

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



**PARÁMETROS CRÍTICOS DE DISEÑO Y OPERACIÓN Y
SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO ENERGÉTICO DE
LAS CORREAS TRANSPORTADORAS EN LA MINERÍA**

NATALIA HERMINDA HENRÍQUEZ BERROCAL

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA : FRANCISCO CABREJOS MARÍN, Ph.D.
PROFESOR CORREFERENTE : Mg.-Ing., GUILLERMO GONZÁLEZ B.

NOVIEMBRE 2019

Agradecimientos

Creo que me faltarán palabras para agradecer a todas las personas que han sido parte de este largo proceso. En primer lugar, quiero agradecer a mis padres Ana y Miguel por el amor incondicional recibido, la dedicación, apoyo y herramientas durante toda mi vida, mis éxitos son fruto y mérito de ustedes. Agradecer a mis hermanas Belén y Annia, también a Francisca Mesina.

Agradecer al profesor Francisco Cabrejos, por su paciencia y guía en el desarrollo de este trabajo de título, pero gracias por transmitir la pasión por lo que hace y las ganas de que más gente se involucre en estos temas. A Eduardo Agurto y Rodrigo Mendoza de la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco que me permitieron realizar mi memoria con ustedes.

A Juan por su amor, contención y apoyo en esta etapa, gracias por ser mi apoyo y levantarme en los momentos en que todo se veía oscuro.

Agradecer a mis amigos Cata, Katy, Percy, Melanie, Franchesca, Caro, Manuel, Ignacio y a la generación Mecánicos 2012 por su amistad y gran compañerismo, sin ustedes nada hubiera sido igual.

Agradecer al grupo de memoristas y practicantes de la VP, también al grupo de graduados de la División Salvador por su buena onda y compañerismo.

A los colegas de la superintendencia de mantenimiento de la Gerencia de Plantas de la División Salvador por lo espacios otorgados.

Y gracias a la vida que me ha dado tanto...

Dedicado a todas las mujeres bacanas de todo el mundo y de distintas épocas.

Por creer en la libertad de elegir la vida que imaginaron.

Si ellas pudieron, nosotras también.

Resumen

El presente Trabajo de Título consiste en caracterizar y definir los parámetros críticos de diseño y operación que guarden relación con el consumo energético de las correas transportadoras utilizadas en la minería. El trabajo se centró en el desarrollo de un programa de cálculo de estos equipos que da como resultado principalmente las tensiones y potencias del transportador en operación basado en, el método de cálculo propuesto por de la guía CEMA en sus séptima edición y la norma DIN 22101.

Las correas transportadoras son equipos cuya principal función es transportar mineral desde su punto de extracción hacia las plantas en donde se procesan, o entre plantas, según sea el caso en los procesos de producción del cobre. La Corporación Nacional del Cobre (Codelco) tiene en su proceso productivo aproximadamente 210 kilómetros de correas transportadoras en operación y la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco tiene proyectadas aproximadamente 46 kilómetros más de equipos a poner en marcha dentro de su cartera de proyectos. De las correas que se tienen en carpeta se analizan en este trabajo 25 transportadores que corresponden a aproximadamente 17,5 kilómetros.

El estudio de los parámetros desarrollados en el presente trabajo, se basa en proyectos anteriores de Codelco (p.ej.: revisión de memorias de cálculo y datos de planta disponibles). Estos parámetros se comparan entre las distintas bases de información disponibles para la caracterización de los mismos para así fortalecer el diseño de correas transportadoras con un enfoque de mejoramiento continuo.

Como resultado del presente trabajo, se definen los parámetros de diseño, parámetros críticos de operación, el programa de cálculo y una serie de recomendaciones para el diseño y operación de estos equipos.

Palabras claves: Correas, Método DIN, Método CEMA, operación continua.

Abstract

This work consists in the characterization and definition of the critical design and operation parameters related to the energy consumption of the conveyor belts used in mining industry. The work focused on the development of a calculation program for this equipment that mainly results in the tension and power of the conveyor in operation based on, the calculation method is through the CEMA guide (7th edition) and DIN 22101.

Conveyor belts are equipment whose main function is to transport ore from its extraction point to the plants where they are processed, or between plants, as the case may be in copper production processes. The National Copper Corporation, known by its Spanish acronym, CODELCO, has in its production process approximately 210 kilometers of conveyor belts in operation and the CODELCO project corporate vice presidency has projected about 46 kilometers more of equipment to be launched within its portfolio of projects. In this work 25 conveyors that correspond to approximately 17.5 kilometers are analyzed.

The study of the parameters developed in this work is based on previous CODELCO projects (eg: review of calculation reports and available plant data). These parameters are compared between the different data bases available for their characterization in order to strengthen the design of conveyor belts with a continuous improvement approach.

As a result of this work, the definition of the design parameters, critical operation parameters, the calculation programs and a series of recommendations for the design and operation of this this equipment, are presented.

Keywords: Belt conveyors, DIN method, CEMA method, continuous operation.

Glosario

A	:	Área transversal del material a granel en una correa. [m ²]
DIN	:	Hace referencia a la norma DIN 22101.
DMH	:	División Ministro Hales de Codelco.
$DSAL$	:	División Salvador de Codelco.
H	:	Elevación total de la correa transportadora. [m]
L	:	Distancia entre centros de las poleas del transportador. [m]
L_n	:	Longitud del recorrido "n". [m]
NNM	:	Proyecto Nuevo Nivel Mina de División El Teniente.
$CEMA$	:	Hace referencia a " <i>Conveyor Equipment Manufacturers Association</i> " en su 7ma edición.
$PMCHS$	:	Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.
Q	:	Cantidad de material a granel transportado. [mtp/h]
S_i	:	Espaciamiento entre estaciones de transporte. [m]
T_1	:	Tensión de la banda que se acerca a la polea motriz. [kN]
T_2	:	Tensión de la banda que se aleja de la polea motriz. [kN]
tpd	:	Toneladas por día.
T_n	:	Tensión de la banda en un punto específico. [kN]
T_x	:	Temperatura de operación. [K]
V	:	Velocidad de la banda. [m/s]
VP	:	Vicepresidencia de Proyectos de Codelco.
W_b	:	Peso de la banda por unidad de longitud. [kg/m]
W_m	:	Peso del material a granel por unidad de longitud. [kg/m]
λ	:	Ángulo de acanalamiento de polines laterales, según DIN. [°]
β	:	Ángulo de acanalamiento de polines laterales, según CEMA. [°]
θ	:	Ángulo de inclinación de un sistema transportador. [°]
γ_m	:	Densidad aparente del material a granel transportado. [kg/m ³]
φ_r	:	Ángulo de reposo del material a granel transportado. [°]
φ_s	:	Ángulo de sobrecarga del material a granel transportado. [°]

Tabla de contenido

Agradecimientos	ii
Resumen	iv
Abstract	v
Glosario	vi
Tabla de contenido	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas.....	xii
1. Introducción	1
2. Objetivos	8
3. Marco teórico	9
3.1 Correas transportadoras	9
3.2 Características y transportabilidad de los materiales a granel	19
3.3 Cálculo de tensiones y potencia en correas transportadoras	20
4. Antecedentes de correas transportadoras en Codelco	41
4.1 Proyecto Nuevo Sistema de Traspaso Andina	41
4.2 Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS).....	43
4.3 Planta Concentradora División Salvador	46
4.4 Área seca de División Ministro Hales	48
4.5 Criterios de diseño en Codelco VP	50
5. Desarrollo	51
5.1 Programa para el cálculo de correas	51
5.2 Ejemplo aplicado a correas en específico.....	56

vii

6. Análisis y resultados	60
6.1 Comparación en base a parámetros críticos de diseño	61
6.2 Parámetros críticos de operación.....	66
6.3 Comparación resultados programa versus memorias de cálculo.....	68
6.4 Determinación de factor de fricción.....	70
7. Conclusiones	71
8. Referencias.....	73
Anexo A: Complemento marco teórico guía CEMA.....	78
Anexo B: Esquema programa de cálculo correa alimentación a tolva 3600.....	90
Anexo C: Esquema programa de cálculo correa colectora norte PMCHS.....	91

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación geográfica de los centros de trabajo de Codelco [3].	1
Figura 2: Camiones mineros [5].	2
Figura 3: Ferrocarril minero [5].	2
Figura 4: Correa transportadora de mineral [6].	3
Figura 5: Esquema trazado Overland PMCHS [8].	5
Figura 6: Procesos metalúrgicos del cobre.	6
Figura 7: Correa transportadora [9].	7
Figura 8: Componentes principales del sistema de correa transportadora [7].	11
Figura 9: Ejemplo estructura banda de tela [10].	12
Figura 10: Ejemplo estructura banda de cable [10].	12
Figura 11: Tipos de polines más comunes lado superior [12].	14
Figura 12: Tipos de polines más comunes lado inferior [12].	14
Figura 13: Polea motriz [14].	15
Figura 14: Polea no motriz [14].	16
Figura 15: Ejemplo de dispositivos de tensado más utilizados [15]	16
Figura 16: Ejemplo de dispositivos de tensado más utilizados [15].	17
Figura 17: Sistema motriz y sus partes principales [7].	18
Figura 18: Ángulo de reposo [9].	19
Figura 19: Ángulo de sobrecarga [9].	19
Figura 20: Principales parámetros y componentes de una correa transportadora.	22
Figura 21: Área según CEMA [9].	23
Figura 22: Esquema y terminología de un “tramo” [9].	24
Figura 23: Ejemplo de la "Flecha" entre dos polines de la correa transportadora.	26
Figura 24: Terminología de tensiones en poleas [15].	29
Figura 25: Terminología en la polea motriz [15].	30
Figura 26: Área según DIN [9].	32
Figura 27: Como se verá el Proyecto Traspaso Andina [17].	41

Figura 28: Diagrama de flujo del Proyecto Nuevo Sistema de Traspaso Andina [18].	42
Figura 29: Distribución geográfica del sistema de transporte de mineral PMCHS [19].	43
Figura 30: Diagrama de flujo proyecto Mina Chuquicamata Subterránea [20].	45
Figura 31: Planta concentradora División Salvador [27].	46
Figura 32: Diagrama de flujo de la Planta Conmiución División Salvador [21].	47
Figura 33: Sector descarga correa Overland [22].	48
Figura 34: Diagrama de flujo área seca de División Ministro Hales [23].	49
Figura 35: Esquema del programa Excel desarrollado.	51
Figura 36: Ejemplo del ingreso de parámetros del programa.	52
Figura 37: Ejemplo del ingreso de parámetros del programa.	53
Figura 38: Ingreso de parámetros de material a transportar y geometría del transportador.	53
Figura 39: Ejemplo de los resultados del programa.	54
Figura 40: Resultados de las tensiones y potencia según método CEMA.	55
Figura 41: Resultados de las tensiones y potencia según norma DIN.	55
Figura 42: Extracto memoria de cálculo correa alimentación tolva 3600 [26].	56
Figura 43: Esquema configuración correa Colectora Norte [27].	58
Figura 44: Comparación área de diseño según método CEMA y norma DIN para ángulo de sobrecarga de 25°.	62
Figura 45: Comparación respecto al peso de la cinta en correas tipo ST.	63
Figura 46: Comparación respecto al peso de la cinta en correas tipo EP.	64
Figura 47: Gráfico polines CEMA C.	65
Figura 48: Gráfico polines CEMA D.	65
Figura 49: Potencia en función del tonelaje transportado de la correa Overland de DMH.	66
Figura 50: Gráfico comparación programa versus potencia instalada de las correas para método CEMA.	68

Figura 51: Gráfico comparación programa versus potencia instalada de las correas para método DIN.....	68
Figura 52: Gráfico comparación resultados método DIN versus método CEMA.	69
Figura 53: Relaciones adimensionales transversales y su nomenclatura [9].	78
Figura 54: Aceleración del material a granel a la velocidad de la banda [9].	80
Figura 55: Arrastre del sello del faldón sobre la banda transportadora [9].	81
Figura 56: Arrastre del sello para un solo rodillo [9].	82
Figura 57: Deformación de la cubierta de la banda sobre el rodillo de transporte [9].	83
Figura 58: Desalineación inclinada del rodillo [9].	84
Figura 59: Planos de alineación de rodillo relativos al transportador y a la línea central de la banda [9].	84
Figura 60: Profundidad del material sobre el faldón [9].	86
Figura 61: Deformación del material causada por el pandeo de la banda [9].	87

Índice de tablas

Tabla 1: Comparación entre distintos medios de transporte [7].	4
Tabla 2: Valores estándar para el coeficiente de fricción f según DIN [16].	35
Tabla 3: Coeficiente C para resistencias secundarias según DIN [16].	36
Tabla 4: Correas del Proyecto Nuevo Sistema de Traspaso Andina.	42
Tabla 5: Correas del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.	44
Tabla 6: Correas de la Planta Concentradora en División Salvador.	46
Tabla 7: Correas del área seca en División Ministro Hales.	48
Tabla 8: Criterios de diseño de la VP para correas transportadoras [24].	50
Tabla 9: Nomenclatura para la comparación de las fuentes de resistencia [25].	56
Tabla 10: Parámetros de entrada de la correa alimentación a tolva 3600.	57
Tabla 11: Resultados del programa para la correa alimentación a tolva 3600 (operación continua).	57
Tabla 12: Parámetros de entrada de correa Colectora Norte.	59
Tabla 13: Resultados programa correa Colectora Norte.	59
Tabla 14: Parámetros críticos de diseño de correas transportadoras.	60
Tabla 15: Extracto memoria de cálculo correa Overland DMH [23].	67
Tabla 16: Comparación factor f	70

1. Introducción

La minería del cobre en Chile ha crecido sostenidamente desde los años 90 y, actualmente, a nivel nacional, es la actividad económica más importante, representando el 9,8 % del PIB (Producto Interno Bruto) [1] así como el 48,4% de las exportaciones del país en el año 2017, y a nivel internacional, lidera la producción de este metal; participando del 25% del mercado mundial en Cobre Refinado y el 28% en el mercado mundial de Mineral de Cobre [2].

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) es una empresa autónoma propiedad del Estado chileno, cuyo negocio principal es la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y sus subproductos, su procesamiento hasta convertirlos en cobre refinado, y su posterior comercialización. Hoy, Codelco es el mayor productor de cobre de mina del mundo. Esto equivale aproximadamente al 10% de la producción mundial de cobre de mina y un 31% de la producción nacional. Codelco concentra el 9% de las reservas globales de cobre, contenida en yacimientos de clase mundial.



Figura 1: Ubicación geográfica de los centros de trabajo de Codelco [3].

La compañía ejecuta sus operaciones a través de siete divisiones mineras más la Fundición y Refinería Ventanas. Su estrategia corporativa es coordinada desde la Casa Matriz ubicada en Santiago de Chile. Sus divisiones son El Teniente, Andina,

Chuquicamata, Salvador, Radomiro Tomic, Gabriela Mistral y Ministro Hales [3]. La Vicepresidencia de Proyectos (VP) cuya principal función es administrar la cartera de proyectos de inversión de la Corporación, siendo responsable del desarrollo de la Ingeniería Conceptual (Prefactibilidad), Ingeniería Básica (Factibilidad), Ingeniería de Detalle, Construcción y Puesta en Marcha, asegurando el cumplimiento del alcance, costo, plazo, calidad y seguridad establecidos para cada fase de los proyectos estructurales que tiene a su cargo [4].

Por su parte, la importancia de las correas transportadoras en la minería ha crecido de manera exponencial. Hace 30 o 40 años si se analizaba un proceso de carguío y transporte de mineral, existían tres alternativas, donde los camiones tenían la mayor importancia, luego el tren y en tercer lugar las correas, dependiendo de la evaluación técnico-económica del proyecto. Esto se debía principalmente a que la tecnología aplicada al desarrollo de correas transportadoras no lograba hacer de éstas un producto competitivo y resistente en comparación con los camiones y el tren. Había mucha incertidumbre con los empalmes, los compuestos y qué se hacía en casos de ruptura de la cinta, lo que hacía dudar sobre la confiabilidad de estos equipos.



Figura 2: Camiones mineros [5].



Figura 3: Ferrocarril minero [5].



Figura 4: Correa transportadora de mineral [6].

Pero en los últimos 15 años hubo un salto tecnológico, los fabricantes lograron un desarrollo que les dio mayor fortaleza y resistencia. Hoy en día con el perfeccionamiento de componentes como cintas, polines y raspadores, entre otros, se ha llegado a la madurez de la tecnología, siendo la predilecta para transportar grandes volúmenes de material a lo largo de grandes distancias entre minas y plantas donde se procesa el mineral [6]. Un ejemplo de esto, hace 8 años el polín más grande que existía bajo la norma CEMA era el E7 para una cinta de 72" de ancho, hoy existe el F8 para una cinta de 96", por el lado de las cintas para el proyecto de Los Pelambres (1999) se utilizó una cinta de resistencia a la tracción de 7.800 N/mm (ST 7800), hoy el Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS) tiene diseñada una cinta de resistencia a la tracción de 10.000 N/mm (ST 10000), aspectos que se verán en detalle más adelante.

En este contexto, se presenta un cuadro de comparación entre las correas transportadoras, camiones mineros y el ferrocarril de transporte de mineral, donde se resume la factibilidad técnica-económica de cada uno de estos sistemas de transporte de mineral en la actualidad.

Tabla 1: Comparación entre distintos medios de transporte [7].

Concepto	Correas transportadoras	Camiones mineros	Ferrocarril
VENTAJAS			
Costo de operación y mantenimiento	Menor	Mayor	Mayor
Mano de obra	Normal	Especializada	Mixta
Nº de operarios	Menor	Mayor	Intermedia
Eficiencia energética	Mayor (motores eléctricos) (> 75%)	Menor (gasóleos) (< 45%)	-
Pendiente	Hasta 15%	Hasta 8%	< 2% – 3%,
Construcción y mantenimiento de pistas	Menor, pistas de mantenimiento y auxiliares	Mayor tráfico elevado	Vías, elevado
Proceso extracción	Contínuo	Intermitente	Intermitente
Organización y automatización	Buena, incluso excelente	Peor	Buena
Capacidad de transporte	Alta	Media	Media/alta
DESVENTAJAS			
Inversión inicial	Alta	Menor, pistas	Alta
Versatilidad, adaptabilidad	Baja	Alta	Baja
Avance tecnológico	Media, motores de velocidad variables	Alta	Baja
Planificación y cálculo	Elevado y riguroso	Riguroso	Riguroso
SITUACIÓN ACTUAL	Aumento de instalaciones	Uso en frentes irregulares y móviles	En recesión en minería

Un ejemplo claro de lo que se plantea, es el Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS), que tiene una inversión de 5.000 MUSD, una configuración aproximadamente con 13 km de correas transportadoras, las cuales conectan la centenaria mina a rajo abierto más grande del mundo, que se transformará en una mina

subterránea, con la planta concentradora. Se proyecta que cuando la División se encuentre en producción normal, este sistema de transporte de mineral moverá 140.000 tpd de mineral [8]. En la Figura 5, se muestra el trazado que tiene la Correa Overland del proyecto, la cual tiene una extensión de 5 km de distancia.

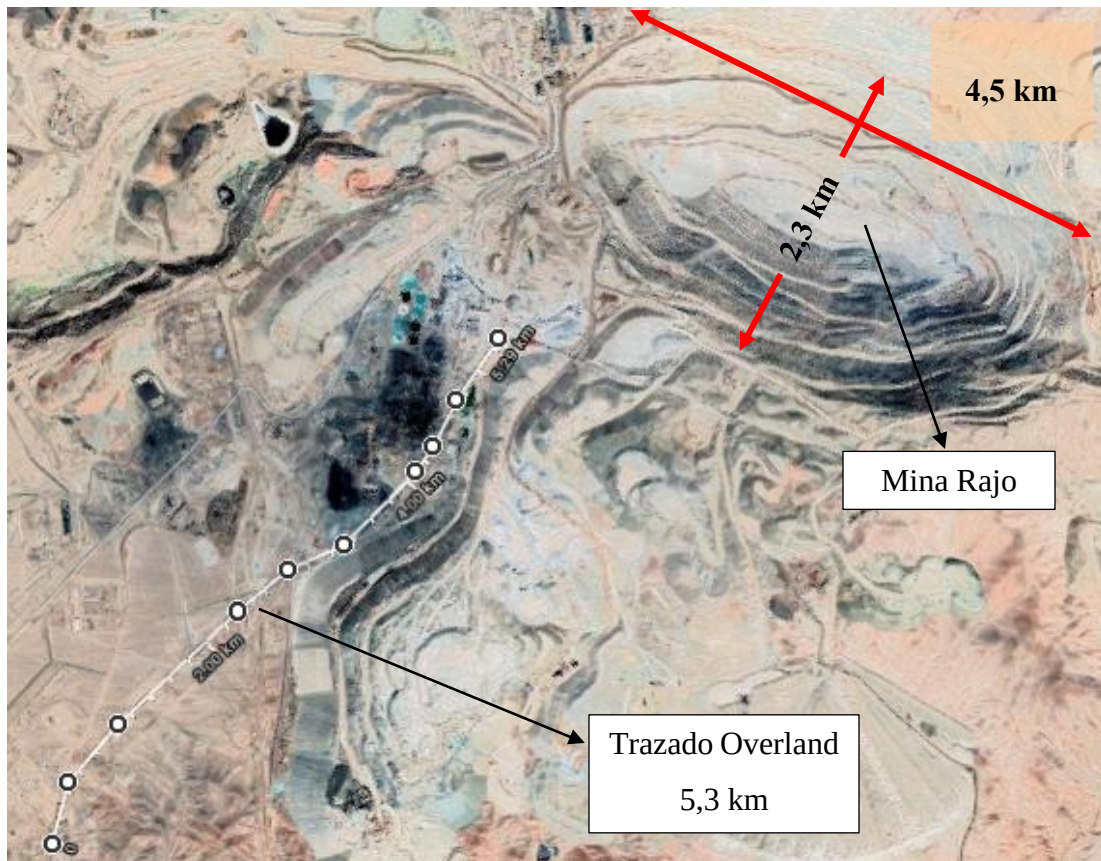


Figura 5: Esquema trazado Overland PMCHS [8].

El PMCHS demuestra la consolidación de las correas transportadoras en el transporte de mineral y sus equipos son analizados en el presente trabajo.

Para contextualizar un poco más la importancia de las correas, se tiene que en la operación minera (Figura 6), después de la extracción en la Mina el material es tratado en plantas de Conminución donde se disminuye el tamaño de partícula. Es en éste proceso donde el material fragmentado es manejado comúnmente a través de

correas transportadoras, además a lo largo del mismo proceso y entre plantas de tratamiento, el mineral en sus distintas etapas y formas es transportado por estos equipos, teniendo así transportadores de distintos tamaños y formas.

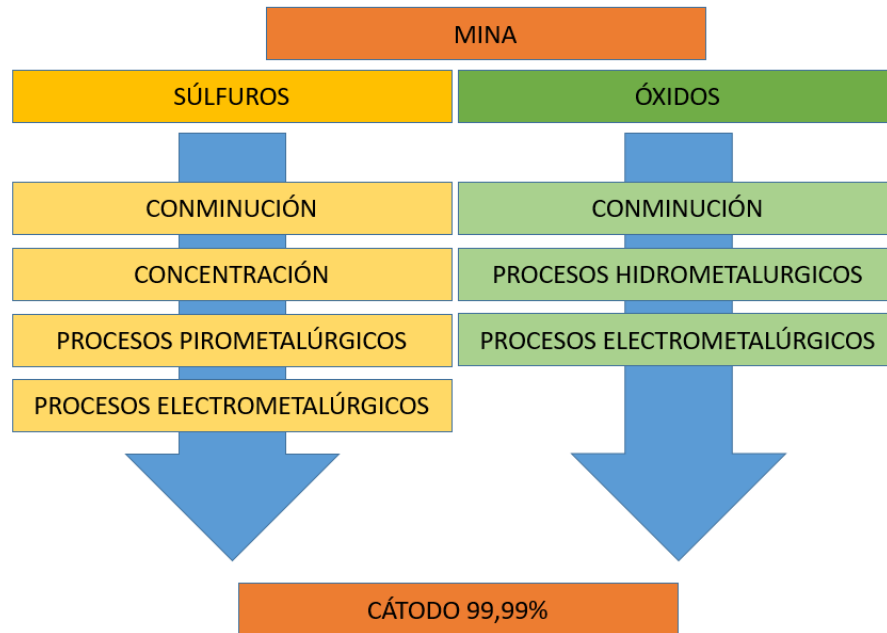


Figura 6: Procesos metalúrgicos del cobre.

