

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## **Evaluación de sensores e instrumentación utilizados en análisis de fallas de maquinaria de transporte en minería**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

**Autor:** Rafael Ruiz Ortiz  
**Director:** Juan Suardiaz Muro

Cartagena, 10 de octubre de 2017



# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## **Evaluación de sensores e instrumentación utilizados en análisis de fallas de maquinaria de transporte en minería**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

**Autor:** Rafael Ruiz Ortiz  
**Director:** Juan Suardiaz Muro

Cartagena, 10 de octubre de 2017



Dedicado a toda la gente que ha hecho posible que este proyecto finalice, tanto amigos como  
compañeros, profesores y familia.



---

# Contenido

1.	Introducción	1
2.	Objetivo	1
2.1.	Objetivo General	1
2.2.	Objetivos Específicos	2
3.	Alcance	2
4.	Fases del proyecto	2
5.	Estructura y fallos típicos de un BCS	4
5.1.	Cinta	4
5.2.	Sistema de potencia	6
5.3.	Rodillos	7
5.4.	Poleas	9
5.5.	Frenos de disco	10
5.6.	Tabla resumen de fallos comunes	11
6.	Análisis modal de fallos de un BCS	12
6.1.	Descripción del BCS investigado	12
6.2.	Ratio de fallo de la cinta	12
6.2.1.	Fallos mecánicos	13
6.2.2.	Fallos eléctricos	13
6.2.3.	Otros fallos	13
7.	Evaluación de tecnología y productos actuales	15
7.1.	Sensores basados en imágenes	15
7.2.	Sensores embebidos	16
7.3.	Sensores de temperatura	17
7.4.	Sensores de medición de vibración	18
7.5.	Motores eléctricos sin reductor	19
7.6.	Sensores de alineamiento	19
7.7.	Sistema de gestión de frenado inteligente	20
8.	Evaluación de nuevas tecnologías	21
8.1.	Detección de imágenes basado en rayos X	21
8.2.	Monitorización de vibración sin contacto	21
8.3.	Sensores de presión MEMS	22
8.4.	Detección mediante visión binocular integrativa (IBVD)	22
8.5.	Detección de rodamientos defectuosos mediante intensidad en el estator	24
9.	Propuesta de BCS	26
10.	Presupuesto estimado	28
11.	Conclusiones	29
12.	Referencias	32

## Abreviaturas

<b>AEI</b>	Desalineamiento angular del rodillo (del inglés: <i>Idler Angular Misalignment</i> )
<b>AHE</b>	Algoritmo de ecualización del histograma (del inglés: <i>Histogram Equalisation Algorithm</i> )
<b>BCS</b>	Sistema de cintas correderas (del inglés: <i>Belt Conveyor System</i> )
<b>CCD</b>	Dispositivo de carga acoplada (del inglés: <i>Charge Coupled Device</i> )
<b>CEMA</b>	Asociación de Fabricantes de Equipamiento para Cintas correderas (del inglés: <i>Conveyor Equipment Manufacturers Association</i> )
<b>DSP</b>	Procesador digital de señales (del inglés: <i>Digital Signal Processor</i> )
<b>EMI</b>	Interferencia electromagnética (del inglés: <i>Electromagnetic Interference</i> )
<b>IBVD</b>	Detección mediante Visión Binocular Integrativa (del inglés: <i>Integrative Binocular Vision Detection</i> )
<b>IEEE</b>	Instituto de ingeniería Eléctrica y Electrónica (del inglés: <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> )
<b>MEMS</b>	Sistemas Electromecánicos (del inglés: <i>Microelectromechanical Systems</i> )
<b>MFL</b>	Pérdida de flujo magnético (del inglés: <i>Magnetic flux leakage</i> )
<b>MCC</b>	Control principal de la cinta (del inglés: <i>Main Conveyor Control</i> )
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>PIB</b>	Producto Interior Bruto
<b>RB</b>	Bandas regulares (del inglés: <i>Regular Bands</i> )
<b>TMPS</b>	Sistema de monitorización de presión de neumáticos (del inglés: <i>Tyre Pressure Monitoring System</i> )



---

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Esquema de un BCS típico.....	4
Ilustración 2: Esquema de una cinta.....	5
Ilustración 3: Clasificación de cintas por grados.....	5
Ilustración 4: Sistema de potencia.....	6
Ilustración 5: Porcentaje de fallos en caja de cambios en motores utilizados en minas de carbón.....	6
Ilustración 6: Rodillo de retorno (izq.) y rodillo de carga (der.).....	7
Ilustración 7: Vista superior de la cinta corredera mostrando el desalineamiento del rodillo.....	8
Ilustración 8: Calculadora de gastos por desalineamiento.....	8
Ilustración 9: Esquema de una polea típica.....	9
Ilustración 10: Tipos de Poleas.....	9
Ilustración 11: Sistema de frenado hidráulico básico.....	10
Ilustración 12: Deceleración sin controlador (izq.) y con controlador (der.).....	10
Ilustración 13: Tabla de fallos comunes de un BCS.....	11
Ilustración 14: Tabla de fallos Gwarek -1200.....	12
Ilustración 15: Tabla de fallos mecánicos Gwarek -1200.....	13
Ilustración 16: Tabla de fallos eléctricos Gwarek -1200.....	13
Ilustración 17: Tabla de otros fallos Gwarek -1200.....	13
Ilustración 18: Imágenes de la cinta en tiempo real.....	16
Ilustración 19: Estructura de correa que utiliza sistemas de detección por medio de sensor loop.....	17
Ilustración 20: Software inteligente de gestión, adquisición y alarmas para control de temperatura.....	18
Ilustración 21: Esquema sensor de vibración.....	18
Ilustración 22: Motor con reductor (izq.) y motor sin reductor (der.).....	19
Ilustración 23: Interruptor de Desalineamiento.....	20
Ilustración 24: Curva de presión hidráulica.....	20
Ilustración 25: Zonas defectuosas ampliadas.....	21
Ilustración 26: Principio Fundamental del sensor electrostático.....	22
Ilustración 27: Diagrama de adquisición de imágenes.....	23
Ilustración 28: Instalación del sensor IBVD.....	23
Ilustración 29: Diagrama del montaje del experimento.....	24
Ilustración 30: Dominio de la frecuencia del rodamiento sano (B1) y del defectuoso (B2).....	24
Ilustración 31: Cinta transportada El Abra.....	26
Ilustración 32: Esquema de propuesta final de BCS.....	30



# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción

Los sistemas de cintas transportadoras o BCS, han sido utilizados en el mundo entero para transportar pasajeros, carga general o carga a granel durante los últimos unos 250 años. Los BCS juegan un papel importante en el transporte continuo a granel en la industria minera. Comparada con otros sistemas de transporte utilizados frecuentemente, como trenes o camiones, los BCS son los más adecuados para transportar grandes volúmenes de forma rápida y eficiente en procesos de producción en áreas donde las carreteras y las vías de tren no llegan o no están igual de desarrolladas [1]. Durante las últimas décadas, el desarrollo de tecnología diseñada para BCS ha permitido la construcción de correas más largas, rápidas y eficientes, con mayor capacidad y menor impacto ambiental.

La industria minera del cobre ha crecido notoriamente en Chile desde los años 90. Este impulso fue debido principalmente por una fuerte inversión extranjera, con un porcentaje del 33.3% del total del país [2]. Chile es el mayor exponente en producción de cobre, renio, nitratos naturales, litio y yodo, además de destacada participación en extracción de molibdeno, plata y oro [3]. La industria minera representa el 9 % del PIB del país [4], situándose como uno de los mercados más importantes de la economía chilena.

Debido al estado actual de las exportaciones de cobre, las cuales se han visto reducidas en un 16% en el primer cuatrimestre de 2016 con respecto al cuatrimestre del año anterior [5], es necesario disminuir costes y aumentar la productividad en el sector minero. Cada vez se hace más costoso acceder a ciertas minas y para ello se hace indispensable disponer de un sistema de transporte eficiente. Chuquicamata Subterránea es un proyecto que consiste en transformar la mina a cielo abierto más grande del mundo en una mina subterránea [6]. Codelco, la empresa estatal que lleva a cabo el desarrollo del proyecto, implantó recientemente un sistema automatizado de inspección de cintas transportadoras dada la necesidad de mantener en buenas condiciones los sistemas de transporte además de reducir tiempos perdidos que generan los incidentes de estos elementos de producción [7].

En resumen, por la necesidad de reducir costos en el sistema de producción de extracción de minerales en Chile, es imprescindible invertir en un sistema de monitorización de correas transportadoras, ya que la extracción cada vez es más compleja y menos accesible, haciendo que se tengan que transportar los minerales a lo largo de kilómetros, significando cualquier parada de un costo muy grande.

## 2. Objetivo

### 2.1. Objetivo General

El objetivo del proyecto consistirá en realizar una evaluación referente al estado del arte de la instrumentación electrónica utilizada en los equipos y componentes mecánicos más importantes del transporte del sector minero, todo ello con finalidad de proponer un sistema en el que se

supervisen los principales motivos de fallo en correas transportadoras. Al realizarse la mayor parte del presente proyecto en el extranjero (Chile) se tendrá en cuenta en gran medida el contexto en el que este se presenta, ya que la industria minera supone una parte muy influyente en la economía del país.

## 2.2. Objetivos Específicos

- Conocer la tecnología y soluciones que están implantando las empresas en la actualidad.
- Presentar las principales características de las correas transportadoras.
- Definir el sistema (correa transportadora) y describir sus modos de operación normal.
- Detectar cuáles son las principales limitaciones existentes en los sistemas de correas transportadoras.
- Desarrollar un análisis sobre los principales proveedores de minería en Chile y evaluar los productos que ofrecen.
- Diseñar un sistema de correas transportadoras que, en un análisis modal de fallos, supervise las variables más críticas del proceso de transporte.
- Realizar una serie de informes y documentos, especificando los procedimientos seguidos.

## 3. Alcance

En este proyecto es de vital relevancia estudiar los productos y servicios que ofrecen las empresas mineras. También es importante establecer los conceptos básicos de funcionamiento de cintas transportadoras, así como sus elementos más importantes.

Se utilizarán revistas especializadas como *IEEE* o *Science Direct* para conocer sobre los últimos avances en cuanto a sensores y tecnología utilizada en correas transportadoras. Una vez estén definidos los productos que parezcan más adecuados para el sistema de correas se establecerá contacto con empresas chilenas que estén dispuestas a proporcionar información sobre dichos productos.

Para proponer un sistema en el que se supervisen y monitoricen los puntos críticos del transporte de minerales, el cual es nuestro objetivo final, será necesario conocer los motivos de parada más frecuentes y/o graves en cintas transportadoras.

## 4. Fases del proyecto

La memoria del proyecto está dividida en cinco capítulos. Cada capítulo contiene una serie de fases, las cuales están ordenadas por orden cronológico.

### Capítulo 1

1. Contextualizar el proyecto e introducirlo
2. Definir los objetivos y el alcance del mismo.

### Capítulo 2

3. Establecer los conceptos básicos de funcionamiento de cintas transportadoras, así como sus elementos más importantes.

4. Presentar de forma resumida y concisa cuales son los fallos más comunes en un BCS.

### **Capítulo 3**

5. Cuantificar el número de paradas que ocurren en una cinta transportadora y su origen.

### **Capítulo 4**

6. Investigar en revistas especializadas sobre los últimos avances en cuanto a sensores y tecnología utilizada en correas transportadoras.
7. Contactar con empresas chilenas que estén dispuestas a proporcionar información sobre dichos productos.
8. Generar una evaluación de que sensores pueden corregir las fallas mencionadas previamente.

