

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN
PARA EL CONTROL DE FLUJO DE COBRE EN UNA FAJA
TRANSPORTADORA, CUYO LÍMITE DE DISEÑO SON 9 400 TPH**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO
DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTOR

ISAAC ALONSO LUNA PRIETO

ASESOR:

ALLAN WALTER FLORES MORALES

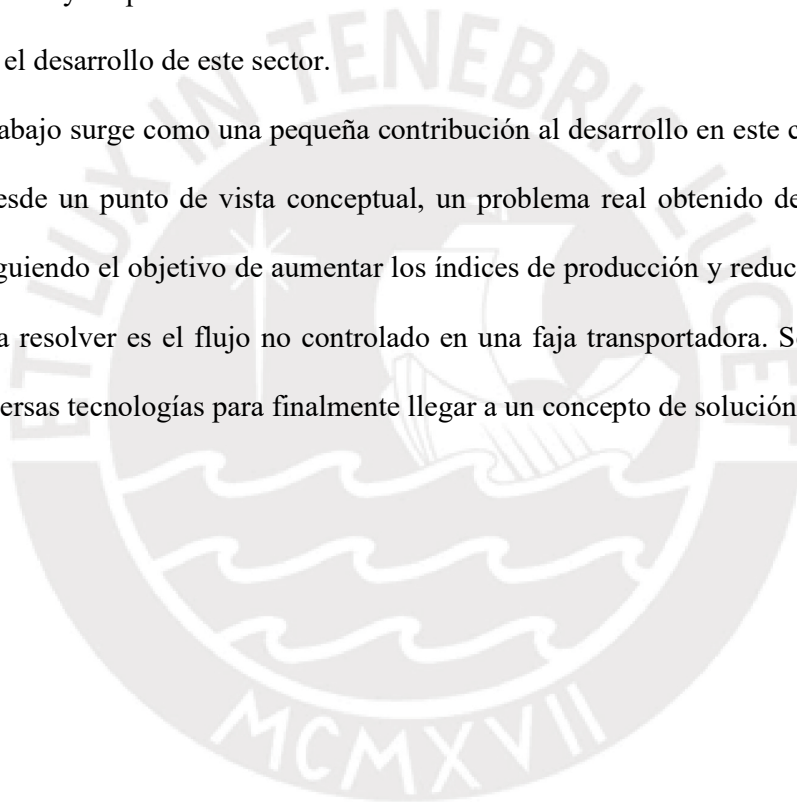
Lima, julio, 2020

RESUMEN

La minería forma parte de la historia del Perú, pues ha estado presente desde épocas preincaicas. Además, su aporte a la economía peruana es sustancial y equivalente al 10% del producto bruto interno del país, siendo uno de los pilares del desarrollo económico. Por otro lado, a nivel mundial, el Perú es considerado un gigante en la industria minera, ya que está presente en el podio de países con mayor reserva de minerales como oro, zinc y cobre. Con el fin de tener un mayor aprovechamiento de estas reservas es necesario un marco tecnológico que incentive el desarrollo de este sector.

El presente trabajo surge como una pequeña contribución al desarrollo en este campo y busca solucionar, desde un punto de vista conceptual, un problema real obtenido de una empresa minera, persiguiendo el objetivo de aumentar los índices de producción y reducir las mermas.

El problema a resolver es el flujo no controlado en una faja transportadora. Se investigan y comparan diversas tecnologías para finalmente llegar a un concepto de solución.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPITULO 1 | 2 |
| 1.1 Relevancia de la actividad minera en el Perú..... | 2 |
| 1.2 Planteamiento del problema..... | 4 |
| 1.3 Propuesta de solución | 6 |
| 1.4 Alcance..... | 6 |
| 1.4.1 Objetivos..... | 7 |
| 1.4.1.1 Objetivo general:..... | 7 |
| 1.4.1.2 Objetivos específicos:..... | 7 |
| CAPITULO 2 | 8 |
| 2.1 Procesamiento de minerales..... | 8 |
| 2.1.1 Flujo del proceso..... | 8 |
| 2.1.2 Clasificación de equipos y transporte de materia..... | 12 |
| 2.2 Productos y equipos usados en la industria..... | 13 |
| 2.2.1 Alimentadores de placas – <i>Apron feeders</i> | 13 |
| 2.2.2 Faja transportadora | 14 |
| 2.3 Sensores..... | 16 |
| 2.3.1 Sensores de velocidad..... | 16 |
| 2.3.2 Sensores de peso..... | 18 |
| 2.4 Actuadores | 21 |
| 2.4.1 Motor hidráulico | 21 |
| 2.4.2 Motor eléctrico..... | 22 |
| 2.5 Unidades de control..... | 26 |
| 2.5.1 MÉTODOS Y ESTRATEGIAS DE CONTROL | 30 |
| 2.5.1.1 Patentes, tesis y trabajos de investigación | 31 |
| CAPITULO 3 | 38 |
| 3.1 Requerimientos del sistema..... | 38 |
| 3.2 Estructura de funciones..... | 39 |
| 3.2.1 Black Box..... | 39 |
| 3.2.2 Lista de funciones..... | 40 |

| | | |
|------------------------------|---|-----------|
| 3.3 | Matriz morfológica..... | 43 |
| 3.4 | Conceptos de solución | 46 |
| 3.5 | Evaluación técnica - económica | 55 |
| 3.5.1 | Criterios técnicos de evaluación | 55 |
| 3.5.2 | Criterios económicos de evaluación..... | 56 |
| CONCLUSIONES | | 60 |
| RECOMENDACIONES | | 61 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 62 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig 1. Producción de cobre 2016-2020 | 3 |
| Fig 2. Diagrama multiplicador del valor agregado bruto..... | 4 |
| Fig 3. Diagrama del proceso | 5 |
| Fig 4. Comportamiento real de la señal de peso en la faja | 6 |
| Fig 5. Tipos de chancadoras..... | 9 |
| Fig 6. Harnero | 9 |
| Fig 7. Molinos semi autógenos..... | 10 |
| Fig 8. Proceso de separación en celdas de flotación..... | 10 |
| Fig 9. Espesador..... | 11 |
| Fig 10. Flujo de proceso para la concentración de cobre..... | 11 |
| Fig 11. Nivel de sistemas en procesamiento de rocas..... | 12 |
| Fig 12. Nivel de sistemas en procesamiento de minerales..... | 12 |
| Fig 13. Alimentador de placas Metso..... | 14 |
| Fig 14. Vista de faja transportadora..... | 15 |
| Fig 15. Speed Switch..... | 16 |
| Fig 16. Tacómetro..... | 17 |
| Fig 17. Encoder industrial..... | 18 |
| Fig 18. Galgas extensiométricas | 18 |
| Fig 19. Almohadilla capacitiva..... | 19 |
| Fig 20. Sensor piezoeléctrico..... | 20 |
| Fig. 21. Puente de carga de una faja transportadora | 20 |
| Fig. 22. Motor Hidráulico | 21 |
| Fig 23. Motor de corriente alterna | 23 |

| | |
|--|----|
| Fig 24. Microcontrolador | 26 |
| Fig 25. PLC y sus módulos | 27 |
| Fig 26. Sistema de control distribuido DCS | 28 |
| Fig 27. Sistema SCADA | 29 |
| Fig 28. Diagrama de bloques del sistema | 30 |
| Fig 29. Área de medición del peso en el transportador..... | 31 |
| Fig 30, Sistema de pesaje dinámico..... | 32 |
| Fig 31. Proceso de pesaje..... | 33 |
| Fig 32. Modelo no lineal del Sistema de pesaje..... | 34 |
| Fig 33. Diagrama esquemático del Sistema..... | 35 |
| Fig 34. Sistema de pesaje patentado | 36 |
| Fig 35. Diagrama de bloques del proceso..... | 37 |
| Fig 36. Black box del sistema | 40 |
| Fig 37. Estructura global de funciones | 42 |
| Fig. 38. Balance técnico – económico | 58 |
| Fig 39. Valoración ponderada de conceptos de solución..... | 59 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Datos técnicos de Apron Feeder AF60 | 14 |
| Tabla 2. Datos técnicos de faja transportadora | 15 |
| Tabla 3. Comparación entre sensores de peso | 21 |
| Tabla 4. Comparación entre motores hidráulicos | 22 |
| Tabla 5. Comparación de motores eléctricos de corriente alterna | 24 |
| Tabla 7. Evaluación técnica - económica de conceptos de solución | 57 |
| Tabla 8. Valoración ponderada de los conceptos de solución | 59 |



INTRODUCCIÓN

Hoy en día las empresas mineras se ven obligadas a optimizar sus procesos productivos de manera constante. Esto se debe a las altas exigencias y elevado valor de los minerales en el mercado internacional. Tan solo algunas horas de paro en el proceso se traducen en cientos de miles de dólares perdidos, por lo que es un deseo de las empresas del rubro operar correctamente sus equipos y mantenerlos en óptimas de condiciones, evitando así paradas imprevistas.

El presente proyecto surge como una oferta de solución para una empresa productora de cobre que presenta problemas en el sistema de transporte ubicado entre la zona de canchado primario y el primer reservorio de mineral (*stockpile*). Debido a la mala implementación de estrategias de control y mala ubicación de algunos componentes, se presenta un flujo no controlado de mineral de cobre a través su faja transportadora, superando periódicamente los 9 400 tph, su valor límite de diseño. Este problema de sobrecarga genera serias consecuencias como desalineamiento de polines y desgaste de la faja transportadora.

En el documento se presenta un análisis detallado acerca del procesamiento de minerales, sensores, actuadores, controladores y trabajos de investigación relacionados con el problema de estudio. En base a la tecnología investigada se presentan 3 conceptos de solución que cumplen con el objetivo general del proyecto, escogiendo la alternativa más óptima bajo una evaluación técnica-económica. Finalmente se describe a detalle el concepto escogido,

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

En el presente capítulo, se explica la trascendencia de la minería en el Perú, el planteamiento del problema y sus consecuencias, la propuesta de solución y el estado del arte, en el cual se describe el procesamiento de minerales y las tecnologías existentes dentro de este. Por último, se presenta el plan metodológico a seguir durante el diseño del sistema.

