son formas de energía conocidas y de las cuales se hace una asociación directa con accidentes ocurridos en el pasado de contusiones, fracturas, caídas y electrocución. La velocidad de la correa y el flujo de mineral influyen directamente en la magnitud de la energía cinética. Así mismo, la altura en que se realicen los trabajos va a cambiar la energía potencial de los elementos en la cinta, por lo que cambia la percepción del riesgo en el lugar con mayor naturalidad ante una persona.

Respecto de los controles de seguridad, es de suma importancia conocer la magnitud de los peligros presentes. Ésta se puede cuantificar en base a la cantidad de energía a la que queda expuesta una persona luego de aplicar una barrera de seguridad. Donde la energía que puede contener una barrera es diferente dependiendo de los casos de carga a los que se vea sometida. Se recomienda realizar simulaciones numéricas y ensayos mecánicos para entregar estos datos a quienes adquieran herramientas de control para contener energías. Esto resulta en un desafío de diseño para mejorar el desempeño de las barreras de control de peligros.

Esta nueva metodología puede ser integrada en las metodologías actuales de gestión de riesgos como un aporte a la seguridad y salud de las personas en la industria ya que se puede aplicar a otra máquina o proceso productivo.

## 6,2 Perspectivas

Como trabajo futuro, este estudio se puede extender a otros equipos dado que se ha demostrado la existencia de energías sin controles explícitos en los protocolos de seguridad. Por el desconocimiento de la magnitud de estos el cual ha sido mostrado a través del análisis energético.

Estudiar la dinámica en que las energías se pueden liberar y causar daños sobre una persona a fin de encontrar “radios de influencia” de las energías en las máquinas.

Implementar estos estudios en la etapa de diseño de plantas de procesos productivos o de montaje de equipos.



## Referencias

- AZoM. (2003). *Emulsion Polymerised Styrene Butadiene Rubber (E-SBR) – Mechanical, Electrical and Cure Properties and Resistance to Fluids*. Obtenido de AZoM.com: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1844>
- Bhushan, B. (2001). *Modern Tribology Handbook*. Boca Ratón, FL: CRC Press.
- Budynas, R., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Octava ed.). México D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- CEMA. (2007). *Belt Conveyors for Bulk Materials*. Nápoles, FL: Conveyor Equipment Manufacturers Association.
- CES EduPack. (2013). *Styrene butadiene rubber (SBR, unreinforced)*.
- Cia. General de aceros S.A. (2007, Marzo). SAE 1020 y SAE 1045. Aceros de ingeniería al carbono. *Acero SAE 1020*. Bogotá, Colombia.
- CTCPRENSA. (24 de Marzo de 2016). *CTC conmemora los 51 años de la tragedia del relave minero "El Cobre"*. Obtenido de Confederación de Trabajadores del Cobre: <http://www.confederaciondelcobre.cl/erbocefnoc/tag/tragedia-del-relave-minero-el-cobre/>
- Drenkelford, S. (2015). *Energy-saving potential of Aramid-based conveyor belts*. Delft: Delft University of Technology.
- Energy*. (Diciembre de 2018). Obtenido de Wikipedia, the free encyclopedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Energy>
- Estandar australiano AS/NZS 4360. (1999). *Administración de riesgos*.
- Federación Minera de Chile. (19 de Junio de 2017). *A 72 años de la mayor tragedia minera de la historia, Federación Minera de Chile exige ratificación de Convenio 176 de la OIT*. Obtenido de Federación Minera de Chile: <http://www.federacionminera.cl/a-72-anos-de-la-mayor-tragedia-minera-de-la-historia-federacion-minera-de-chile-exige-ratificacion-de-convenio-176-de-la-oit/>
- Feyrer, K. (2015). *Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability* (Segunda ed.). Londres: Springer.
- Francart, W. J. (2006). Reducing belt entry fires in underground coal mines. *11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium 2006*, 303-308.
- Goodyear. (2006). *Bandas transportadoras Flexsteel*.
- Harrison, A. (1983). Criteria for minimising transient stress in conveyor belts. *Mechanical Engineering Transactions, Vol. ME8*, 129-134.
- He, D., Pang, Y., Lodewijks, G., & Liu, X. (2018). Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials. *Powder Technology*, 408-419.
- IEC. (2014). *IEC 60034-30-1:2014 Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*. Ginebra: International Electrotechnical Commission.