Las correas transportadoras juegan un rol fundamental en el rubro minero. De hecho, una falla en estos sistemas puede llegar a detener el proceso productivo y, por ende, generar una importante pérdida económica. Por lo tanto, en su diseño e implementación, se conjugan componentes de altos niveles de confiabilidad, y las empresas están invirtiendo cada vez más en los programas de mantenimiento asociados a estos sistemas.

En Codelco, se tiene aproximadamente 210 km lineales de correas transportadoras instaladas y en operación, mientras que la VP tiene proyectadas sólo en tres de sus proyectos estructurales (PMCHS, NNM y Traspaso Andina) más de 46 km de correas.

En las correas transportadoras el rol del diseño es de suma importancia, debido a que una vez construido y montado el equipo, es prácticamente imposible realizar una reingeniería del transportador debido al elevado costo económico que esto significaría, sin considerar el alto costo de inversión que ya se supone al instalar este tipo de tecnología de manejo de mineral. A su vez, en el constante desarrollo de las correas y de proyectos que estén asociados al rubro minero en general, las exigencias respecto al ítem medio ambiental y de eficiencia energética son cada vez más altas.

Por lo anterior, es que establecer los parámetros críticos de diseño y operación que afectan al consumo de energía de las Correas Transportadoras es de suma importancia en las etapas tempranas del diseño de proyectos de ingeniería. Un estudio acabado de los requerimientos de servicio (trayectoria a cubrir, flujo de masa a transportar, temperatura ambiente de operación, entre otros) y de los componentes estructurales requeridos (tipo de cinta, ancho y largo, polines, poleas, empalmes, mesas) de la correa definirán los aspectos que habrá que tener especial cuidado en el diseño de futuros proyectos, tanto de Codelco VP como de otras entidades que desarrollen este tipo de tecnología para sus procesos.



Figura 7: Correa transportadora [9].

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es determinar y caracterizar los parámetros de diseño y operación que tengan influencia en el consumo energético de las correas transportadoras utilizadas en la minería, considerando elementos mínimos a verificar desde el punto de vista de requerimientos de servicios (trayectoria a cubrir, flujo de masa a transportar, temperatura ambiente de operación, etc.) y componentes estructurales (tipo de cinta, ancho y largo, polines, poleas, empalmes, mesas).

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Definir y caracterizar parámetros de diseño y operación que tengan influencia en el consumo de energía de las correas transportadoras mineras,
- Desarrollar un programa en Excel en base a los métodos CEMA y DIN 22101 sobre correas transportadoras,
- Realizar una comparación en base a los parámetros de diseño y operación definidos con información recogida desde memorias de cálculo de correas transportadoras de la industria, publicaciones y datos reales de operación,
- Comparar y evaluar la factibilidad técnica y económica entre correas transportadoras y otros medios de transporte que realizan funciones similares en la minería,
- Definir buenas prácticas que se rescaten para el diseño, construcción y operación de las correas transportadoras en la minería.

3. Marco teórico

En este apartado se detallan los principales conceptos físicos que gobiernan las correas transportadoras, sus principales componentes y los criterios de diseño más aplicados a este tipo de tecnología.

3.1 Correas transportadoras

Una correa transportadora es un equipo ó sistema de transporte continuo formado básicamente por una cinta de caucho reforzado, que se mueve entre dos poleas. La correa es arrastrada por fricción por una o más poleas motrices, que a su vez son accionadas por uno o más motores. Las otras poleas suelen girar libres, y la función de una de ellas (polea de cola) es la de servir de retorno de la cinta transportadora. La correa es soportada por polines entre las poleas motrices y de cola, los cuales están soportados sobre mesas y/o bastidores.

Los conceptos particularmente relevantes de la física clásica que se aplican al diseño y operación de correas transportadoras son:

- **Principio de conservación de la energía:** La cantidad de energía permanece constante y no se crea ni se destruye. La energía se convierte de una forma a otra.
- **Energía potencial:** Es la energía almacenada en virtud de la masa y la posición de un objeto dentro del campo de fuerzas gravitatorio.

$$E_{potencial} = m \cdot g \cdot H \quad (1)$$

- **Energía cinética:** Es la energía de un cuerpo debido a su movimiento.

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (2)$$

- **Trabajo:** Es el producto de la aplicación de una fuerza sobre un cuerpo para desplazarlo de un punto a otro.

$$W = F \cdot L \quad (3)$$

- **Primera Ley de Newton (Inercia):** Un objeto en movimiento tiende a seguir en movimiento hasta que otra fuerza actúa sobre él.

- **Segunda Ley de Newton:** La relación entre la masa de un objeto, su aceleración y la fuerza aplicada.

$$F = m \cdot a \quad (4)$$

- **Tercera Ley de Newton (Conservación del momento):** Para cada acción, existe una reacción equivalente y opuesta.

$$F_1 = F_2 \quad (5)$$

Las correas transportadoras cuentan con diversos componentes básicos necesarios para su correcto funcionamiento, los cuales pueden ser apreciados en el esquema de la Figura 8, para un transportador en particular con tornillo tensor.

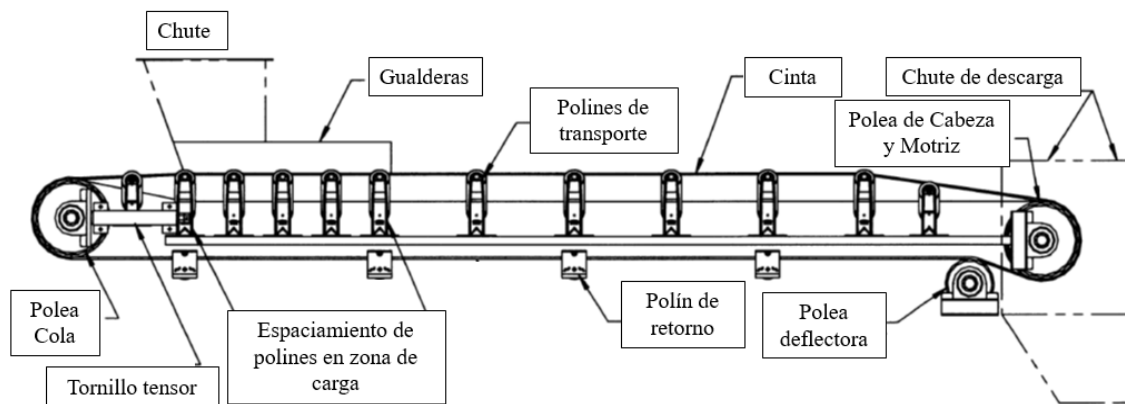


Figura 8: Componentes principales del sistema de correa transportadora [7].

A continuación se describen los cinco principales y más críticos componentes que conforman una correa transportadora: la cinta, los polines, las poleas, el sistema tensor y el sistema motriz. La cinta o banda de goma se considera como el elemento principal de un transportador, debido a que dentro de sus funciones cumple con transportar el material a granel, absorber las tensiones desarrolladas en el arranque, absorber la energía de impacto en el punto de carga. Además, debe cumplir importantes requisitos de seguridad, tales como resistir efectos térmicos o químicos a los que se encuentre expuesta al transportar el material.

Existen distintos tipos de banda que se especifican según el material empleado en la carcasa o según su recubrimiento. Las bandas más utilizadas en la industria minera son en primer lugar las bandas de tela o tipo EP, formadas por fibras de poliéster (E) en la dirección longitudinal (Urdidumbre) y de poliamida (P) en la dirección transversal (trama), como se ejemplifica en la Figura 9. En segundo lugar, están las bandas con cables de acero o tipo ST, debido a su denominación en inglés *Steel Cord*, las cuales se muestran en la Figura 10.

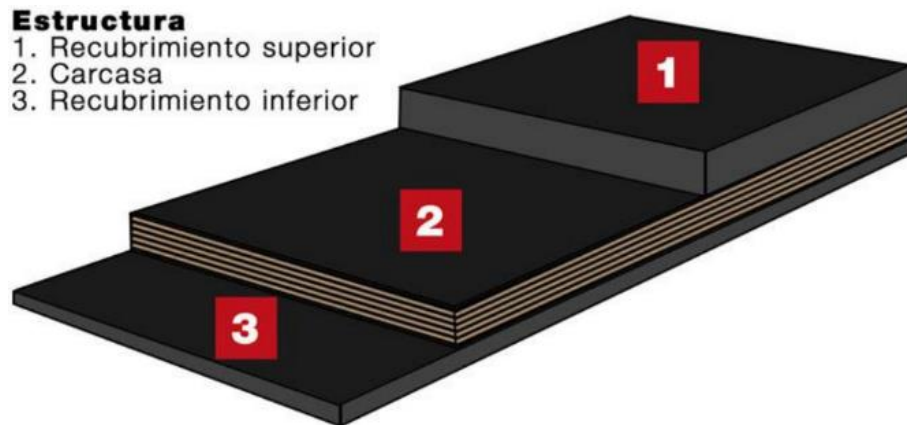


Figura 9: Ejemplo estructura banda de tela [10].

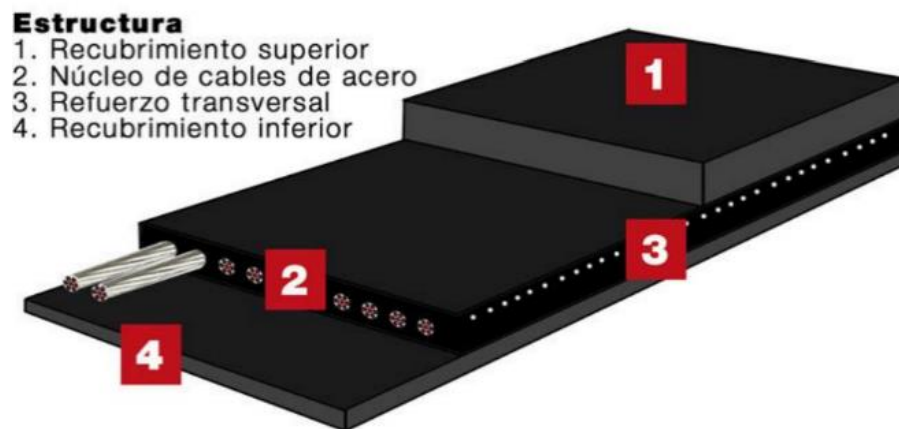


Figura 10: Ejemplo estructura banda de cable [10].

La constitución de la banda está conformada por el tejido o carcasa, constituida por la urdimbre o hilos longitudinales y por la trama o hilos transversales. La urdimbre, que soporta los esfuerzos de tracción longitudinales, es generalmente más resistente que la trama, la cual soporta esfuerzos transversales secundarios, derivados de la adaptación a la forma de artesa y los producidos por impactos. Además, la cinta está compuesta por los recubrimientos que se encuentran formados por elastómeros (caucho natural), PVC u otros materiales. El recubrimiento superior es el que soporta el material

y su impacto en los traspasos, mientras que el inferior es el que se encuentra en contacto con los rodillos o polines. Es por esto que el recubrimiento superior tiene mayor espesor que el inferior, debido a que es éste el que sufre más desgaste. La norma que rige la designación de la cinta es la DIN 22102 [11].

Los polines son otro componente principal de las correas transportadoras y de su selección y calidad depende en gran medida el buen funcionamiento de la correa transportadora. Si el giro de los polines es deficiente, además de aumentar la fricción y por tanto el consumo de energía, también se produce desgaste en el recubrimiento de la banda, teniendo consecuencias en la vida útil de la misma o incluso en potenciales riesgos de incendio en las correas transportadoras.

Las funciones que cumplen los polines son, en primer lugar, soportar a la banda que lleva el material a granel tanto en el transporte como en el retorno, absorber el impacto producido por el material a granel en el tramo de carga del mismo, asistir al centrado de la banda cuando se encuentra en operación. Proporcionan la contención para poder adaptarse al terreno en el caso de las correas todo terreno (Overland).

Los polines adoptan varias configuraciones para cumplir con la función determinada por su ubicación. Los más comunes se ejemplifican en las Figuras 11 y 12.

- **Disposición rígida en la estación de transporte (lado superior):**
 - Tres rodillos con un ángulo de acanalamiento.
 - En Guirnalda o tipo “Garland”.

- **Disposición rígida en la estación de retorno (lado inferior):**
 - Un solo rodillo liso, engomado o con discos de goma.
 - Dos rodillos lisos en “V”, lisos, engomados y con discos de gomas.

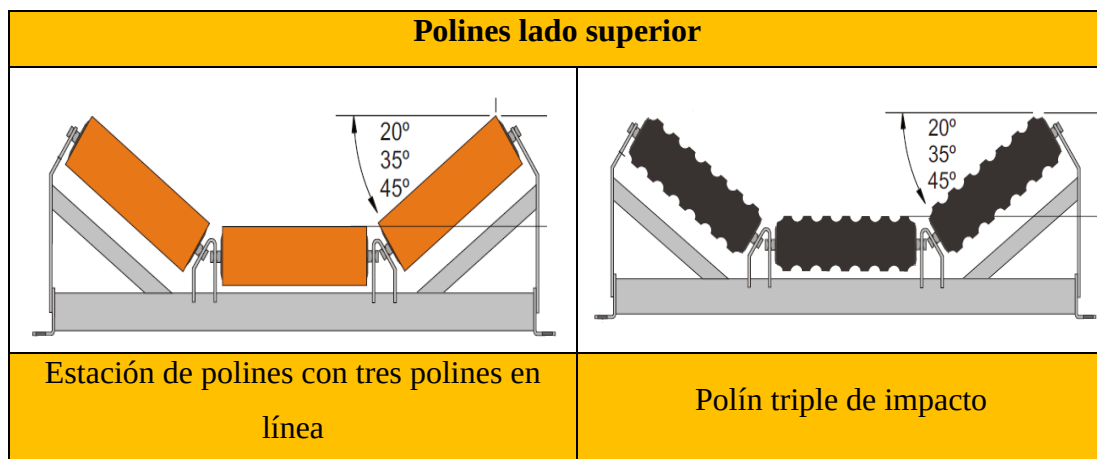


Figura 11: Tipos de polines más comunes lado superior [12].

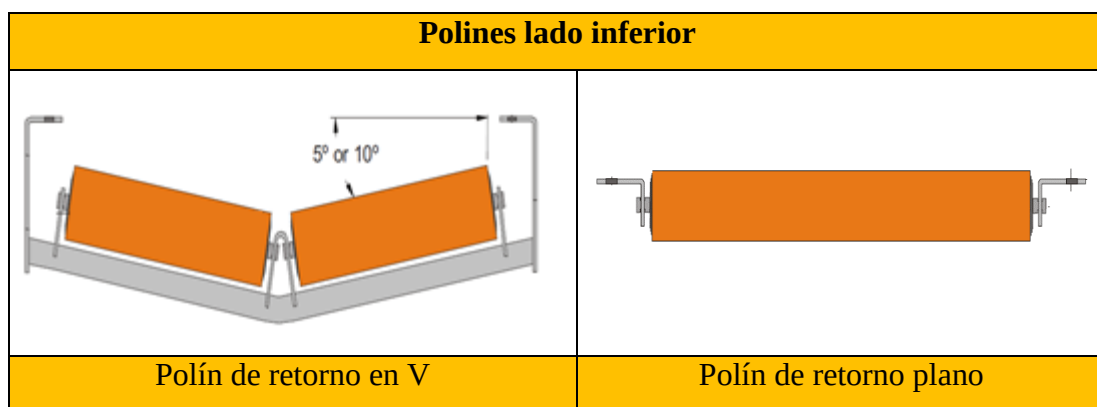


Figura 12: Tipos de polines más comunes lado inferior [12].

Los polines se constituyen principalmente por un cilindro y los rodamientos, que pueden ser cónicos o de bolas. La norma que rige la selección de polines es la DIN 15207 [13].

Las poleas ó tambor son un componente sencillo, y se clasifican en dos grupos. El primero son las denominadas poleas motrices que son las encargadas de transmitir el movimiento producido por el grupo motor-reductor a la correa (Figura 13). El segundo son las poleas no motrices, que son las encargadas de realizar el cambio de

trayectoria de la banda, denominadas de cola o conducida. Las poleas no motrices también se subdividen en otros tipos dependiendo de la posición de estas sobre la banda, encontrándose la siguiente clasificación:

- **De descarga o cabeza:** situados en el fin de la correa transportadora, tiene la función de descargar el material del equipo y pueden tener el sistema motriz de la correa transportadora, dependiendo de la configuración de la misma.
- **De cola o reenvío:** situados en el inicio del transportador, normalmente, en transportadores sencillos, están cerca de la zona de carga del material, Figura 14.
- **Tensora:** pueden estar situados en la cabeza, cola o en cualquier lugar de la cubierta inferior de la cinta, dependiendo de la ubicación del sistema de tensado.
- **De desvío:** ubicados generalmente en la estación tensora del transportador.
- **De inflexión o presión:** encargados de aumentar el ángulo de abrace entre la polea motriz y la banda, para aumentar así el valor del factor de transmisión.

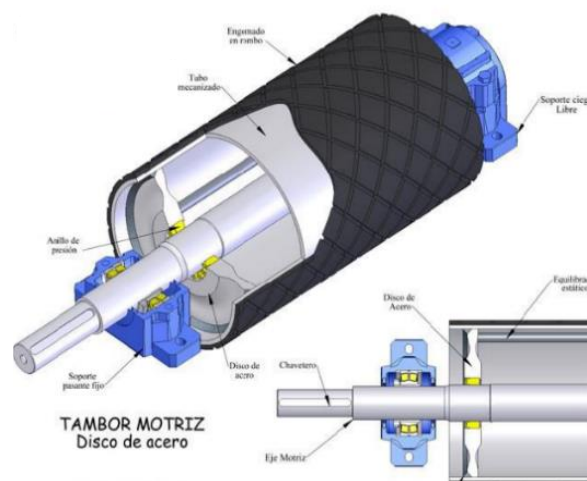


Figura 13: Polea motriz [14].

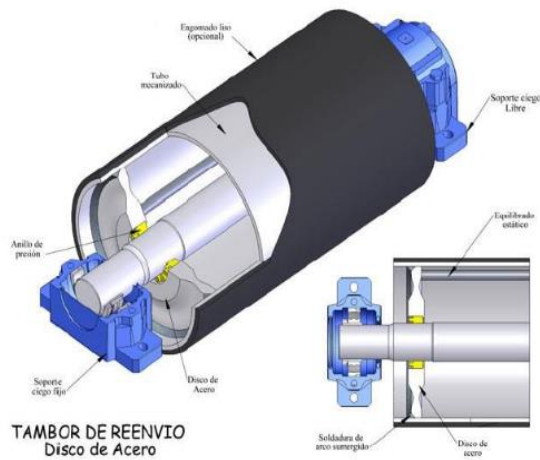
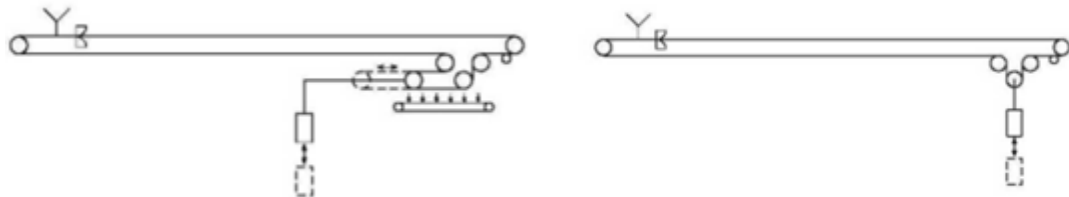


Figura 14: Polea no motriz [14].

Los dispositivos de tensado (tensores de banda) tienen como función lograr el adecuado contacto entre la banda y la polea motriz, evitar derrames de material en las proximidades de los puntos de carga controlando la “flecha” o SAG de la banda, motivados por falta de tensión en la banda. Los tensores de banda compensan las variaciones de longitud producidas en la cinta que son inherentes a la operación y construcción de las mismas, que normalmente se traducen en el estiramiento de esta. Los grupos tensores mantienen la tensión adecuada en el ramal de retorno durante el arranque del transportador y existen distintas posiciones de este sistema, ejemplificándose las más comunes en las Figuras 15 y 16.



Tensor gravitacional con carro tensor

Tensor gravitacional en polea de cabeza

Figura 15: Ejemplo de dispositivos de tensado más utilizados [15]

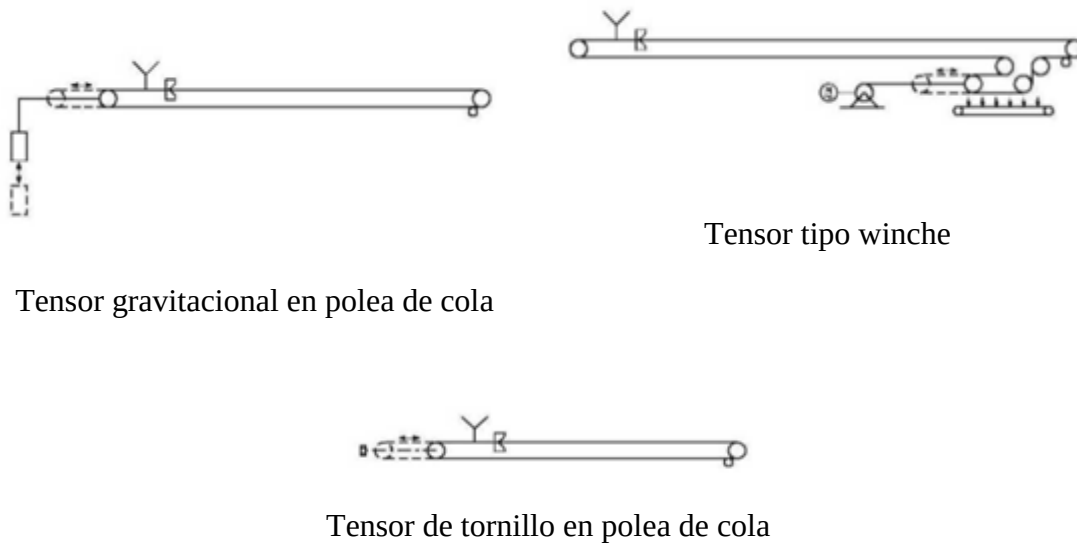
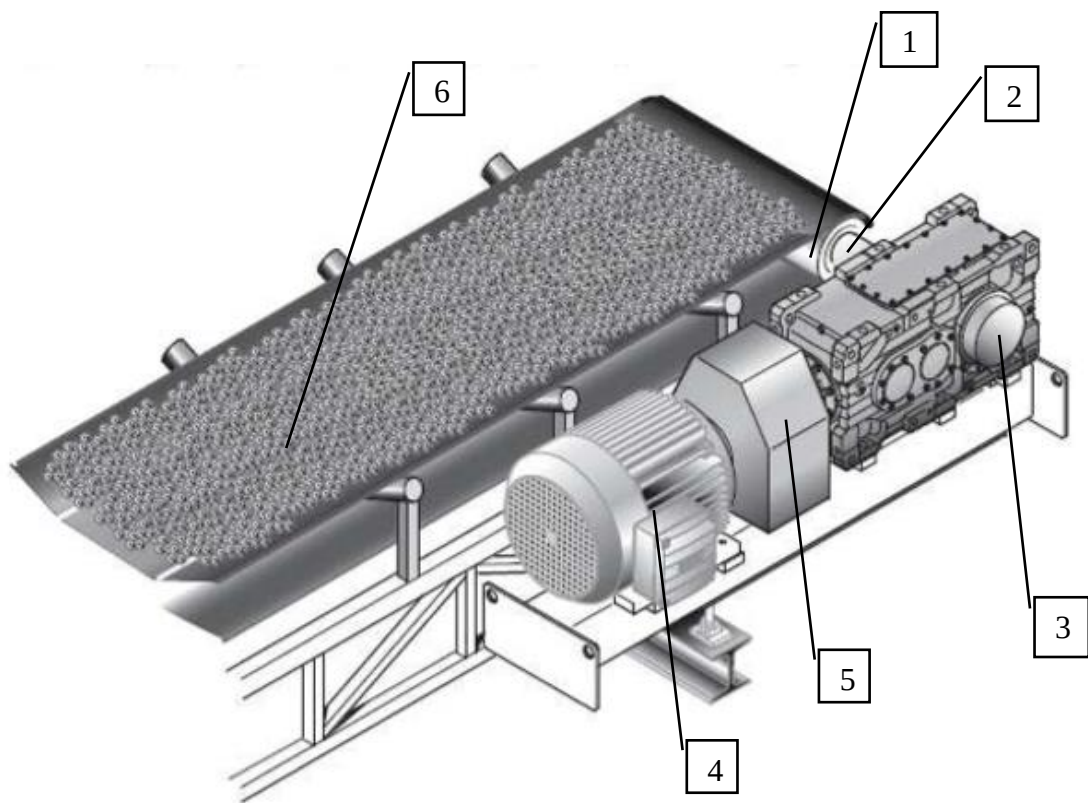


Figura 16: Ejemplo de dispositivos de tensado más utilizados [15].