1.1 Relevancia de la actividad minera en el Perú

Sin lugar a dudas, la actividad minera es uno de pilares del desarrollo económico en el Perú. Esta ha estado presente a largo de la historia del Perú, desde su uso ornamental en las épocas preinca e inca hasta la actualidad (Benavides, 2012). De acuerdo a los datos publicados por el Ministerio de economía y finanzas en el Marco macroeconómico 2020-2023, el sector minero representa aproximadamente el 11% de PIB, valor que seguirá creciendo desde el segundo semestre del 2019 (Ministerio de Economía y Finanzas et al., 2019). Asimismo, según Pablo de la Flor, director ejecutivo de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE), en la última década el sector minero ha transferido vía canon alrededor de S/40.000 mil millones a gobiernos regionales y municipios. La inversión pública en servicios básicos y el desarrollo y construcción de obras de infraestructura de impacto regional o local se ha financiado sustancialmente con estos aportes (Diario Gestión, 2019).

El Perú es considerado como un gigante de la industria minera a nivel global, pues es el segundo mayor productor de cobre a nivel mundial y también está entre los líderes en producción de oro, plata, zinc, molibdeno, entre otros minerales. El territorio peruano cuenta con el 10.3% de reservas de cobre en el mundo, 4.3% de oro, 17.6% de plata y 12.2% de zinc (Gleisberg, 2019). En la figura 1 se muestra la producción de cobre en los últimos años a nivel nacional, se esperan cifras positivas para el 2020.

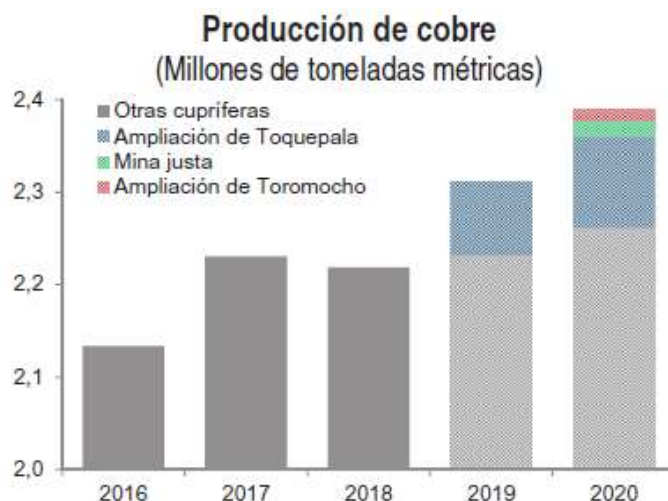


Fig 1. Producción de cobre 2016-2020

Fuente: <http://www.embajadadelperu.org.co/docs/Mining 2019 - 2020.pdf>

A partir de los datos mencionados, el Perú cuenta con gran potencial geológico. De manera análoga, gracias a la agilidad de los procesos administrativos y el favorable marco legal nacional para los productores mineros, el pueblo peruano es altamente atractivo para la inversión extranjera. En efecto, el país es sede de algunas de las compañías mineras más grandes del mundo, entre ellas Glencore, MMG, Freeport – McMoRan, Rio Tinto, Barrick y Anglo American (Ernst and Young, 2019). En la actualidad, el Perú cuenta con una cartera de 41 proyectos mineros por alrededor de US\$ 49 mil millones que se encuentran en fases previas de construcción. Mientras tanto, los proyectos de mayor envergadura que están por pasar a fase de operación son Mina Justa, la ampliación de Toromocho y Quellaveco. Por consiguiente, la inversión privada seguirá registrando tasas favorables durante los próximos 3 años (Ministerio de Economía y Finanzas et al., 2019).

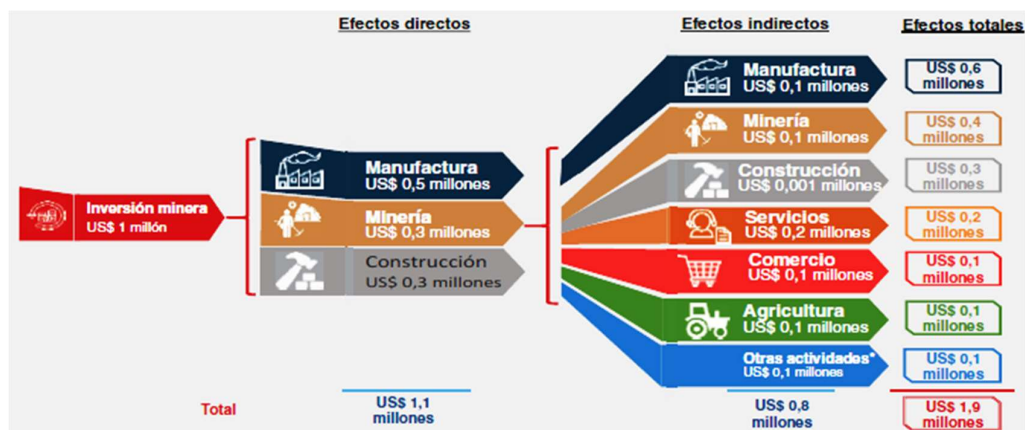


Fig 2. Diagrama multiplicador del valor agregado bruto
 Fuente: Marco macroeconómico multianual 2020-2023. *Diario El Peruano*.

El desarrollo de un proyecto minero en el Perú repercute en los diferentes sectores, generando empleos directos e indirectos, así como negocios locales de proveedores (Tecnología minera, 2019). Según el Ministerio de economía y finanzas, por cada empleo creado en el sector minero, durante la fase de construcción, se podrían generar 9 empleos adicionales (Ministerio de Economía y Finanzas et al., 2019). La figura 2 muestra los efectos directos e indirectos de la minería.

1.2 Planteamiento del problema

Debido al alto potencial económico de esta actividad en el Perú, las empresas mineras se ven obligadas a optimizar sus procesos productivos de manera constante. Para cumplir con sus objetivos de producción en plazos ajustados de tiempo es una exigencia el desarrollo de nuevas estrategias de control, seguridad y mantenimiento en sus procesos (Springer, 2008).

Durante el procesamiento de los minerales participan diferentes equipos, divididos en estaciones de: chancadoras, zarandas, molinos y celdas de flotación. Las fajas transportadoras son uno de los elementos más importante en las plantas, ya que transportan el mineral entre las diferentes estaciones por largas distancias. Cada uno de estos equipos se encuentra en trabajo

constante durante extensos periodos de tiempo, por lo que existe desgaste de sus partes y componentes. Con el fin de evitar paradas imprevistas en la producción, muchas empresas realizan una gestión de mantenimiento preventivo y/o predictivo, pues estas paradas pueden significar grandes pérdidas de dinero (Schlesinger, King, Sole, & Davenport, 2011).

Para el presente trabajo se tomará como referencia información y datos de una empresa minera productora de cobre. La figura 3 muestra el esquema de la problemática a resolver. Los equipos de alimentación de placas o *Apron Feeders* suministran el material hacia la faja principal la cual tiene un límite de 9 400 tph, mismo que deberá ser controlado por medio de la regulación de las velocidades de alimentación.

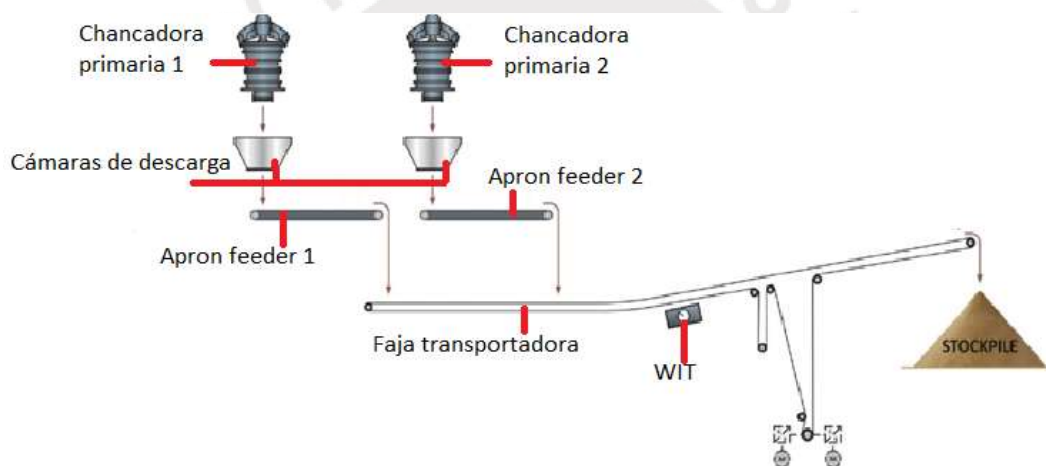


Fig 3. Diagrama del proceso

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la empresa

La faja transportadora cuenta con una balanza que mide el flujo másico de mineral que transcurre sobre esta. La figura 4 muestra el registro de esta señal en tph. Si el flujo de cobre supera las 9 400 tph se produce un deterioro de los elementos de la faja, lo cual a mediano o largo plazo producirá una parada en el equipo, produciendo grandes pérdidas de dinero. Por otro lado, si el tonelaje se mantiene muy por debajo del límite se producirá una sobre carga de material en las cámaras de descargas, volviendo la producción más lenta, perjudicando económicamente a la empresa.

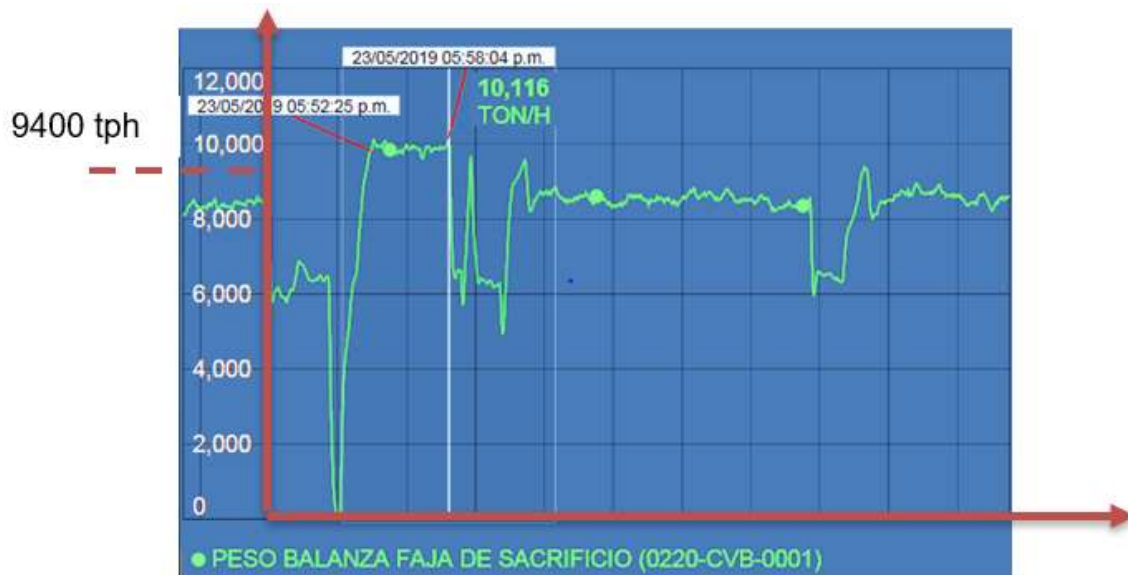


Fig 4. Comportamiento real de la señal de peso en la faja
Fuente: Imagen brindada por la empresa

1.3 Propuesta de solución

Ante el problema descrito, el presente trabajo presenta como solución el diseño de un sistema de automatización capaz de controlar el flujo de mineral de cobre en la faja transportadora, optimizando la disposición de la instrumentación y modificando la filosofía de control del sistema.