### **Capítulo 5**

9. Proponer un sistema en el que se supervisen y monitoricen los puntos críticos del transporte de minerales en un BCS.
10. Estimar un presupuesto y el consiguiente ahorro de forma anual.

## CAPÍTULO 2

### 5. Estructura y fallos típicos de un BCS

Un BCS es generalmente utilizado de forma continuada, teniendo así una alta eficiencia y gran capacidad, una construcción simple y poco mantenimiento. Es adecuada para distintos tipos de distancias y de materiales transportados. Los principales motivos que condicionan el buen desarrollo de las herramientas de monitorización en el sector minero son debidos al duro entorno en el que se encuentran.

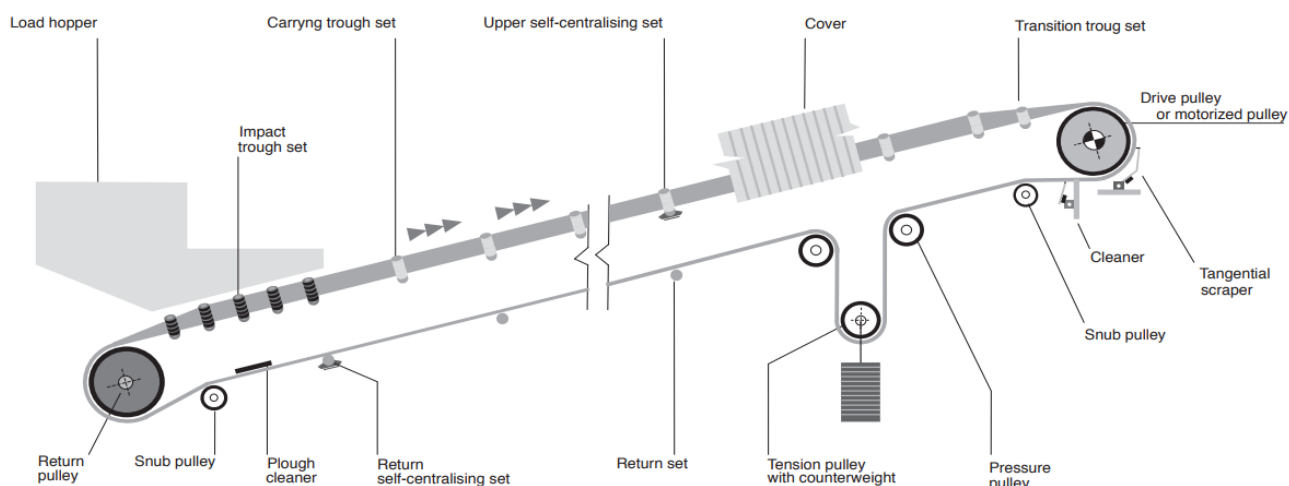


Ilustración 1: Esquema de un BCS típico.

En la siguiente sección consideraremos los tipos de fallos más comunes que nos encontramos en un BCS

#### 5.1. Cinta

Tiene como misión principal soportar y trasladar el material fragmentado. Ha de ser flexible, tanto de forma longitudinal, por el avance y retorno de la banda, como transversalmente, por la curva que ejercen los rodillos. También tiene que ofrecer resistencia a la tensión aplicada por las poleas.

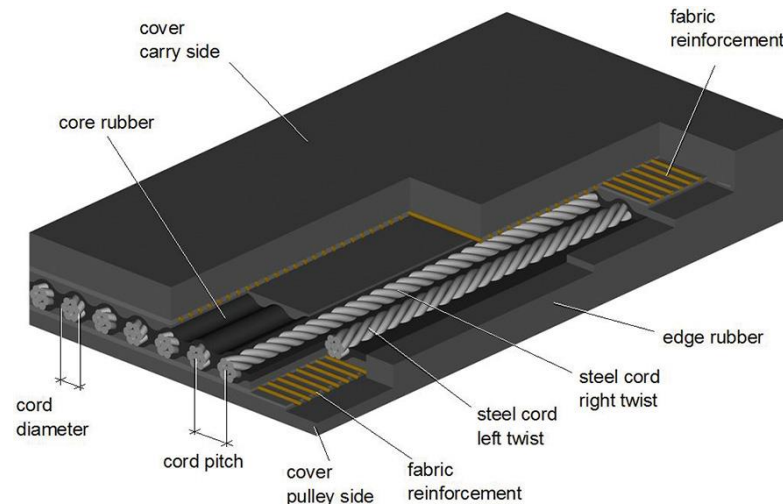


Ilustración 2: Esquema de una cinta

En la figura 2 podemos observar los distintos componentes de una cinta. Una de las partes más relevantes de la cinta es su cubierta, un tejido de algodón, poliéster o poliamida que proporciona resistencia a la tensión. En muchos casos incluye cables de acero. Por otro lado, tenemos el recubrimiento, que es la cubierta de goma que ayuda a amortiguar el desgaste de los golpes. Por último, los empalmes, que sirven para unir segmentos de banda.

La cinta es la parte más importante de un BCS. En estos tipos de sistemas los materiales son transportados desde una estación a otra a través de la cinta. Las cintas están comúnmente clasificadas según los estándares DIN 22102 [8] e ISO 15236 [9]. En la tabla siguiente se desarrolla la nomenclatura utilizada.

Grado	Estándar	Abrasión Máxima ( $mm^3$ )	Resistencia de rotura ( $N/mm^2$ )	Elongación en la ruptura (%)
W	DIN22102	90	18	400
X	DIN22102	120	25	450
Y	DIN22102	150	20	400
Z	DIN22102	250	15	350
H	ISO15236	120	24	450
D	ISO15236	100	18	400
L	ISO15236	200	15	350

Ilustración 3: Clasificación de cintas por grados

La cinta puede sufrir un numero de daños muy significativos con cierta frecuencia. Generalmente suelen estar relacionados con cortes longitudinales en la correa. Estos son los fallos más comunes [10]:

- Daños en la cubierta de la cinta como cortes longitudinales, fisuras, muescas, etc.
- Daños en los bordes de la cinta
- Abertura de los empalmes
- Alargamiento de los empalmes
- Desgaste excesivo o anormal de la cubierta
- Alineación incorrecta de los cables
- Corrosión de los cables debida a la penetración de humedad en cortes, fisuras, reparaciones o empalmes
- Inclusión de objetos extraños
- Solapamiento de la cinta en las poleas

## 5.2. Sistema de potencia

Se encarga de entregar energía mecánica a la polea motora o motriz y, por consiguiente, al sistema móvil. Consiste en un motor eléctrico, un acoplamiento de amortiguación, un sistema reductor de dos o tres etapas y otro acoplamiento que conecta el eje con la polea motora.

El motor eléctrico, de inducción y trifásico, es el encargado de proporcionar torque a la polea motora mediante la conversión de energía eléctrica a mecánica.

Por otro lado, los acoplamientos sirven para reducir tanto las vibraciones como para sobrecargas. Separan mecánicamente la entrada de la caja de cambios con el motor, así como la salida con la polea motora.

Un objeto crucial en este subsistema es la caja de cambios o caja reductora. Esta multiplica el torque del motor mediante engranajes, proporcionando así a la polea motora el torque necesario. Disponen de sistema de lubricación a fin de reducir el roce entre engranajes. Según la industria hasta un 14% de las cajas de cambios tienen que ser reemplazadas cada año debido a fallos no esperados [11].

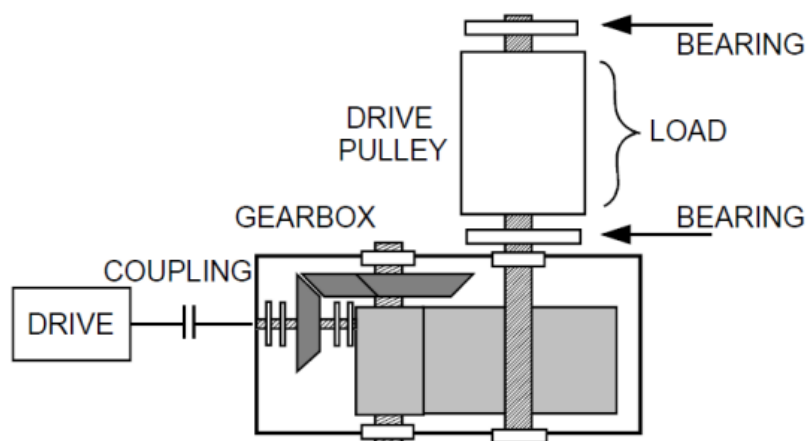


Ilustración 4: Sistema de potencia

La gran mayoría de fallos que surgen en los reductores están relacionados con ruedas dentadas, dientes rotos o rodamientos dañados.

Según un análisis de sistemas eléctricos de potencia utilizados para minas de carbón [12], más del 50% de problemas están relacionado con la fase primaria.

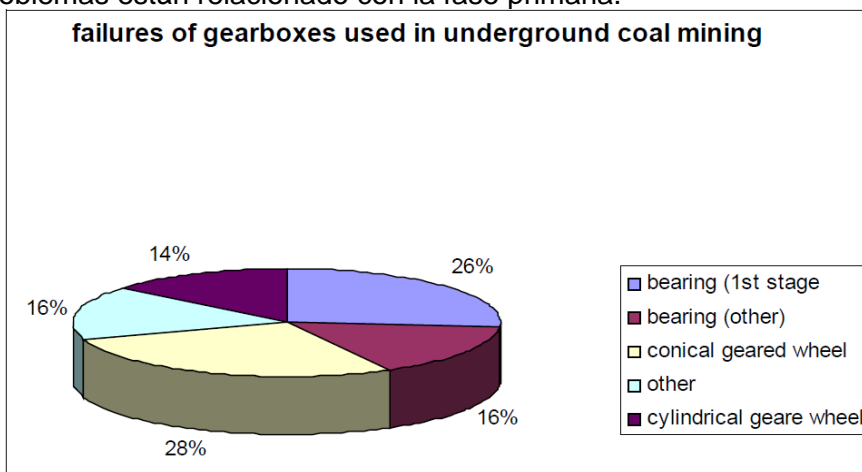


Ilustración 5: Porcentaje de fallos en caja de cambios en motores utilizados en minas de carbón



Como se verá más adelante ya existen varias empresas que ofrecen motores sin fase reductora, los cuales reducen en gran medida el tamaño del motor, la eficiencia y la cantidad de paradas por fallo al año.

### 5.3. Rodillos

Son cilindros de acero que giran de forma solidaria con la banda con bajo deslizamiento entre sus componentes y la banda y con mínimo roce en sus ejes. Contribuyen tanto a la limpieza como al centrado.



Ilustración 6: Rodillo de retorno (izq.) y rodillo de carga (der.).

En la anterior figura podemos observar dos tipos de rodillos existentes. El rodillo de retorno se encarga de sostener la banda durante el trayecto de vuelta de la misma. El rodillo de carga sostiene la banda de forma directa, y el material transportado de forma indirecta. Genera una curva transversal en la banda para evitar el vertido del material. Otro tipo de rodillos son los de impacto, los cuales amortiguan la caída de material durante el depósito sobre la cinta del mismo.