El sistema motriz es el encargado de transmitir la energía necesaria para el desplazamiento de la cinta, mantener la velocidad fijada de desplazamiento y frenar la cinta cuando se demanda. La capacidad de transmisión de tensión a la banda está limitada por el tipo de rozamiento (tipo de contacto) y por el ángulo de abrace según la fórmula de Euler, y por este motivo, a veces, se necesita más de una polea motriz ya que el ángulo de abrace está limitado por diseño.

El motor, el reductor y el freno constituyen el grupo motriz, encargado de dar el movimiento a la correa transportadora y se encuentran unidos normalmente. En correas transportadoras se utilizan principalmente motores de corriente alterna.

En la Figura 17 se ejemplifican las partes típicas de un sistema motriz en una correa transportadora.



- 1. Polea de accionamiento ó motriz.
- 2. Cojinetes.
- 3. Reductor

- 4. Motor
- 5. Sistema antirretorno.
- 6. Cinta

Figura 17: Sistema motriz y sus partes principales [7].

3.2 Características y transportabilidad de los materiales a granel

La caracterización del material a granel a transportar es de suma importancia a la hora del correcto diseño de cintas transportadoras, la cual está fuertemente influenciada por su densidad aparente, el contenido de humedad y el tamaño de partículas del material.

Los parámetros a considerar para la evaluación del material a granel son:

- **Fricción interna:** La fricción o roce del material sobre sí mismo.
- **Resistencia cohesiva:** El grado en que las partículas individuales tienden a adherirse entre sí.
- **Resistencia adhesiva:** El grado en que el sólido a granel tiende a adherirse a las superficies o a la banda.
- **Ángulo de reposo (φ_r):** El ángulo natural formado entre la horizontal y la pendiente de una pila de material a granel (Figura 18).

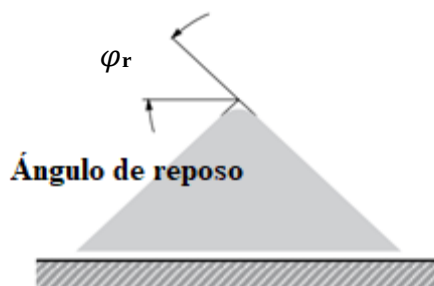


Figura 18: Ángulo de reposo [9].

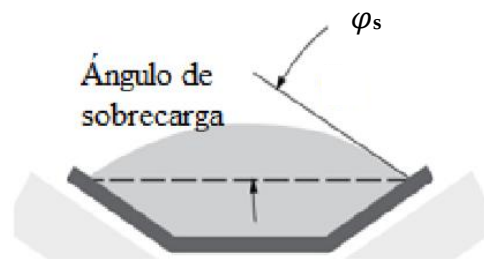


Figura 19: Ángulo de sobrecarga [9].

- **Ángulo de sobrecarga (φ_s):** Ángulo que se forma con la horizontal que adopta la superficie del material mientras éste se encuentra en movimiento (Figura 19).

- **Densidad aparente:** El peso por unidad de volumen del material a granel sin compactar.
- **Contenido de humedad:** La humedad de un material afecta principalmente la cohesión y tensión superficial que este puede tener.
- **Granulometría:** La distribución de los tamaños de partícula de un material sólido a granel.

3.3 Cálculo de tensiones y potencia en correas transportadoras

A continuación, se describen los dos métodos más recurrentes para el cálculo de potencia requerida en una correa transportadora, el método CEMA y la norma DIN.

3.3.1 Método de cálculo CEMA (7ma edición)

Para superar las pérdidas de tensión debido a los componentes de un sistema transportador, la potencia (mecánica) requerida está determinada por:

$$P_b = \Delta T \times V \quad (6)$$

Donde:

- P_b : Potencia vista por la banda en la polea motriz.
- ΔT : Cambio total de la tensión en la correa.
- V : Velocidad de banda

Y finalmente, el cálculo de la potencia utilizado para la selección del motor viene dada por la ecuación 7:

$$P_d = \frac{P_b \times SF_d}{E_n} \quad (7)$$

Donde:

- P_d : Potencia mínima rotativa requerida en la polea motriz.
- SF_d : Factor de seguridad para la polea motriz.
- E_n : Eficiencia entre el accionamiento y la banda.

La guía CEMA según sus siglas en inglés, Conveyor Equipment Manufacturers Association en su 7ma edición, tiene como objetivo establecer una metodología de diseño de correas transportadoras, a través de recomendaciones, fórmulas, gráficos y tablas que están basadas en las principales prácticas de la industria norteamericana [9].

El área que ocupa el material a granel en el transportador (A) viene dada por la relación:

$$A = \frac{Q}{V \cdot \gamma_m \cdot \cos \theta} \quad (8)$$

Donde:

- A : Área transversal del material a granel según los requerimientos de diseño.
- Q : Cantidad de material a granel transportado según los requisitos del diseño.
- V : Velocidad de la banda.
- γ_m : Densidad aparente del material a granel transportado.
- θ : Ángulo de inclinación total del transportador.

La velocidad de la banda (V) se mueve normalmente entre los rangos:

- Transportadores de planta (entre 0 a 100 m) : 2,9 [m/s] a 3,7 [m/s].
- Transportadores entre planta (100 m a 1.000 m) : 3,2 [m/s] a 6 [m/s].
- Transportadores todo terreno (Overland) : 5 [m/s] a 10 [m/s].

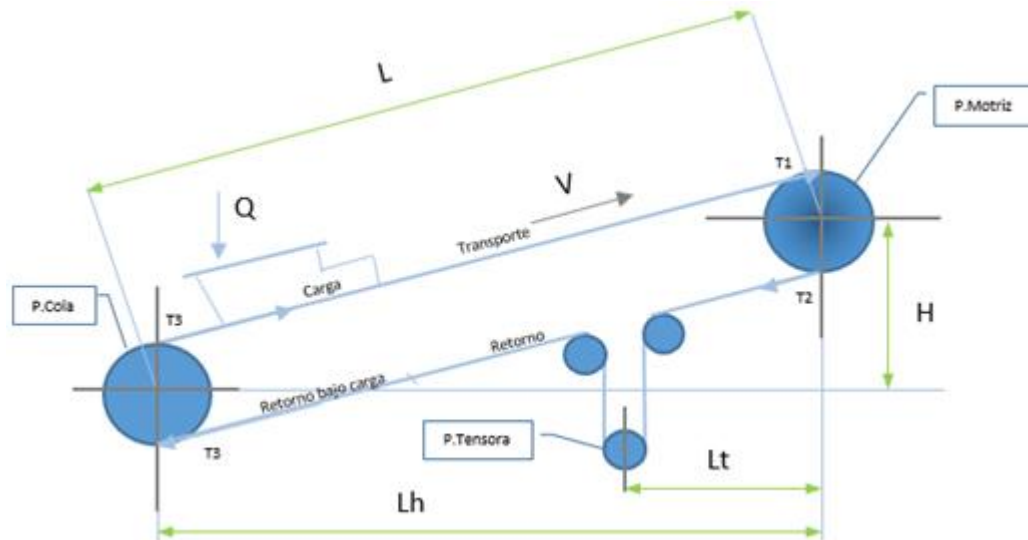


Figura 20: Principales parámetros y componentes de una correa transportadora.

3.3.1.1 Área según CEMA

Para calcular el área transversal estándar CEMA (A_s), utilizando la distancia del borde estándar CEMA (B_{we}), el largo del polín transportador de carga de tres unidades iguales (B_c) y el perfil semicircular de la sección transversal de la superficie superior del material a granel, cuyo borde externo es tangente al ángulo de sobrecarga del material (ϕ_s), como se muestra en la Figura 21.

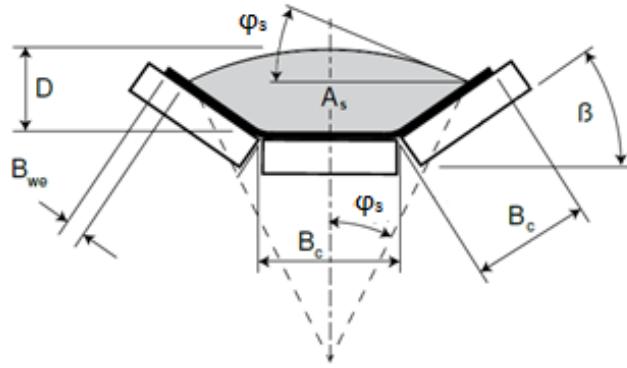


Figura 21: Área según CEMA [9].

Para el desarrollo de la sección transversal estándar según CEMA, se utiliza el método llamado *Relaciones adimensionales transversales* y de lo anterior, se define la ecuación para el área A_s [9]:

$$\begin{aligned}
 A_s = 2 \times BW^2 \times & \\
 \times \left[r_{sch}^2 \times \left(\frac{\varphi_s}{2} - \frac{\sin(\varphi_s) \times \cos(\varphi_s)}{2} \right) + \dots \right. & \quad (9) \\
 \left. \dots + \left[\frac{b_c}{2} \times b_{wmc} \times \sin(\beta) \right] + b_{wmc}^2 \times \frac{\sin(\beta) \times \cos(\beta)}{2} \right] &
 \end{aligned}$$

3.3.1.2 Selección de polines según CEMA

Un paso previo al cálculo de tensiones y potencia de un transportador, es la selección adecuada de los polines. Los polines de las cintas transportadoras tienen una importancia significativa en la pérdida de energía del sistema, en consecuencia, en el consumo de energía de la misma.

El parámetro de selección para los polines es la carga calculada del polín (CIL) y su cálculo se detalla en la guía CEMA [9], se describe en la ecuación 10:

$$CIL = (W_b + (W_m \times K_1)) \times S_i + IML \quad (10)$$

Donde:

- W_b : Peso de la cinta por unidad de longitud.
- W_m : Peso del material a granel por unidad de longitud.
- K_1 : Factor de ajuste del bulto.
- S_i : Distancia entre polines.
- IML : Carga de desalineación del polín.

3.3.1.3 Cálculo de Tensiones CEMA (7ma edición)

El cálculo de las fuerzas de transporte y sus interacciones para su uso en la selección de los componentes y el establecimiento de los límites operativos para los transportadores de banda que trasladan materiales a granel, se basa principalmente en el funcionamiento en estado estacionario y a velocidad constante de un transportador. De esta manera brinda parámetros y ecuaciones de diseño para cuantificar en forma individual cada categoría de pérdida de energía, para así simplificar el cálculo de tensión del sistema.

El cálculo y el texto siguientes describen la tensión que es añadida en cada tramo para que se pueda producir el movimiento del transportador de la siguiente manera, siendo “n” cada tramo en cuestión, como se muestra en la Figura 22.

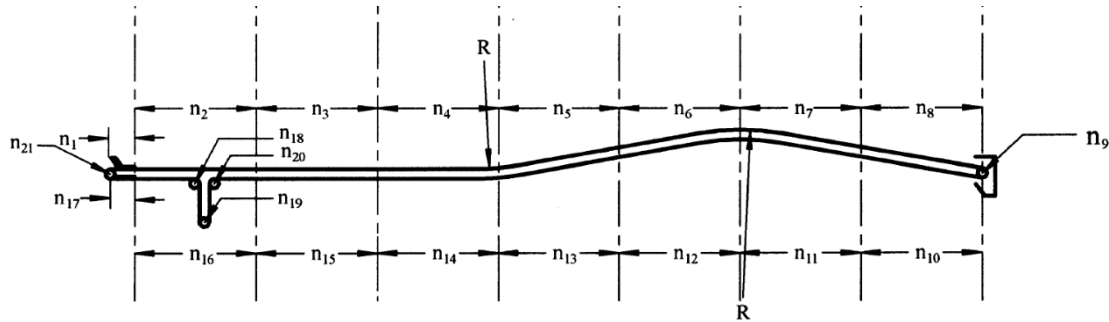


Figura 22: Esquema y terminología de un “tramo” [9].

La guía CEMA en su 7ma edición subdivide el equipo en “n” tramos, calculando en cada uno de éstos las pérdidas de tensión asociadas y sumándolas finalmente. La ecuación que gobierna el cambio total de tensión en la correa está dado por la ecuación 11, donde se describen tres fuentes de pérdida de tensión.

$$\Delta T = \sum_n \Delta T_{Energía\ n} + \sum_n \Delta T_{Principal\ n} + \sum_n \Delta T_{Punto\ n} \quad (11)$$

Los cambios en la tensión descritos como componentes de energía ecuación 12:

$$\sum_n \Delta T_{Energía\ n} = \Delta T_{Hn} + \Delta T_{amn} \quad (12)$$

Los cambios de tensión principales se presentan en la ecuación 13.

$$\begin{aligned} \sum_n \Delta T_{Principal\ n} = & \Delta T_{ssn} + \Delta T_{isn} + \Delta T_{iWn} + \Delta T_{bin} \\ & + \Delta T_{mn} + \Delta T_{sbn} + \Delta T_{sn} + \Delta T_{mzn} \end{aligned} \quad (13)$$

Los cambios de tensión debido a fuentes puntuales (ecuación 14) son:

$$\sum_n \Delta T_{Punto\ n} = \Delta T_{pxn} + \Delta T_{prn} + \Delta T_{bcn} \quad (14)$$

En el Anexo A, se presenta el detalle de cada una de las pérdidas de tensión con los parámetros de los cuales dependen y sus respectivas ecuaciones. Para más detalle consultar la guía CEMA en su séptima edición [9].

3.3.1.4 Control de la tensión

- Tensiones máximas de diseño

La tensión máxima operativa de la banda, normalmente ocurre en el punto de descarga en transportadoras horizontales o ascendentes y en los puntos de carga en transportadores en declive regenerativos.

La tensión en el arranque de la correa es mayor que la tensión operacional de la misma. De esta forma, la tensión máxima a la que está solicitada la correa se utiliza para seleccionar la cinta, la cual debe incorporar otras solicitaciones que no estén consideradas en la operación normal de la correa y que dependan de su configuración.

- Tensiones mínimas de diseño

La tensión mínima del transportador impacta en el costo del equipo, aunque no contribuye con el trabajo para la función de transporte del material en sí mismo. Los tensores se utilizan para mantener las tensiones mínimas necesarias para el funcionamiento aceptable del transportador, pero no afectan los cambios locales en la tensión, excepto mediante los efectos de catenaria. Éstos se cuantifican con la denominada “flecha” (Δy_s) fenómeno que ocurre con la cinta al descansar entre los polines (En inglés “Catenary belt sag”), que se ejemplifica en la Figura 23.

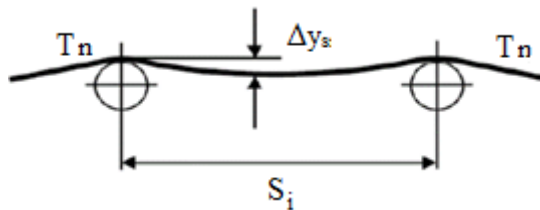


Figura 23: Ejemplo de la "Flecha" entre dos polines de la correa transportadora.

La ecuación que gobierna este fenómeno viene dada de la forma:

$$\Delta y_s = \frac{(W_b + W_m) \cdot S_i}{8 \cdot T} \cdot 100(\%) \quad (15)$$

Donde:

- W_b : Peso de la cinta por unidad de longitud.
- W_m : Peso del material a granel por unidad de longitud.
- S_i : Distancia entre polines.
- T : Tensión en el tramo.

La experiencia recomienda que la flecha en el lado de transporte debe tener como cota máxima un 3%, sobre este valor se tiende a producir derrames no deseados en la banda transportadora y normalmente su valor es de 1%.

De lo anterior, se define la Tensión mínima ($T_{\min}$) que debe ser proporcionada a la cinta para que la flecha no supere el porcentaje señalado con anterioridad es:

$$T_{\min} = \frac{12,5 \cdot (W_b + W_m) \cdot S_i}{\Delta y_s} \quad (16)$$

Donde:

- W_b : Peso de la cinta por unidad de longitud.
- W_m : Peso del material a granel por unidad de longitud.
- S_i : Distancia entre polines.
- Δy_s : Catenaria o flecha.

Las ecuaciones 15 y 16 son equivalentes.

- Distribución de tensiones

Por un lado, se tiene que (ΔT) corresponde al cambio total de la tensión para producir una velocidad estable de la banda, por lo tanto, es la fuerza que debe vencer el motor para que el transportador pueda cumplir con las exigencias de transporte, la cual considera cualquier tipo de singularidad que se encuentre en el recorrido de la correa. Por otro lado, la polea motriz que transfiere a la banda una tensión (ΔT_e) que está controlada por el coeficiente de fricción entre la polea y la cinta, siendo la condición límite o tensión circunferencial dada por la ecuación:

$$\Delta T_e = T_{\min} \times (e^{f\theta_n} - 1) \quad (17)$$

Donde:

- $T_{\min}$: Tensión mínima del transportador.
- f : Coeficiente de fricción entre la polea motriz y la cinta de goma.
- θ_n : Ángulo de abrace en la polea motriz.

En la Figura 24 se presentan la nomenclatura más utilizada de las tensiones que están en juego en un transportador. Las tensiones que entran y que salen de la polea motriz, se les suele llamar T_1 y T_2 , ó $T_{\min}$ y $T_{\max}$, siendo la última denominación la más universal.

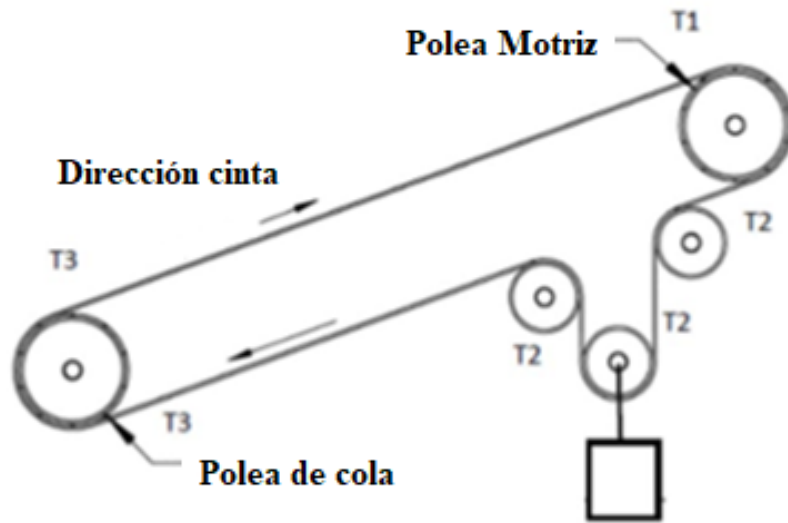


Figura 24: Terminología de tensiones en poleas [15].

La ecuación 18 relaciona los cambios de tensiones y se basa en el Principio de Euler. La guía CEMA lo describe como el factor de envoltura (C_{wn}):

$$C_{wn} = \frac{1}{e^{f\theta_n} - 1} = \frac{T_2}{\Delta T_e} \quad (18)$$

Donde:

- T_2 : Tensión que sale de la polea motriz.
- ΔT_e : Tensión proporcionada por la polea activa.
- f : Coeficiente de fricción entre la polea motriz y la cinta.
- θ_n : Ángulo de abrace de la polea motriz.

Se calcula T_2 comparando entre los resultados de las ecuaciones (16) y (18), siendo la mayor de éstas la tensión que evita el deslizamiento de la banda, por ende la T_2 de diseño. Entonces, desde la ecuación de Euler se tiene que:

$$T_2 \geq C_{wn} \times \Delta T_e \quad (19)$$

Donde:

- T_2 : Tensión que sale de la polea motriz.
- C_{wn} : Factor de envoltura.
- ΔT_e : Tensión proporcionada por la polea activa.

Finalmente, según la Figura 25 se tiene que la tensión efectiva viene dada por:

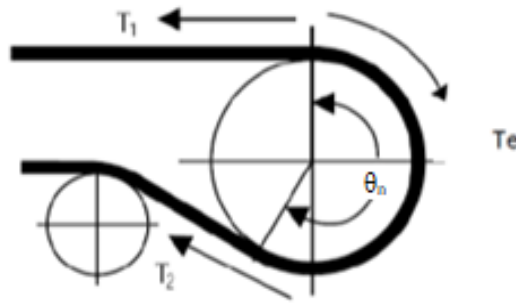


Figura 25: Terminología en la polea motriz [15].

$$\Delta T_e = T_1 - T_2 \quad (20)$$

Donde:

- T_1 : Tensión que ingresa en la polea motriz.
- T_2 : Tensión que sale de la polea motriz.
- ΔT_e : Tensión proporcionada por la polea activa.

3.3.2 Método de cálculo Norma DIN 22101 año 2011

Este apartado describe el método de cálculo de las resistencias al movimiento según la norma DIN, aplicado al funcionamiento en estado continuo, considerando la cubierta superior y de retorno de la correa transportadora [16].

Para superar las resistencias al movimiento en un sistema transportador, la potencia (mecánica) requerida está determinada por:

$$P_W = F_W \cdot V \quad (21)$$

Donde:

- F_W : Resistencias al movimiento total del transportador.
- V : Velocidad de la banda

Para condiciones de carga desfavorables en un sistema transportador con secciones ascendentes y descendentes y con una carga nominal distribuida en forma desigual, es muy posible que las resistencias de movimiento F_W definidas se excedan notablemente.