1.4 Alcance

- La investigación incluye un marco teórico, estado de la tecnología y recopilación de fuentes, tesis y trabajos de investigación relacionados al proyecto.
- El diseño solo se extenderá hasta la solución conceptual del problema. A partir del análisis documentado se desarrollarán y presentarán bosquejos de conceptos de solución que integren las tecnologías investigadas. Se escogerá uno concepto mediante una evaluación técnica y económica.

1.4.1 Objetivos

A continuación, se presentan el objetivo general y los objetivos específicos del presente informe. En estos se reflejan los resultados que se esperan obtener con el desarrollo diseño.

1.4.1.1 *Objetivo general:*

- Diseñar conceptualmente un sistema de automatización capaz de controlar el flujo de mineral de cobre en una faja transportadora, considerando su límite de diseño de 9 400 tph.

1.4.1.2 *Objetivos específicos:*

- Investigar el marco de procesamiento de minerales metálicos.
- Investigar acerca de los equipos involucrados en el flujo del proceso.
- Indagar acerca de sensores, actuadores y sistema de control que puedan incluirse en el desarrollo del proyecto. Identificar las diferencias entre los mismos, ventajas y desventajas.
- Realizar un estado de la tecnología. Recopilar fuentes, patentes y trabajos de investigación relevantes acerca del tema en estudio.
- A partir del análisis documental realizado, definir 3 conceptos de solución que cumpla el objetivo general del proyecto.
- Evaluar técnica y económicamente cada alternativa de solución, escogiendo la más adecuada.
- Iniciar el desarrollo conceptual de la alternativa escogida.

CAPITULO 2

ESTADO DEL ARTE

En el presente acápite, se describe el procesamiento de minerales. Así como los equipos comerciales usados en la industria, los cuales están involucrados en el proyecto de estudio. Posteriormente se describen y comparan sensores, actuadores y controladores. Por último, se mencionan trabajos de investigación y tesis acerca de procesos y estrategias de control relacionadas al tema.

2.1 Procesamiento de minerales

Las plantas procesadoras de mineral se encuentran compuestas de las diversas etapas, en las cuales se requiere la presencia de distintos equipos. A continuación, se detalla el flujo del proceso y los equipos que involucra.

2.1.1 Flujo del proceso

El objetivo de la planta es obtener la mayor cantidad de concentrado posible. El esquema general del proceso de minerales metálicos, como el cobre, está bien definido y está compuesto por los siguientes módulos:

- **Perforación y/o explotación:** Es el punto de inicio del proceso y depende del tipo de yacimiento, pues la mina puede ser operada a tajo abierto o a socavón. En ambos casos, en esta etapa ocurre la primera fragmentación del mineral (tamaño de partícula >150 mm). (METSO, 2004).
- **Chancado:** es el primer proceso mecánico de reducción de tamaño. La distribución y cantidad de etapas de chancado varía de acuerdo al tamaño de alimentación que acepta la etapa de molienda primaria. En el caso a tratar, luego de las chancadoras primarias, el mineral es reducido hasta un tamaño de particular menor a 150 mm. La selección de

equipos de chancado depende de condiciones operacionales, tamaño de alimentación, capacidad, dureza, entre otras (METSO, 2004). En la figura 5 se observan distintos tipos de chancadoras usadas en la industria.

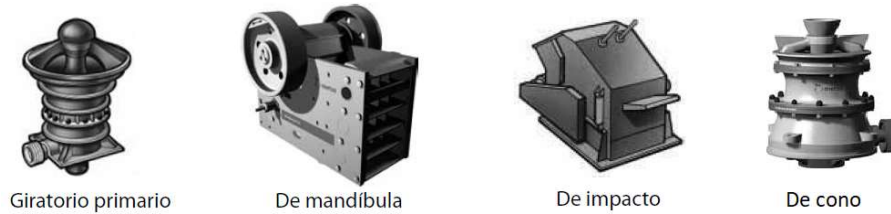


Fig 5. Tipos de chancadoras
Fuente: (METSO, 2004)

- Harneado: El proceso de reducción de tamaño de las chancadoras y molinos no es muy exacto, pues muchas de las fracciones descargadas no alcanzan la dimensión deseada. Posterior a las chancadoras habitualmente están presente los harneros (figura 6), estos equipos realizan la clasificación de tamaños mediante un patrón geométrico.

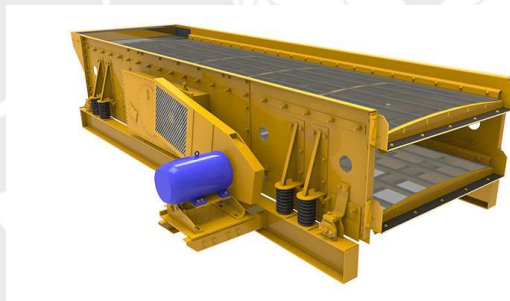


Fig 6. Harnero

Fuente: <https://www.dismet.com/productos/zarandas-horizontales/>

- Molienda: Para aislar las partículas que contienen mineral de las que no, los cristales de roca deben ser molidos lo suficientemente finos para pasar a la etapa de enriquecimiento (Schlesinger et al., 2011). El producto final es denominado polvo mineral. En este punto participan diferentes tipos de molinos, tales como molinos de barras, de bolas, autógenos y semi autógenos (figura 7). El tamaño máximo de la partícula resultante de este subproceso es de 74 micras (Romero Baylón, Flores Chávez, & Arévalo, 2014).



Fig 7. Molinos semi autógenos.

Fuente:(METSO, 2004)

- **Enriquecimiento:** Este subproceso se realiza mediante celdas de flotación y su objetivo es la separación las partículas del mineral valioso, denominado pulpa, de las mermas, conocidas como relaves. Esta separación se basa en las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas de las partículas de mineral. Como resultado de las reacciones químicas del proceso se generan burbujas de aire, a la cuales se adhiere el mineral recuperado, de esta manera “flotan” y forman una capa de espuma en la superficie. (Schlesinger et al., 2011). En la figura 8 se aprecia este proceso de manera gráfica.

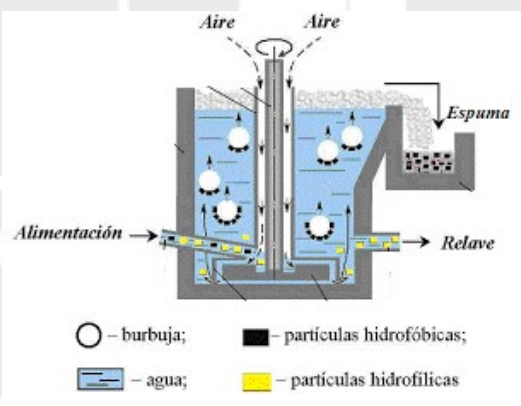


Fig 8. Proceso de separación en celdas de flotación.

Fuente: <http://gladiolo1.blogspot.com/2018/01/fundamentos-de-la-teoria-de-flotacion.html>

- **Refinamiento:** Etapa en la que se trata el relave y el concentrado húmedo resultantes del módulo anterior. En cuanto al mineral, se seca el producto para que este sea transportable. Por otro lado, el deshecho es tratado correctamente para reducir el impacto ambiental. En la figura 9 se muestra un espesador, el cual contribuye a la separación sólido – líquido, existen también otras técnicas como la sedimentación y el secado a presión o a calor (METSO, 2004).

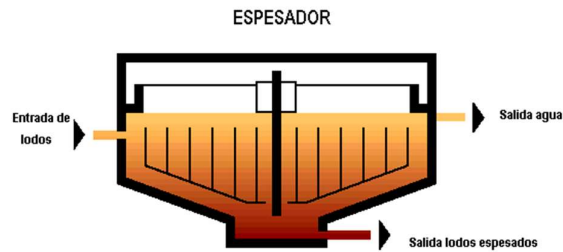


Fig 9. Espesador
Fuente: (Perez De La Cruz, 2007)

- Transporte de materiales: refiere a las tecnologías encargadas del movimiento del flujo del mineral (en seco). Incluye equipos responsables del transporte, apilamiento y alimentación. En el caso a tratar, estarían incluidos la faja transportadora y sus alimentadores (METSO, 2004). En la figura 10 se muestra el flujo del procesamiento de mineral de cobre. En ella se aprecian las etapas previamente mencionados, entre estas es necesaria la presencia de equipos de movimiento y traslado.

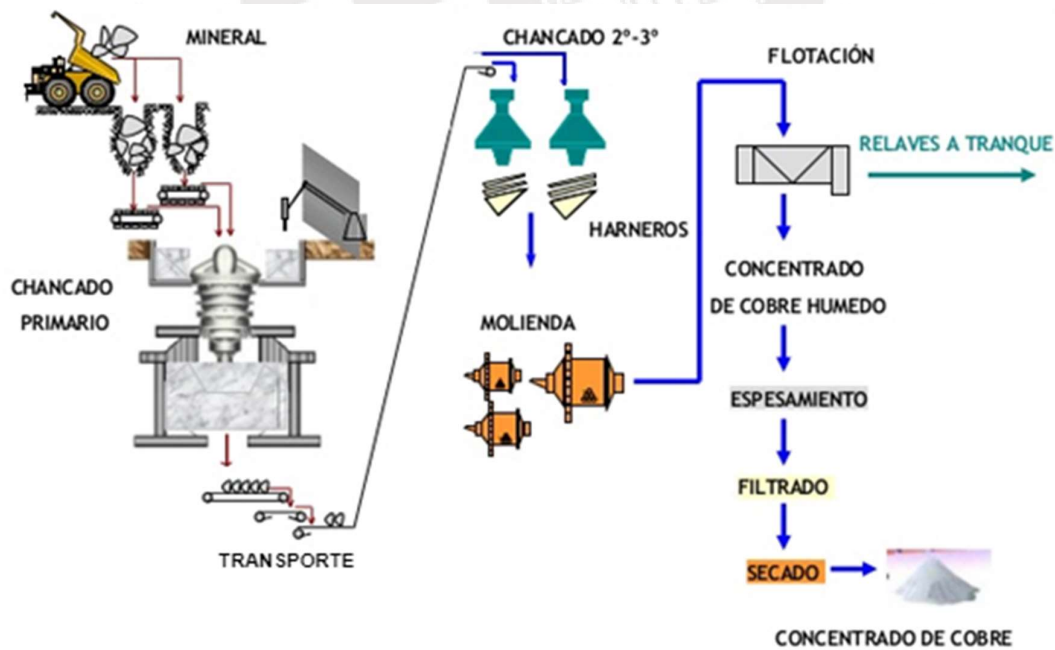


Fig 10. Flujo de proceso para la concentración de cobre.
Fuente: (METSO, 2004).