Los motivos más frecuentes de repuesto de rodillos son el desgaste superficial, ya sea por el roce entre la banda y el rodillo o por presencia de polvo y humedad, así como el desgaste de los rodamientos.

Otra razón por la que se puede producir un parón o que puede generar pérdidas de rendimiento es el desalineamiento de los rodillos. Alinear un rodillo quiere decir ajustar el AEI (desalineamiento angular del rodillo) de la figura de abajo a cero. Uno de los problemas que se pueden encontrar a la hora de medir el alineamiento es que la dirección de la correa y el eje de giro del rodillo están separados el uno del otro.

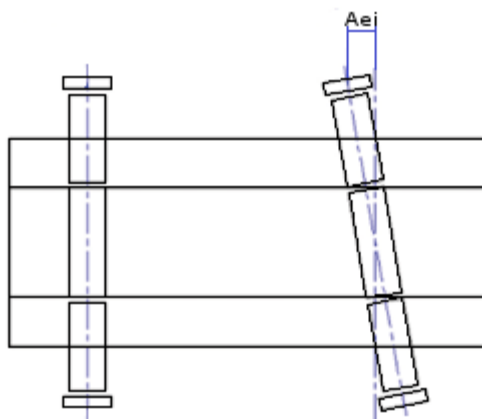


Ilustración 7: Vista superior de la cinta corredera mostrando el desalineamiento del rodillo.

Para medir las pérdidas de energía y el coste de estas se usará como ejemplo una correa [13] de 36 pulgadas de ancho con un desalineamiento medio de 0.25 pulgadas, lo que quiere decir que un extremo está media pulgada por delante del otro. Se divide entonces por el ancho del rodillo, el cual suele ser el ancho de la correa más 9 pulgadas.

Se hará uso de una herramienta disponible [14] para calcular el coste anual debido al desalineamiento de los rodillos. El cálculo del coste se realiza a partir de esta fórmula:

$$\text{Coste Anual} = \frac{\text{Desalineamiento actual} - \text{Desalineamiento deseado}}{\text{Ancho del rodillo}} * \text{factor de fricción}$$

\* (Carga por unidad de longitud + Ancho de correa por unidad de longitud \* 2) + Longitud de correa + Velocidad + Horas de trabajo al año  
 \* Coste de kWh


		Conveyor Design Inputs	
Enter Conveyor Inputs	Conveyor loading	1600	tph
Enter Annual Conveyor Usage	Belt Speed	600	rpm
Enter Average Current Misalignment - see tab below	Belt Width	60	in
Enter Goal Alignment >0" to 1/16"	Belt Weight	10	lb/ft
Enter cost of electricity	Conveyor length	33000	ft
Repeat for each Conveyor- Add all	Conveyor usage	3000	hours per year
	Current alignment*	0,5	in
	Goal alignment**	0,0625	in
	Cost of electricity	\$0,10	/kw-hr
	Annual cost saving %	\$48.427,69	with steel idlers per CEMA

Ilustración 8: Calculadora de gastos por desalineamiento

Para una correa de 33000 pies (aproximadamente 10 km) el ahorro anual sería de cercano a los 50000 dólares por año. Cuanto más larga sea la correa, más alto será el gasto por desalineamiento.

## 5.4. Poleas

Las poleas están generalmente fabricadas en construcciones de acero. Giran solidariamente a la banda y contribuyen al tensado. La carcasa está conectada por medio de dos hubs.

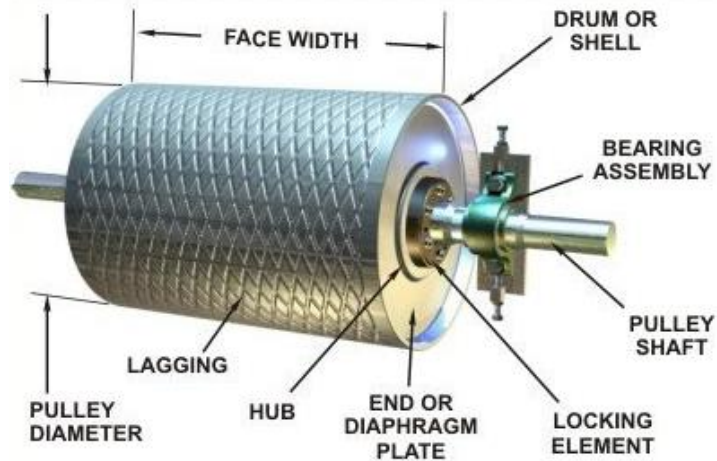


Ilustración 9: Esquema de una polea típica.

En la figura 10 es posible observar los distintos tipos de polea y rodillos que forman parte de un BCS.

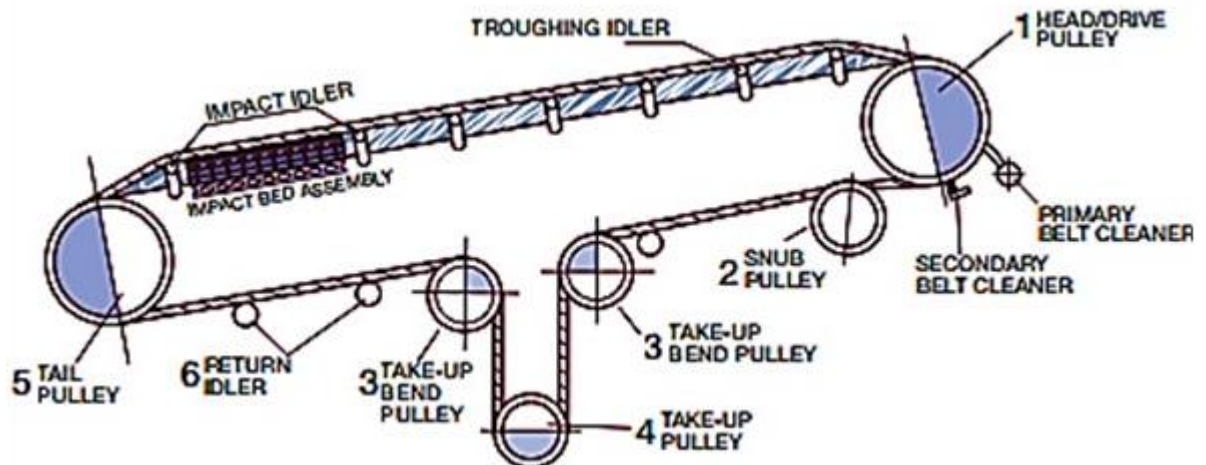


Ilustración 10: Tipos de Poleas.

Correspondiendo con la numeración de la figura 10, a continuación, se definirán exclusivamente las poleas:

- 1 Polea motora: Entrega energía mecánica a la banda proporcionada por el torque del motor eléctrico.
- 2 Polea de inflexión: Aumenta el área de contacto entre la banda y el resto de poleas, contribuyendo a mejorar el tensado
- 3/4 Polea de curvado y contracurvado: Se utilizan para mejorar el ángulo de agarre de la

banda, así como para producir todos los cambios necesarios en la dirección de la correa para contrarrestar el tensionado.

5 Polea de retorno o cola: Permite el retorno de la banda

Al tener un funcionamiento muy similar al de los rodillos, las poleas padecen de los mismos fallos que estos, y su monitorización por lo tanto será parecida en muchos sentidos.

**5.5. Frenos de disco**

Un sistema de frenado se compone de dos pastillas de freno y un sistema hidráulico. Las unidades de frenado para un BCS vienen en distintas formas y tamaños en función del diseño de la cinta transportadora. Se pueden dividir por tanto en dos clases: los sistemas de frenado básico y los sistemas de frenado inteligentes.

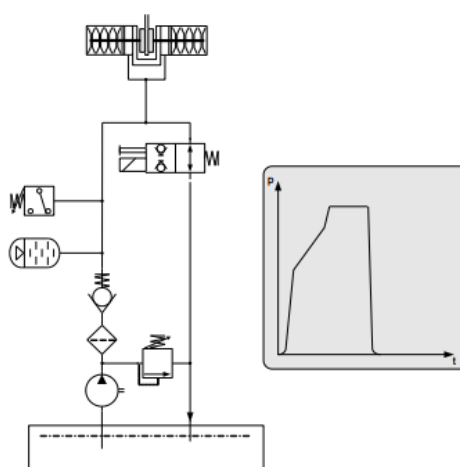


Ilustración 11: Sistema de frenado hidráulico básico

El freno es activado y desactivado por el MCC. En caso de que ocurra un fallo eléctrico, el sistema hidráulico descargará el combustible a la reserva y el freno actuará con toda su fuerza.

Sin embargo, los diseñadores de BCS y operadores no quieren que los frenos actúen inmediatamente de forma completa, sino más bien de forma progresiva, ya que de lo contrario podría dañar otros componentes como rodamientos o incluso estirando la propia correa.

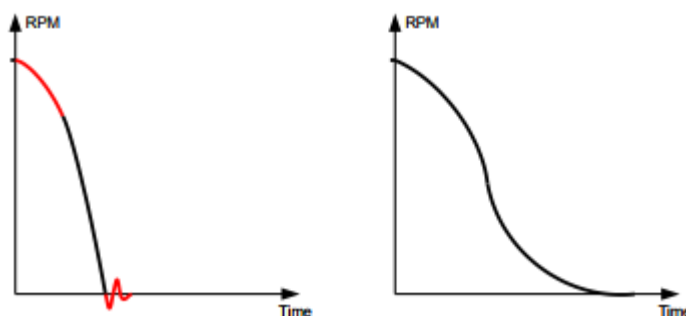


Ilustración 12: Deceleración sin controlador (izq.) y con controlador (der.)

### 5.6. Tabla resumen de fallos comunes

La siguiente tabla sirve como resumen de fallos comunes de los elementos más característicos de un BCS, así como sus correspondientes causas y efectos:

	<b>Fallos comunes</b>	<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
<b>Banda</b>	-Corte Longitudinal y transversal	-Incrustación de objetos metálicos -Cortes de cable de acero y deformación de empalmes	-Impacto de objetos metálicos en el resto de componentes del BCS
<b>Motor eléctrico</b>	-Desgaste de rodamientos	-Lubricación inadecuada -Sobrecargas -Presencia de polvo y humedad	-Aumento de vibraciones
<b>Caja reductora</b>	-Desgaste de rodamientos -Espacio excesivo entre dientes -Desalineamiento de ejes -Fugas de aceite -Acumulación de suciedad en filtros	-Lubricación inadecuada -Sobrecargas -Presencia de humedad -Excentricidad de engranajes	-Aumento de vibraciones
<b>Rodillos y Poleas</b>	-Desgaste superficial -Trabamiento de elementos rodantes	-Presencia de Polvo -Altas temperaturas -Desgaste de componente de rodamiento -Desalineamiento	-Aumento del desgaste natural de la banda
<b>Frenos de disco</b>	-Liberación fallida de pastillas de freno -Pérdida de eficiencia del resorte del sistema hidráulico -Desgaste de pastillas	-Presencia de polvo -Altas temperaturas	-Recambio de pastillas de frenos -Prolongación de la detención del BCS

Ilustración 13: Tabla de fallos comunes de un BCS

## CAPÍTULO 3

### 6. Análisis modal de fallos de un BCS

Con objeto de analizar la estructura y sus subdivisiones es necesario una cuantificación de los fallos más comunes durante el modo de operación de un BCS. Para ello se han tomado datos de una investigación sobre monitorización de fallos en una cinta corredera [15].