3.3.2.1 Área según DIN

El área teórica (A_{th}) según la norma DIN se calcula a través de un trapecio y un triángulo que representan el material en corte transversal en la correa, como se muestra en la Figura 26 y se describe en las ecuaciones 22, 23 y 24.

$$A_{1,th} = [l_M + (b - l_M) \cdot \cos \lambda]^2 \cdot \frac{\tan \varphi_s}{4} \quad (22)$$

$$A_{2,th} = [l_M + \frac{(b - l_M)}{2} \cdot \cos \lambda] \cdot \frac{(b - l_M)}{2} \cdot \sin \lambda \quad (23)$$

$$A_{th} = A_{1,th} + A_{2,th} \quad (24)$$

Donde:

- l_M : Largo del polín central.
- λ : Ángulo de acanalamiento de los polines.
- b : Ancho que ocupa la carga sobre la cinta.
- φ_s : Ángulo de sobre carga del material.

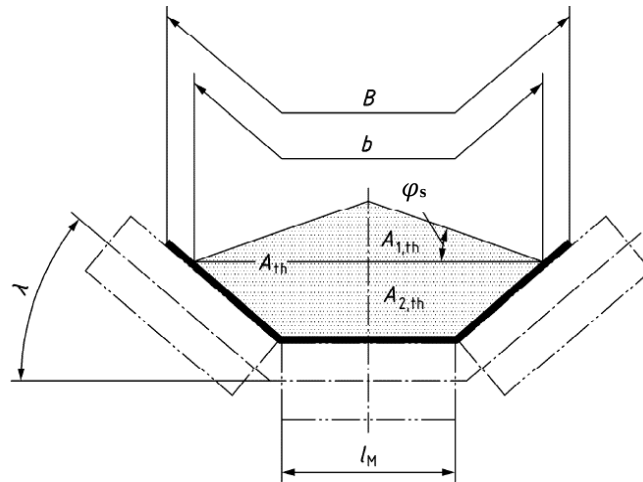


Figura 26: Área según DIN [9].

3.3.2.2 Selección de polines según DIN

La selección de rodillos se realiza a través de la norma DIN 15207 [13].

3.3.2.3 Cálculo de resistencias al movimiento según DIN 22101

El método descrito a continuación para la determinación de las resistencias al movimiento, la potencia requerida y las tensiones locales de la banda, produce resultados bastante realistas para este tipo de tecnología, incluso para instalaciones de transportadores complejos y con todas las condiciones de operación posibles.

Se puede simplificar el método de cálculo para los transportadores de banda que no sean muy complejos en su geometría, que tengan condiciones operativas manejables y para aquellos que no requieren un alto grado de precisión, siempre y cuando se cumplan los requisitos de básicos de seguridad.

El total de la resistencia al movimiento, considerando la suma de todos los tipos de resistencias en cada punto teniendo en cuenta la cubierta superior (over) y la cubierta

inferior del transportador (under), se define en la ecuación 25 y es igual al total de la fuerza periférica que transmite la polea a la cinta. La ecuación 26 describe los tipos de resistencia al movimiento según su origen, las cuales se revisan en detalle más adelante.

$$F_W = \sum_{i=1}^{n_o} F_{W,o,i} + \sum_{i=1}^{n_u} F_{W,u,i} = F_{Tr} \quad (25)$$

$$F_W = F_H + F_N + F_{St} + F_S = F_{Tr} \quad (26)$$

- **F_H: Resistencias primarias en la trayectoria de la correa**

Las resistencias primarias totales son las que actúan en toda la trayectoria de la correa transportadora, ya sea en la cubierta superior y de retorno. Su relación exacta se detalla en la ecuación 27, donde se considera la cubierta superior e inferior del transportador, separados por secciones “i”. El cálculo de las resistencias primarias se simplifica usando la ecuación 28, válida cuando el transportador no es muy complejo.

$$F_{H,i} = l_i \cdot f \cdot g \cdot [m'_{R,i} + (m'_G + m'_{L,i}) \cdot \cos \delta_i] \quad (27)$$

Donde:

- f : Coeficiente de fricción según DIN.
- g : Aceleración de gravedad.
- l_i : Largo de la correa.
- $m'_{R,i}$: Masa relativa a la longitud de los polines.
- m'_G : Masa relativa a la longitud de la correa transportadora.
- $m'_{L,i}$: Masa relativa a la longitud del material transportado.
- δ_i : Ángulo de inclinación en la sección.

$$F_H = f \cdot g \cdot L \cdot [m'_R + (m'_G + m'_L) \cdot \cos \theta] \quad (28)$$

Donde

- f : Coeficiente de fricción según DIN.
- g : Aceleración de gravedad.
- L : Largo de la correa.
- m'_R : Masa relativa a la longitud de los polines.
- m'_G : Masa relativa a la longitud de la correa transportadora.
- m'_L : Masa relativa a la longitud del material transportado.
- θ : Ángulo total de inclinación del transportador.

- Coeficiente de fricción f

La selección del coeficiente de fricción DIN es la selección más importante en el correcto cálculo de las resistencias primarias, en especial para correas con poca inclinación.

El coeficiente f es definido principalmente por la resistencia de los polines, la indentación de la cinta en los polines y la resistencia a la flexión de la cinta entre los polines (SAG). Basado en la experiencia, la norma DIN ha desarrollado la Tabla 2, que da pautas para determinar el coeficiente f .

Tabla 2: Valores estándar para el coeficiente de fricción f según DIN [16].

Características	Valor de la característica		
Fricción interna material	Medio	Bajo	Alto
Alineación	Medio	Bueno	Malo
Tensión de la correa	Medio	Alto	Bajo
Condición de operación	Medio	Bueno	Bajo
Diámetro de polín	108 mm a 159 mm	>159 mm	<108 mm
Espacio polines transporte	1 m a 1,5m	<1 m	>1,5 m
Espacio polines retorno	2,5 m a 3,5 m	<2,5 m	>3,5 m
Velocidad de la banda	4 m/s a 6 m/s	<2,5 m/s	>3,5 m/s
Ángulo de acanalamiento	25° a 35°	<25°	>35°
Temperatura ambiente	15° a 25°	>25°	<15°
Coeficiente de fricción f Valor estándar	0,020	0,010	0,040

- **F_N : Resistencias secundarias totales**

Se deben a resistencias al movimiento limitadas localmente y también a la resistencia debido a la inercia del material, las cuales se encuentran en algunos lugares específicos del transportador, usualmente en la cabeza y la cola del mismo. La forma general se presenta en la ecuación 29:

$$F_N = \sum_{i=1}^{n_o} F_{N,o,i} + \sum_{i=1}^{n_u} F_{N,u,i} = F_{N,o} + F_{N,u} \quad (29)$$

Existe una aproximación de este tipo de resistencias al movimiento que es sólo aplicable a transportadores con una distancia total entre poleas sobre los 80 m ($L > 80$ m) y se describe en la ecuación 30. El coeficiente C depende directamente del largo L del transportador y se presenta en la Tabla 3.

$$F_N = F_H \times (C - 1) \quad (30)$$

Donde:

- F_H : Resistencias primarias.
- C : Coeficiente para resistencias secundarias según DIN.

Tabla 3: Coeficiente C para resistencias secundarias según DIN [16].

L [m]	80	100	150	200	300	400	500
C [-]	1,92	1,78	1,58	1,45	1,31	1,25	1,20
L [m]	600	700	800	900	1000	1500	>2000
C [-]	1,17	1,14	1,12	1,10	1,09	1,06	1,05

Cuando el transportador es menor a 80 m, se deben determinar individualmente las resistencias secundarias, por extensión sólo se nombran en este apartado el tipo de resistencia. Resistencias secundarias a calcular:

- Resistencia debido a los limpiadores de banda (F_{Gr}).
- Resistencia a la fricción entre la cinta y los chutes laterales (F_{schb}).
- Inercia entre el material transportado y la cinta en la zona de carga (F_{Auf}).
- **F_{st} : Resistencias a la gradiente del sistema**

La resistencia debido a la gradiente del material transportado y la correa transportadora en el recorrido de cubierta superior y de retorno, tiene una gran influencia en la distribución de las fuerzas de la correa en sistemas transportadores con gradientes muy pronunciadas. En estos casos la suma de las resistencias determina una gran parte de la potencia motriz requerida.

La resistencia a la gradiente de una sección se determina considerando la ecuación 31:

$$F_{st,i} = h_i \cdot g \cdot (m'_G + m'_{L,i}) \quad (31)$$

Donde:

- h_i : Diferencia de altura en la sección del sistema.
- g : Aceleración de gravedad.
- $m'_{L,i}$: Masa relativa a la longitud de los polines.
- m'_G : Masa relativa a la longitud de la correa transportadora.

En el caso en que la correa tenga carga sólo en la parte superior y esta sea pareja sobre la misma, la resistencia a la gradiente de puede calcular como se presenta en la ecuación 32.

$$F_{St} = H \times g \times m'_L \quad (32)$$

Donde:

- H : Altura total del transportador.
- g : Aceleración de gravedad.
- m'_L : Masa relativa a la longitud del material transportado.

- **F_s: Resistencias especiales**

Este tipo de resistencia generalmente sólo se da en correas transportadoras con propósitos especiales, como por ejemplo:

- Para transportadoras con posiciones inclinada del polín.
- Para transportadoras con chutes fuera de los puntos de alimentación.
- Para transportadoras con descargas laterales de material.

3.3.2.4 Control de la tensión

La tensión de la correa de un sistema transportador varía a lo largo de la trayectoria de la misma y se rige por los factores que se han descrito con anterioridad, adicionando ítems como el número y disposición de las poleas en el recorrido de la cinta, tipo y ubicación del dispositivo tensor, estado de la carga.

La determinación de las tensiones de la correa se inicia con un cálculo secuencial que comienza desde un punto específico de la correa, y se recalculan o modifican dichas tensiones con respecto al agarre por fricción en las poleas y la geometría del transportador a través de iteraciones.

- Tensión mínima requerida para la transición hacia la polea de las fuerzas periféricas

La transmisión de la fuerza periférica de la polea tanto en estados de funcionamiento continuo como de transición requiere una tensión mínima en la correa, para asegurar la correcta trayectoria de la cinta en el transportador, en el punto para que empiece a correr. Las fuerzas F_{T1} y F_{T2} están asociadas a la fuerza periférica máxima $F_{Tr,max} > 0$ que tiene las siguientes aplicaciones:

$$F_{T1} - F_{T2} = F_{Tr,max} \quad (33)$$

Donde:

- F_{T1} : Tensión que se acerca a la polea de mando.
- F_{T2} : Tensión que se aleja de la polea de mando.
- $F_{Tr,max}$: Tensión periférica máxima en la polea.

$$\frac{F_{T1}}{F_{T2}} \leq e^{\mu \cdot \alpha} \quad (34)$$

Donde:

- F_{T1} : Tensión que se acerca a la polea de mando.
- F_{T2} : Tensión que se aleja de la polea de mando.
- μ : Coeficiente de fricción entre la polea motriz y la cinta.
- α : Ángulo de abrace de la cinta sobre la polea motriz.

$$F_{T2} \geq \frac{1}{e^{\mu \cdot \alpha} - 1} \cdot F_{Tr,max} \quad (35)$$

Donde:

- F_{T2} : Tensión que se aleja de la polea de mando.
- μ : Coeficiente de fricción entre la polea motriz y la cinta.
- α : Ángulo de abrace de la cinta sobre la polea motriz.
- $F_{Tr,max}$: Tensión periférica máxima en la polea.

- Tensión mínima requerida para limitar el SAG del transportador

Para el propósito de optimizar la instalación del transportador, especialmente la eficiencia energética, se calcula la curva máxima relativa, flecha o *belt sag* (h_{rel}) en relación al espacio del polín transportador determinado en estado de operación continuo. Es permisible tener una flecha mayor y/o irregular en otras condiciones.

La tensión mínima requerida se detalla en la ecuación 36 para el lado superior del transportador y para el lado inferior se detalla en la ecuación 37.

El valor recomendado para la flecha de la correa transportadora en estado continuo de operación por la norma DIN en el recorrido superior es de un 1%.

$$F_{T,o,min} = \frac{g \cdot (m'_L + m'_G) \cdot l_{R,o}}{8 \cdot h_{rel}} \quad (36)$$

Donde:

- g : Aceleración de gravedad.
- m'_L : Masa relativa a la longitud del material transportado.
- m'_G : Masa relativa a la longitud de la correa transportadora.
- l_{R,o} : Separación entre polines de la cubierta superior.
- h_{rel} : Flecha.

Y para el recorrido de retorno sin carga, la ecuación 37 describe la tensión que debe existir en dicha sección.

$$F_{T,u,min} = \frac{g \cdot m'_G \cdot l_{R,u}}{8 \cdot h_{rel}} \quad (37)$$

Donde:

- g : Aceleración de gravedad.
- m'_G : Masa relativa a la longitud de la correa transportadora.
- l_{R,u} : Separación entre polines de la cubierta superior.
- h_{rel} : Flecha que se produce en la cinta.

4. Antecedentes de correas transportadoras en Codelco

Codelco cuenta con aproximadamente 210 kilómetros de correas transportadoras en operación, distribuidas en sus siete divisiones más la fundición y refinería de Ventanas. Además, la VP tiene proyectados por lo menos 46 kilómetros más que llegan a complementar sus operaciones. En este apartado se describen los equipos utilizados para el estudio del presente trabajo, detallando sus principales parámetros de diseño y la configuración dentro de los sistemas de manejo de materiales asociados. Además, se detalla los criterios de diseño con los cuales se delimita el desarrollo de correas transportadoras en la Vicepresidencia de Proyectos.

4.1 Proyecto Nuevo Sistema de Traspaso Andina

El Proyecto Nuevo Sistema de Traspaso Andina de División Andina (Figura 27) considera reemplazar el actual sistema de chancado primario Don Luis por una nueva estación de chancado primario emplazado en la plataforma denominada Nodo 3.500 y un nuevo sistema de transporte de mineral que alimentará la Planta Cordillera, para así mantener los niveles actuales de procesamiento de mineral. El proyecto considera 9 correas transportadoras instaladas en túneles con una extensión aproximada de 5 kms. La correa Haulague III de 4,2 km es la principal del sistema, la cual constará de una pendiente negativa por lo que generará 3.300 kW para la división. En la Tabla 4 se presentan las correas del proyecto y en la Figura 28 se ejemplifica el diagrama del sistema.



Figura 27: Como se verá el Proyecto Traspaso Andina [17].

Tabla 4: Correas del Proyecto Nuevo Sistema de Traspaso Andina.

Nombre	L [m]	H [m]	Q [t/h]	V [m/s]	BW [mm]	Tipo cinta	G. Motor [kW]
Colectora Chancado Secundario	23	6	2.482	3,20	1.219	EP 630/3	150
Chancado Sec. a Tolva Gruesos 1	92	7	2.482	3,20	1.219	EP 630/3	150
Chancado Sec. a Tolva Gruesos 2	113	1	2.482	3,20	1.219	EP 630/3	150
Alim. a Tolva 3600	22	2,5	4.220	3,70	1.524	EP 800/4	187
Traspaso a Tolva 3600	63	3	4.220	3,70	1.524	EP 800/4	298
By-Pass Sag	256	28	4.220	3,70	1.524	EP 1500/3	630
Alim. a Chancado Sec.	341	39	2.482	3,70	1.219	EP 1500/3	630
Correa de sacrificio	46	0	7.046	2,50	2.438	ST 3150	223
Correa regenerativa (Haulage III)	4.238	-363	7.046	6,00	1.829	ST 5000	5.000

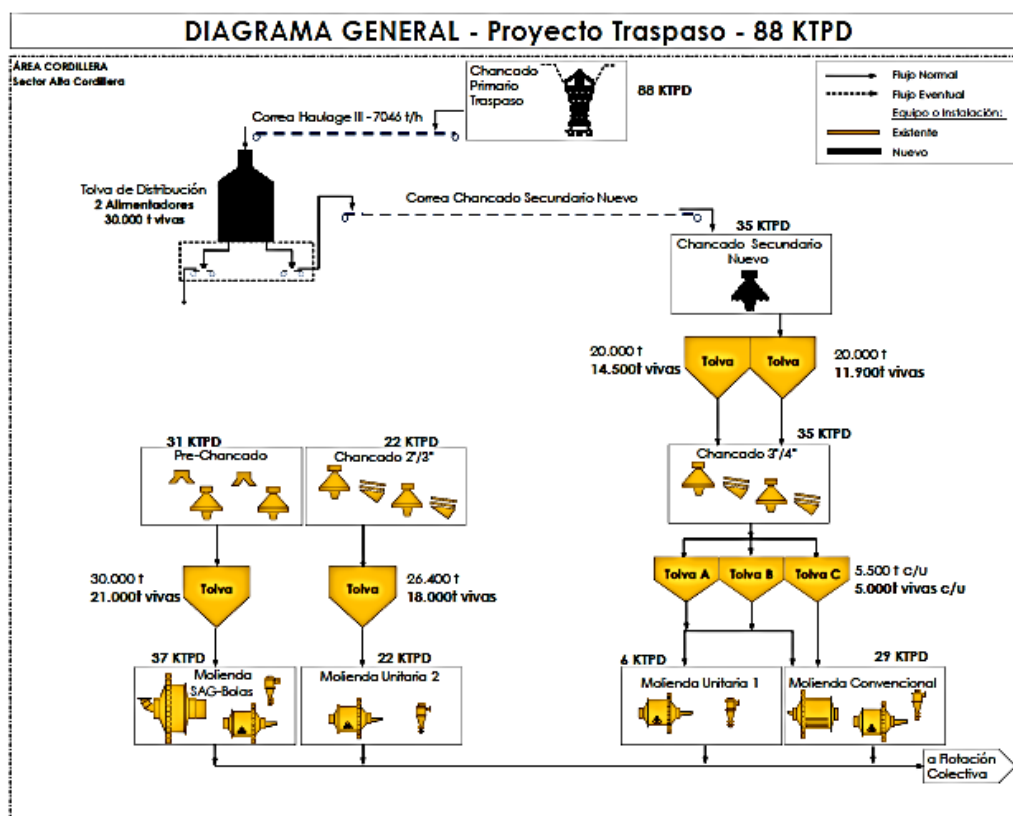


Figura 28: Diagrama de flujo del Proyecto Nuevo Sistema de Traspaso Andina [18].

4.2 Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS)

En el presente trabajo se analizarán equipos transportadores correspondientes al proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS), que transformará la centenaria mina a rajo abierto más grande del mundo en una mina subterránea, extendiendo en aproximadamente 40 años la vida de la División Chuquicamata. Para el proyecto se ha de diseñar, construir y montar aproximadamente 12,5 km de correas, siendo la Correa Principal C-01, Correa Principal C-02 y la Correa Overland OLC-01 referentes de este tipo de tecnología a nivel mundial por su complejidad. En la Tabla 5 se presentan las principales características de las correas transportadoras presentes en este proyecto y en las Figura 29 y 30 se ejemplifica la distribución del sistema de manejo de mineral asociado al proyecto.



Figura 29: Distribución geográfica del sistema de transporte de mineral PMCHS [19].

Tabla 5: Correas del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.

Nombre	L [m]	H [m]	Q [t/h]	V [m/s]	BW [mm]	Tipo cinta	G. Motor [kW]
Correa Colectora Norte	1.052	0	11.000	4,85	2.134	ST 1250	1.400
Correa Reversible	50	0	11.000	4,4	2.134	ST 400	250
Correa alimentadora 1 Norte	36	0	11.000	1,4	3.150	EP 2500	400
Correa alimentadora 1 Sur	36	0	11.000	1,4	3.150	EP 2500	400
Correa de nivel 1	840	-37	11.000	7	1.829	ST 2250	800
Correa de transferencia	53	0	11.000	3,8	2.388	EP 800	200
Correa de sacrificio N1 S1	44	0	2.500	1,7	1.829	EP 1000	75
Correa intermedia N1 S1	184	0	2.500	4,3	1.219	ST 500	150
Correa de sacrificio N2 S3	42	0	2.500	1,7	1.829	EP 1000	75
Correa intermedia N2 S3	277	0	2.500	4,3	711	ST 500	150
Correa alimentadora bajo silo 1	28	0	11.000	1,4	3.150	EP 2500	400
Correa alimentadora bajo silo 2	28	0	11.000	1,4	3.150	EP 2500	400
Correa alimentación Planta CV04	160	0	8.000	6	1.829	ST 500	450
Correa alimentación Pila mina	275	46	8.000	6	1.829	ST 1400	1.600
Correa Principal C-01	3.303	495	11.000	7	1.829	ST 10000	20.000
Correa Principal C-02	3.039	456	11.000	7	1.829	ST 10000	20.000
Correa Overland OLC-01	5.330	287	11.000	7	1.829	ST 6800	15.000

4.3 Planta Concentradora División Salvador

La planta concentradora de la División Salvador tiene alrededor de 57 años de vida operacional, incluyendo una expansión de 24.000 a 32.000 tpd en la década del 80. Su planta de conminución consta de 11 correas transportadoras, con una extensión de aproximadamente 2 km de transportadores de banda. Las correas principales son la CT-10 y la CT-30, la última con una TripperCar en su configuración. En la Tabla 6 se presentan las principales características de las correas transportadoras presentes en la división y en las Figuras 31 y 32 se tiene la distribución del sistema de correas.

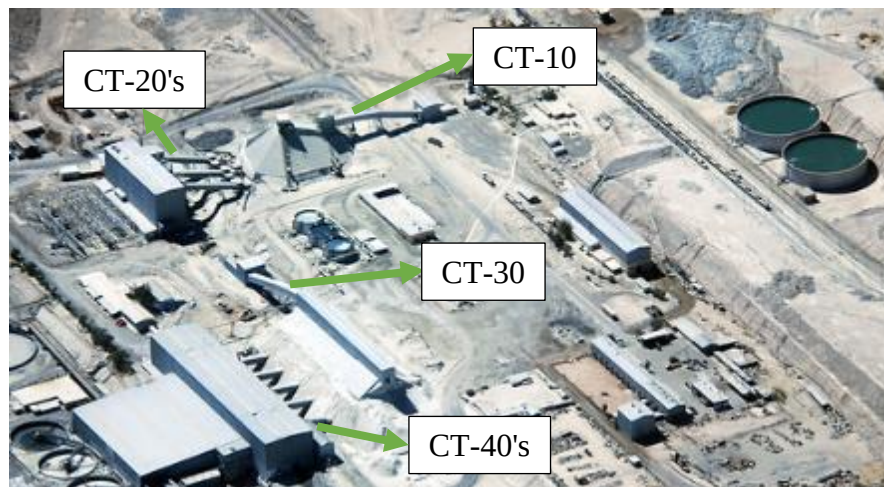


Figura 31: Planta concentradora División Salvador [27].

Tabla 6: Correos de la Planta Concentradora en División Salvador.