2.1.2 Clasificación de equipos y transporte de materia

Los equipos de transporte pueden clasificarse en dos grandes grupos: los de procesamiento de rocas (diámetro > 150 mm) y los de procesamiento de mineral (diámetro < 74 micras). En las figuras 11 y 12 se muestra el detalle y niveles de sistemas de equipos de cada grupo.



Fig 11. Nivel de sistemas en procesamiento de rocas.
Fuente: (METSO, 2004).

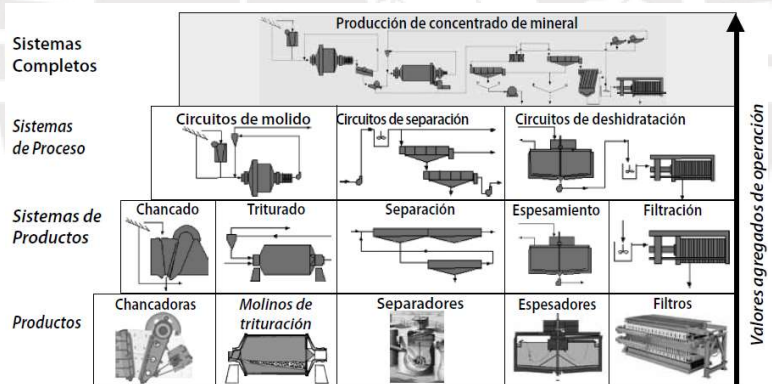


Fig 12. Nivel de sistemas en procesamiento de minerales.
Fuente: (METSO, 2004).

Es importante acotar que los procesos analizados en el presente trabajo corresponden al transporte de materiales secos. Sin embargo, es sabido que la mina cuenta con equipos para el transporte de materiales húmedos tales como bombas de lodos, válvulas, tuberías y accesorios. Estos equipos son fundamentales en el procesamiento general y participan de forma transversal en todas las etapas del proceso (METSO, 2004).

2.2 Productos y equipos usados en la industria

La presencia de equipos y sistemas móviles en los yacimientos mineros es primordial. Las fajas transportadoras suelen cubrir tramos extensos entre las diferentes estaciones de trabajo. Son la mejor opción de transporte de material, ya que reducen el uso de maquinaria pesada como grúas, camiones de descarga, etc. Esto significa: menor emisión de gases y polvo en el medio ambiente, flexibilidad en el proceso, mayor seguridad en el trabajo, ahorro en costos de mantenimiento de carreteras y vehículos, entre otros. A continuación, se muestran algunos equipos comerciales usados para la alimentación, descarga y traslado de roca mineral.

2.2.1 Alimentadores de placas – *Apron feeders*

Conocidos también como alimentadores de placas o de bandejas, poseen un diseño robusto y de alta resistencia para manejar las cargas de choque pesadas. Como menciona la empresa Metso en su catálogo web (Metso, s/f), sus equipos cuentan con bandejas profundas de manganeso fundido, cadenas y rodillos de retorno de tipo tractor, carriles de impacto que limitan la deflexión de las bandejas, entre otros componentes, que garantizan larga vida útil y productividad continua. Por todas estas características los alimentadores de placas destacan en la manipulación de materiales que están fuera del alcance de otros alimentadores.

Los alimentadores de placas suelen utilizarse debajo de chancadoras, tolvas, silos o equipos que descarguen material pesado, para actuar como un amortiguador para los equipos posteriores. Por otro lado, su accionamiento puede ser electromecánico o hidráulico, ambos sistemas trabajan a bajas revoluciones; sin embargo, la variación de su velocidad es fundamental para el control de flujo de alimentación hacia el próximo equipo. En la figura 13 se muestra un *apron feeder* y sus partes principales.

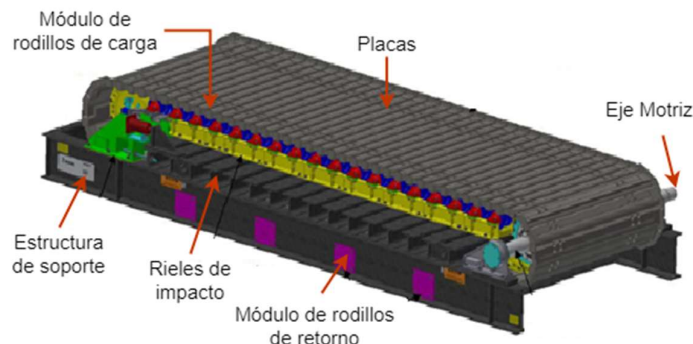


Fig 13. Alimentador de placas Metso.
Fuente:(Metso, 2011)

La tabla 1 muestra los detalles técnicos de los alimentadores de placas usados en el caso a estudiar. Se aprecia que su velocidad de operación es considerablemente baja.

Tabla 1. Datos técnicos de Apron Feeder AF60

| | Apron feeder AF60 |
|-------------------------|----------------------------|
| Marca | Metso |
| Material | Mineral de cobre triturado |
| Capacidad TPH | 5263 |
| Accionamiento principal | Variable - Hidráulico |
| Potencia requerida (kW) | 123.8 |
| RPM Máximo | 7.19 |

2.2.2 Faja transportadora

Es el equipo encargado del transporte de mineral seco a granel más utilizado en las plantas concentradoras. Este transportador es alimentado por los alimentadores de placas mencionados previamente. Su longitud es extensa y conecta el área de chancado primario con la zona de apilamiento de material, conocido como *stock pile*.

En el caso trabajado, se considera una faja transportadora que funciona con una caja de engranajes y es accionada por un motor eléctrico controlado por un variador de frecuencia de 710 kW. La faja cuenta con una zona de pesaje dinámico, interruptores mecánicos, sistema de frenos, detector de metales, además de otros accesorios.

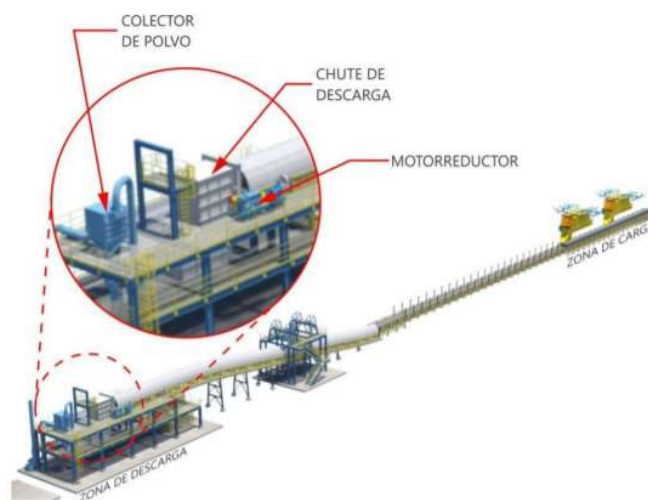


Fig 14. Vista de faja transportadora
Fuente: (Ortega Ñahuin, 2017)

En la figura 14 se muestra el transportador usado en el caso a estudiar, se identifican en la imagen algunas de sus partes. Asimismo, de acuerdo a los manuales de operación del equipo, se muestran las principales características de la faja en la tabla 2.

Tabla 2. Datos técnicos de faja transportadora

| | Transportador 0220-CVB-0001 |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Marca | ThyssenKrupp Robins |
| Material | Mineral de cobre triturado |
| Longitud (m) | 206 |
| Ancho (m) | 2.13 |
| Capacidad tph | 9 400 |
| Velocidad (m/s) | 4.5 |
| Potencia del motor reductor (kW) | 710 |

2.3 Sensores

Los alimentadores de placas y la faja transportadora requieren de sensores para la adquisición de datos de sus variables físicas. Las variables a medir en el proyecto son peso y velocidad; a continuación, se describen y comparan las tecnologías de medición más utilizadas para estos casos.

2.3.1 Sensores de velocidad

- Interruptor de velocidad: Este instrumento es comúnmente usado para la medición de velocidad en elementos rotativos, requieren poco o ningún mantenimiento, y su instalación en transportadores es directa. Su rango de medición de velocidades oscila entre 0,1 m / min y 1000 m / min. Por lo general no se requiere hardware adicional (“Conveyor belt speed switch for mining industry - EE Publishers”, s/f). En la figura 16 se muestra la disposición de este sensor en una faja transportadora.

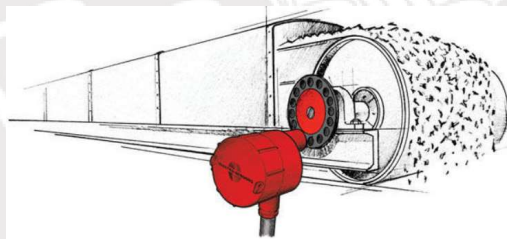


Fig 15. Speed Switch.

Fuente: (“Conveyor belt speed switch for mining industry - EE Publishers”, s/f).

- Tacómetro: El sensor consiste en una rueda giratoria que está en contacto con la parte baja de la faja, girando en sentido de retorno. Este dispositivo es eficiente y preciso para cintas transportadoras de baja velocidad (velocidades menores 4 m/s). Los tacómetros de alta gama incluyen un post-procesamiento de datos, integrando la velocidad de la cinta y la masa instantánea del marco de pesaje (Azo Sensors, 2018).



Fig 16. Tacómetro

Fuente: <https://www.powderbulksolids.com/instrumentation-control/new-%E2%80%9Ctraction-action%E2%80%9D-belt-speed-sensor>

En la figura 16 se muestra la ubicación del instrumento en una faja transportadora. La estructura de soporte de la rueda giratoria se apoya sobre la base de uno de los polines de carga, de modo que esté en contacto con la superficie baja de la cinta. A partir de la velocidad de giro detectada en la rueda se determina la velocidad de transporte ya que son proporcionales.