#### 6.1. Descripción del BCS investigado

El objetivo de la investigación es una cinta tipo Gwarek -1200. Es un tipo de cinta corredera muy diseñada para la extracción minera de cobre. Puede ser alimentada por uno, dos, tres o cuatro motores de 75, 90, 100, o 132 kW cada uno, dependiendo de la carga, longitud e inclinación.

Especificaciones de la cinta Gwarek -1200:

1. Velocidad de la cinta [m/s]: 1.6, 2, 2.5, 3. Rendimiento correspondiente [t/h]: 600, 800, 1000, 1200.
2. Longitud máxima: 3000 m. (A velocidad máxima con 4 motores de 132 kW).
3. Relación de transmisión: 46.96, 25.68, 39.02, 24.961.
4. Resistencia de la correa: 800-2500 kN/m. (En función de la capacidad y la velocidad).

#### 6.2. Ratio de fallo de la cinta

En el trabajo se analizaron cuatro cintas Gwarek como las mencionadas en el apartado anterior. Se registraron 169 fallos desde enero a diciembre de 2010. Estos han sido divididos por tipo de fallos:

- Fallos mecánicos
- Fallos eléctricos
- Fallos hidráulicos
- Otros fallos (fallos no asociados de forma directa con el funcionamiento del BCS)

Causa	Duración media[ <i>min.</i> ]	Porcentaje de duración	Acumulativo del porcentaje de duración
Mecánicos	201,5	63,8	63,8
Otros	48,8	15,4	79,2
Eléctricos	33,5	10,6	89,8
Hidráulicos	32,2	10,2	100

Ilustración 14: Tabla de fallos Gwarek -1200

La tabla de la figura 11 está ordenada de mayor a menor en función del porcentaje de duración. Como se puede observar la duración media de los fallos mecánicos es la más alta de todos los tipos de fallos, lo que supondrá que los tipos de fallos mecánicos sean el eje central de esta evaluación. Los fallos hidráulicos no se tendrán en cuenta en este estudio ya que son los que ocurren con menor frecuencia.

### 6.2.1. Fallos mecánicos

Causa	Número	Porcentaje	Acumulativo del porcentaje
Cinta rota	17	32,8	32,8
Empalme dañado	13	25	57,8
Bucle fuera de servicio	5	9,6	67,4
Cinta con defectos mecánicos	4	7,7	75,1
Rascador dañado	3	5,8	80,9
Recambio de polea	3	5,8	86,7
Frenos defectuosos	2	3,8	90,5
Recambio en la transmisión	1	1,9	92,4
Fallo en el motor	1	1,9	94,3
Embrague dañado	1	1,9	96,2
Cojinete defectuoso	1	1,9	98,1
Recambio de rodillos	1	1,9	100

Ilustración 15: Tabla de fallos mecánicos Gwarek -1200

Según los datos, la correa dañada es el fallo mecánico más repetido y a su vez el que más problemas genera al funcionamiento normal de un BCS. Por otro lado, fallos que tengan que ver con poleas y rodillos suponen casi el 10% del total de los mismos.

### 6.2.2. Fallos eléctricos

Causa	Número	Porcentaje	Acumulativo del porcentaje
Cinta corredera con fallos eléctricos	56	94,9	94,9
Falta de control	2	3,4	98,3
Sensor de temperatura defectuoso	1	1,7	100

Ilustración 16: Tabla de fallos eléctricos Gwarek -1200

El fallo eléctrico más común es por ineficiencia eléctrica. Sin embargo, este fallo es demasiado genérico como para abordarlo. Además, los fallos a nivel eléctrico en un BCS son difíciles de monitorizar.

### 6.2.3. Otros fallos

Causa	Número	Porcentaje	Acumulativo del porcentaje
Correa quemada	15	30,6	30,6
Falta de intensidad	7	14,3	44,9
Parada	7	14,3	59,2
Ajuste	6	12,3	71,5
Atasco en la cinta corredera	5	10,2	81,7
Rebobinado de correa	2	4,1	85,8
Falta de agua	2	4,1	89,9
Rotura de la cadena de aguante	2	4,1	94
Limpieza de seguridad	1	2	96
Bloqueo	1	2	98
Recambio de plataforma	1	2	100

Ilustración 17: Tabla de otros fallos Gwarek -1200



Se observa que en otra ocasión más la correa se encuentra en lo más alto de la lista de número de fallos. En este caso es por quemadura. Los fallos por atasco, rebobinado de correa, bloqueo y limpieza de seguridad suelen estar relacionados con el polvo y/o restos de minerales incrustados en la cinta.

En otro tipo de correas no subterráneas las condiciones de sol a las que se someten las BCS acaban significando erosiones en la correa y las consecuentes quemaduras.



## CAPÍTULO 4

### 7. Evaluación de tecnología y productos actuales

En este apartado se van a exponer las distintas tecnologías que se pueden encontrar actualmente en el mercado para monitorizar los componentes de un BCS. Es importante señalar las principales limitaciones que es posible encontrar a la hora de instalar nuevas tecnologías para controlar el desgaste de las correas transportadoras [16]:

- Accesibilidad limitada.
- Pocos instantes de parada para mantenimiento e incorporación de sistemas nuevos.
- Presencia de impactos de rocas.
- Altura geográfica, sol, polvo en exceso, temperaturas extremas, lluvias y nieve esporádicas.

Por ello, para diseñar sistemas habrá que tener en cuenta las siguientes características:

- Fácil instalación.
- De muy baja mantención.
- Resistente a las condiciones ambientales.
- Resistente a impactos de rocas.
- Puede instalarse en correas de cualquier tipo.
- Interfaz de fácil manejo para usuarios.
- Monitoreo remoto desde cualquier oficina a través de conectividad ethernet.

#### 7.1. Sensores basados en imágenes

Muchas empresas ofrecen un sistema de monitoreo de daños en la cubierta de la cinta corredera basados en la detección de daños mediante procesamiento de imágenes en tiempo real.

Una solución típica [17] sería una cámara de propósito industrial de alta resolución y velocidad y resistente a temperaturas adversas para captar cualquier problema relacionado con rasgaduras, abolladuras o zonas poco uniformes. El software también incluiría apoyo de decisión y gran capacidad de análisis de imágenes

El sistema permite que el usuario tenga acceso en tiempo real a la zona seleccionada de la cinta corredera. Los defectos podrán ser inspeccionados con el fotograma que el usuario necesite. Además, se podrá tomar un vistazo más de cerca a la cinta mediante pseudo 3D.

El modo de operación suele seguir generalmente los siguientes pasos [16]:

1. La cámara situada después del alimentador está tomando imágenes de forma continuada en busca de signos de desgaste en la correa

2. Mediante algoritmos de procesamiento de imágenes se comparan las imágenes tomadas anteriormente con las actuales para encontrar indicios de desgaste
3. En la sala de operación tienen las imágenes de las zonas que el sistema determina como críticas. El personal encargado los revisa y toma decisiones al respecto.
4. El operador puede pedirle al sistema que le muestra la ubicación, en tiempo real, de la zona con posible grieta para poder programar una inspección visual de ésta.
5. Además, el sistema puede incorporar una alarma de corte, la cual puede alertar a los operadores de la correa de un corte, y puede estar incorporada al sistema de control de los motores, deteniendo inmediatamente la correa.



Ilustración 18: Imágenes de la cinta en tiempo real

## 7.2. Sensores embebidos

Un producto muy utilizado actualmente en la industria [18] es el sensor embebido por bucle de inducción (sensor loop), el cual consiste en antenas conductoras electro-inductivas que se vulcanizan en la cubierta de carga o de retorno y espaciadas de acuerdo con los requerimientos. En cuanto se produce un corte en la correa esta se para inmediatamente y se evita que el daño sea mayor.

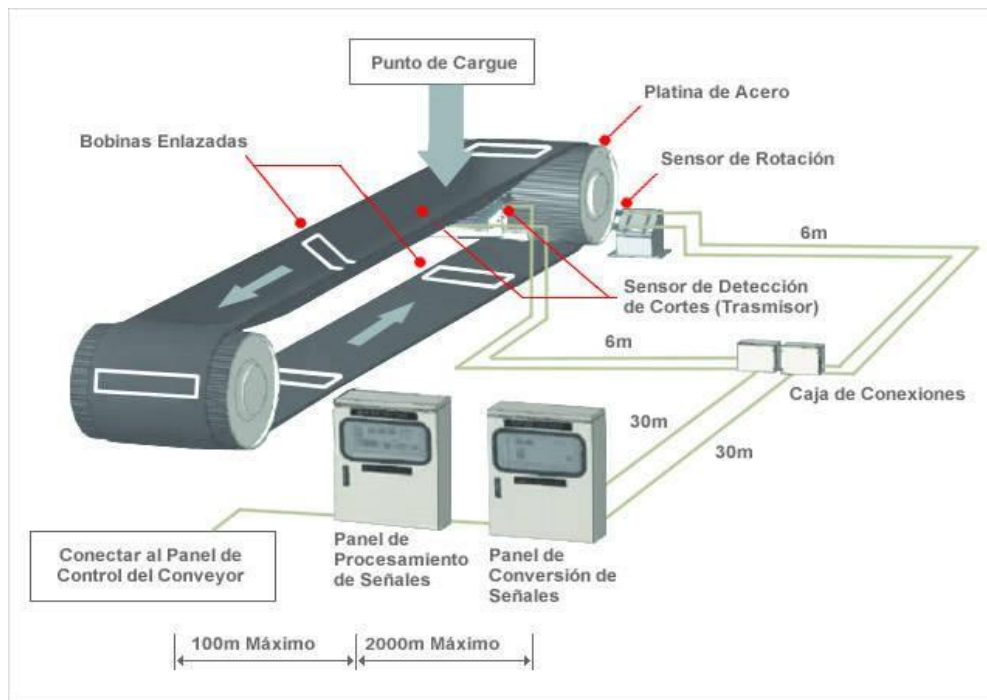


Ilustración 19: Estructura de correa que utiliza sistemas de detección por medio de sensor loop

Con objeto de alargar la vida de los empalmes, los cuales son uno de los puntos más débiles de la correa, existe un sistema de protección para correas. Se basa en la medición de los cambios de longitud de los empalmes instalando magnetos a ambos lados de la correa. De forma previa se mide la elongación de los empalmes, y una vez que se supera una distancia crítica se asume que el empalme está dañado.

Por otro lado, otro sistema de protección basado en una cinta corredera la cual ha sido previamente magnetizada, de manera que, monitorizando continuamente los cambios magnéticos, se pueden detectar desgarres. El sistema de operación consiste en la lectura de pérdidas de flujo magnético o MFL procedente de las cuerdas de la cinta, la cual ha sido previamente magnetizada, que después es comparada con la información anterior de cada ciclo. El propio sistema se encarga a su vez de establecer una valoración desde el punto de vista de la severidad del fallo.

### 7.3. Sensores de temperatura

Existe un método de mantenimiento predictivo para los rodillos que se utilizan en las correas transportadoras [19]. Este se basa en la captación de la temperatura mediante sensores y la correspondiente transmisión de la información vía fibra óptica. El sistema utiliza el principio del Scattering de Ramman para monitorizar elementos a varios kilómetros. Además, se incluye el software de adquisición y gestión de datos.