Nombre	L [m]	H [m]	Q [t/h]	V [m/s]	BW [mm]	Tipo cinta	G. Motor [kW]
CT-10	149	32	3.000	2,54	1.372	EP 1250/5	450
CT-11	25	5,5	3.000	2,5	1.372	EP 1250/5	75
CT-21 a CT-23	90	15	1.100	2,64	914	EP 1000/5	113
CT-30	271	33,8	3.000	3,5	1.524	EP 1250/5	375
CT-41 a CT-44	64	6,6	270	2	762	EP 800/3	15
CT-45	70	8	380	1,9	914	EP 800/3	30

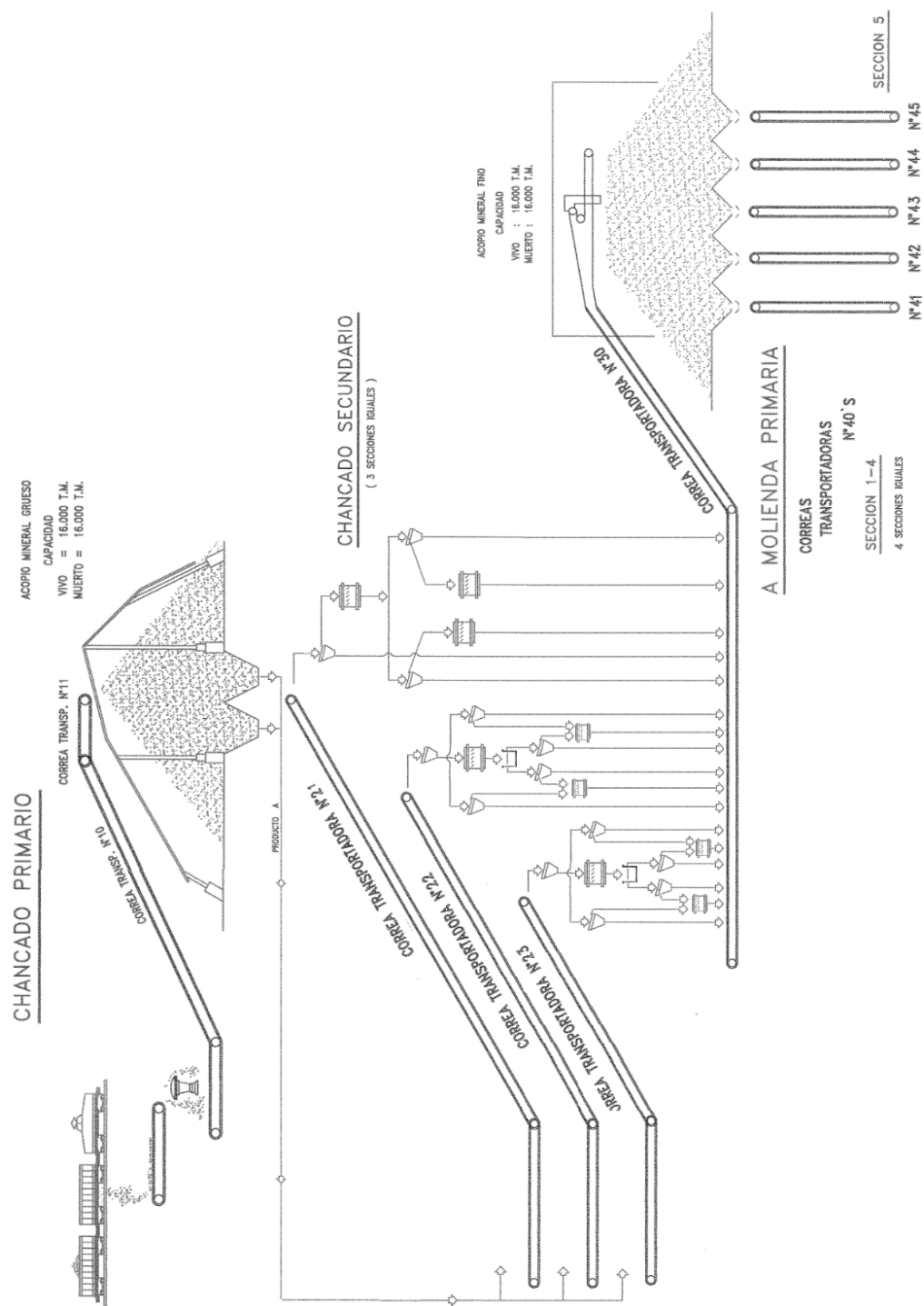


Figura 32: Diagrama de flujo de la Planta Conmiución División Salvador [21].

4.4 Área seca de División Ministro Hales

La División Ministro Hales (DMH) inició su construcción en septiembre del 2010. La división está compuesta por una mina a rajo abierto, una planta concentradora y un complejo de tostación. La inversión de este proyecto es de 3.083.000 USD, procesa diariamente 300.000 tpd de material y en 2018 aportó a la corporación 195.485 toneladas de cobre fino [22].

El sistema de manejo de material del área seca de DMH, está constituida por dos correas, la primera de ellas una correa de sacrificio bajo el chancador primario y la segunda una Overland que conecta la mina con un stockpile de gruesos que es parte de la planta concentradora (Figura 33). Los parámetros más importantes de sus correas se presentan en la Tabla 7 y su diagrama de flujo se presenta en la Figura 34.

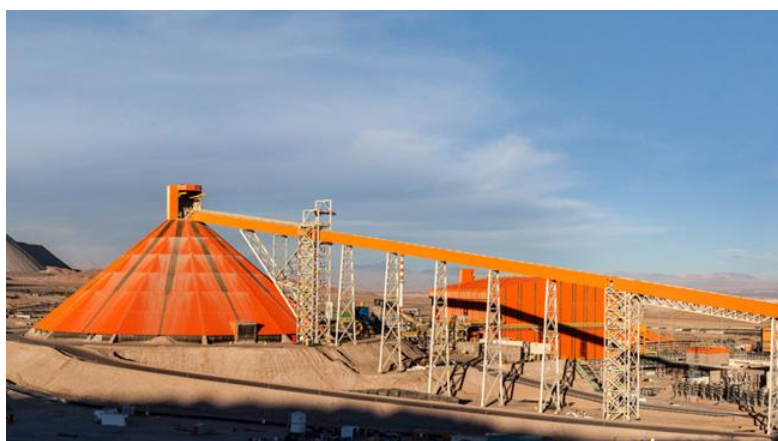


Figura 33: Sector descarga correa Overland [22].

Tabla 7: Correas del área seca en División Ministro Hales.

Nombre	L [m]	H [m]	Q [t/h]	V [m/s]	BW [mm]	Tipo cinta	G. Motor [kW]
Correa sacrificio	80	0	4.414	5,3	1.372	ST 1250	450
Overland 3115	2.881	142,7	4.414	5,3	1.372	ST 4500	3.600

4.5 Criterios de diseño en Codelco VP

En la Tabla 8 se presentan los principales criterios de diseño que guardan relación con el consumo energético de las correas que se utilizan en la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco para el cálculo de los equipos. Esta tabla es un extracto de la norma interna del sistema de gestión de proyectos de la VP [24].

Tabla 8: Criterios de diseño de la VP para correas transportadoras [24].

Parámetro	Criterio
Coeficiente f DIN	>0,02[-]
Inclinación del transportador	✓ Ascendentes: 15° máximo ✓ Descendentes: 8° máximo
Coeficiente de roce entre la cinta y el material	0,5[-]
Flecha o SAG	<u>Cubierta superior:</u> ✓ Cinta tipo ST: 1% ✓ Cinta tipo EP: 0,5%-2% <u>Cubierta inferior:</u> ✓ Todo tipo: 4%
Ángulo de abrace polea motriz	180°
Expectativa de vida en polines	60.000 [horas]
Espaciamiento entre polines	En la zona de transporte del material debe ser 1 [m] ó 1,2 [m].
Factor de seguridad de la cinta	✓ Cinta tipo EP: 10 [-] ✓ Cinta tipo ST: 6,7 [-]
Porcentaje de llenado máximo de la correa	✓ Correas en túneles: 65% ✓ Correas a la salida de Chancadores primarios: 70% ✓ Correas estándar: 80%

5. Desarrollo

En este apartado se detalla el proceso en que se desarrolló el trabajo para determinar los parámetros críticos de las correas transportadoras. Además, se detalla el programa Excel y las principales comparaciones que determinaron la criticidad de los parámetros.

5.1 Programa para el cálculo de correas

Para el análisis de las correas se desarrolló un programa en Excel que realiza el cálculo de un transportador a través de la guía CEMA en su séptima edición y la norma DIN 22101. Las ecuaciones utilizadas están descritas en el Marco teórico del presente trabajo, el esquema donde se presentan los resultados del programa se presenta en la Figura 35. El programa entrega resultados de potencia y tensiones para el modo de operación continua.

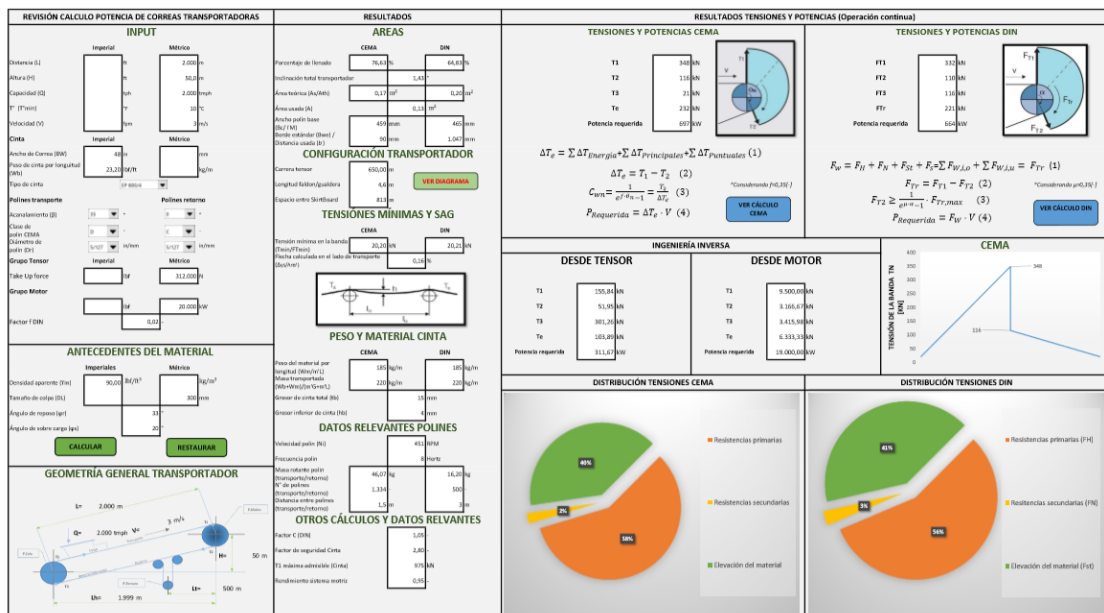


Figura 35: Esquema del programa Excel desarrollado.

A continuación se describe los aspectos más relevantes del programa. El programa se divide en tres secciones, en la primera columna se solicitan los requerimientos básicos a cubrir por una correa transportadora: distancia, altura, temperatura mínima, velocidad de la banda y tonelaje a transportar. Luego, el programa solicita información sobre los componentes principales del equipo: cinta, polines, grupo tensor y grupo motor, los dos últimos para hacer un cálculo de reingeniería y características del material. En las Figuras 36, 37 y 38 se muestran el ingreso de datos del programa y la geometría del transportador.

[illegible]

52

REVISIÓN CALCULO POTENCIA DE CORREAS TRANSPORTADORAS		RESULTADOS		RESULTADOS TENSIONES Y POTENCIAS CEMA		TENSIONES Y POTENCIAS DIN	
INPUT Distancia (L) [ft/m] 2.000 Altura (H) [ft/m] 30.00 Capacidad (Q) [t/h] 2.000 Velocidad (V) [ft/min] 100 Círculo Ancho de Correo (BWS) [in/mm] 48.00 Paso de cinta por longitud (P) [in/mm] 21.25 (6/16) Tipo de cinta Polines transporte Acanalamiento (g) Clase de polin CEMA Diámetro de polin in/mm Grupo Tensor Take Up force lbf/N Grupo Motor Factor f DIN 5.00		ÁREAS CEMA DN Porcentaje de llenado 75.00% 84.00% Instrucción total transportador 1.40" 3.50" Ancho de cinta (b) 62.5" 1.59" Ancho de (A) 62.5" 1.59" Ancho pulso base 48.00" 1.22" BWS (BWS) 50.00" 1.27" BWS estándar (BWS) / Distancia entre cintas (B) 50.00" 1.27" Correas tensor 635.00" 16.13" Longitud total/guidera 4.00" 101.60" Espacio entre cintas 80.00" 2.03" CONFIGURACIÓN TRANSPORTADOR Tensiones mínimas y sag Tensión mínima en la banda 25.23 kN 5.65 kN Fuerza calculada en el lado de transporte (Sag) 5.00" 127.00"		T1 330 kN 74.00 kN T2 330 kN 74.00 kN T3 330 kN 74.00 kN T4 330 kN 74.00 kN T5 330 kN 74.00 kN T6 330 kN 74.00 kN T7 330 kN 74.00 kN T8 330 kN 74.00 kN T9 330 kN 74.00 kN T10 330 kN 74.00 kN T11 330 kN 74.00 kN T12 330 kN 74.00 kN T13 330 kN 74.00 kN T14 330 kN 74.00 kN T15 330 kN 74.00 kN T16 330 kN 74.00 kN T17 330 kN 74.00 kN T18 330 kN 74.00 kN T19 330 kN 74.00 kN T20 330 kN 74.00 kN T21 330 kN 74.00 kN T22 330 kN 74.00 kN T23 330 kN 74.00 kN T24 330 kN 74.00 kN T25 330 kN 74.00 kN T26 330 kN 74.00 kN T27 330 kN 74.00 kN T28 330 kN 74.00 kN T29 330 kN 74.00 kN T30 330 kN 74.00 kN T31 330 kN 74.00 kN T32 330 kN 74.00 kN T33 330 kN 74.00 kN T34 330 kN 74.00 kN T35 330 kN 74.00 kN T36 330 kN 74.00 kN T37 330 kN 74.00 kN T38 330 kN 74.00 kN T39 330 kN 74.00 kN T40 330 kN 74.00 kN T41 330 kN 74.00 kN T42 330 kN 74.00 kN T43 330 kN 74.00 kN T44 330 kN 74.00 kN T45 330 kN 74.00 kN T46 330 kN 74.00 kN T47 330 kN 74.00 kN T48 330 kN 74.00 kN T49 330 kN 74.00 kN T50 330 kN 74.00 kN T51 330 kN 74.00 kN T52 330 kN 74.00 kN T53 330 kN 74.00 kN T54 330 kN 74.00 kN T55 330 kN 74.00 kN T56 330 kN 74.00 kN T57 330 kN 74.00 kN T58 330 kN 74.00 kN T59 330 kN 74.00 kN T60 330 kN 74.00 kN T61 330 kN 74.00 kN T62 330 kN 74.00 kN T63 330 kN 74.00 kN T64 330 kN 74.00 kN T65 330 kN 74.00 kN T66 330 kN 74.00 kN T67 330 kN 74.00 kN T68 330 kN 74.00 kN T69 330 kN 74.00 kN T70 330 kN 74.00 kN T71 330 kN 74.00 kN T72 330 kN 74.00 kN T73 330 kN 74.00 kN T74 330 kN 74.00 kN T75 330 kN 74.00 kN T76 330 kN 74.00 kN T77 330 kN 74.00 kN T78 330 kN 74.00 kN T79 330 kN 74.00 kN T80 330 kN 74.00 kN T81 330 kN 74.00 kN T82 330 kN 74.00 kN T83 330 kN 74.00 kN T84 330 kN 74.00 kN T85 330 kN 74.00 kN T86 330 kN 74.00 kN T87 330 kN 74.00 kN T88 330 kN 74.00 kN T89 330 kN 74.00 kN T90 330 kN 74.00 kN T91 330 kN 74.00 kN T92 330 kN 74.00 kN T93 330 kN 74.00 kN T94 330 kN 74.00 kN T95 330 kN 74.00 kN T96 330 kN 74.00 kN T97 330 kN 74.00 kN T98 330 kN 74.00 kN T99 330 kN 74.00 kN T100 330 kN 74.00 kN T101 330 kN 74.00 kN T102 330 kN 74.00 kN T103 330 kN 74.00 kN T104 330 kN 74.00 kN T105 330 kN 74.00 kN T106 330 kN 74.00 kN T107 330 kN 74.00 kN T108 330 kN 74.00 kN T109 330 kN 74.00 kN T110 330 kN 74.00 kN T111 330 kN 74.00 kN T112 330 kN 74.00 kN T113 330 kN 74.00 kN T114 330 kN 74.00 kN T115 330 kN 74.00 kN T116 330 kN 74.00 kN T117 330 kN 74.00 kN T118 330 kN 74.00 kN T119 330 kN 74.00 kN T120 330 kN 74.00 kN T121 330 kN 74.00 kN T122 330 kN 74.00 kN T123 330 kN 74.00 kN T124 330 kN 74.00 kN T125 330 kN 74.00 kN T126 330 kN 74.00 kN T127 330 kN 74.00 kN T128 330 kN 74.00 kN T129 330 kN 74.00 kN T130 330 kN 74.00 kN T131 330 kN 74.00 kN T132 330 kN 74.00 kN T133 330 kN 74.00 kN T134 330 kN 74.00 kN T135 330 kN 74.00 kN T136 330 kN 74.00 kN T137 330 kN 74.00 kN T138 330 kN 74.00 kN T139 330 kN 74.00 kN T140 330 kN 74.00 kN T141 330 kN 74.00 kN T142 330 kN 74.00 kN T143 330 kN 74.00 kN T144 330 kN 74.00 kN T145 330 kN 74.00 kN T146 330 kN 74.00 kN T147 330 kN 74.00 kN T148 330 kN 74.00 kN T149 330 kN 74.00 kN T150 330 kN 74.00 kN T151 330 kN 74.00 kN T152 330 kN 74.00 kN T153 330 kN 74.00 kN T154 330 kN 74.00 kN T155 330 kN 74.00 kN T156 330 kN 74.00 kN T157 330 kN 74.00 kN T158 330 kN 74.00 kN T159 330 kN 74.00 kN T160 330 kN 74.00 kN T161 330 kN 74.00 kN T162 330 kN 74.00 kN T163 330 kN 74.00 kN T164 330 kN 74.00 kN T165 330 kN 74.00 kN T166 330 kN 74.00 kN T167 330 kN 74.00 kN T168 330 kN 74.00 kN T169 330 kN 74.00 kN T170 330 kN 74.00 kN T171 330 kN 74.00 kN T172 330 kN 74.00 kN T173 330 kN 74.00 kN T174 330 kN 74.00 kN T175 330 kN 74.00 kN T176 330 kN 74.00 kN T177 330 kN 74.00 kN T178 330 kN 74.00 kN T179 330 kN 74.00 kN T180 330 kN 74.00 kN T181 330 kN 74.00 kN T182 330 kN 74.00 kN T183 330 kN 74.00 kN T184 330 kN 74.00 kN T185 330 kN 74.00 kN T186 330 kN 74.00 kN T187 330 kN 74.00 kN T188 330 kN 74.00 kN T189 330 kN 74.00 kN T190 330 kN 74.00 kN T191 330 kN 74.00 kN T192 330 kN 74.00 kN T193 330 kN 74.00 kN T194 330 kN 74.00 kN T195 330 kN 74.00 kN T196 330 kN 74.00 kN T197 330 kN 74.00 kN T198 330 kN 74.00 kN T199 330 kN 74.00 kN T200 330 kN 74.00 kN T201 330 kN 74.00 kN T202 330 kN 74.00 kN T203 330 kN 74.00 kN T204 330 kN 74.00 kN T205 330 kN 74.00 kN T206 330 kN 74.00 kN T207 330 kN 74.00 kN T208 330 kN 74.00 kN T209 330 kN 74.00 kN T210 330 kN 74.00 kN T211 330 kN 74.00 kN T212 330 kN 74.00 kN T213 330 kN 74.00 kN T214 330 kN 74.00 kN T215 330 kN 74.00 kN T216 330 kN 74.00 kN T217 330 kN 74.00 kN T218 330 kN 74.00 kN T219 330 kN 74.00 kN T220 330 kN 74.00 kN T221 330 kN 74.00 kN T222 330 kN 74.00 kN T223 330 kN 74.00 kN T224 330 kN 74.00 kN T225 330 kN 74.00 kN T226 330 kN 74.00 kN T227 330 kN 74.00 kN T228 330 kN 74.00 kN T229 330 kN 74.00 kN T230 330 kN 74.00 kN T231 330 kN 74.00 kN T232 330 kN 74.00 kN T233 330 kN 74.00 kN T234 330 kN 74.00 kN T235 330 kN 74.00 kN T236 330 kN 74.00 kN T237 330 kN 74.00 kN T238 330 kN 74.00 kN T239 330 kN 74.00 kN T240 330 kN 74.00 kN T241 330 kN 74.00 kN T242 330 kN 74.00 kN T243 330 kN 74.00 kN T244 330 kN 74.00 kN T245 330 kN 74.00 kN T246 330 kN 74.00 kN T247 330 kN 74.00 kN T248 330 kN 74.00 kN T249 330 kN 74.00 kN T250 330 kN 74.00 kN T251 330 kN 74.00 kN T252 330 kN 74.00 kN T253 330 kN 74.00 kN T254 330 kN 74.00 kN T255 330 kN 74.00 kN T256 330 kN 74.00 kN T257 330 kN 74.00 kN T258 330 kN 74.00 kN T259 330 kN 74.00 kN T260 330 kN 74.00 kN T261 330 kN 74.00 kN T262 330 kN 74.00 kN T263 330 kN 74.00 kN T264 330 kN 74.00 kN T265 330 kN 74.00 kN T266 330 kN 74.00 kN T267 330 kN 74.00 kN T268 330 kN 74.00 kN T269 330 kN 74.00 kN T270 330 kN 74.00 kN T271 330 kN 74.00 kN T272 330 kN 74.00 kN T273 330 kN 74.00 kN T274 330 kN 74.00 kN T275 330 kN 74.00 kN T276 330 kN 74.00 kN T277 330 kN 74.00 kN T278 330 kN 74.00 kN T279 330 kN 74.00 kN T280 330 kN 74.00 kN T281 330 kN 74.00 kN T282 330 kN 74.00 kN T283 330 kN 74.00 kN T284 330 kN 74.00 kN T285 330 kN 74.00 kN T286 330 kN 74.00 kN T287 330 kN 74.00 kN T288 330 kN 74.00 kN T289 330 kN 74.00 kN T290 330 kN 74.00 kN T291 330 kN 74.00 kN T292 330 kN 74.00 kN T293 330 kN 74.00 kN T294 330 kN 74.00 kN T295 330 kN 74.00 kN T296 330 kN 74.00 kN T297 330 kN 74.00 kN T298 330 kN 74.00 kN T299 330 kN 74.00 kN T300 330 kN 74.00 kN T301 330 kN 74.00 kN T302 330 kN 74.00 kN T303 330 kN 74.00 kN T304 330 kN 74.00 kN T305 330 kN 74.00 kN T306 330 kN 74.00 kN T307 330 kN 74.00 kN T308 330 kN 74.00 kN T309 330 kN 74.00 kN T310 330 kN 74.00 kN T311 330 kN 74.00 kN T312 330 kN 74.00 kN T313 330 kN 74.00 kN T314 330 kN 74.00 kN T315 330 kN 74.00 kN T316 330 kN 74.00 kN T317 330 kN 74.00 kN T318 330 kN 74.00 kN T319 330 kN 74.00 kN T320 330 kN 74.00 kN T321 330 kN 74.00 kN T322 330 kN 74.00 kN T323 330 kN 74.00 kN T324 330 kN 74.00 kN T325 330 kN 74.00 kN T326 330 kN 74.00 kN T327 330 kN 74.00 kN T328 330 kN 74.00 kN T329 330 kN 74.00 kN T330 330 kN 74.00 kN T331 330 kN 74.00 kN T332 330 kN 74.00 kN T333 330 kN 74.00 kN T334 330 kN 74.00 kN T335 330 kN 74.00 kN T336 330 kN 74.00 kN T337 330 kN 74.00 kN T338 330 kN 74.00 kN 			

En la Figura 39 se muestra los resultados para el transportador, parámetros respecto al área transversal de la correa y dimensiones que son relevantes para manejar el transportador. También se calculan dimensiones de la configuración del transportador como el largo de las gualderas, la carrera del tensor, el espacio entre las gualderas que ocupa el material (en la zona de carga de este), se presentan los cálculos del SAG y tensiones mínimas de las correas y otros datos relevantes que influyen en el transportador.