- Encoder: Es un dispositivo electromecánico que tiene múltiples aplicaciones en la industria, por tal motivo está presente en sistemas robóticos, de corte, de clasificación, de empaquetado, de transporte, entre otros. Los encoders poseen un disco con muestras que al girar y moverse generan una señal, la cual es enviada a un dispositivo de control. A partir de esta señal se puede determinar la posición, velocidad o dirección del elemento a sensar. Se muestra este instrumento en la figura 17.



Fig 17. Encoder industrial.

Fuente: <https://www.indiamart.com/proddetail/incremental-solid-shaft-encoder-14969939948.html>

Pueden ser incrementales o absolutos. Las señales incrementales no proporcionan información específica acerca de la posición, a diferencia de los encoders absolutos que tiene un código único para cada posición. Los encoders destinados a aplicaciones industriales suele trabajar a una corriente entre 60 y 80 mA y a 24 V. Asimismo leen entre 1000 a 3600 líneas por revolución, por lo que son muy precisos.

2.3.2 Sensores de peso

- Galgas extensiométricas: Usualmente se encuentran incorporadas en la parte inferior de placas de acero y caucho que se encuentran en la superficie de transporte. Este producto es ampliamente utilizado en la industria mecánica-eléctrica, química, construcción, entre otros campos; los valores de tensión son relacionados a magnitudes como fuerza, presión, desplazamiento, presión y torque (Martinez & Tapia, 2016).

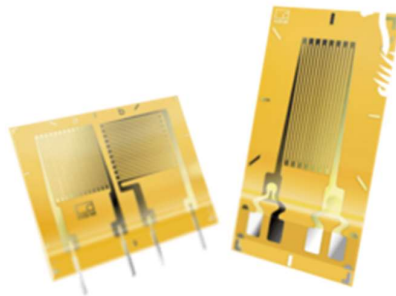


Fig 18. Galgas extensiométricas

Recuperado de: <https://www.hbm.com/es/7836/galgas-extensometricas-de-lamina-tecnologia-y-tipos/>

Las galgas extensométricas son conductores eléctricos que generalmente se ubican adyacentes a una película, esto se puede apreciar en la figura 18. En caso la película sufra una fuerza de tracción compresión, esta, junto con los con las galgas, se alarga o acorta. Como consecuencia, se producen variaciones en la resistencia de los conductores eléctricos. Dichas variaciones permiten calcular la deformación, ya que el aumento del valor de la resistencia es directamente proporcional a la elongación del dispositivo. A partir de la deformación se puede obtener las magnitudes deseadas por el sistema (HBM, 2019).

- Sensores capacitivos: Estos dispositivos suelen tener forma de almohadilla o de banda. Las almohadillas generalmente comprenden tres láminas de acero, separadas por un material dieléctrico de goma suave. La compresión de la almohadilla por el peso del material produce un aumento en la capacitancia, que se interpreta como una masa (Koniditsiotis, 2006). Se observa el instrumento en la figura 19.

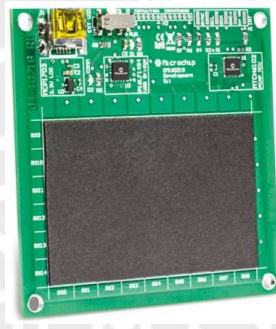


Fig 19. Almohadilla capacitiva

Fuente: <https://uk.rs-online.com/web/p/interface-development-kits/8252502/>

- Transductores piezoeléctricos: El cable piezoeléctrico generalmente se monta en un canal de aluminio. El canal se coloca en la superficie de la faja. El paso del material a pasar sobre el cable genera una señal de corriente que es proporcional a la masa del material (Fernández, 2018) . Se muestra el dispositivo en la figura 20.



Fig 20. Sensor piezoeléctrico

Fuente: <https://www.hbm.com/es/6810/guia-de-seleccion-de-sensores-piezoelctricos/>

- Celdas de carga: Comúnmente usadas para la medición de peso en fajas transportadoras y sistemas de transporte de material a granel. En muchos casos, existe un controlador exclusivo que mapea las variables de peso y velocidad en la faja, esta información se comparte con un controlador de nivel superior, sistemas SCADA, sistemas ERP u otros equipos periféricos (AEBELT, s/f). En la figura 21, se muestra la disposición de un arreglo de celdas de carga en uno de los polines, estas se montan sobre un bastidor que sujeta al rodillo por los extremos, comúnmente se le denomina como puente de carga.

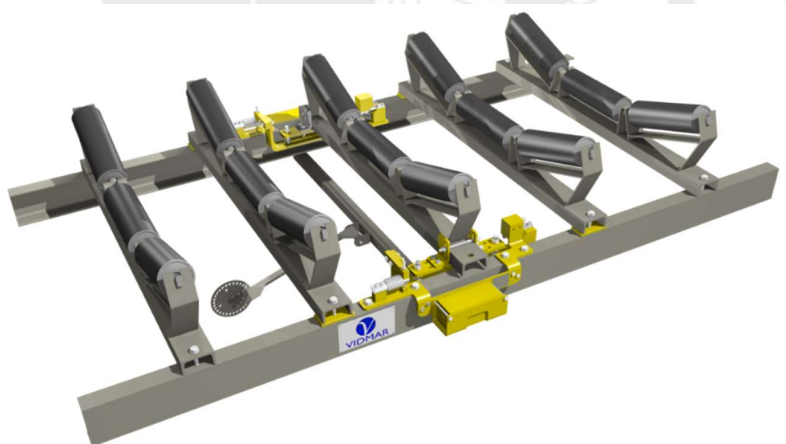


Fig. 21. Puente de carga de una faja transportadora

Fuente: (AEBELT, s/f).

En la tabla 3, se muestra una comparación entre los diferentes tipos de sensores mencionados, se consideran algunos de los parámetros más importantes:

Tabla 3. Comparación entre sensores de peso

| | Galgas extensiométricas (Acoplados a una bandeja) | Sensores capacitivos | Transductores piezoeléctricos | Celdas de carga |
|-------------------------------|---|---|-------------------------------|----------------------------|
| Instalación | Permanente, empotrados | Semipermanente, montados en la superficie | Permanente, empotrados | Semipermanente, empotrados |
| Tiempo de vida (años) | 10 | 5 | 3 | 15 |
| Temperatura de operación (C°) | -40 hasta 80 | -20 hasta 60 | -40 hasta 50 | -40 hasta 70 |
| Precisión | 85+- 5% | 85+-10 % | 80+-5% | 95+-5% |

2.4 Actuadores

Existen dos formas convencionales de accionar los equipos de transporte, mediante un accionamiento hidráulico o uno electro-mecánico.

2.4.1 Motor hidráulico

Un motor hidráulico (figura 22) es un actuador mecánico que transforma la presión de un fluido hidráulico en un par de torsión y desplazamiento angular, es decir, en rotación. Su funcionamiento es inverso al de una bomba hidráulica y se sugiere vaya acompañado de un sistema de lubricación. Suelen ser empleados por que brindan un par muy grande a velocidades de giro pequeñas en comparación con los motores eléctricos (Ferreyros, 2001).



Fig. 22. Motor Hidráulico

Fuente: https://hfphydraulic.com/motor_hidraulico_charlynn_serie_2000_3895.php

Existen tres tipos de motores hidráulicos en el mercado; de engranajes, de paletas y de pistones. El principio de funcionamiento de los dos primeros es muy similar, se caracterizan por ser de un tamaño más reducido y por su capacidad de trabajar a altas velocidades, pero con bajo de par. Por otro lado, los motores de pistones son los más utilizados en la industria, pues consiguen mayores potencias trabajando a altas presiones. Dependiendo de la posición de los pistones respecto al eje, estos motores pueden ser de pistones axiales o radiales (Castellón et al., 2015). En la tabla 4, se contrasta algunos de los parámetros más relevantes en la selección de estos motores:

Tabla 4. Comparación entre motores hidráulicos

| | Motor de engranajes | Motor de pistones axiales | Motor de pistones radiales |
|--|---------------------|---------------------------|----------------------------|
| Par de giro | Bajo | medio | Alto |
| Presión nominal (bar) | Hasta 280 aprox. | Hasta 400 aprox. | Hasta 250 aprox. |
| Velocidad de rotación máxima (rev/min) | Hasta 5000 aprox. | Hasta 10000 aprox. | Hasta 15 00 aprox. |

2.4.2 Motor eléctrico

Los motores eléctricos son máquinas que convierten energía eléctrica en mecánica. Su gran aplicación en las industrias se debe a la simplicidad de su construcción y diseño mecánico, además el uso de energía eléctrica se traduce en beneficios de costo, facilidad de transporte y limpieza (Gugliandolo & Ísmodes, 1989). En caso fueran de corriente continua su velocidad es controlada variando la corriente de entrada. Por otro lado, los motores de corriente alternan son controlados variando su frecuencia (TT Motor, 2017). Los motores DC son de un costo más elevado, pues necesitan de una fuente de corriente continua, sin embargo, se prestan a controles de gran flexibilidad y precisión. En la mayoría de aplicaciones en la industria se emplean motores AC, pues debido a su alimentación son significativamente más económicos, además requieren menos mantenimiento (Roydisa, s/f).

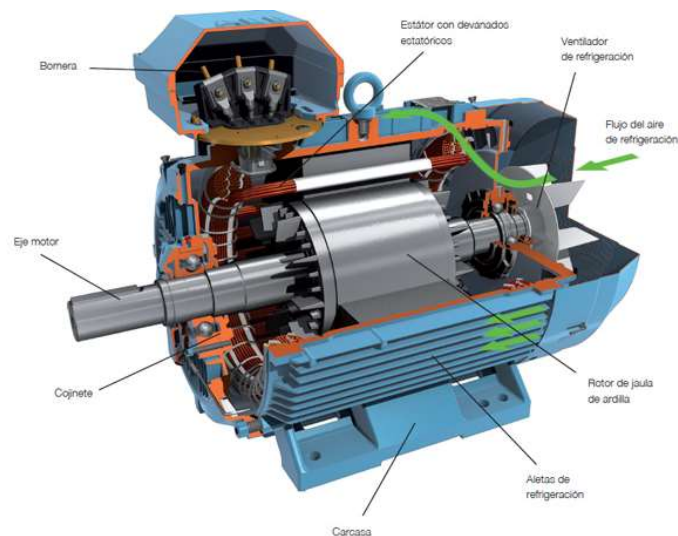


Fig 23. Motor de corriente alterna

Fuente: <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-acesorios/velocidad-del-motor-electrico-como-herramienta-de-diagnostico>

Existen dos tipos de motores de corriente alterna: síncronos o asíncronos. El nombre del primero de estos se debe a que tanto la velocidad del rotor como la del campo magnético son iguales. Son usados en máquinas que tienen carga variable y necesitan operar a velocidad constante. Por el contrario, el rotor en un motor asíncrono gira a diferente frecuencia que el campo magnético del estator. Estos motores, también son conocidos como motores de inducción y pueden ser de dos tipos: de rotor bobinado y de jaula de ardilla, el cual se muestra en la figura 23 (The Grid, 2018).