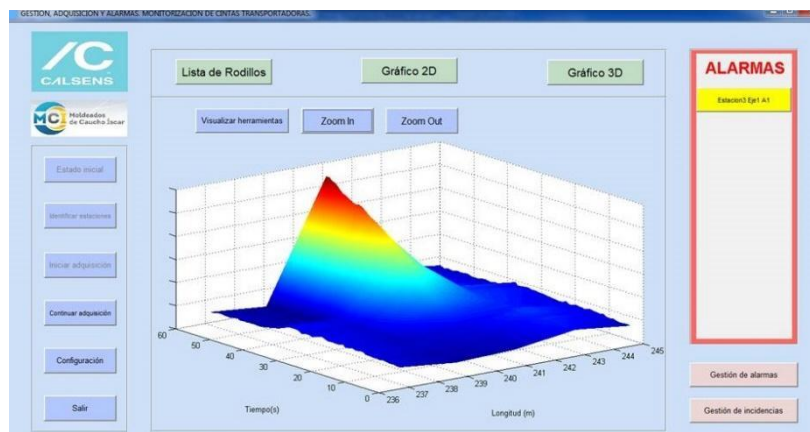


Ilustración 20: Software inteligente de gestión, adquisición y alarmas para control de temperatura

La tecnología se basa en el análisis de luz retro dispersada (back-scattered) [20]. Un pulso láser viaja por la fibra óptica generándose “ecos”, debido a anomalías en la fibra originadas por alguna deformación o cambios de temperatura. El análisis de las frecuencias de estos ecos permite detectar anomalías térmicas presentes a lo largo de la correa, entregando la ubicación y magnitud de éstas mediante la utilización de un software de visualización, previamente configurado según los requerimientos de cada compañía solicitante.

Al ser un sensor distribuido, proporciona una reducción significativa en los costos de instalación, calibración y mantenimiento. Además, la fibra óptica es barata, ligera, flexible, inmune a la humedad e interferencia electromagnética (EMI). Su instalación se realiza de manera que no interfiera con la operación normal de la correa y no obstruya las labores de mantenencias periódicas en ésta.

#### 7.4. Sensores de medición de vibración

La vibración que se origina en los componentes de un BCS se mide a partir de sensores con acelerómetro incorporado. Se montan directamente en la maquinaria que se desea monitorizar lo cual hace posible la detección temprana de problemas. Estos sensores pueden ser inalámbricos, lo que permite monitorizar partes de difícil acceso, además de mantener al personal fuera de zonas de peligro. Puede elegirse un punto de alarma ajustable, y conectar la salida NPN o relé para parar la maquinaria o como parte de un sistema de alarmas.

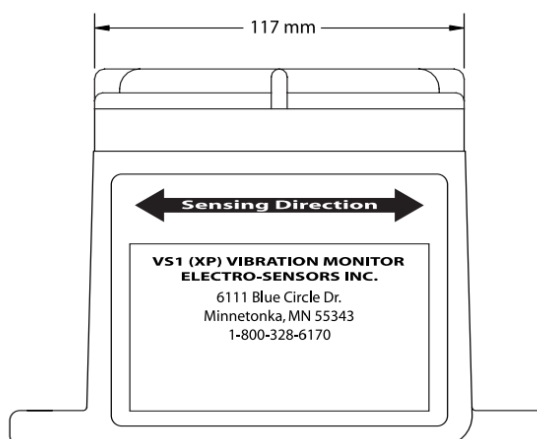


Ilustración 21: Esquema sensor de vibración.

Es importante resaltar que los sensores como el de la figura 15 solo detectan vibración en la dirección que se marca en los mismos [21], siendo importante para su instalación.

Dentro de la gama de sensores existentes en el mercado podemos diferenciar entre aquellos que están diseñados para detectar vibración demasiado alta o baja en maquinarias tales como motores eléctricos grandes, reductores de velocidad. Por otro lado, tenemos sensores que detectan baja o alta velocidad en máquinas que funcionan con vibraciones deliberadas, tales como conductores y alimentadores de vibración. En el caso que concierne esta investigación es necesario medir vibraciones no deseadas, por lo que el primer tipo de sensores es el más apropiado.

### 7.5. Motores eléctricos sin reductor

En referencia al apartado 8.2. en el que se mencionaba que los reductores de los motores eléctricos suponen una fuente de fallos para la fase de potencia de las BCS, ciertas empresas han desarrollado variadores de frecuencia sin reductor, lo cual reduce en gran medida la parte mecánica de los motores, traduciéndose en un menor consumo, menos componentes, menores costes y mayor disponibilidad.

Permite la transmisión directa producida por la máquina eléctrica sin necesidad de caja reductora. Estos motores al funcionar a una baja velocidad son controlados por un convertidor de frecuencia que modula la frecuencia y amplitud de la tensión alterna para tener un control total del sistema

Las principales ventajas son [22]:

- Control más suave
- Torque inicial controlado a bajas frecuencias
- Factor de potencia alto  $> 0.95$
- No necesita mucho mantenimiento y tiene una gran disponibilidad

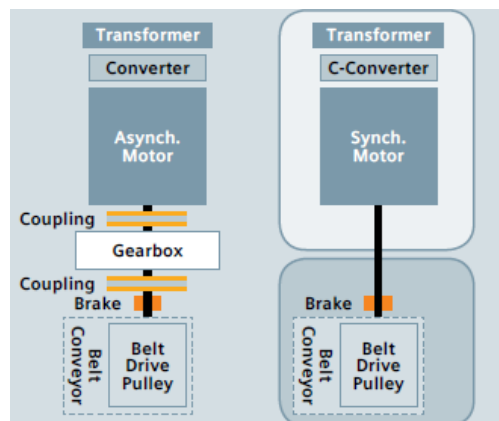


Ilustración 22: Motor con reductor (izq.) y motor sin reductor (der.).

En la mina de Cuajone en Perú ya se utiliza una cinta corredera sin reductor [23]. Los variadores de frecuencia no solo aumentan la eficiencia energética en un tres por ciento, sino que además habría que añadir los gastos de mantenimiento que ya no se requieren.

### 7.6. Sensores de alineamiento

Un producto esencial para monitorizar los rodillos son los interruptores de desalineamiento [24]. Este tipo de sensor se ajusta a la cinta, colocándola sobre su estructura, de forma que el brazo de la roldana mantenga la distancia y ángulo esperado.

Cuando un rodillo deja de estar en línea, entra en contacto con el sensor, previamente ajustado para que no supere un desalineamiento crítico, haciendo girar el eje de transmisión y mandando

una señal de alarma.

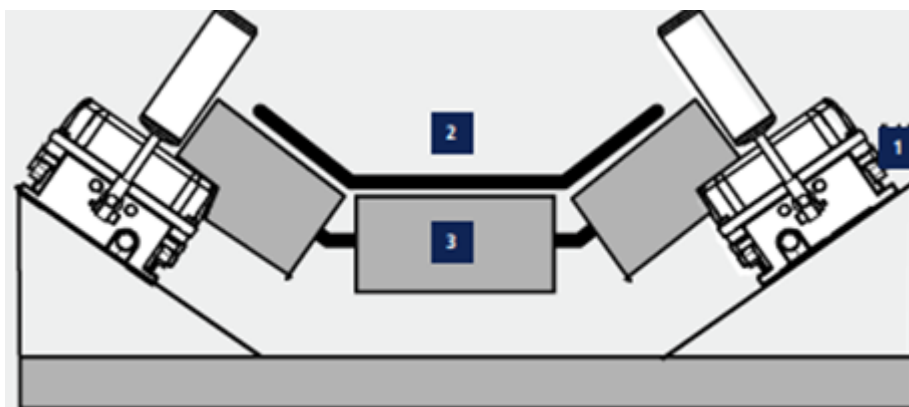


Ilustración 23: Interruptor de Desalineamiento

Siguiendo la referencia de la numeración de la figura 21, estos son los componentes que forman parte de la misma:

1. Interruptor de desalineamiento
2. Cinta
3. Rodillo de soporte

### 7.7. Sistema de gestión de frenado inteligente

Los controladores de frenado se presentan como indispensables en un BCS. Además de alargar la vida útil de las unidades de frenado, protege tanto el sistema de potencia como otros componentes del sistema, como puede ser los rodamientos [25].

Cuando el sistema de frenado inteligente recibe la petición de frenado, el controlador se encarga de modular la presión de las válvulas siguiendo una curva de frenado predefinida. El sistema de realimentación asegura un control del torque preciso. Se pueden ajustar frenados específicos para según qué necesidades.

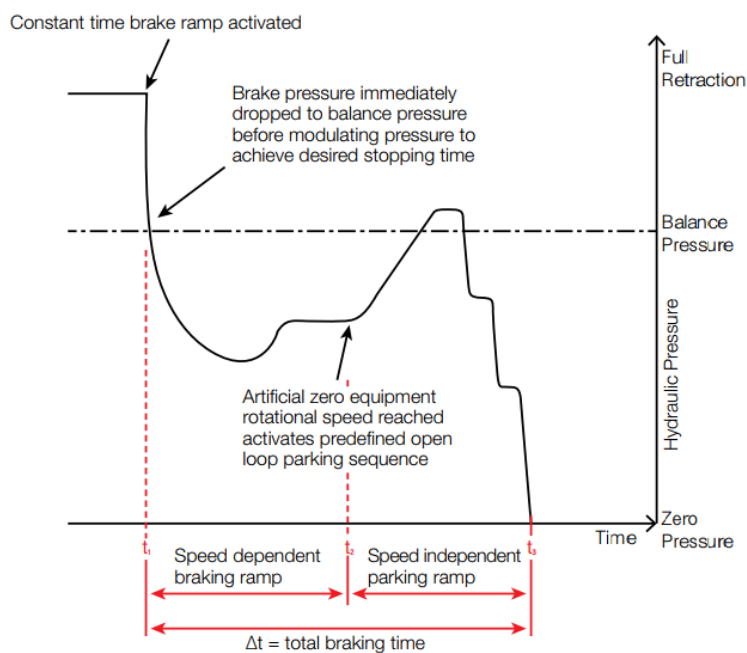


Ilustración 24: Curva de presión hidráulica

Por otro lado, los motores al tener un comportamiento inductivo corren riesgo de dañar el sistema de potencia si la intensidad se corta bruscamente, generando así picos. Por tanto, un sistema de frenado seguro supone una protección mayor al resto de componentes de un BCS.

## 8. Evaluación de nuevas tecnologías

### 8.1. Detección de imágenes basado en rayos X

Los rayos X son una de las fuentes de emisión de radiación electromagnética más antigua utilizada para obtención de imágenes. El caso de uso más conocido son los diagnósticos médicos. Sin embargo, cada vez tiene un uso más esparcido en el ámbito industrial

El método [26] se denomina bandas regulares (RB), el cual está basado en el concepto de periodicidad. La cinta transportadora de cables de acero se mueve a una velocidad relativa constante de una fuente de rayos X y un recolector de imágenes en dos dimensiones. Este proceso se utiliza para detectar defectos en cintas correderas con cuerdas de acero tales como perforación, grietas, corrosión o rotura.

Existen dos bandas, la clara (LRB) y la oscura (DRB). Estas se utilizan para detectar defectos mediante un estudio de cada línea vertical y horizontal obtenida en las imágenes. Cualquier defecto supondrá una irregularidad en la señal recolectada.