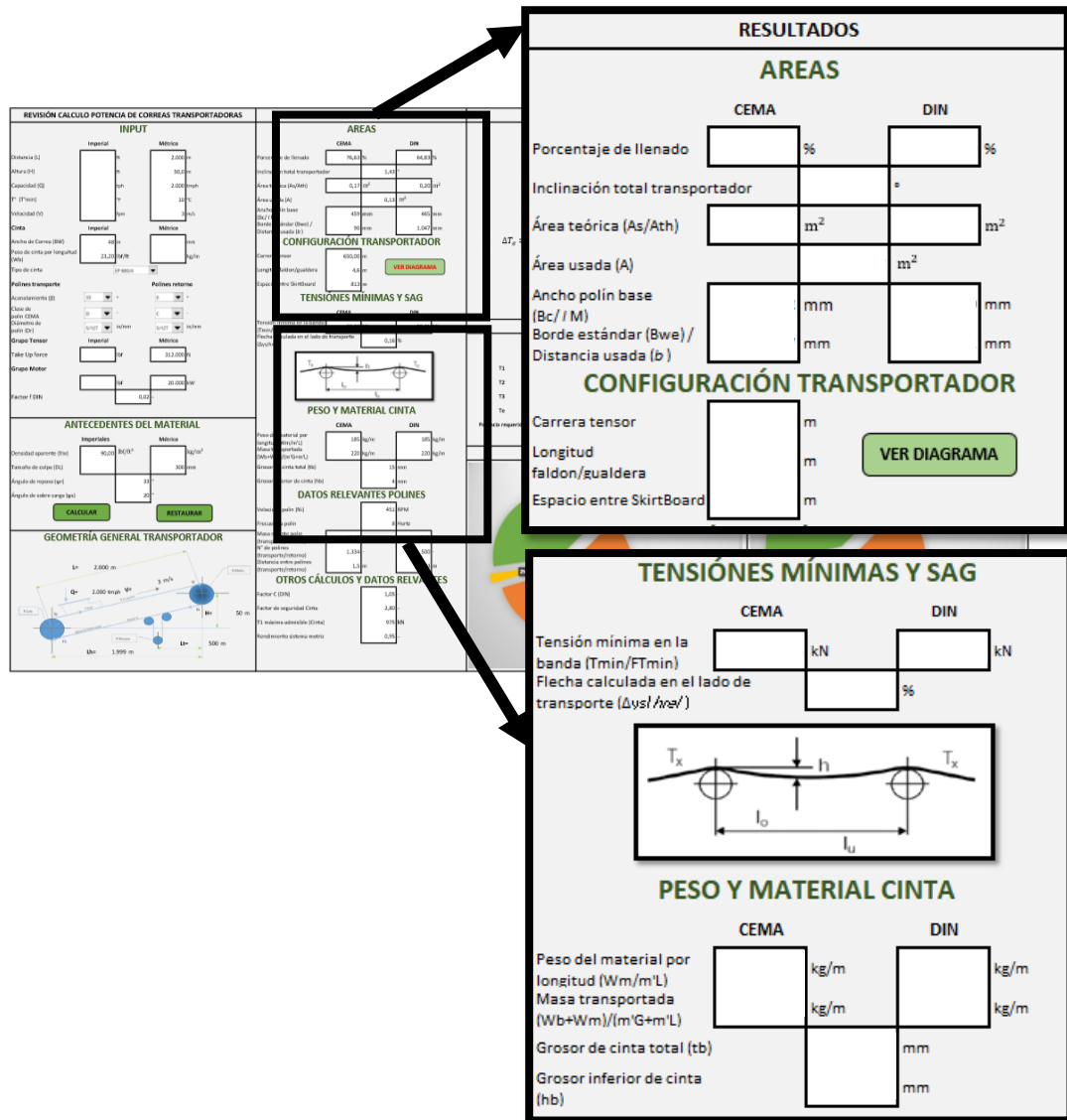


Figura 39: Ejemplo de los resultados del programa.

En la tercera columna se presentan los resultados de tensiones y potencias, según ambos métodos. En la Figura 40 se ejemplifica el método CEMA junto a las principales ecuaciones que gobiernan este cálculo. En la Figura 41 se presentan los resultados para la norma DIN.

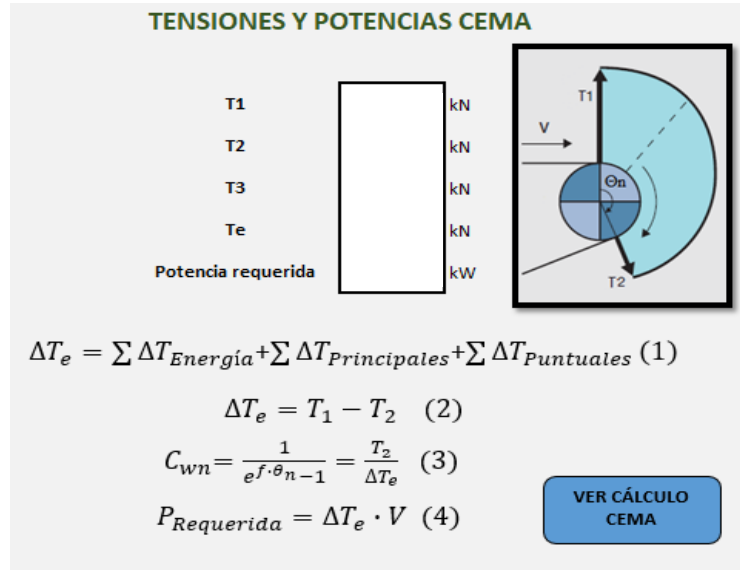


Figura 40: Resultados de las tensiones y potencia según método CEMA.

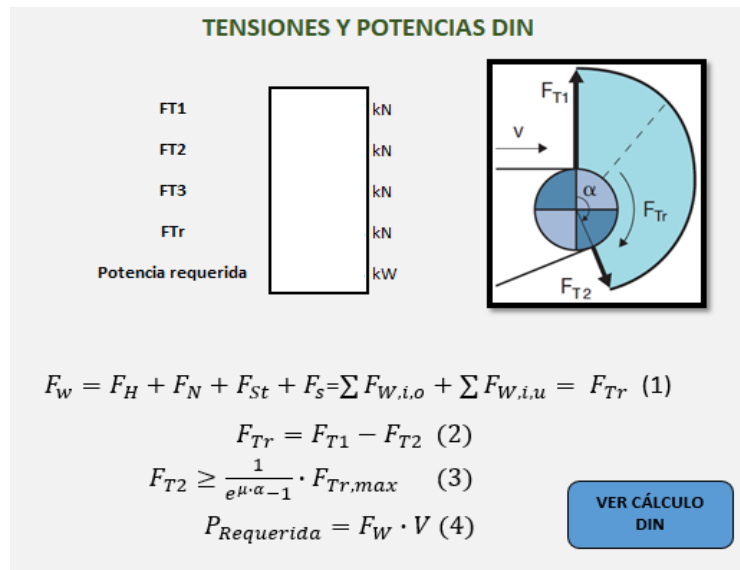


Figura 41: Resultados de las tensiones y potencia según norma DIN.

La Tabla 9 presenta la distribución de tensiones para ambos métodos.

Tabla 9: Nomenclatura para la comparación de las fuentes de resistencia [25].

Variable	DIN 22101	CEMA 7ma edición
Resistencias primarias	F_H	$\Delta T_{iW}, \Delta T_{is}, \Delta T_{bi}, \Delta T_{mz}, \Delta T_{im}.$
Resistencias secundarias	F_N	$\Delta T_{ss}, \Delta T_s, \Delta T_{punt}.$
Elevación del material	F_{st}	$\Delta T_H, \Delta T_{am}.$

5.2 Ejemplo aplicado a correas en específico

A continuación, se presentan dos ejemplos de correas transportadoras que se recalcularon con el programa desarrollado en este trabajo de título, y se compara con su respectiva memoria de cálculo.

5.2.1 Correa alimentación a tolva 3600 del Proyecto Traspaso Andina

En la Figura 42 se muestra el perfil del transportador y su configuración rescatada desde la memoria de cálculo del transportador [26].



Figura 42: Extracto memoria de cálculo correa alimentación tolva 3600 [26].

En la Tabla 10 se presenta los parámetros que se ingresan al programa y que se obtuvieron de la memoria de cálculo del transportador.

Tabla 10: Parámetros de entrada de la correa alimentación a tolva 3600.

General		
Parámetro	Valor	Unidad
Distancia	21,9	m
Altura	2,5	m
Capacidad	4.220	tmph
T° mínima	10	°C
Velocidad	3,7	m/s
Cinta		
Ancho	1.524	mm
Peso lineal	54,7	kg/m
Tipo de cinta	EP 800/4	-
Polines cubierta superior		
Acanalamiento	45	°
Clase de polín CEMA	E	-
Diámetro de polín	152	mm
Polines cubierta inferior		
Acanalamiento	10	°
Clase de polín CEMA	D	-
Diámetro de polín	152	mm

En la Tabla 11 se comparan los resultados del programa desarrollado con lo detallado en la memoria de cálculo.

Tabla 11: Resultados del programa para la correa alimentación a tolva 3600 (operación continua).

Resultados			
Parámetro	Memoria de Cálculo	Método CEMA	Método DIN
T₁ [kN]	61	51	53
T₂ [kN]	40	30	30
T_e [kN]	20	21	22
Potencia requerida [kW]	75	76	79
Error absoluto		1%	5%

El presente ejemplo, es un reflejo de lo que ocurre con los transportadores cortos ($L < 100$ metros). El cálculo con el método CEMA es más ajustado a lo declarado en la memoria de cálculo asociada del transportador, mientras que el valor de la potencia calculado con el método DIN es más elevado. Aunque el error absoluto entre el método DIN y lo declarado en la memoria de cálculo es bajo.

Si bien la T_1 y la T_2 que calcula el programa por ambos métodos son de menor valor que lo declarado en la memoria de cálculo, el factor determinante del dimensionamiento del motor y por ende el requerimiento energético de la correa en operación es el factor T_e , el valor calculado por el programa para ambos métodos es bastante cercano a lo declarado por la memoria de cálculo asociada al transportador.

El esquema que representa el cálculo de este transportador se observa en el Anexo B del presente documento.

5.2.2 Correa Colectora Norte PMCHS

En la Figura 43, se muestra un esquema a modo de ejemplo del perfil del transportador. La correa transportadora en este caso tiene un tensor manual en la polea de cola según lo indicado por la memoria de cálculo asociada.

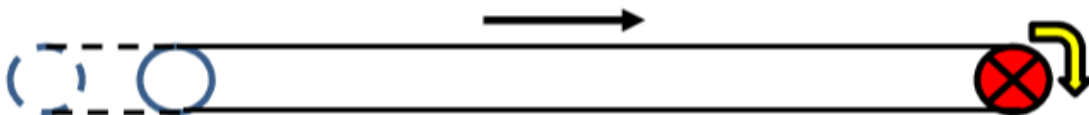


Figura 43: Esquema configuración correa Colectora Norte [27].

En la Tabla 12, se presenta los parámetros que se ingresan al programa y que se obtuvieron de la memoria de cálculo de transportador [26].

Tabla 12: Parámetros de entrada de correa Colectora Norte.

General		
Parámetro	Valor	Unidad
Distancia	1.052	m
Altura	0	m
Capacidad	11.000	tmph
T° mínima	10	°C
Velocidad	4,85	m/s
Cinta		
Ancho	2.133	mm
Peso lineal	75	kg/m
Tipo de cinta	ST 1250	-
Polines cubierta superior		
Acanalamiento	35	°
Clase de polín CEMA	F	-
Diámetro de polín	178	mm
Polines cubierta inferior		
Acanalamiento	10	°
Clase de polín CEMA	E	-
Diámetro de polín	178	mm

En la Tabla 13 se comparan los resultados del programa desarrollado con lo detallado en la memoria de cálculo.

Tabla 13: Resultados programa correa Colectora Norte.

Resultados			
Parámetro	Memoria de Cálculo	Método CEMA	Método DIN
T₁ [kN]	271	264	248
T₂ [kN]	110	88	83
T_e [kN]	161	176	166
Potencia requerida [kW]	781	856	804
Error absoluto		9,5%	2,9%

Al contrario de lo observado en el ejemplo anterior, en el caso de las correas largas ($L > 1.000$ metros) el cálculo del método DIN es más ajustado a lo declarado por la memoria de cálculo asociado al transportador. El esquema que representa el cálculo de este transportador se entrega en el Anexo C del presente documento.

6. Análisis y resultados

A continuación se presentan los principales resultados del presente trabajo junto al respectivo análisis de los aspectos más importantes. En primer lugar, la Tabla 14 define los parámetros críticos de diseño de las correas transportadoras.

Tabla 14: Parámetros críticos de diseño de correas transportadoras.

Parámetro	Descripción	Unidad
V/v	Velocidad de la banda.	m/s
$Q/m'L$	Cantidad de material a granel transportado según los requisitos del diseño.	mtph
L	Distancia a cubrir.	m
H	Elevación total de la correa transportadora.	m
T°	Temperatura mínima de operación.	$^{\circ}C$
Densidad aparente	Densidad aparente del material a granel transportado.	kg/m^3
φ_r	Ángulo de reposo del material a granel transportado.	grados
φ_s	Ángulo de sobre carga del material a granel transportado.	grados
BW/B	Ancho de banda estándar.	mm
Tipo de cinta	Material de la carcasa de la cinta	-
$Wb/m'G$	Peso lineal de la cinta	kg/m
β/λ	Ángulo de acanalamiento de polines laterales.	grados
Clase polín según CEMA	Denominación de polín según la guía CEMA	-
D_r/d_1	Diámetro del polín.	mm
S_i/l_i	Espaciamiento de rodillos de transporte.	m
Coeficiente f	Coeficiente de fricción según DIN.	-

La Tabla 14 se define a partir de distintos análisis realizados, tanto en el desarrollo del programa detallado con anterioridad que corresponden principalmente al modelo matemático asociado a la guía CEMA en su séptima edición y la norma DIN 22101. Además del estudio de las 25 memorias de cálculo de las correas transportadoras de los proyectos Chuquicamata Subterráneo y Nuevo Sistema de Traspaso Andina, también se realizó el análisis en base a datos recogidos desde catálogos de proveedores de componentes de correas transportadoras.

Se define como parámetro crítico de diseño como aquellos que son indispensables para desarrollar el cálculo del requerimiento energético de la correa transportadora, los cuales se debe tener un mayor cuidado a la hora de su selección.

6.1 Comparación en base a parámetros críticos de diseño

A continuación, se detallan los análisis y comparaciones más relevantes en base a los parámetros críticos detallados con anterioridad. Estos análisis ayudan a estimar tempranamente valores de parámetros críticos y se indican buenas prácticas que se han recogido del trabajo desarrollado.

6.1.1 Área de diseño

Se realiza la comparación según los anchos estándar de banda de cada uno de los métodos y se obtiene el gráfico representado en la Figura 44.

Las áreas de diseño se definen en el marco teórico del presente trabajo en la Figura 21 para el método CEMA y en la Figura 26 para el método DIN. Ambos métodos estiman el área transversal como un trapecio más, en el caso de la norma DIN un triángulo cuyo ángulo de base es el de sobre carga del material, mientras que la guía CEMA supone un sector de circunferencia cuyo ángulo tangencial es el de sobre carga del material.

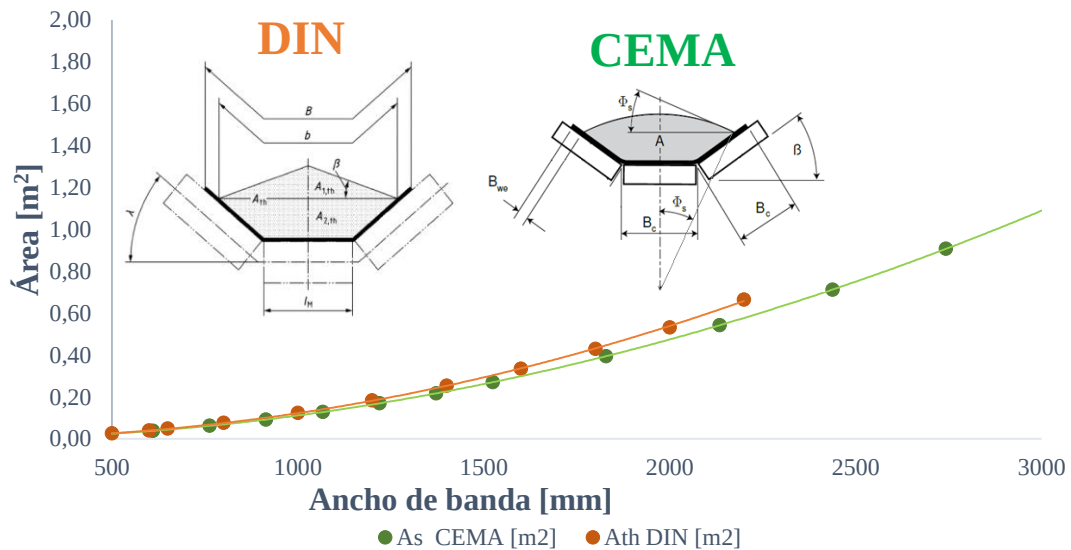


Figura 44: Comparación área de diseño según método CEMA y norma DIN para ángulo de sobrecarga de 25°.

Se observa que la curva del método DIN es ligeramente mayor a la curva del método CEMA. El área de diseño se calcula en base a la geometría del método y principalmente el ancho de banda del transportador. El porcentaje de llenado que compara el área que ocupa el material en la correa con el área de diseño, limita la cantidad de material que se puede transportar, por ende hay que tener especial cuidado en la selección del ancho de banda (BW) y capacidad (Q) en etapas tempranas del diseño.

Además, debido a las diferencias observadas en la Figura 44 el porcentaje de llenado de la correa varía entre ambos métodos y una de las condiciones de borde que normalmente tienen los diseños de correas es este parámetro. Una buena práctica en el diseño de estos equipos es estandarizar con uno de los dos métodos el cálculo del área de diseño.

6.1.2 Peso de la cinta

En este apartado, se presentan los resultados de la comparación entre las masas relacionadas al área de las cintas de las correas, se compara el peso de estas por metro cuadrado de cinta.

En primer lugar, se tiene en la Figura 45 el gráfico para varas cintas de tipo ST o con cables de acero.

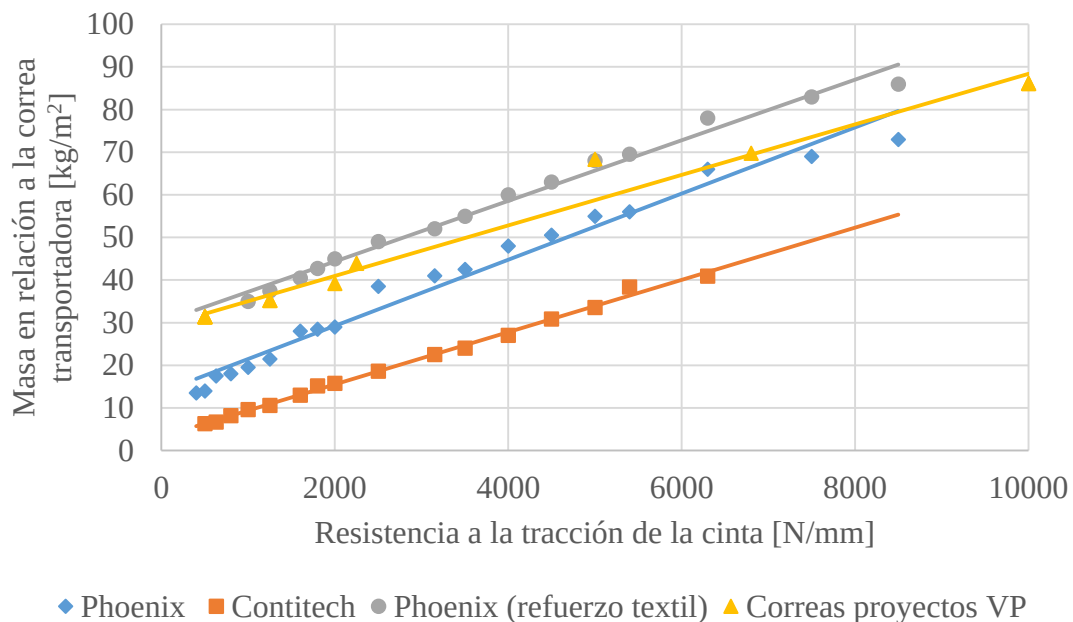


Figura 45: Comparación respecto al peso de la cinta en correas tipo ST.

Se aprecia que las correas que están en proyecto, vale decir PMCHS y Traspaso Andina, son similares a las con cable de acero de Phoenix [28]. Por lo tanto, en etapas tempranas del diseño se podría tomar como referencia estos valores, debido a que ambos métodos de cálculo solicitan como valor de entrada el peso de la correa.

Para el caso de las correas de tela tipo EP, se presenta su comparación en la Figura 46, donde se compara el peso por área de las memorias de cálculo de las correas de PMCHS y Traspaso Andina (Correas proyectos VP) y los proveedores de correas de este tipo Phoenix [28], Goodyear [29] y Contitech [30].

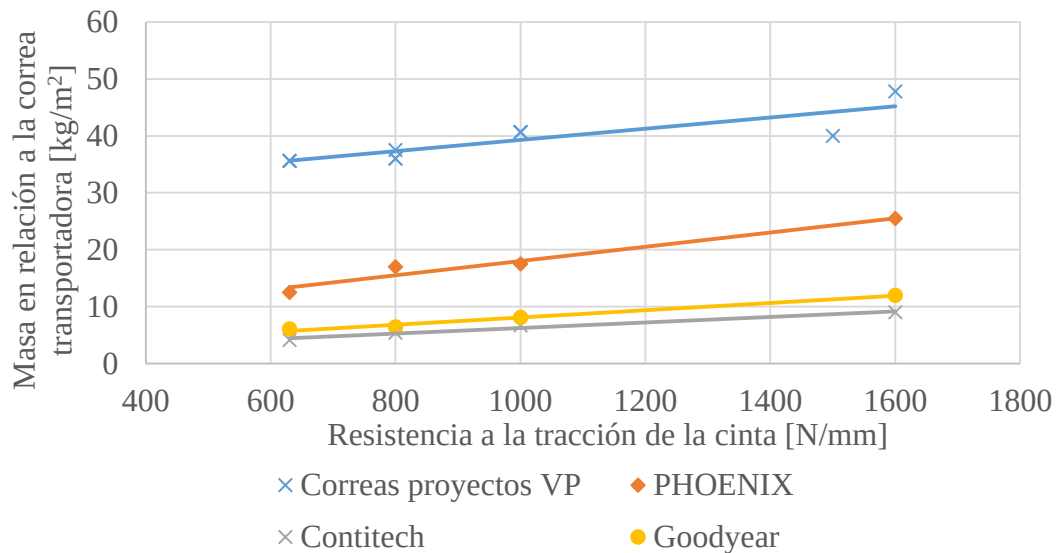


Figura 46: Comparación respecto al peso de la cinta en correas tipo EP.

A diferencia de lo ocurrido en el caso anterior, las correas de Codelco que utilizan cintas de tela son considerablemente más pesadas que las cintas de catálogo de los proveedores consultados, vale decir que estas cintas son a pedido y son elaboradas para las necesidades de los proyectos.

Cabe mencionar que las correas de los proyectos mencionados están en su totalidad albergadas en túneles mineros, debido a las dificultades que implica un cambio de cinta en estas condiciones las cintas tienden a ser más gruesas y por ende más pesadas. Esto constituye un ejemplo de buena práctica para el diseño de estos equipos, entender el contexto en que va a operar la correa y tener en consideración la mantenibilidad de la misma.