El motor tipo Jaula de ardilla es considerado el motor eléctrico por excelencia, pues es relativamente más barato, compacto, eficiente y de fácil mantenimiento. Una de sus principales desventajas es su elevado torque de arranque, por lo que suele estar acompañado de un sistema de arranque. Puede ser monofásico o trifásico, esto depende directamente de la fuente de tensión a utilizar. Los motores monofásicos habitualmente son usados en aplicaciones de baja potencia, que no superen los 3kW. Sin embargo, en el presente trabajo se requiere una alta potencia que permita el accionamiento de los equipos, por tal motivo se compara solo motores de corriente alterna en la tabla 5, resumiendo las características más importantes de los mismos.

Tabla 5. Comparación de motores eléctricos de corriente alterna

| | Motor de jaula de ardilla simple | Motor de doble jaula de ardilla | Motor de rotor bobinado |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Rendimiento | Muy bueno | Bueno | Muy bueno |
| Factor de potencia | Bajo | Bajo | Bajo |
| Par de arranque | Bajo | Bajo | Muy bueno |
| Capacidad de sobrecarga | Buena | Buena | Buena |
| Control de velocidad | Malo | Malo | Bueno |
| Mantenimiento | Excelente | Bueno | Malo |

En la selección de un motor eléctrico deben tenerse en cuenta los detalles particulares previamente mencionados. Se muestra a continuación los pasos y cálculos a considerar para la adecuada de selección de un motor tipo jaula de ardilla:

- 1) Se determina la potencia de funcionamiento a condiciones nominales (P_{est}):

$$P_{est} = P_{carga} / \eta$$

Donde:

P_{carga} = Potencia de carga nominal, η = rendimiento del mecanismo

La potencia de carga, P_{carga} , depende directamente del tipo de carga aplicado. El resultado de este cálculo es la potencia nominal que debería entregar el motor a la carga (Gugliandolo & Ísmodes, 1989).

- 2) Se determina la potencia mecánica real, multiplicando el valor de potencia previamente hallado por un factor de servicio C_S , usualmente son tomados en base a la experiencia del responsable de la selección.

$$P_{real} = C_S \cdot P_{est}$$

Este factor suele usarse en aquellas situaciones en las que se desconoce o varían mucho las necesidades de la carga y el ciclo de servicio. (Vargas-Machuca, 1990)

- 3) Escoger en base al catálogo del fabricante al motor cuya potencia sea igual o mayor que la potencia real, P_{real} , ya calculada. Las velocidades de los motores tipo jaula de ardilla suelen ser fijas. La selección del motor eléctrico ahora depende de este parámetro. Usualmente los valores de velocidad son cercanos 900, 1200, 1800 y 3600 RPM. En caso se necesite más torque a menor velocidad puede incluirse un reductor de engranajes que cumpla las especificaciones deseadas. Se escoge la alternativa que ofrezca la mejor combinación de costo, peso, tamaño, corriente de arranque; buscando la opción de valores menores (Gugliandolo & Ísmodes, 1989).
- 4) Verificar que el tiempo de arranque (t_{arr}) no excede los límites según la norma IEE.

$$t_{arr} = \frac{I_T \cdot N}{9.55 \cdot (T_M - T_C)}$$

Donde:

N= Velocidad de rotación en el punto de equilibrio (RPM)

T_M =Torque medio del motor durante el arranque.

T_C = Torque medio de la carga durante el arranque.

Según Alexandrov (Alexandrov, 1976), el torque medio del motor, T_M , se aproxima a:

$$T_M = (0.85)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (T_{min} + T_{max})$$

- 5) Pueden tomarse en cuenta parámetros como aceleración en el arranque o calentamiento. Finalmente se verifica la correcta elección del motor y su sistema de arranque de acuerdo a la tensión, frecuencia, toque de carga, etc. Asimismo, es recomendable realizar pruebas preliminares del motor en campo (Lobosco & Pereira, 1989).

2.5 Unidades de control

La automatización de los procesos requiere equipos capaces de procesar las variables de entrada para dirigir las tareas obteniendo las salidas deseadas del sistema. A continuación, se presentan algunas opciones:

- **Microcontroladores:** La aplicación de estos dispositivos es diversa, pueden ser usados en proyectos de automatización, proyectos educativos, instrumentos electrónicos, equipos médicos, equipos industriales entre otras aplicaciones. Sin embargo, su capacidad operativa es limitada, pues están concebidos para trabajos puntuales de un número reducido de tareas. Los microcontroladores ejecutan programas grabados en su memoria interactuando con el exterior mediante sus líneas de entrada y salida. Para aplicaciones de mayor envergadura es posible usar más de un microcontrolador, designando tareas específicas para cada equipo. Sin embargo, para proyectos de mayor complejidad como el del presente trabajo es recomendable usar equipos de control más robustos y de mayor confiabilidad (Valdés & Ramón, 2007). En la figura 24 se muestra un controlador Raspberry, uno de lo más microcontroladores más usados.

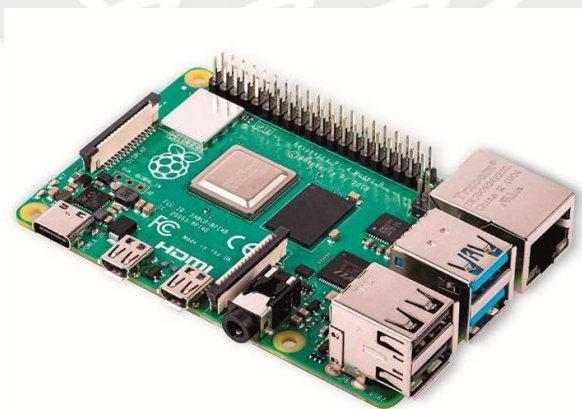


Fig 24. Microcontrolador

Fuente: <https://www.robot-advance.com/EN/art-raspberry-pi-4-model-b-4go-2640.htm>

- **Controlador Lógico Programable (PLC):** Es el controlador más usado en la industria, debido a su extenso campo de aplicación. Su uso se da fundamentalmente en aquellas instalaciones en donde se requiera un proceso de control, adquisición de señales y emisión de alarmas. En la figura 25 se muestra un PLC modular, el cual brinda la opción de expandir la capacidad del equipo en caso se requieran más operaciones, permite ampliar las entradas y salidas del sistema, así como la incorporación de módulos de comunicación o módulos especiales que se encarguen de operaciones específicas. Por otro lado, en el PLC compacto su configuración inicial no puede ser modificada, su uso es menos frecuente y se aplica para tareas pequeñas. (UNED, 2017).

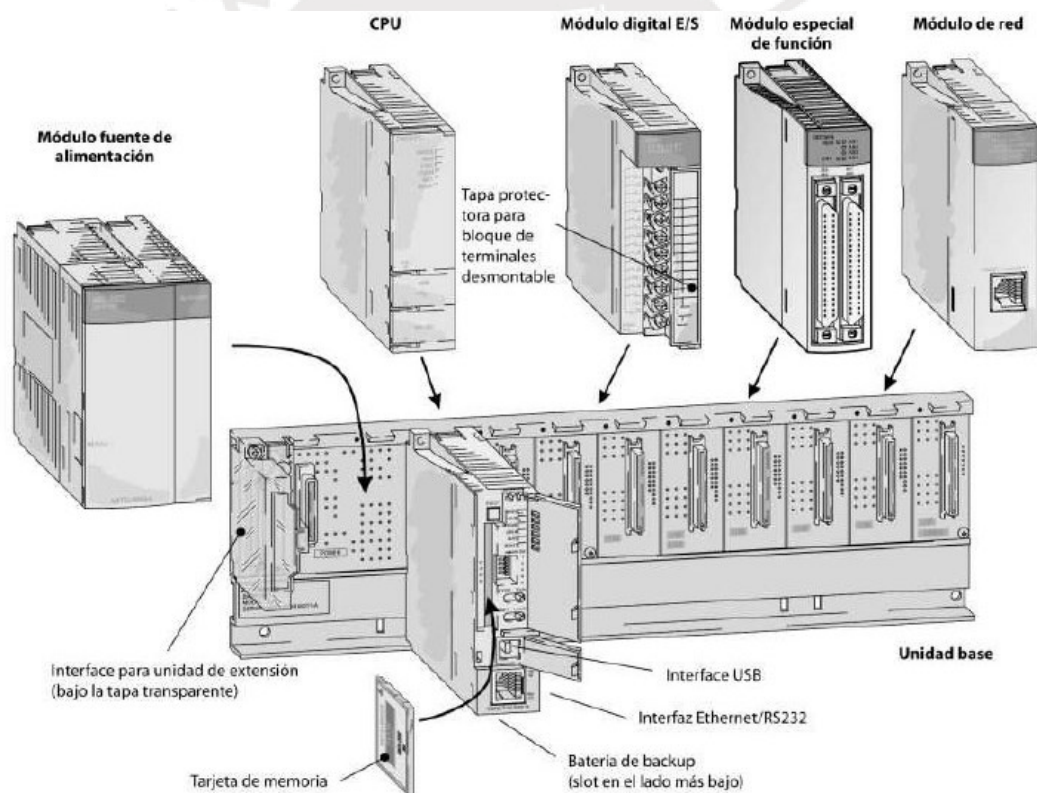


Fig 25. PLC y sus módulos

Fuente: <https://iguren.es/blog/que-es-un-automata-programable-plc/>

- Controlador DCS: Un sistema de control distribuido está compuesto por más de una unidad de control; por lo que la lógica de control y toma de decisiones no está centralizada. En la mayoría de los casos, los proveedores brindan sus equipos con su propio controlador o PLC, estos se integran al sistema de control distribuido y son gobernados por una unidad de control maestra. Además, el sistema DCS es un sistema redundante, pues copia o repite datos de carácter crítico como medida de prevención ante posibles fallas (Rockwell Automation, 2018).