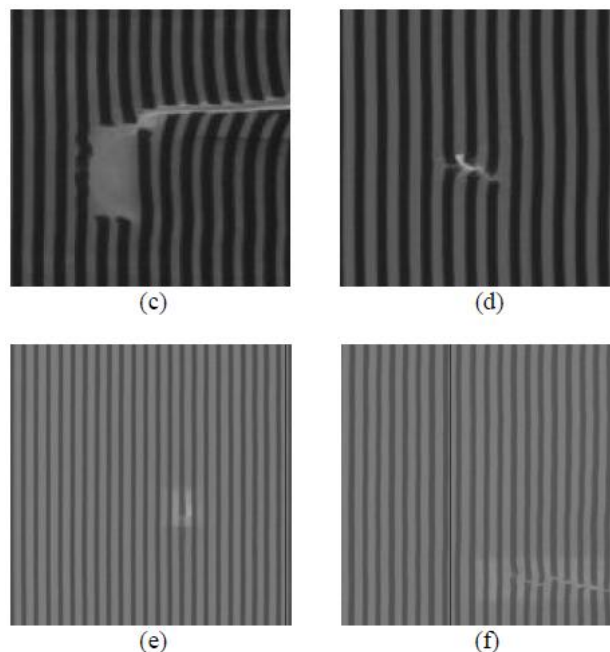


Ilustración 25: Zonas defectuosas ampliadas

Se estudia las imágenes recolectadas para cada región de la cinta y se compara de manera estadística mediante la media y la desviación estándar. Debido a la simplicidad del método y de la poca complejidad computacional es un método muy rápido y tiene un rango de acierto muy alto.

### 8.2. Monitorización de vibración sin contacto

Esta técnica de medida de la vibración por sensor electroestático es de bajo coste, tiene una estructura simple y de fácil instalación y es adecuado para ambientes hostiles [27].



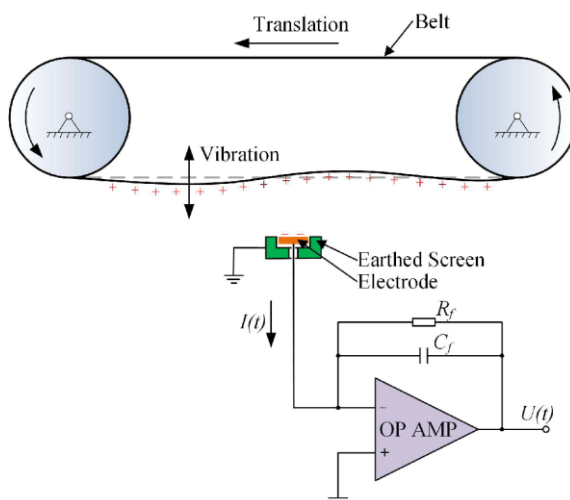


Ilustración 26: Principio Fundamental del sensor electrostático.

Un electrodo metálico aislado puesto adyacente a la correa genera corrientes inducidas cuando hay cerca un objeto metálico. Se utiliza un convertor I-V y un Amplificador Operacional para acondicionar la señal producida por el sensor. También se utiliza un filtro paso bajo para eliminar ruidos. Una tarjeta DSP se encarga de muestrear la señal y medir la velocidad del motor mediante un encoder. La respuesta del sensor a un movimiento de la cinta, tanto axial como transversalmente es calculado de forma numérica mediante modelado de por elementos finitos.

### 8.3. Sensores de presión MEMS

Hoy en día los sensores de presión MEMS se utilizan en gran medida para aplicaciones de automoción. Ciertas empresas ofrecen sus productos TPMS para neumáticos de tal forma que estos quedan comunicados vía 3G o ethernet y supervisan la presión y temperatura en tiempo real [28].

Los TPMS incluyen un sensor de presión y un acelerómetro para calibrar la fuerza centrífuga que se genera cuando la rueda gira. El sensor, el cual es piezorresistivo, genera un cambio de resistencia cada vez que detecta tensión mecánica.

Estos sensores podrían instalarse embebidos en las cintas correderas para monitorizar la presión y temperatura de las bandas para detección de fallas.

### 8.4. Detección mediante visión binocular integrativa (IBVD)

Hay muchos métodos para la detección de rasgaduras longitudinales en cintas correderas, entre las que destacan el método electromagnético, el mecánico, el ultrasónico, los rayos X, etc. Sin embargo, tal y como se ha ido viendo, presentan una serie de desventajas.

El método mecánico tiene un bajo nivel de sensibilidad y mal rendimiento en tiempo real. El electromagnético necesita de una bobina que esté embebida en la correa, de forma que puede influenciar la composición de la correa. El método de rayos X puede ser perjudicial para los seres humanos.

Sin embargo, la visión artificial es una tecnología más fiable para la detección de rasgaduras [29]. Las imágenes adquiridas tanto por un dispositivo de carga acoplada (CCD) de luz visible como por infrarrojos CCD proporcionan información en tiempo real y se pueden procesar de forma online.

El método se denomina como *Integrative Binocular Vision Detection* (IBVD). Debido al duro



entorno de las minas de cobre, la luz visible CCD se presenta como una herramienta complicada para identificar rasgaduras en una cinta corredera. Es por esto por lo que se combina con infrarrojos CCD.

La tecnología consiste en tres partes. Primero, el sensor IBVD es utilizado para tomar imágenes fusionadas de alta calidad. Segundo, el algoritmo de mejora de imágenes y el algoritmo de segmentación de imágenes se utilizan para procesar la imagen con objeto de obtener mejor la rasgadura. Por último, la rasgadura es extraída por el algoritmo de detección. Además, el progreso de las potenciales rasgaduras puede ser evaluado.

<<asgasd>>

La adquisición de imágenes es una parte primordial del método. El sensor IBVD consta de dos partes: unidad de adquisición de señal y unidad de fusión de señal. A través de la lente y el prisma divisor de haz se emiten los infrarrojos y la luz visible, los cuales son recibidos por infrarrojos CCD y luz visible CCD respectivamente. Las señales son enviadas entonces a la unidad de fusión de señal para obtener finalmente la imagen fusionada.

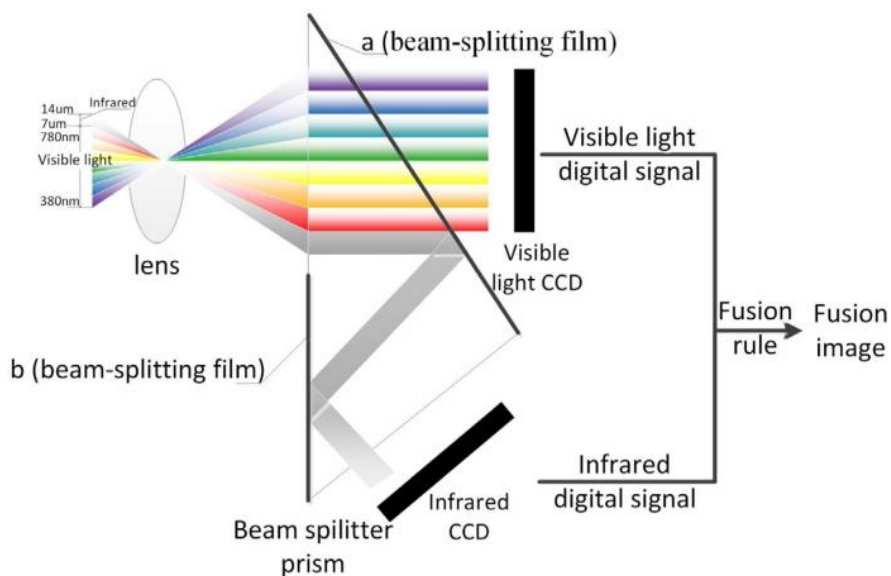


Ilustración 27: Diagrama de adquisición de imágenes.

Los experimentos del laboratorio muestran un resultado de precisión de detección por encima del 96%. Además, el método IBVD tarda menos de 18ms en terminar de detectar un corte longitudinal. Es capaz de alcanzar los requisitos para ser un sistema de monitorización en tiempo real de alta fiabilidad.

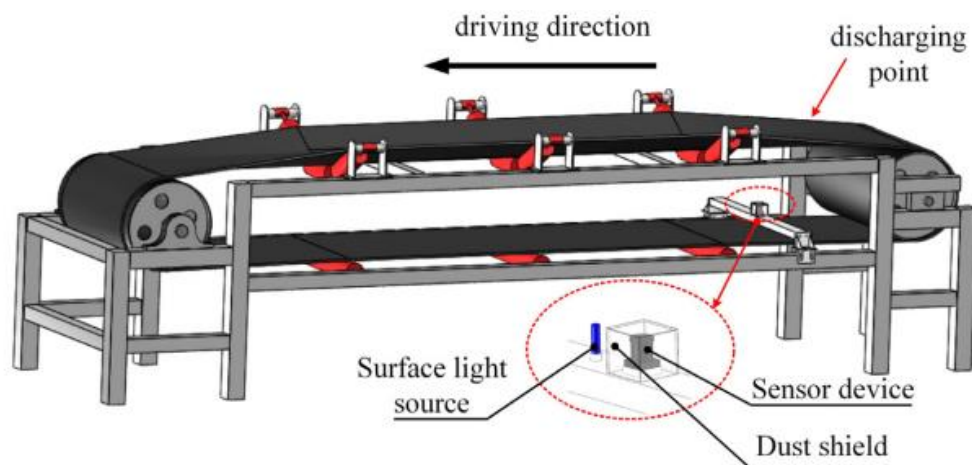


Ilustración 28: Instalación del sensor IBVD

### 8.5. Detección de rodamientos defectuosos mediante intensidad en el estator

Los rodamientos del sistema de potencia son uno de los componentes más críticos de un BCS. Un rodamiento defectuoso supone cambios en el espectro de corriente en el estator del motor.

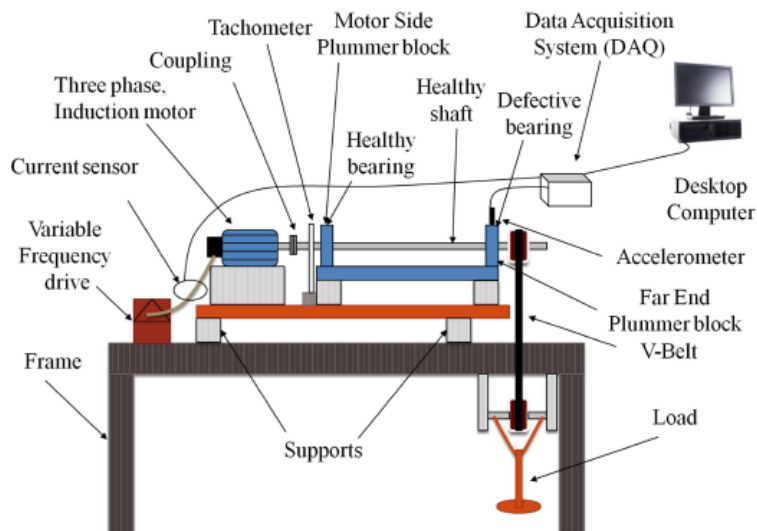


Ilustración 29: Diagrama del montaje del experimento

Esto es debido a que cualquier fallo en los rodamientos es igual a irregularidades en el campo magnético, los cuales generan un cambio en la inductancia propia, causando bandas laterales a lo largo de la línea de frecuencia.