6.1.3 Tipo de polines, ancho de cinta y peso del juego de polines

En este apartado se presentan gráficos de cada tipo de polín CEMA en relación a su diámetro, ancho de cinta y peso del juego de polines para las clases CEMA C y D se presentan los gráficos presentes en las Figuras 47 y 48 respectivamente. Los datos son recogidos del catálogo de polines del proveedor Lordbrand [12].

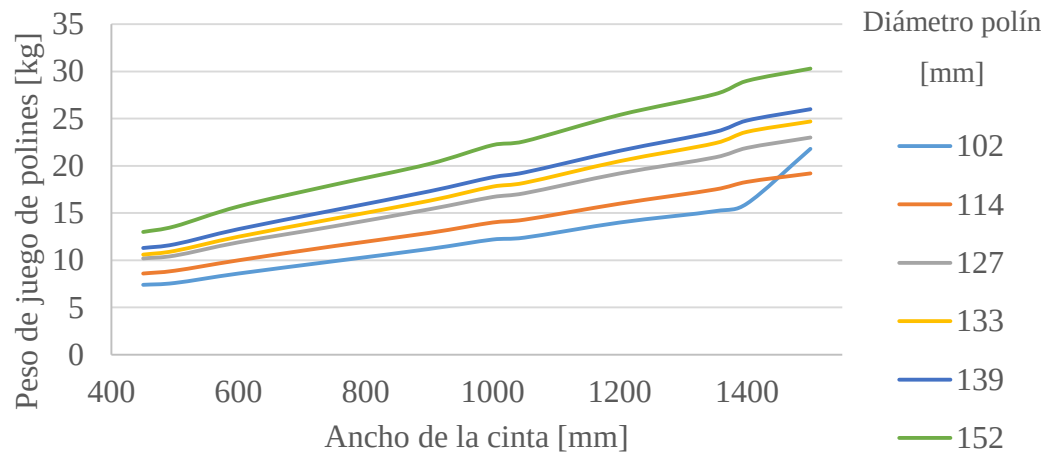


Figura 47: Gráfico polines CEMA C.

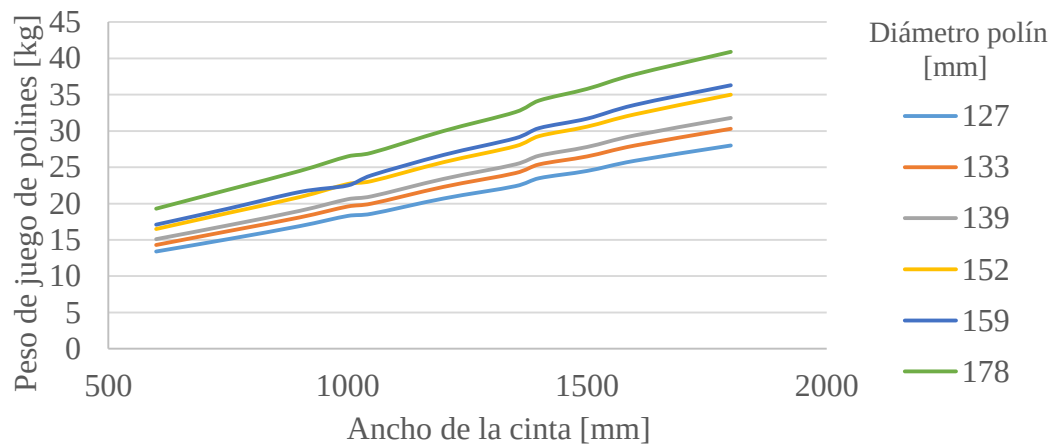


Figura 48: Gráfico polines CEMA D.

Estos gráficos son una buena referencia para ver cómo se comportan el peso de los distintos juegos de polines en función del ancho de la banda, considerando que a más peso del juego de polines, mayor es la potencia que se necesita.

6.2 Parámetros críticos de operación

En operación los equipos están sometidos a distintas condiciones que podrían afectar su funcionamiento, para este trabajo en particular, se analizaron los datos operacionales de la correa Overland de la división Ministro Hales, los cuales fueron recogidos desde el centro integrado de operación (CIO) de la mina ubicado en Santiago de Chile [31]. Los datos que monitorean estos equipos y que se detallan en los informes operacionales corresponden a la velocidad del transportador (V), capacidad (Q) y potencia requerida (P).

En la Figura 49, se observa como varía la potencia del transportador en operación, en comparación con el tonelaje que está transportando la correa.

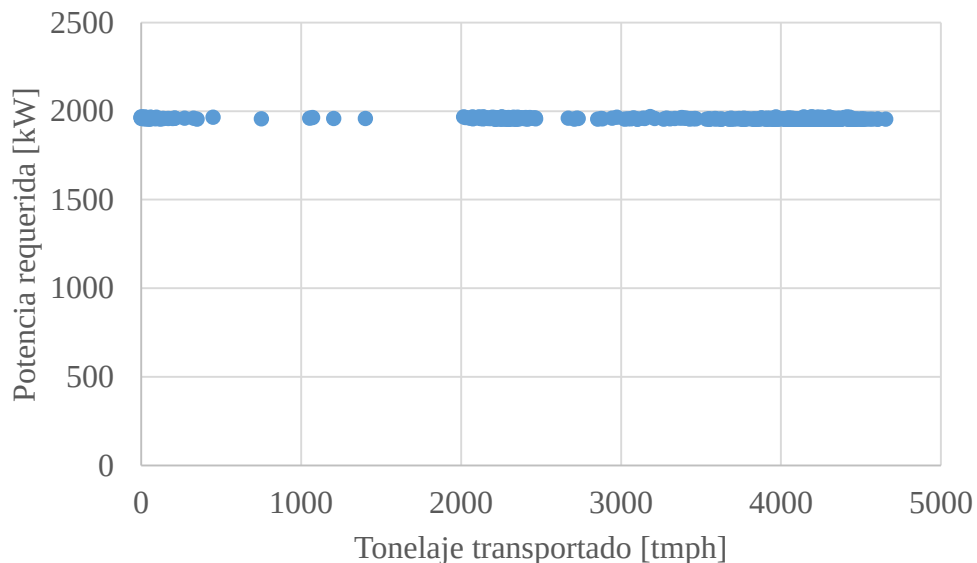


Figura 49: Potencia en función del tonelaje transportado de la correa Overland de DMH.

La velocidad del transportador en la correa se mantiene constante en su magnitud nominal, descrita en la memoria de cálculo del transportador, que corresponde a 5 m/s.

Además en la Tabla 15, se tiene un extracto de la memoria de cálculo donde se detalla la solicitud de potencia cuando la correa está vacía (Empty - Normal Frict.) y cuando está normalmente cargada (Full - Normal Frict.).

Tabla 15: Extracto memoria de cálculo correa Overland DMH [23].

Caso	Potencia demandada [kW]	Porcentaje de solicitud del motor [%]
Correa vacía	754	21
Correa cargada	3.085	86

Según lo observado en este equipo es que aunque el tonelaje transportado sea nulo en la correa, la solicitud de energía en el transportador se mantiene constante, cuestión que se contradice respecto a la memoria de cálculo del transportador, donde se indica que la solicitud de energía debería ser de un 21% de su potencia instalada. A su vez, la memoria de cálculo indica que en operación normal, considerando la correa cargada nominalmente el requerimiento de energía es de 86%, mientras que los datos operacionales muestran que el requerimiento de energía se mantiene constante en 50% con un promedio de 1.815 kW.

Como caracterización de parámetros críticos operacionales, el caso analizado no es concluyente, debido a que se tuvo acceso a información de un solo transportador.

6.3 Comparación resultados programa versus memorias de cálculo

En la Figura 50, se compara la potencia instalada de los transportadores con los resultados del programa para el cálculo de la potencia que se desarrolló en el presente trabajo para el caso con el método de cálculo CEMA y en la Figura 51 se presenta para el caso con el método de cálculo DIN. Para estos casos se considera el cálculo con el programa como el de potencia instalada asociada a la correa.

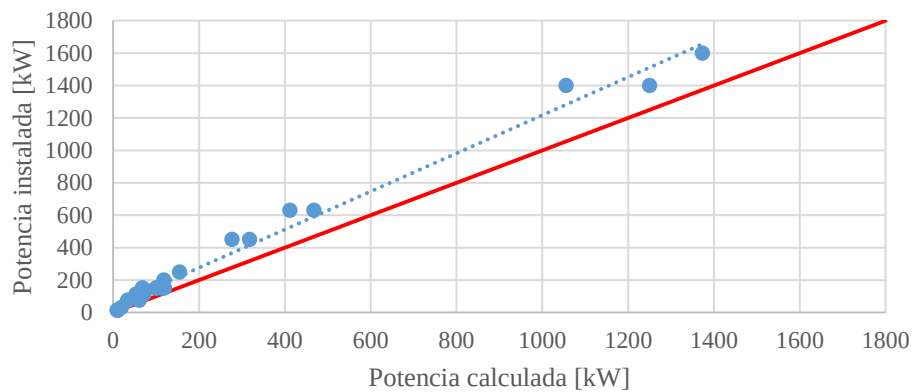


Figura 50: Gráfico comparación programa versus potencia instalada de las correas para método CEMA.

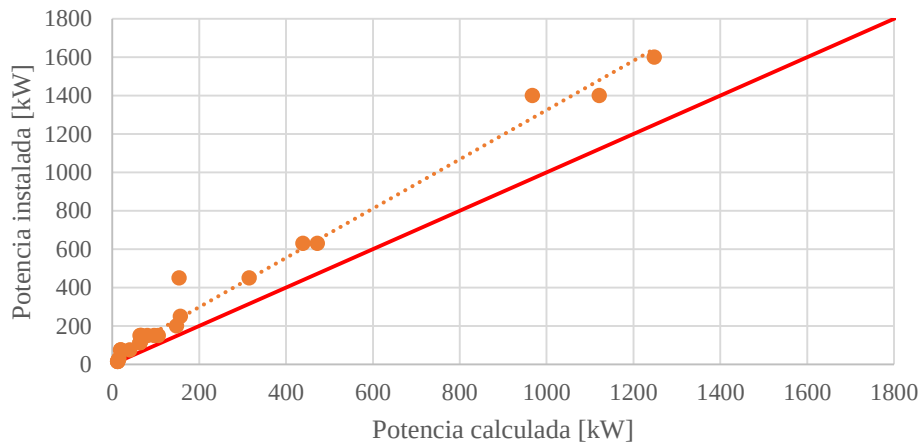


Figura 51: Gráfico comparación programa versus potencia instalada de las correas para método DIN.

Para ambos casos, se observa que ningún transportador que se recalcule con el programa desarrollado queda por debajo de la línea roja, que representa la bisectriz del cuadrante, esto es debido a que la potencia instalada que se presenta en las memorias de cálculo correspondientes a las correas, está asociada a la disponibilidades de motores que se encuentra en el mercado. Por ejemplo, si se calcula que el motor debe proporcionar 1.536 kW, debido a que en el mercado no existe un motor de estas características, por lo tanto la potencia instalada será de 1.600 kW. Por ende, se tiene que el programa desarrollado es una buena referencia para el cálculo de estos equipos.

Además, se observa que no se tienen grandes diferencias entre los cálculos desarrollados en el presente trabajo y lo declarado en memorias de cálculo, por lo que no se infiere sobredimensionamientos en los transportadores analizados.

En la Figura 52, se presenta el gráfico que compara ambos métodos.

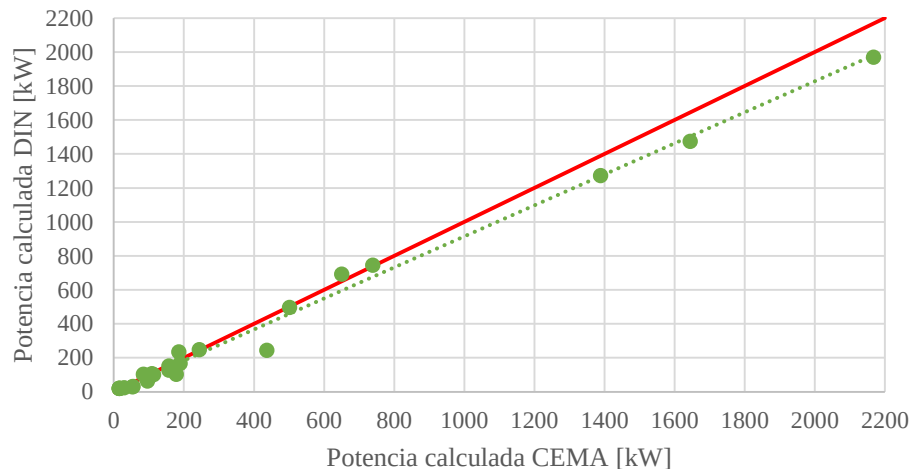


Figura 52: Gráfico comparación resultados método DIN versus método CEMA.

En general para correas cortas ambos métodos están bastante ajustados a las memorias de cálculo, mientras que para correas más largas el método CEMA asocia un valor levemente mayor que la norma DIN.

6.4 Determinación de factor de fricción

Se realizó un análisis del factor f de la norma DIN, en el que se compara los valores de f declarado en las memorias de cálculo de distintas correas transportadoras y valores de f calculados con el programa desarrollado a través de un análisis de ingeniería inversa, para modo de operación continua. Los resultados están en la Tabla 16.

Tabla 16: Comparación factor f .

Proyecto	Correa	Distancia (L) [m]	Factor f (memoria cálculo) [-]	Factor f calculado [-]
PMCHS	Correa de Sacrificio N1 S1	44	0,0192	0,0100
PMCHS	Correa Reversible	50	0,0184	0,0100
PMCHS	Correa de transferencia	53	0,0180	0,0179
PMCHS	Correa alimentación Planta CV04	160	0,0195	0,0120
PMCHS	Correa Intermedia N1 S1	184	0,0192	0,0165
PMCHS	Correa Intermedia N2 S3	277	0,0206	0,0175
PMCHS	Correa Colectora Norte	1.052	0,0182	0,0162
Traspaso Andina	Correa Chancado Secundario a Tolva Gruesos 1	92	0,0234	0,0270
Traspaso Andina	By-Pass SAG	246	0,0236	0,0260
	Promedio		0,0200	0,0170

Como resultado se tiene que el factor f que proviene de las memorias de cálculo tiene como promedio 0,02 lo que se condice con lo declarado por la norma, mientras que el análisis realizado tiene como promedio 0,017 para el modo de operación continua.

En algunos casos la variación entre ambos valores es mínima, pero en otro casos llega casi al 100%.

7. Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo de título cumple de forma satisfactoria el objetivo principal y los objetivos específicos, que consistió en determinar y caracterizar los parámetros de diseño y operación que tengan influencia en el consumo energético de las correas transportadoras utilizadas en la minería. Además, se desarrolló un programa que permite calcular correas transportadoras a través de la guía CEMA en su séptima edición y la norma DIN 22101.

Por el lado del diseño, se determinaron 16 parámetros críticos en los que se debe tener especial énfasis al escogerlos en etapas tempranas de las ingenierías y revisar su composición y calidad. Estos parámetros están conformados tanto por parte de los requerimientos de servicio del transportador, como también parámetros que gobiernan los componentes estructurales, y se presentan en la Tabla 14 del presente trabajo.

El programa desarrollado es una buena herramienta para el cálculo de correas y para la revisión de memorias de cálculo de transportadores, debido a la similitud que este presenta con lo detallado en la documentación analizada.

Como recomendaciones para futuros trabajos, se puede realizar un análisis en base a condiciones de terreno que presenten los transportadores en operación. Por ejemplo: como afecta el desalineamiento de la cinta en el requerimiento de energía que presentan las correas, condición que es muy típica en estos equipos. Además, se puede hacer un análisis a nivel eléctrico, comparando la potencia medida a través de la corriente con el voltaje de los motores y comparándolo con las memorias de cálculo de los transportadores. Estos análisis se deben realizar en plantas altamente sensorizadas, como son las plantas nuevas.

Además, se puede hacer un estudio del factor f de la norma DIN para las distintas faenas que se encuentran en el país a través de un análisis de ingeniería

inversa, obteniéndose así el factor f DIN para Chile y utilizarlo en diseños futuros para que se tengan parámetros más apegados a la realidad local.

Como comentario final, respecto a la comparación de este tipo de tecnología con otras que cumplen funciones similares, se tiene el caso del Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo. Que en su configuración presenta un sistema de manejo de materiales en base a largas correas que reemplazan los trenes o camiones que comúnmente cumplían esta función con anterioridad, en minas de similares características, y que son ejemplo claro de la madurez de esta tecnología, la cual ha alcanzado niveles de confiabilidad adecuados, por lo que se ha transformado en la predilecta de los diseños ingenieriles de hoy en día.

8. Referencias

- [1] Banco Central de Chile. Base de datos estadísticos [Consulta en línea] <https://si3.bcentral.cl/Siete/secure/cuadros/arboles.aspx?idCuadro=CCNN2013_P0_V2> [Consulta: 01 de Junio de 2019].
- [2] OEC. Chile [Consulta en línea] <<https://atlas.media.mit.edu/es/profile/country/chl/>> [Consulta: 01 de Junio de 2019].
- [3] CODELCO. La Corporación [Consulta en línea] <http://www.codelco.com/la-corporacion/prontus_codelco/2011-06-21/164601.html> [Consulta: 05 Octubre 2018].
- [4] CODELCO. Vicepresidencia de Proyectos, Historia [Consulta en línea]. <http://portal.codelco.cl/irj/servlet/prt/portal/prtroot/com.sap.km.cm.docs/intranet/Mi_Codelco/Somos_Codelco/Areas%20Corporativas/VCP/vcp_historia.htm> [Consulta: 05 de Octubre 2018].
- [5] We-Siang Tan. (2016). “MEJORA EN SISTEMA DE TENSADO EN CORREAS DE LA LÍNEA CRÍTICA EN GRAN EMPRESA MINERA DEL COBRE”. [Consulta en línea]. <<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23378/3560900257146UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [Consulta: 05 de Octubre 2018].
- [6] Revista Minería Chilena, Correas transportadoras: Mayor conocimiento y tecnología [Consulta en línea]. <<http://www.mch.cl/informes-tecnicos/correas-transportadoras-mayor-conocimiento-y-tecnologia-2/>> [Consulta: 05 de Octubre 2018].

- [7] Emilio Andrea Blanco. (2014). BLOQUE III– CAPÍTULO 12. CINTAS TRANSPORTADORAS. Universidad de Cantabria, España. [Consulta en línea] <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/12._cintas.pdf> [Consulta: 14 de abril 2019].
- [8] CODELCO. Proyecto Chuquicamata Subterráneo [Consulta en línea] <https://www.codelco.com/chuquicamata-subterranea/prontus_codelco/2016-04-05/194304.html> [Consulta: 01 de Junio de 2019].
- [9] Conveyor Equipment Manufacturers Association 7ma edition (CEMA). (2014). Transportadores de banda para materiales a granel. Naples, Florida USA: IHS website solutions.
- [10] We-Siang Tan. (2016). “MEJORA EN SISTEMA DE TENSADO EN CORREAS DE LA LÍNEA CRÍTICA EN GRAN EMPRESA MINERA DEL COBRE”. [Consulta en línea]. <<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23378/3560900257146UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [Consulta: 05 de Octubre 2018].
- [11] DIN 22102. (1991). Conveyor belts with textile plies for bulk goods; dimensions, specifications, marking. Deutsches Institut für Normung.
- [12] LORDBRAND S.A. Lordbrand Idlers [Consulta en línea] <<https://lorbrand.com>> [Consulta: 05 Octubre 2018].
- [13] DIN 15207-1. (2000). Idlers for belt conveyors handling loose bulk materials; main dimensions. Deutsches Institut für Normung.
- [14] ROTRANS S.A. Cintas transportadoras, esquema [Consulta en línea] <<http://rotranssa.com>> [Consulta: 05 Octubre 2018].

[15] Richard Duran. (2018). Apuntes para el Cálculo de correas transportadoras, FLSmidth. Santiago de Chile.

[16] DIN 22101. (2011). Continuous conveyors- Belt conveyors for loose bulk materiales- Basis for calculation and dimensioning, English traslation of DIN 22101:2011-12. Deutsches Institut für Normung.

[17] Revista Minería Chilena. Los otros proyectos clave de Codelco. [Consulta en línea]. <<http://www.mch.cl/reportajes/los-otros-proyectos-clave-de-codelco/>> [Consulta: 15 de Julio 2019].

[18] CODELCO, Vicepresidencia de Proyectos (VP). (2017). “Bases Técnicas OOC y Montaje Electromecánico”. Los Andes, Valparaíso: SGDOC Sistema de Gestión documental, Vicepresidencia de Proyectos de Codelco.

[19] Takraf Tenova. Maurice Le-Fort. (2017). Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo. Sistema de transporte Nivel 1 y principal.

[20] CODELCO, Vicepresidencia de Proyectos (VP). (2017). “Bases técnicas Contrato CC-23B – Obras Civiles y Montaje Sistema de Transporte Principal”. Calama, Antofagasta: SGDOC Sistema de Gestión documental Vicepresidencia de Proyectos de Codelco.

[21] CODELCO, División Salvador. Datos recogidos de terreno.

[22] CODELCO, División Ministro Hales. [Consulta en línea] <https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/edic/base/port/ministro_hales.html> [Consulta: 19 Junio 2019].

[23] CODELCO, Vicepresidencia de Proyectos (VP). (2011). “Memoria de cálculo correa Overland Mina Ministro Hales”. Santiago de Chile: SGDOC Sistema de Gestión de Documentos, Gerencia de Ingeniería y Constructibilidad, Vicepresidencia de Proyectos de Codelco.

[24] CODELCO, Vicepresidencia de Proyectos (VP). (2017). “Especificación correas transportadoras y electromagnetos”. Santiago de Chile: SGP Sistema de Gestión de Proyectos, Gerencia de Ingeniería y Constructibilidad, Vicepresidencia de Proyectos de Codelco.

[25] Satria, I.& Rusli, M. (2018). “A comparison of Effective Tension Calculation for Design Belt Conveyor between CEMA and DIN Standard”. MATEC Web of Conferences 166, ICMAA 2018.

[26] CODELCO, Vicepresidencia de Proyectos (VP). Memorias de cálculo. Santiago de Chile: SGDOC Sistema de Gestión de Documentos, Gerencia de Ingeniería y Constructibilidad, Vicepresidencia de Proyectos de Codelco.

[27] Fernando Kanacri. (2019). “Apuntes para el cálculo de correas transportadoras”. Santiago de Chile.

[28] Phoenix Conveyor Belt Systems. (2006). “Fundamentos de diseño de las Correas Transportadoras Phoenix”. Hamburgo.

[29] Goodyear. Catálogo Correas Pylon EP. [Consulta en línea] <https://www.goodyearrubberproducts.com/spanishpdfs/pylon_total.pdf> [Consulta: 10 Diciembre 2018].

[30] Contitech. Manual de Ingeniería. [Consulta en línea] <
[http://clientes.bcsoporte.com/tecniband/wp-](http://clientes.bcsoporte.com/tecniband/wp-content/uploads/2013/03/ManualIngenieria.pdf)
[content/uploads/2013/03/ManualIngenieria.pdf](http://clientes.bcsoporte.com/tecniband/wp-content/uploads/2013/03/ManualIngenieria.pdf)> [Consulta: 10 Diciembre 2018]

[31] Datos operacionales DMH, Centro Integrado de Operaciones (CIO). Santiago de Chile.