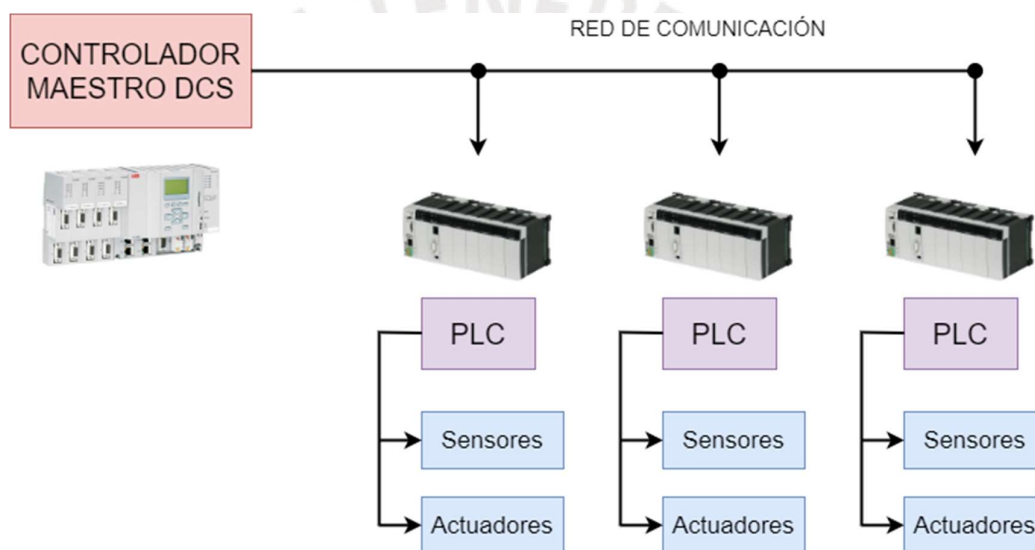


Fig 26. Sistema de control distribuido DCS
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a confiabilidad, un controlador DCS posee doble CPU por lo cual un desperfecto o falla en el proceso de operación no afectará a todo el sistema (Canelon, 2018). Se muestra en la figura 26 un esquema de control distribuido, donde el controlador maestro es el que gobierna el sistema.

- SCADA: Sus siglas refieren a Sistema de Adquisición de Datos y Control de Supervisión. Se encarga de recoger los datos de los sensores que se encuentran ubicados en la planta. Estos datos son recibidos por una unidad de almacenamiento o servidor y son enviados posteriormente hacia una computadora central para su procesamiento y toma de decisiones (Villajulca, 2011). En la figura 27 se muestra el esquema y distribución de diferentes equipos en un sistema SCADA.

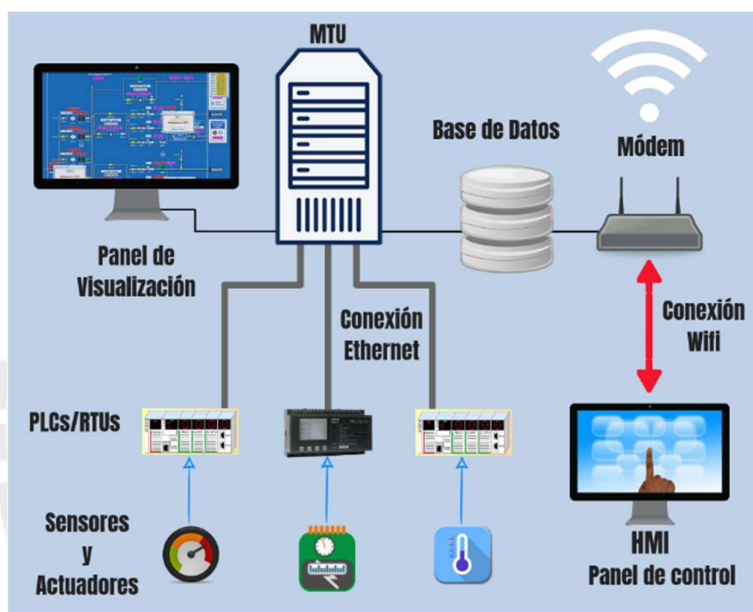


Fig 27. Sistema SCADA

Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/733453489295618101/>

2.5.1 Métodos y estrategias de control

A partir de la información recopilada de la empresa referencial para este trabajo, se realizó un diagrama de bloques del proceso, el cual se muestra en la figura 28.

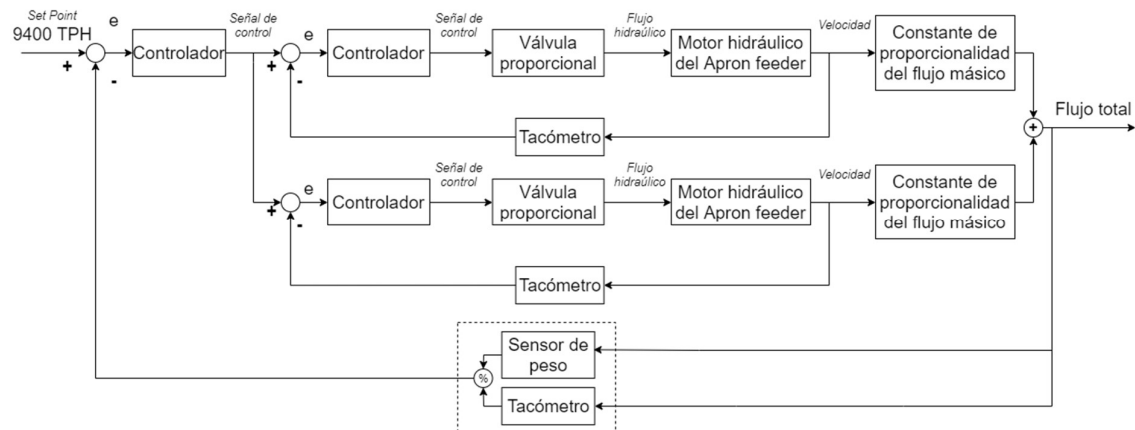


Fig 28. Diagrama de bloques del sistema

Fuente: Elaboración propia

En la figura 28 puede apreciarse la presencia de 3 lazos de control. Dos de ellos corresponden a los alimentadores de placas, cuya salida se dirige hacia un sumador dando como resultado el flujo total de cobre en el sistema. El tercer lazo corresponde a la comparación entre el flujo final y el punto de ajuste de 9 400 tph, valor límite de diseño de la faja transportadora. Las variables manipuladas son las velocidades de los alimentadores y la variable controlada es el flujo de mineral total que se transporta sobre la faja transportadora.

Para controlar el flujo de material en la faja transportadora será necesario aplicar diferentes estrategias de control. Para lograr este objetivo se usará un sensor de peso y un sensor de velocidad que retroalimentaran al sistema. Con esta información el controlador deberá acercar la variable del proceso al punto de ajuste mediante la variación de la velocidad de los alimentadores de placas.

2.5.1.1 Patentes, tesis y trabajos de investigación

Existen en la actualidad diversas tecnologías aplicadas a sistemas de transportes similares al del presente trabajo. Con el fin de tener una referencia o punto de partida para el diseño conceptual, se muestran a continuación trabajos de investigación que buscan la optimización del control de flujo en sistemas transportadores.

- Artículo de investigación: *Sistema de pesaje dinámico de alta precisión basado en una cinta transportadora* (Gao & Pang, 2009)

Este artículo de investigación presenta un estudio de la corrección de errores de medida en el pesaje dinámico de una correa transportadora. Se analizan las causas de los errores para que puedan ser normalizados, además a partir de estos datos se crea un modelo matemático. Según H. Gao y W. Pang el área de medición es la clave para garantizar precisión del sistema de pesaje dinámico. El área de medición está compuesta por una máquina de correa corta y un receptor de polines simple. El artículo demuestra que los errores se reducen, llegando a una precisión de hasta el 0.2%. En la figura 29 se muestra el sistema de pesaje dinámico y los componentes mencionados.

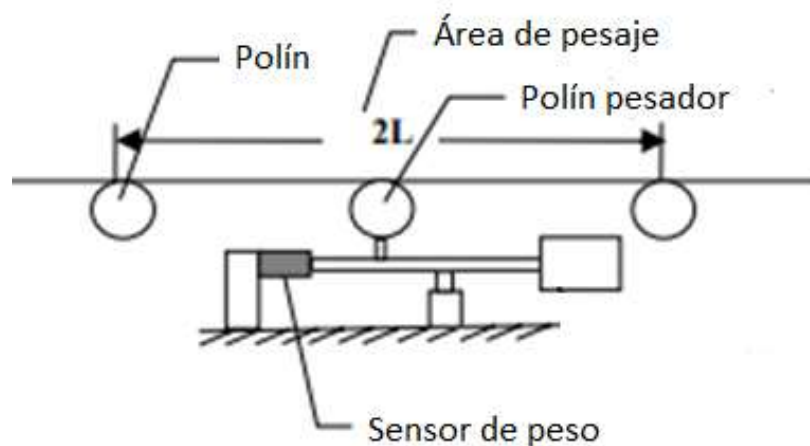


Fig 29. Área de medición del peso en el transportador
Fuente: (Gao & Pang, 2009).

- Tesis: *Selección e instalación de sistemas de pesaje en fajas transportadoras para minería* (Eli & Mondragón, 2003)

Esta tesis brinda información descriptiva de sistemas de pesaje en fajas transportadoras, su principio de funcionamiento y componentes. Estos sistemas son diseñados para ser instalados en los transportadores de banda para el pesaje de sólidos a granel. El sistema consiste en una estructura de apoyo estática y una dinámica. La primera soporta al equipo en sí, mientras que la segunda registra el peso mediante celdas de carga.

La estructura dinámica recibe fuerzas verticales proporcionales a la carga del material que pasa sobre ella. Mientras tanto las celdas de carga del sistema proporcionan una señal electrónica que es enviada al controlador; asimismo se mide la velocidad de la faja con un tacómetro, el cual envía también una señal de proceso. Finalmente, el controlador procesa obtiene el flujo instantáneo de mineral a partir de ambos datos. Es así como se realiza el pesaje dinámico sin parar la producción. En la figura 30 se muestra el sistema explicado.

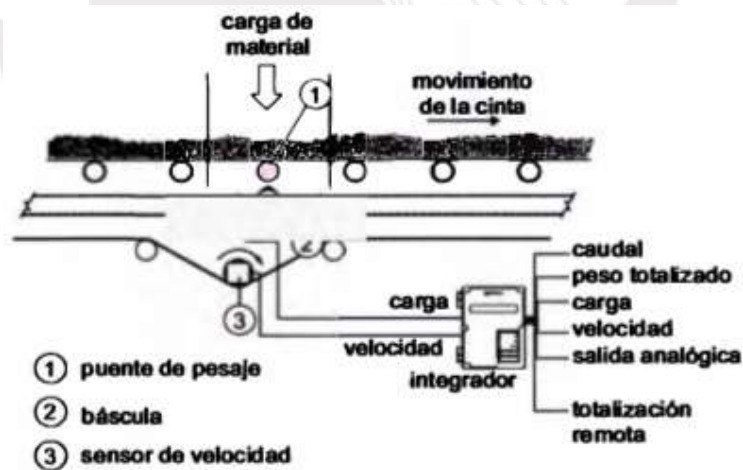


Fig 30, Sistema de pesaje dinámico.