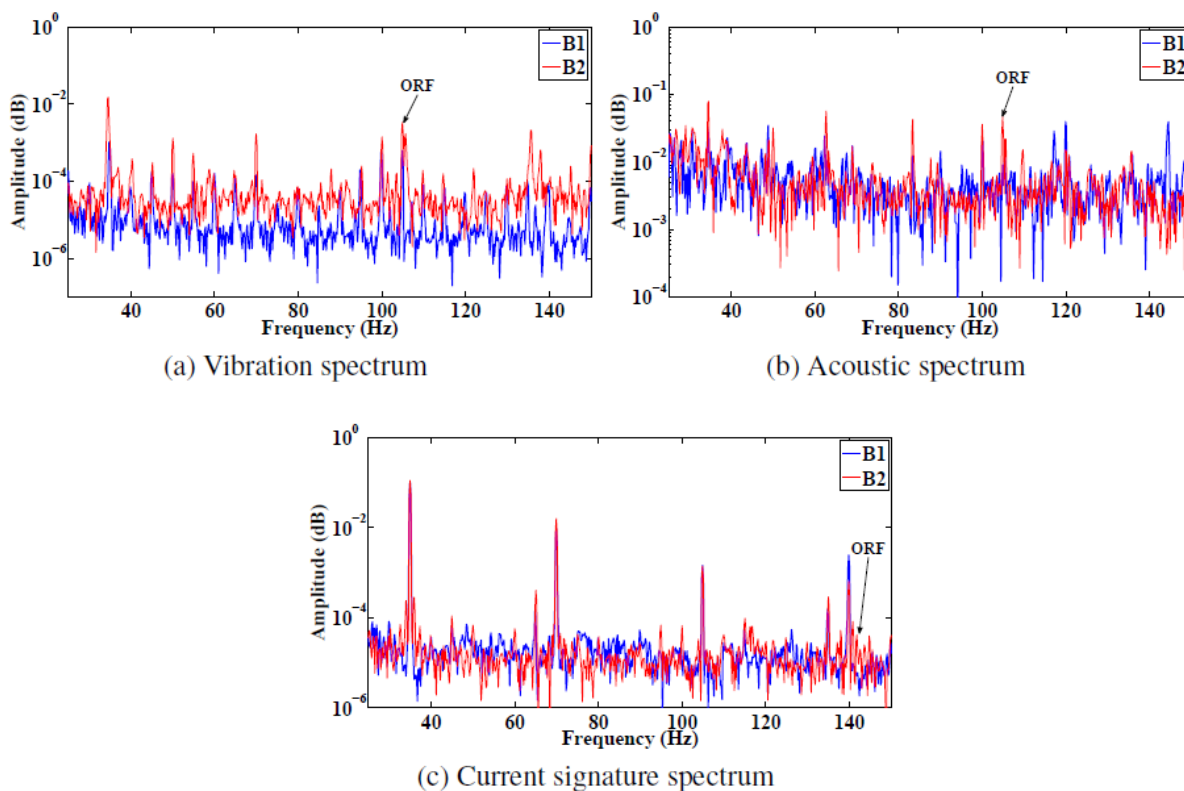


Ilustración 30: Dominio de la frecuencia del rodamiento sano (B1) y del defectuoso (B2)

Por lo tanto, los rodamientos defectuosos pueden ser detectados mediante la monitorización de los armónicos de la corriente. Si tomamos como ejemplo el experimento realizado en este artículo [30] y comparamos el espectro en el dominio de la frecuencia de la vibración, sonido y corriente entre un rodamiento sano y otro defectuoso podemos observar la correlación de la corriente del estator y la vibración que aparece en el rodamiento.

## CAPÍTULO 5

### 9. Propuesta de BCS

En primer lugar, sería importante definir qué tipo de BCS queremos monitorizar, puesto que las condiciones de trabajo difieren mucho entre unos otros, para justo después proponer una solución a los fallos más frecuentes que se han ido encontrando a lo largo del estudio. La propuesta se ajustará a las tecnologías y herramientas investigadas en las secciones anteriores.

Se va a tomar como mina de referencia la de El Abra. Esta está situada en la II Región de Chile, a 70 km al norte de Calama. Esta zona es considerada desértica, además de estar situada a 3900 msnm. De ella se extraen 8500 t/h de mineral de cobre agresivo. Incorpora una correa transportadora principal de cable de acero de casi 20000 m y 1600mm de ancho, recorriendo una diferencia de altitud de -510 m [30].

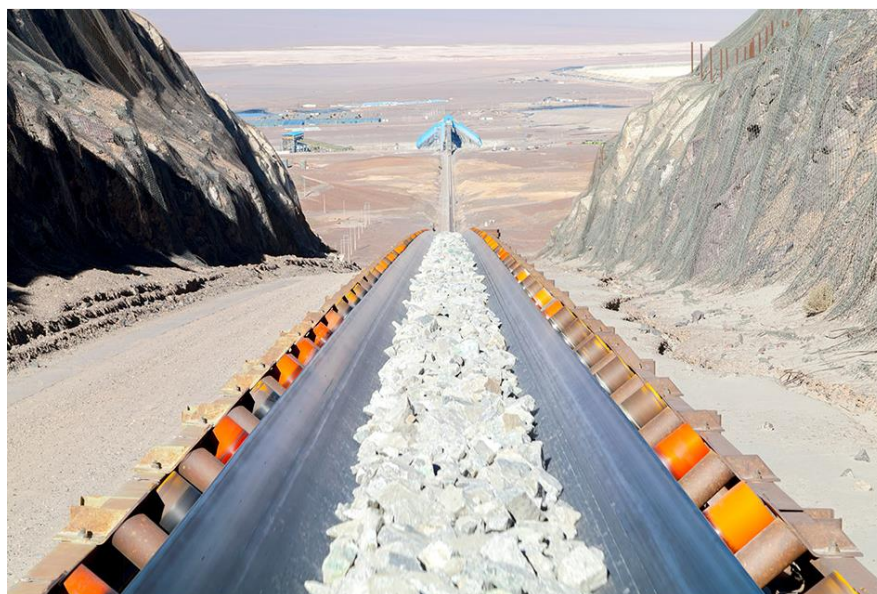


Ilustración 31: Cinta transportada El Abra

Hay que tener en cuenta que las condiciones climáticas de la zona son especialmente complicadas, por lo que la elección de componentes y sensores estará condicionada por las siguientes circunstancias:

- A 3.900 msnm, con una presión atmosférica de 600 hPa
- (comparada con los 1.000 hPa a nivel del mar).
- En tormentas de arena con vientos de hasta 150 km/h.
- En una zona sísmica de categoría 2.
- Con oscilaciones diarias de temperatura de 20° C.

La decisión de tomar El Abra como ejemplo de mina es debido a que es un yacimiento de cobre importante dentro Chile, país en el cual se ha desarrollado una parte importante del proyecto,

aparte de ser a cielo abierto y poseer una cinta corredera de larga longitud, es decir, uno de los principales objetivos de la evaluación, ya que es en este tipo de BCS donde más importante es que no se produzcan fallos y el rendimiento sea lo más alto posible, ya que las posibles pérdidas que se puedan generar serían muy perjudiciales.

### **Correa**

Este es el punto crítico del BCS. Los cortes longitudinales que se producen por la carga de material en la correa son claramente uno de los principales problemas a los que se ha tenido que enfrentar la industria de la minería. Es por esto por lo que es primordial encontrar un método que satisfaga las duras condiciones del entorno.

En la actualidad existen muchas empresas que ofrecen sistemas de detección de cortes basados en imágenes. La fiabilidad de los mismos es muy alta y además no necesita un sistema de instalación muy complejo. El problema de las cámaras de alta resolución es que, en entornos sucios, tienen resultados limitados. Por otro lado, los sistemas basados en rayos X son costosos y dañinos para el ser humano.

En cuanto al método IBVD, este mismo soluciona los problemas los problemas de la suciedad mediante la tecnología de infrarrojos. Es menos aparatoso que los rayos X y más sencillo de instalar. Sin embargo, es una solución menos completa, ya que la tecnología de rayos X es capaz de detectar empalmes deteriorados, daños en la carcasa, objetos incrustados en la correa, fallos en los cables de acero, etc.

Otra cuestión a tener en cuenta sería que el tipo de BCS objeto de esta investigación está actualmente en operación, por lo que instalar una cinta corredera nueva se antoja complicado. Es por esto por lo que las tecnologías que se buscan han de ser lo más sencillas de instalar posible. En este contexto, los sensores embebidos dentro de la cinta quedan descartados.

Al no poder complementar el método de IBVD debido a la imposibilidad de instalar correas con sensores incluidos en las mismas, (i.e.: con galgas extensiométricas para medir el daño producido en los empalmes), queda la opción de los rayos X como la más adecuada para monitorización de daños en la cinta transportadora.

También sería muy interesante añadir los sensores electrostáticos contactless para monitorizar las vibraciones producidas en la correa, tanto axiales como transversales. Las vibraciones en la correa pueden ser causadas por que el sistema de tensado (poleas de curvado y contracurvado) no funciona de forma correcta, generando holgura sistema.

### **Poleas y rodillos**

En el caso de las poleas y rodillos la principal causa de desgaste de los mismos son las altas temperaturas y el desalineamiento.

Con objeto de monitorizar las temperaturas de poleas y rodillos el método más eficaz el cual se ha investigado en este proyecto es el de las termografías y posterior transmisión mediante fibra óptica. Como se ha explicado previamente, es una tecnología de sencilla instalación, carente de interferencias, poco costosa y resistente a las condiciones.

Un alineamiento indebido puede suponer pérdidas muy importantes en un BCS, por lo que los interruptores de desalineamiento suponen una solución muy adecuada. Son capaces de detectar si se supera un desalineamiento crítico deseado, mandando una alarma cuando esto sucede. Además, la instalación no supone un problema muy complejo.

## Sistema de Potencia

El principal problema que encontramos en los motores utilizados en BCS es el aumento de vibraciones debido al desgaste de rodamientos. Un tipo de detección sería mediante termografías. Sin embargo, la medición de vibraciones es un método de detección más temprano y continuo.

Existen varios sistemas de medición de vibraciones disponibles. Los más utilizados en el mercado tienen que estar en contacto con el sistema a medir. Sin embargo, existe un método de detección de rodamientos defectuosos mediante la medición de la intensidad en el estator. Un rodamiento en mal estado supone un cambio en el espectro de intensidad del estator. Este último método se presenta como más adecuado para nuestro sistema de detección temprana de fallos, ya que se centra en la medición de vibración en los rodamientos, una de las principales causas de fallo en los sistemas de potencia de un BCS.

Ya se ha discutido en apartados anteriores que la caja reductora es uno de los motivos más frecuentes de fallo del sistema de potencia. Apostar por un motor eléctrico sin caja reductora es por tanto una opción muy interesante, y más sabiendo que esta tecnología ya se utiliza actualmente en minas muy importantes.

Por último, un sistema de frenado seguro protege a otros componentes del BCS, además de asegurar una vida útil de los frenos más larga. Gracias a un controlador tipo PI, el cual soporta una primera fase de frenado dependiente de la velocidad y una segunda predefinida por el usuario, el frenado será suave y predictivo.

## 10. Presupuesto estimado

La elaboración del presupuesto se realizará para un BCS similar al de la propuesta, es decir, una cinta corredera con condiciones similares a la de El Abra (longitud, altura, ambiente extremo, etc...).