- Labor, U. S. (n.d.). *www.osha.gov*. Retrieved from *www.osha.gov*:  
[https://www.osha.gov/pls/imis/AccidentSearch.search?acc\\_keyword=%22Conveyor%20Belt%22&keyword\\_list=on](https://www.osha.gov/pls/imis/AccidentSearch.search?acc_keyword=%22Conveyor%20Belt%22&keyword_list=on)
- Legrand. (2011). *Guía de potencia 2011. Dispositivos de corte y protección*. Madrid, España: Legrand Group España.
- Lodewijks, G. (2002). Two Decades Dynamics of Belt Conveyor Systems. *Bulk Solids Handling*, 22(2), 124-132.
- Manojkumar, H., & Shiyam, R. (2014). Fire risk prevention and control measures in belt conveyor. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 3(4), 1084-1087.
- OSHA. (s.f.). *Accident Search Results*. Obtenido de Occupational Safety and Health Administration: [https://www.osha.gov/pls/imis/AccidentSearch.search?acc\\_keyword=%22Belt%20Conveyor%22&keyword\\_list=on](https://www.osha.gov/pls/imis/AccidentSearch.search?acc_keyword=%22Belt%20Conveyor%22&keyword_list=on)
- Pascual, R., Meruane, V., & Barrientos, G. (2005). Analysis of transient loads on cable-reinforced conveyor belts with damping consideration. *Proceedings of the XXVI Iberian Latin-American congress on computational methods in engineering CILAMCE*.
- Potencia y energía en una onda*. (s.f.). Obtenido de Laplace:  
[http://laplace.us.es/wiki/index.php/Potencia\\_y\\_energ%C3%ADa\\_en\\_una\\_onda](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Potencia_y_energ%C3%ADa_en_una_onda)
- Ramesan, M., & Kumar, T. (2009). Preparation and properties of different functional group containing styrene butadiene rubber. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 23-27.
- Reason, J. (2000). Human error: models and management. *British Medical Journal*, 768-770.
- Sernageomin. (2019). *Accidentabilidad Minera segundo Trimestre 2019*. Obtenido de [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/accidentabilidad\\_Minera/Accidente\\_sMinerosTercerTrimestre2017.pdf.pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/accidentabilidad_Minera/Accidente_sMinerosTercerTrimestre2017.pdf.pdf)
- SONAMI. (Agosto de 2012). *Ley de seguridad e institucionalidad minera*. Obtenido de <http://www.sonami.cl/site/wp-content/uploads/2016/03/01.-Ley-de-Seguridad-e-Institucionalidad-Minera.pdf>
- Standards Association of Australia. (1999). *AS/NZS 4360:1999 Administración de Riesgos*. Sídney: Standards Association of Australia.
- V. Kecojevic, e. a. (2008). Risk Assessment for Belt Conveyor-Related Fatal Inidents in the US Mining Industri. *Bulk Solids & Powder*, 63-73.
- Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria* (Decimosegunda ed., Vol. 1). Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación.
- Yuan, L., & Litton, C. (2007). Experimental Study Of Flame Spread On Conveyor Belts In A Small-Scale Tunnel. *National Institute for Occupational Safety and Health*.

## ANEXO

Detalle de todas las tareas por locación y sus respectivos controles,

Tabla 36. Controles asociados a las tareas y energías en la correa de transporte

Locación	Tarea	Energía	Control	
<b>Chute</b>	<b>Asear chute</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual, Protecciones físicas (barrera física que impide la interacción entre hombre máquina)	
		Energía gravitatoria	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual, Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje) Plataformas y superficies de trabajo Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión	
	Energía elástica	Sin control		
	<b>Cambiar chute</b>	Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje) Comunicación efectiva para zona segura de trabajo, Demarcación/Delimitación/Segregación/observador de seguridad zona segura de trabajo y actividades con puntos ciegos, Dispositivos de seguridad, Plataformas y superficies de trabajo Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión	
		<b>Cambiar placas de chute</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual, Protecciones físicas (barrera física que impide la interacción entre hombre máquina)
			Energía gravitatoria	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual, Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje) Plataformas y superficies de trabajo

			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
<b>Cinta</b>	<b>Alinear cinta</b>	Energía cinética	Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Protecciones físicas (barrera física que impide la interacción entre hombre máquina)
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
	<b>Empalmar cinta</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
			Sin control explícito (Termografía)
		Energía térmica	Sin control
		Energía eléctrica	Distancia de acercamiento a partes eléctricas energizadas
			EPP dieléctrico e ignífugo
			Herramientas y equipos aislados eléctricamente,
	<b>Medir espesor de cinta</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
			Sin control explícito (Termografía)
	<b>Reparar cinta en caliente</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
			Sin control explícito (Termografía)
		Energía térmica	Sin control
		Energía eléctrica	Distancia de acercamiento a partes eléctricas energizadas
			EPP dieléctrico e ignífugo

			Herramientas y equipos aislados eléctricamente,
	<b>Reparar cinta en frío</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
			Sin control explícito (Termografía)
	<b>Cambiar cinta</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Demarcación/Delimitación/Segregación/observador de seguridad zona segura de trabajo y actividades con puntos ciegos,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía térmica	Sin control
<b>Polea</b>	<b>Asear polea</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Demarcación/Delimitación/Segregación/observador de seguridad zona segura de trabajo y actividades con puntos ciegos,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo

			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía térmica	Sin control
	<b>Cambiar polea</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Demarcación/Delimitación/Segregación/observador de seguridad zona segura de trabajo y actividades con puntos ciegos,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía térmica	Sin control
	<b>Colocar sensores en polea</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control



	<b>Medir vibraciones de polea</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
	<b>Lubricar polea</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
<b>Polín</b>	<b>Asear polín</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,

			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Delimitación de áreas expuestas a caída de objetos,
			Elementos de contención para caída de objetos
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
			Sin control explícito (Termografía)
		Energía térmica	Sin control
	<b>Inspeccionar polín</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
			Sin control explícito (Termografía)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
	<b>Cambiar polín en altura</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Accesorios de izaje manuales certificados y revisados,

			Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Delimitación de áreas expuestas a caída de objetos,
			Elementos de contención para caída de objetos
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
			Sin control explícito (Termografía)
		Energía térmica	Sin control
	<b>Cambiar polín a nivel de suelo</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Accesorios de izaje manuales certificados y revisados,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
			Sin control explícito (Termografía)
		Energía térmica	Sin control
<b>Sistema tensor</b>	<b>Inspeccionar sistema tensor</b>	Energía cinética	Demarcación/Delimitación/Segregación/observador de seguridad zona segura de trabajo y actividades con puntos ciegos,
			Protecciones físicas (barrera física que impide la interacción entre hombre máquina)
		Energía gravitatoria	Demarcación/Delimitación/Segregación/observador de seguridad zona segura de trabajo y actividades con puntos ciegos,
			Protecciones físicas (barrera física que impide la interacción entre hombre máquina)
		Energía elástica	Sin control

		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
<b>Unidad motriz</b>	<b>Alinear unidad motriz</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
		Energía eléctrica	Acceso controlado y restringido a instalaciones eléctricas
			Aislamiento, bloqueo y prueba de energía cero
			EPP dieléctrico e ignífugo
			Herramientas y equipos aislados eléctricamente,
	<b>Cambiar unidad motriz</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Demarcación/Delimitación/Segregación/observador de seguridad zona segura de trabajo y actividades con puntos ciegos,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,

			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía térmica	Sin control
		Energía eléctrica	Acceso controlado y restringido a instalaciones eléctricas
			Aislamiento, bloqueo y prueba de energía cero
			EPP dieléctrico e ignífugo
			Herramientas y equipos aislados eléctricamente,
	<b>Inspeccionar unidad motriz</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
		Energía eléctrica	Acceso controlado y restringido a instalaciones eléctricas
			Distancia de acercamiento a partes eléctricas energizadas
			EPP dieléctrico e ignífugo
			Herramientas y equipos aislados eléctricamente,
	<b>Lubricar unidad motriz</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)

			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
		Energía eléctrica	Acceso controlado y restringido a instalaciones eléctricas
			Distancia de acercamiento a partes eléctricas energizadas
			EPP dieléctrico e ignífugo
			Herramientas y equipos aislados eléctricamente,
	<b>Medir vibraciones de unidad motriz</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
		Energía eléctrica	Acceso controlado y restringido a instalaciones eléctricas

			Distancia de acercamiento a partes eléctricas energizadas
			EPP dieléctrico e ignífugo
			Herramientas y equipos aislados eléctricamente,
	<b>Tomar termografía de unidad motriz</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,
			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
		Energía eléctrica	Acceso controlado y restringido a instalaciones eléctricas
			Distancia de acercamiento a partes eléctricas energizadas
			EPP dieléctrico e ignífugo
			Herramientas y equipos aislados eléctricamente,
	<b>Limpiar housing de la unidad motriz</b>	Energía cinética	Aislamiento, bloqueo, prueba de energía cero y liberación de energía residual,
			Comunicación efectiva para zona segura de trabajo,
			Dispositivos de seguridad,
		Energía gravitatoria	Arnés de seguridad y accesorios (Incluye punto de anclaje)
			Elementos de sujeción para herramientas durante trabajo sobre nivel físico,

			Limpieza área de trabajo niveles superiores (Material acumulado en estructuras o plataformas),
			Plataformas y superficies de trabajo
			Plan específico de primera respuesta para trauma por suspensión
		Energía elástica	Sin control
		Energía química	Sin control explícito (Extintor)
		Energía de onda mecánica	Sin control (freno de correa)
		Energía térmica	Sin control
		Energía eléctrica	Acceso controlado y restringido a instalaciones eléctricas
			Distancia de acercamiento a partes eléctricas energizadas
			EPP dieléctrico e ignífugo
			Herramientas y equipos aislados eléctricamente,