Anexo A: Complemento marco teórico guía CEMA

Éste cálculo se desarrolla suponiendo que el rodillo central está nivelado y la correa transportadora está horizontal. Para definir las relaciones transversales específicas, simplemente se multiplica la relación adimensional correspondiente por el ancho de la banda (BW), procedimiento que se realiza con cada parámetro adimensional presente en este apartado.

Para el cálculo de la sección transversal estándar según CEMA (A_s) se definen en primer lugar las relaciones adimensionales necesarias, tomando como referencia la Figura 53.

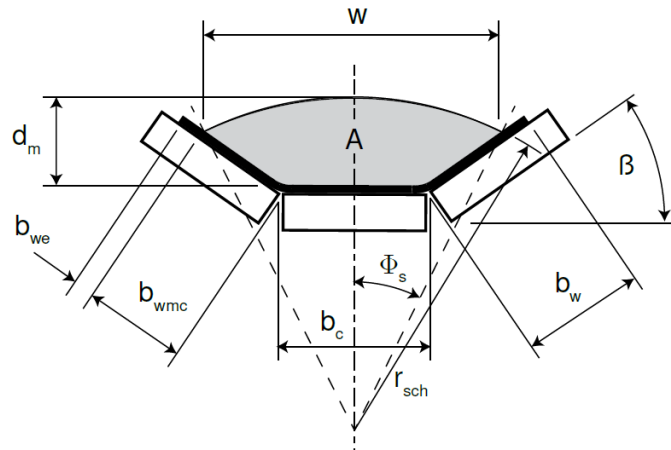


Figura 53: Relaciones adimensionales transversales y su nomenclatura [9].

$$\text{Ancho polín base (} b_c \text{)} \quad b_c = \frac{0,371 \times BW + 6,35}{BW} [mm] \quad (B.1)$$

$$\text{Distancia borde estándar (} b_{we} \text{)} \quad b_{we} = \frac{0,055 \times BW + 22,9}{BW} [mm] \quad (B.2)$$

$$\begin{aligned} &\text{Ancho de la banda sobre el} \\ &\text{rodillo lateral del transportador} \\ & (b_w) \end{aligned} \quad b_w = b_{we} + b_{wmc} = \frac{1 - b_c}{2} \quad (B.3)$$

Radio de la superficie superior
del material con el ancho de la
banda (r_{sch})

$$r_{sch} = \frac{\frac{b_c}{2}}{\sin(\varphi_s)} + \frac{\cos(\beta) \times b_{wmc}}{\sin(\varphi_s)} \quad (B.4)$$

Donde:

- BW : Ancho de banda del transportador.
- β : Ángulo de artesa o acanalamiento del juego de polines.

Adicionalmente, se presentan las ecuaciones para el cálculo del ancho máximo que ocupa la carga en la banda (w) y la profundidad máxima del material a granel en el centro de la banda (d_m), que tienen presencia en los cálculos de tensiones y potencias que se verán con posterioridad.

$$w = b_c + 2 \times b_{wmc} \times \cos(\beta) \quad (B.5)$$

$$d_m = b_{wmc} \times \sin(\beta) + \left[\frac{\frac{b_c}{2}}{\sin(\varphi_s)} + \frac{\cos(\beta) \times b_{wmc}}{\sin(\varphi_s)} \right] \times (1 - \cos(\varphi_s)) \quad (B.6)$$

- **Cambios de tensión debido a la energía**

1. ΔT_{Hn} : Cambio de tensión para elevar o bajar el material en la banda.

$$\Delta T_{Hn} = H_n \times (W_b + W_m) \quad (B.7)$$

Donde:

- H_n : Altura total del transportador.

2. ΔT_{amn} : Cambio de tensión añadida en la zona de carga para acelerar de manera continua el material a la velocidad de la banda.

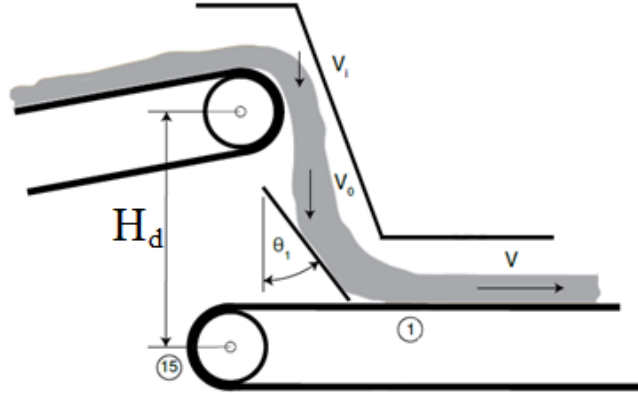


Figura 54: Aceleración del material a granel a la velocidad de la banda [9].

$$V_0 = V_i + \sqrt{2 \times g \times H_d} \quad (B.8)$$

$$\Delta T_{amn} = \frac{Q}{g} \times (V - V_0 \times \sin \theta_1) \quad (B.9)$$

Donde:

- V_i : Velocidad inicial del flujo que cae del material a granel cuando éste se traspasa de una correa a otra.
- H_d : Distancia vertical por la que cae el material a granel cuando éste acelera a la velocidad de la banda.
- V_0 : Velocidad efectiva del flujo que cae del material a granel cuando éste se acelera a la velocidad de la banda.
- θ_1 : Ángulo del chute en relación con el plano YZ de la banda.

- **Cambios de tensión debido a las resistencias principales**

1. ΔT_{ssn} : Cambio de tensión debido al deslizamiento de la banda sobre el sello del faldón (Skirtboard).

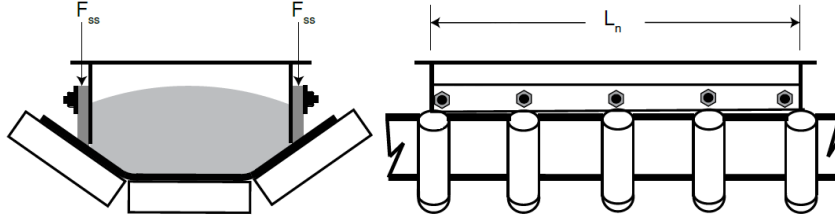


Figura 55: Arrastre del sello del faldón sobre la banda transportadora [9].

$$C_{ss} = 2 \times \mu_{ss} \times F_{ss} \times R_{rss} \quad (B.10)$$

$$\Delta T_{ssn} = C_{ss} \times L_n \times R_{rss} \quad (B.11)$$

Donde:

- μ_{ss} : Coeficiente de fricción de deslizamiento entre la banda y el caucho del sello.
- F_{ss} : Fuerza normal efectiva entre la banda y el sello.
- C_{ss} : Resistencia de rozamiento al movimiento de la banda en el faldón.

2. ΔT_{isn} : Cambio de tensión a partir de la fricción del sello del polín.

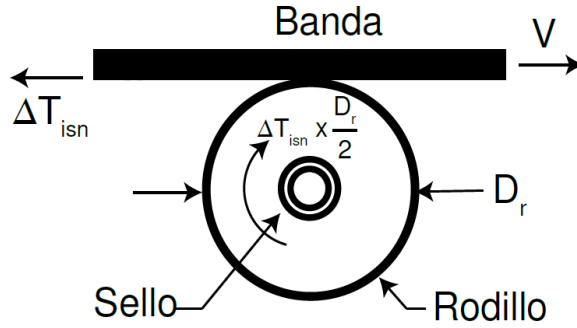


Figura 56: Arrastre del sello para un solo rodillo [9].

$$K_{iT} = K_{iT_a} \times e^{K_{iT_b} \times T_x} \quad (B.12)$$

$$\Delta T_{ir} = [K_{iV} \times R_{riV} \times (N_i - 500 \text{ rpm}) + K_{iS} \times R_{riS}] \times \frac{2}{D_r} \quad (B.12)$$

$$\Delta T_{isn} = K_{iT} \times \Delta T_{ir} \times \frac{n_r}{S_{in}} \times L_n \quad (B.14)$$

Donde:

- K_{iT} : Factor de corrección por temperatura para la resistencia al sello del polín.
- K_{iT_a} : Constante para la resistencia torsional del sello del polín.
- K_{iT_b} : Constante para la resistencia torsional del sello del polín.
- T_x : Temperatura de operación.
- K_{iV} : Pendiente de la curva de velocidad de torsión por polín.
- N_i : Velocidad del polín.
- K_{iS} : Resistencia torsional del sello por polín a 500 rpm.
- ΔT_{ir} : Arrastre de un polín único.
- n_r : Cantidad de polines por juego de polines, de transporte o de retorno.

3. ΔT_{iw_n} : Cambio de tensión a partir de la fricción de la carga del polín.

$$\Delta T_{iw_n} = \frac{C_{iw} \times (W_b + W_m)}{\frac{D_r}{2}} \times L_n \times R_{riw} \quad (B.15)$$

Donde:

- C_{iw} : Factor del efecto a la resistencia torsional del polín.

4. ΔT_{bin} : Cambio de tensión a partir de la deformación viscoelástica de la banda (Indentación)

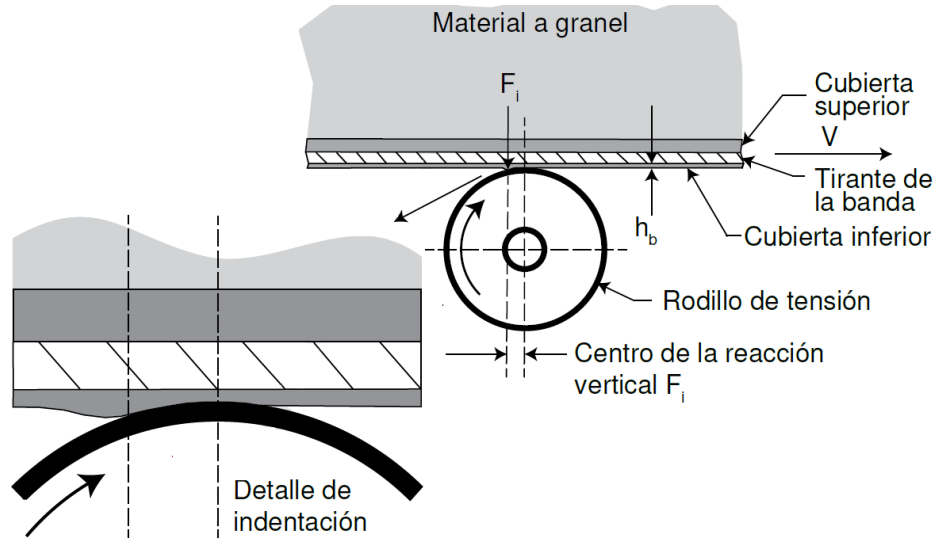


Figura 57: Deformación de la cubierta de la banda sobre el rodillo de transporte [9].

$$c_{wd} = 1,239 + 0,10866 \times X_{id} + 0,005 \times \beta - 0,00476 \times BW - 0,00263 \times \varphi_s \quad (B.16)$$

$$X_{id} = \frac{\gamma_m \times S_{in}}{X_{ldref}} \quad (B.17)$$

$$\Delta T_{bin} = K_{biR} \times c_{wd} \times (W_b + W_m) \times L_n \times R_{rbi} \quad (B.18)$$

Donde:

- c_{wd} : Factor de distribución de la carga.
- X_{id} : Factor de ajuste de la presión de la carga.
- X_{Idref} : Factor de ajuste de la presión de la carga referencial.

El K_{biR} , es calculado a través del método de muestra pequeña detallado en la guía CEMA 7ma edición.

5. ΔT_{imn} : Cambio de tensión a partir de la desalineación del polín

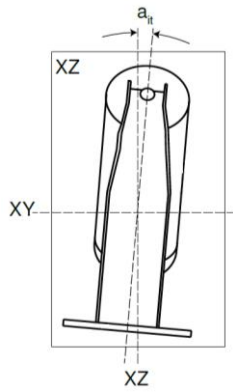


Figura 58: Desalineación inclinada del rodillo [9].

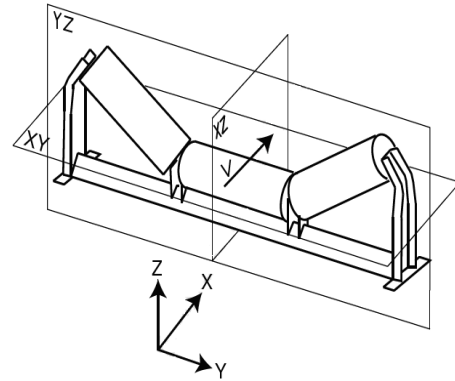


Figura 59: Planos de alineación de rodillo relativos al transportador y a la línea central de la banda [9].

$$C_{im} = C_{bi} \times a_{im} \quad (B.19)$$

$$a_{im} = \frac{\Delta A_e}{A_a} \quad (B.20)$$

$$\Delta A_e = \Delta A_{ei} + \Delta A_{em} + \Delta A_{et} \quad (B.21)$$

$$\Delta T_{imn} = C_{im} \times L_n \times (W_b + W_m) \times R_{rim} \quad (B.22)$$

Donde:

- C_{im} : Factor de diseño para la resistencia de rozamiento debido a la desalineación del polín.
- C_{bi} : Factor de fricción del polín y la banda de caucho para los cálculos de desalineación.
- a_{im} : Desalineación promedio del eje del polín al eje longitudinal de la banda.
- ΔA_e : Desviación de la alineación efectiva total perpendicular al recorrido de la banda.
- A_a : Distancia entre centros de pernos de montaje.
- ΔA_{ei} : Desalineación perpendicular del polín debido a la instalación esperada del plano XZ.
- ΔA_{em} : Desalineación lateral del polín debido a las tolerancias de fabricación.
- ΔA_{et} : Desalineación efectiva debido a la inclinación del polín, para polines de marco fijo.

6. ΔT_{sbn} : Cambio de tensión debido a las bases de impacto/camas de deslizamiento

$$\Delta T_{sbn} = C_{sb} \times (W_b + W_m) \times L_n \times R_{rsb} \quad (B.23)$$

Donde:

- C_{sb} : Factor de fricción de deslizamiento de la cama del impacto.

7. ΔT_{sn} : Cambio de tensión a partir del deslizamiento del material a granel y el faldón

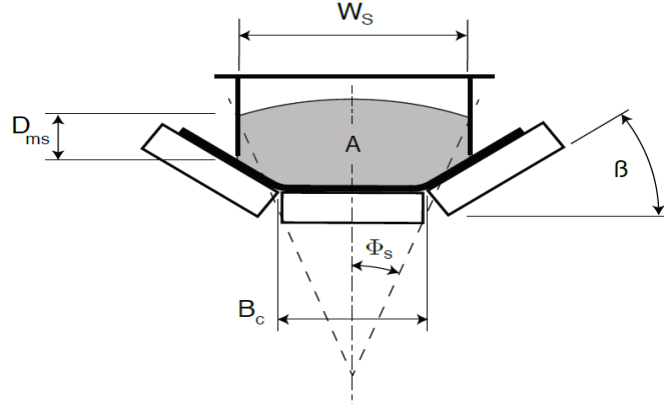


Figura 60: Profundidad del material sobre el faldón [9].

$$C_s = \gamma_m \times \frac{1 - \sin(\varphi_r)}{1 + \sin(\varphi_r)} \times \mu_s \quad (B.24)$$

D_{ms}

$$= \frac{A - 0,25 \times (W_s^2 - B_c^2) \times \tan(\beta) - 0,25 \times W_s^2 \times \left[\frac{\varphi_s}{\sin(\varphi_s)^2} - \cot(\varphi) \right]}{W_s} \quad (B.25)$$

$$W_s = \frac{2}{3} \times BW \quad (B.26)$$

$$\Delta T_{sn} = C_s \times D_{ms}^2 \times L_n \times R_{rs} \quad (B.27)$$

Donde:

- C_s : Coeficiente de fricción de deslizamiento entre el faldón y el material a granel.
- μ_s : Coeficiente de fricción entre el faldón y el material a granel.
- B_c : Ancho polín base.
- D_{ms} : Profundidad del material que se desliza sobre los faldones.

8. ΔT_{mzn} : Cambio de tensión debido al movimiento de los materiales a granel entre los polines (Deflexión entre polines/SAG)

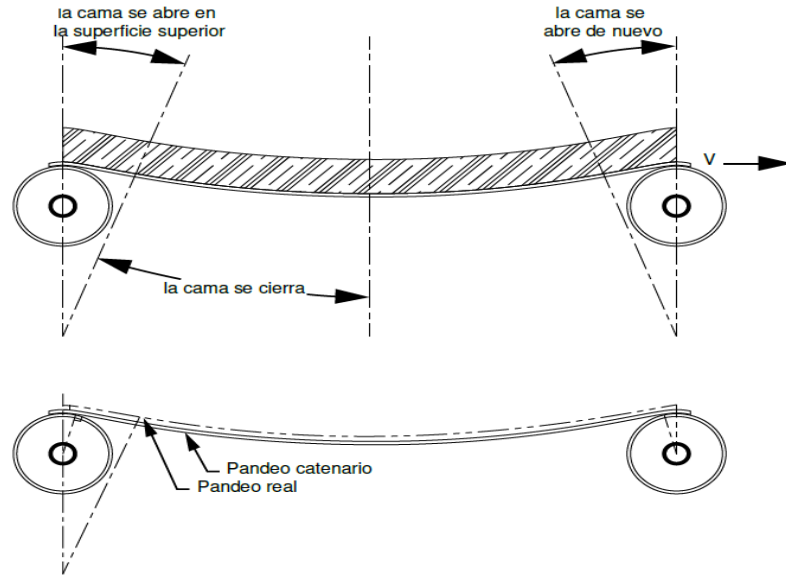


Figura 61: Deformación del material causada por el pandeo de la banda [9].

$$W_{mzn} = D_m^3 \times Y_m \times C_{mz} \times BW \times \left[\exp \left[(W_b + W_m) \times \frac{S_{in}}{T_n} \right] - 1 \right] \times \exp \left[\frac{-1}{2} \times (W_b + W_m) \times \frac{S_{in}}{T_n} \right] \times R_{mz} \quad (B.28)$$

$$\Delta T_{mzn} = \frac{W_{mzn} \times L_n}{S_i^2} \times R_{mz} \quad (B.29)$$

Donde:

- C_{mz} : Pérdida de fricción neta que depende del ángulo de reposo del material a granel.
- W_{mzn} : Trabajo de la banda requerido para causar el movimiento del material a granel desde un polín a otro.

- **Cambios de tensión debido a resistencias puntuales**

1. ΔT_{prn} : Pérdida debido a los cojinetes, lubricantes y sellos de las poleas.

$$\Delta T_{prn} = 0,01 \times \frac{d_{sn}}{D_{pn}} \times R_{rpn} \quad (B.30)$$

Donde:

- d_{sn} : Diámetro del eje de la polea.
- D_{pn} : Diámetro de la polea.

2. ΔT_{pxn} : Poleas como pérdidas puntuales pasivas.

x=subíndice, $\begin{cases} \text{"f" para bandas tipo EP.} \\ \text{"s" para bandas tipo ST.} \end{cases}$

$$\Delta T_{pfn} = (F_{pfn} \times BW + 0,09 \times T_n) \times \frac{t_b}{D_{pn}} \quad (B.31)$$

$$\Delta T_{psn} = (F_{psx} \times BW + 0,12 \times T_n) \times \frac{t_b}{D_{pn}} \quad (B.32)$$

$$\Delta T_{pn} = (\Delta T_{pxn} + \Delta T_{prn}) \times R_{rp} \quad (B.33)$$

Donde:

- F_{pxn} : Factor relacionado a la naturaleza de la banda carcasa de “tela” o “cables”.
- t_b : Espesor de la banda.
- D_{pn} : Diámetro polea.

3. ΔT_{bcn} : Limpiadores de banda como pérdidas puntuales.

$$C_{bcm} = \mu_{bcm} \times F_{bcm} \quad (B.34)$$

$$\Delta T_{bcn} = BW \times \sum_m C_{bcm} \times R_{rpn} \quad (B.35)$$

Donde:

- C_{bcm} : Resistencia al rozamiento del limpiador de banda.
- μ_{bcm} : Coeficiente de fricción entre la banda y el limpiador.
- F_{bcm} : Fuerza normal efectiva entre las aspas del limpiador y la banda.

[illegible]

Anexo C: Esquema programa de cálculo correa colectora norte PMCHS

REVISIÓN CÁLCULO POTENCIA DE CORREAS TRANSPORTADORAS		RESULTADOS	
INPUT Imperial Métrico Distancia (L) 1.052 m Altura (H) 0.0 m Capacidad (Q) 11.000 tph T₁ (T_{min}) 10 °C Velocidad (V) 4.05 m/s Cinta Imperial Métrico Ancho de Correa (BW) 2.138 mm Peso de cinta por longitud (W) 75.0 kg/m Polines transporte 35 10 Acabalamiento (B) F Clase de polín 7/78 Diámetro de polín (D1) 46 mm Grupo Tensor Imperial Métrico Take Up force 338.100 N Grupo Motor Imperial Métrico Factor f DIN 0.0162		AREAS CEMA DIN Porcentaje de llenado 50.25 % 70.55 % Indicación total transportador 0.087 Área trébol (A_{trébol}) 0.44 m² 0.56 m² Área usada (A) 0.39 m² Ancho polín base (B_c) 798 mm 800 mm Borde estándar (Base / Distancia usada (b)) 142 mm 1.88 mm CONFIGURACIÓN TRANSPORTADOR Carretera tensor 5.28 m Longitud fábrica/guidera 8.61 m Espacio entre SkidBoard 1.42 m TENSIONES MÍNIMAS Y SAG CEMA DIN Tensión mínima en la banda (T_{min}) (T_{min}) 28.82 kN 28.82 kN Pesca calculada en el lado de transporte (S_{calc}) 0.47 %	
ANTECEDENTES DEL MATERIAL Imperial Métrico Densidad aparente (γ_m) 1.600 kg/m³ Tamaño de carga (D₂) 300 mm Ángulo de rozamiento 25 ° Ángulo de sobre carga (φ_s) 15 ° CALCULAR RESTAURAR		GEOMETRÍA GENERAL TRANSPORTADOR 	
TENSIONES Y POTENCIAS CEMA T1 254 kN T2 88 kN T3 30 kN Te 178 kN Potencia requerida 858 kW $\Delta T_e = \sum \Delta T_{Energia} + \sum \Delta T_{Principales} + \sum \Delta T_{Puntuales} \quad (1)$ $\Delta T_e = T_1 - T_2 \quad (2)$ $C_{WH} = \frac{1}{e^{f \cdot \mu_n - 1}} \cdot \frac{T_2}{\Delta T_e} \quad (3)$ $P_{Requerida} = \Delta T_e \cdot V \quad (4)$ VER CÁLCULO CEMA		TENSIONES Y POTENCIAS DIN FT1 248 kN FT2 83 kN FT3 110 kN FT4 166 kN Potencia requerida 804 kW $F_w = F_H + F_N + F_{ST} + F_2 \pm \sum F_{W,i,0} + \sum F_{W,i,180} = F_{Tr} \quad (1)$ $F_{Tr} = F_{T1} - F_{T2} \quad (2)$ $F_{T2} \geq \frac{1}{e^{f \cdot \mu_n - 1}} \cdot F_{Tr,max} \quad (3)$ $P_{Requerida} = F_{Tr} \cdot V \quad (4)$ VER CÁLCULO DIN	
INGENIERÍA INVERSA DESDE TENSOR DESDE MOTOR T1 292.40 kN T2 97.47 kN T3 52.61 kN Te 194.59 kN Potencia requerida 945.42 kW T1 411.34 kN T2 137.11 kN T3 92.26 kN Te 274.23 kN Potencia requerida 1.330.09 kW		CEMA 	
DISTRIBUCIÓN TENSIONES CEMA 		DISTRIBUCIÓN TENSIONES DIN 	