Para estimar las cantidades necesarias se ha recurrido a la hoja de características de un BCS de larga longitud [32]:

- Rodillos de carga: 11871
- Rodillos de retorno: 2646
- Poleas Motrices: 2
- Poleas de Cola: 1
- Poleas de Inflexión: 2
- Longitud (m): 5903
- Número de motores: 4
- Frenos de disco: 6

---

	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Total</b>
<b>Interruptores de desalineamiento</b>	200	350 €	70.000 €
<b>Sistema termográfico vía fibra óptica</b>	1	60.000 €	60.000 €
<b>Método de detección por rayos X</b>	1	800.000 €	800.000 €
<b>Medición de vibraciones sin contacto</b>	100	150 €	15.000 €
<b>Sistema de frenado Inteligente</b>	2	5.000 €	10.000 €
<b>Detección de rodamientos defectuosos</b>	4	45.000 €	180.000 €
<b>Motor eléctrico sin caja reductora</b>	4	135.000 €	540.000 €
		<b>PRECIO FINAL</b>	<b>1.675.000 €</b>

### Diseño final de monitorización de sistema de cintas correderas

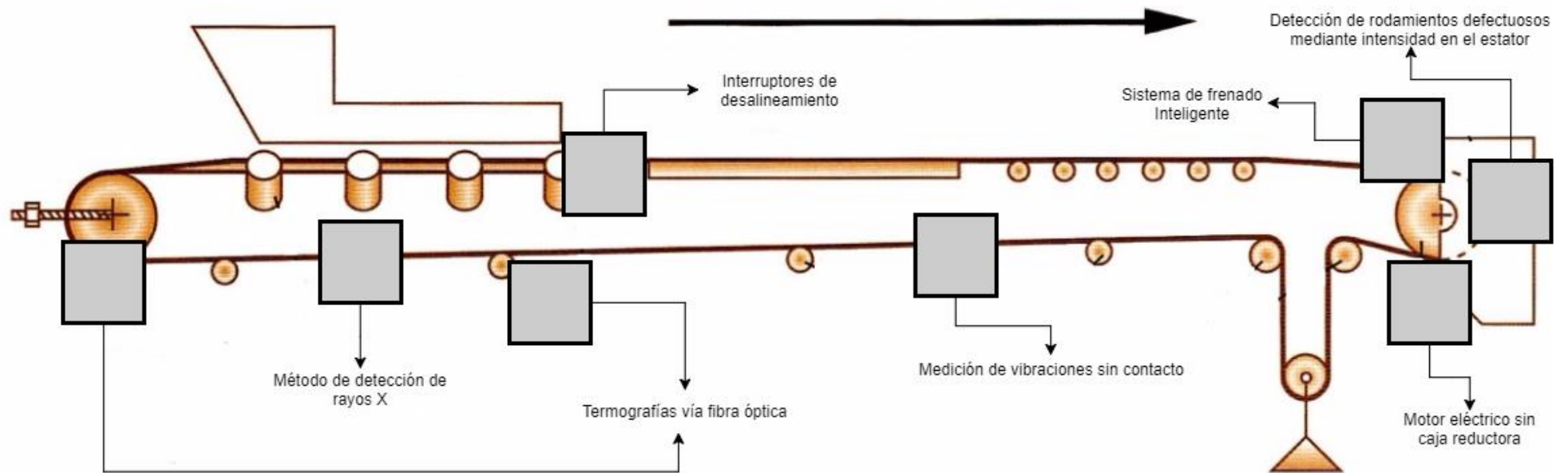


Ilustración 32: Esquema de propuesta final de BCS



---

## 11. Conclusiones

En primer lugar, en este proyecto se ha desarrollado el problema actual por el que pasan el sector minero con respecto al acceso y transporte de mineral. Ha quedado definido que es un BCS, tanto de forma global como cada una de sus partes por separado. También se ha cuantificado y analizado cuales son las potenciales causas de fallos en un sistema de cintas correderas. Se ha seleccionado que tecnologías presentes en el mercado podían satisfacer la detección preventiva de los problemas más comunes del sistema. Además, se ha investigado sobre nuevas tecnologías en desarrollo que mejoraran las prestaciones de los productos utilizados en la actualidad. Por último, se ha propuesto un diseño final, así como un presupuesto estimado, defendiendo la inversión inicial y mostrando el potencial ahorro a lo largo de los años.

Con esta evaluación del estado del arte de los productos utilizados para monitorizar los componentes de los sistemas de cintas correderas, se pretende que empresas que actualmente tengan en funcionamiento un tipo de BCS similar al propuesto aquí, puedan valorar si realizar una inversión que le proporcione un sistema más eficiente, así como qué productos pueden integrar en su sistema.

## 12. Referencias

- [1] AZO Mining – **Belt Conveyor Technology for Mining Applications**  
<<https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=446>>
- [2] Cochilco – **Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016**  
<<https://www.cochilco.cl/Lists/Anuario/Attachments/17/Anuario-%20avance7-10-7-17.pdf>>
- [3] Cochilco – **Perspectivas de la inversión en la minería chilena**  
< [https://boletin.cochilco.cl/archivos/presentaciones/20130514\\_perspectivas.pdf](https://boletin.cochilco.cl/archivos/presentaciones/20130514_perspectivas.pdf)>
- [4] Sofofa – **La Industria Chilena en Cifras**  
<<http://web.sofofa.cl/informacion-economica/indicadores-economicos/estructura-de-la-industria/>>
- [5] Diario Financiero – **Exportaciones vuelven a terreno negativo en junio arrastradas por el cobre**  
<<http://www.entornointeligente.com/articulo/8667603/CHILE-Exportaciones-vuelven-a-terreno-negativo-en-junio-arrastradas-por-el-cobre--Diario-Financiero-08072016>>
- [6] Codelco – **Mina subterránea Chuquicamata**  
<[https://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/artic/20110706/pags/20110706103025.html](https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20110706/pags/20110706103025.html)>
- [7] Minería Chilena – **Chuquicamata, satisfecha con su sistema automatizado de inspección de correas transportadoras**  
<<http://www.mch.cl/2014/03/05/chuquicamata-satisfecha-con-su-sistema-automatizado-de-inspeccion-de-correas-transportadoras/>>
- [8] **DIN 22102**  
< <https://www.beuth.de/en/standard/din-22102-1/192941318>>
- [9] **ISO 15236**  
<<https://www.iso.org/standard/70276.html>>
- [10] Phoenix Conveyor Belts – **Phoenoguard PX. Sistemas de protección**  
<[http://www.phoenix-conveyorbelts.com/pages/products/protection-systems/phoenoguard-px/phoenoguard-px\\_es.html](http://www.phoenix-conveyorbelts.com/pages/products/protection-systems/phoenoguard-px/phoenoguard-px_es.html)>
- [11] SKOC A. – **Dynamics of bevel gears in mining machines** – Mining, No. 226, Silesian University of Technology, Gliwice 1996.
- [12] Radosław Zimroz, Robert Król. – **Failure analysis of belt conveyor systems for condition monitoring purposes** – Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Instytut Górnictwa, Wrocław
- [13] Coal Age – **The Impact of Idler Misalignment on Belt Performance**  
<<http://www.coalage.com/features/5498-the-impact-of-idler-misalignment-on-belt-performance.html#.WOJ7VDvvi00>>
- [14] AVR – **Alignment Verification Rig**  
<<http://avr4idlers.com/>>

- 
- [15] Bożena Skotnicka – Zasadzień - **Monitoring of mining equipment failure based on selected quality management tools**
- [16] Aplik – **Visión de correas**  
<<https://www.aplik.cl/productos/vision-de-correas/>>
- [17] Honeywell – **BeltAIS Cover Defect Monitoring System**  
<<https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/notes/PIN-BeltAIS%20Cover-Defect-Monitoring.pdf>>
- [18] Phoenix Conveyor Belts – **Phoenocare Sensor Guard**  
<[http://www.phoenix-conveyorbelts.com/pages/products/protection-systems/phoenocare-sl/phoenocare-sl\\_es.html](http://www.phoenix-conveyorbelts.com/pages/products/protection-systems/phoenocare-sl/phoenocare-sl_es.html)>
- [19] Calsens SL – **Sistemas inteligentes de monitorización**  
<[http://cal-sens.com/?page\\_id=3370](http://cal-sens.com/?page_id=3370)>
- [20] Nueva minería y energía – **Monitoreo preventivo en correas transportadoras**  
<<http://www.nuevamineria.com/revista/monitoreo-preventivo-en-correas-transportadoras/>>
- [21] Electro Sensors – **Monitor de vibración Series VS**  
<[http://www.electro-sensors.com/files/2813/5100/5667/VS-Series\\_Manual.pdf](http://www.electro-sensors.com/files/2813/5100/5667/VS-Series_Manual.pdf)>
- [22] Siemens – **SIMINE Gearless Conveyor Drives**  
<<https://www.industry.siemens.com/verticals/global/en/mining-industry/PublishingImages/conveyor-systems/simine-gearless-conveyor-drives-siemens.pdf>>
- [23] Mining.com – **Siemens supplies the world’s biggest gearless conveyor drive system**  
<<http://www.mining.com/web/siemens-supplies-the-worlds-biggest-gearless-conveyor-drive-system/>>
- [24] Kiepe Elektrik – **Misalignment Switches**  
<<http://www.kiepe-elektrik.com/products/misalignment-switches>>
- [25] Altra Industrial Motion – **SOBO iQ Controlled Braking for General Systems**  
<<http://www.altraliterature.com/pdfs/P-7916-SV.pdf>>
- [26] Xian-Guo Li, Chang-Yun Miao, Ji Wang - **Automatic Defect Detection Method for the Steel Cord Conveyor Belt Based on Its X-ray Images** - 2011 International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (CASE)
- [27] Yonghui Hu, Yong Yan, Fellow, IEEE, Lijuan Wang, Xiangchen Qian, and Xiaoyu Wang - **Simultaneous Measurement of Belt Speed and Vibration Through Electrostatic Sensing and Data Fusion** - IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 65, No. 5, May 2016
- [28] K. Chun, H. C. Kim, S. Kim, Y. Kim, S. Lee, K. Min, S. Lim, and J. Lee - **MEMS for TPMS and Exhaust of Automobiles** - ISRC and Department of ECE, Seoul National University, School of EE, University of Ulsan Department of MAE, Seoul National University, Hyundai Motors Company
- [29] Tiezhu Qiao, Lulu Chen, Yusong Pang, Gaowei Yan, Changyun Miao – **Integrative binocular vision detection method based on infrared and visible light fusion for conveyor belts longitudinal tear-** Measurement 110 (2017) 192–201 (Science Direct)
-

[30] Sukhjeet Singh, Amit Kumar, Navin Kumar – **Detection of bearing faults in mechanical systems using motor current signature and acoustic signatures** - 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV21), Beijing, China, 13-17 July 2014

[31] Phoenix Conveyor Belts – **Una historia de éxito: la correa transportadora en descenso de la mina El Abra en Chile**

<<http://www.phoenix-conveyorbelts.com/pages/press-themes/success-stories/download/Phoenocord-St-6800-El-Abra.pdf>>

[32] Máximo Rodrigo Gómez Hidalgo – **Análisis de Fallas en Maquinaria Minera** – Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Eléctrica