Fuente: (Eli & Mondragón, 2003)

- Artículo de investigación: *Filtro Kalman para un sistema de pesaje dinámico* (Halimic & Balachandran, 1995)

En este trabajo se estudia sistemas de pesaje dinámico basados en celdas de carga (figura 30). El peso del material trasladado se estima filtrando la señal eléctrica de la celda de carga. La mejora en este filtrado aumenta la velocidad de pesaje y mejora la precisión de la medición. En este trabajo se propone el filtro de Kalman como filtro de peso para el sistema de pesaje dinámico. Asimismo, se incluyen modelos matemáticos de la celda de carga para examinar el funcionamiento del filtro Kalman propuesto.

Se comparan y presentan una simulación y resultados experimentales. Los resultados obtenidos muestran que el filtro de Kalman puede proporcionar una alternativa efectiva al método convencional, especialmente cuando el sistema no es lineal y se incorpora ruido de baja frecuencia en el ancho de banda de la señal útil.

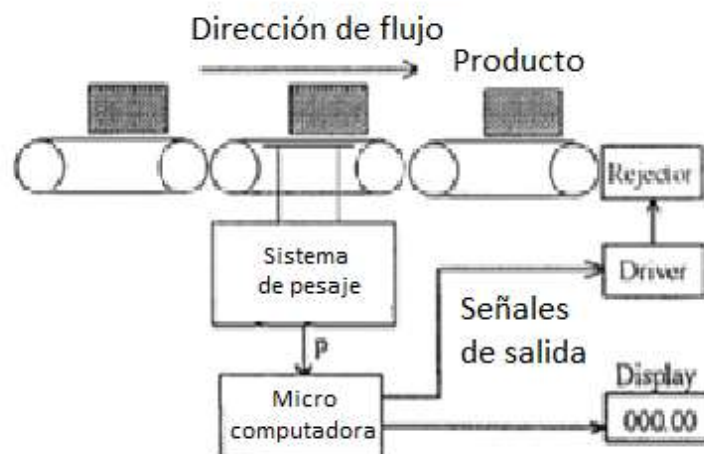


Fig 31. Proceso de pesaje.

Fuente: (Halimic & Balachandran, 1995).

- Artículo de investigación: *Optimización del rendimiento de un alimentador de pesaje mediante modelado y simulación* (N. P. Mahajan, Deshpande, & Kadwane, 2016)

Se estudia nuevamente un sistema alimentador de pesaje, un transportador integrado con un puente de pesaje de correa y sensor de velocidad y accionado por un motor. Con el objetivo de controlar el caudal sólido, la velocidad de la banda es modificada para compensar el flujo de alimentación en la faja.

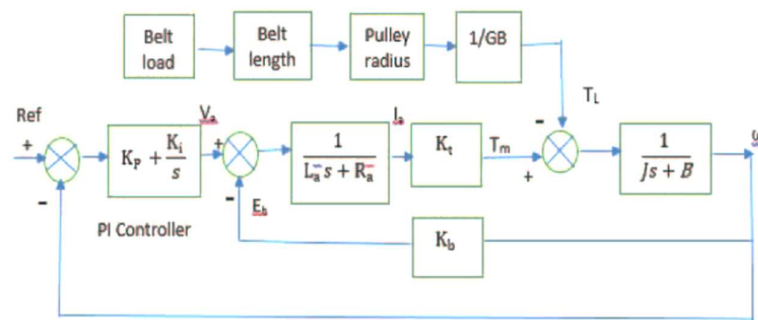


Fig 32. Modelo no lineal del Sistema de pesaje.
Fuente: (N. P. Mahajan et al., 2016)

Según el artículo, estos sistemas suelen modelarse como un sistema de segundo orden que ignora la no linealidad debido a zona muerta y fricciones en el engranaje del motor. Cualquier imprecisión en la velocidad de alimentación sólida afecta la calidad y eficiencia del proceso posterior. En la figura 32 se muestra el modelo del sistema electromecánico de un alimentador de pesaje industrial, a partir de este se estudia la respuesta dinámica del sistema usando los softwares Matlab y Simulink. Los resultados de la simulación se usan para proponer un innovador controlador PI de tiempo discreto retroalimentado que mejora el rendimiento de la máquina.

- Artículo de investigación: *Diseño del controlador PI de lógica difusa para superar la no linealidad de un sistema alimentador de pesaje de banda* (Nayana P. Mahajan, Kadwane, & Deshpande, 2017)

El objeto de estudio es un transportador de correa plana de velocidad variable diseñado para alimentar material a granel en el proceso de forma controlada (figura 33). Se mide el peso dinámico del material a granel en la correa con un puente de pesaje de correa y la velocidad de la correa se controla a compensar la variación de peso para que la velocidad de alimentación sea constante. El problema del control de velocidad de la correa es desafiante ya que la respuesta dinámica del sistema es no lineal y hay cambios frecuentes en la carga de la correa debido a la variación en el volumen características del material.

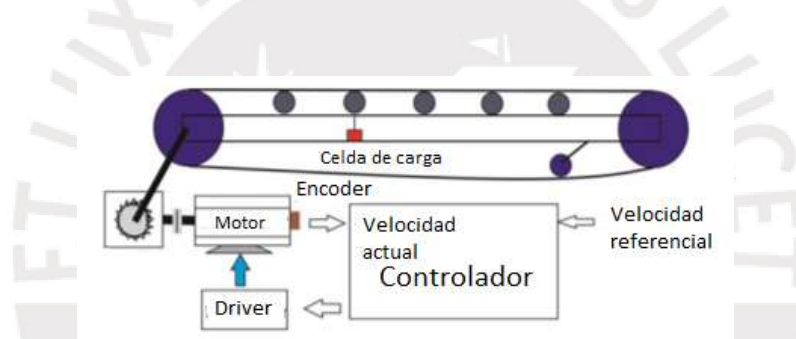


Fig 33. Diagrama esquemático del Sistema
Fuente: Kadwane, & Deshpande, 2017)

La precisión de control del peso de la correa depende completamente del rendimiento del controlador en proporcionando un control preciso de la velocidad de la faja. El controlador PI convencional no puede proporcionar un óptimo control debido a la no linealidad del sistema. Para abordar estos problemas, primero el sistema está modelado y rigurosamente simulado en abierto y circuito cerrado para tener una mejor idea de su respuesta no lineal. Posteriormente, se emplea el controlador PI difuso, los resultados indican una mejora sustancial.

- Patente: Sistema de pesaje utilizando una cinta transportadora con celdas de carga - US20140216894A1

Se presenta una cinta transportadora, un sistema de pesaje y un método para pesar los artículos transportados a través de la misma. La faja incluye una serie de celdas de carga incrustadas en módulos de correa para medir las fuerzas normales a la superficie de transporte. Las mediciones se transmiten desde la correa a un controlador. A diferencia de los anteriores documentos, en este sistema se requiere un pesaje de paquetes individuales sobre la faja, para lograr esto, el diseño incluye un sistema de visión que identifica artículos individuales transportados en la correa. Este sistema de visión determina qué celdas de carga corresponden a paquetes individuales y combina sus medidas para calcular el peso total sobre la faja transportadora. En la figura 34 se muestra el sistema en mención.

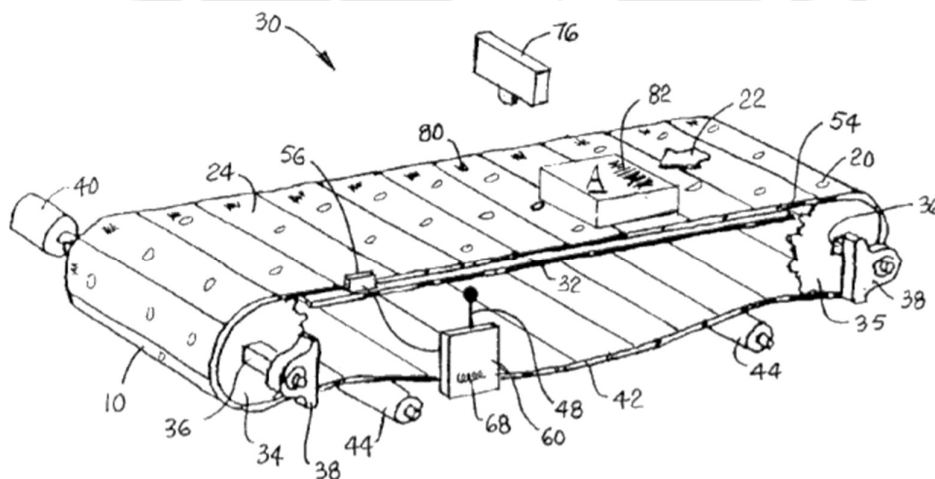


Fig 34. Sistema de pesaje patentado
Fuente: (Kim, Kim, You, & Yim, 2014)

- Artículo de investigación: *Aplicación de redes neuronales para sistemas de pesaje inteligente* (Almodarresi Yasin & White, 1999)

En el presente trabajo, los autores presentan un método para pesaje dinámico innovador que incluye en su diseño una red neuronal artificial de dos capas, capaz de predecir el valor final de flujo del sensor en un entorno ruidoso mientras todavía está en oscilación. El método propuesto se establece por teoría de análisis y es justificado por medio de softwares de simulación y datos medidos (Almodarresi Yasin & White, 1999). Se aprecia el diagrama de bloques general del sistema en la figura 35.

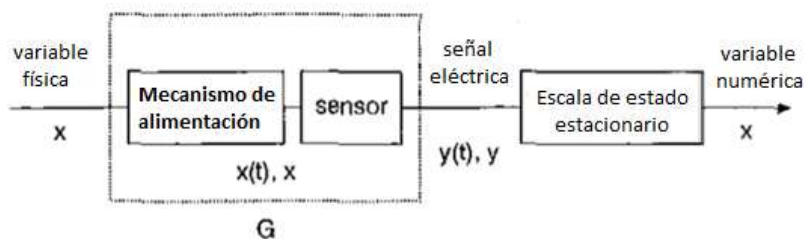


Fig 35. Diagrama de bloques del proceso.

CAPITULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL

3.1 Requerimientos del sistema

El proyecto requiere de ciertas exigencias demandadas por el cliente y las necesidades de la máquina misma, con el fin de cumplir con el objetivo general. Algunos de estos requerimientos son exigencias obligatorias que la máquina debe cumplir y otros, son deseos que se plantea para elaborar satisfactoriamente el diseño de la máquina.

| LISTA DE REQUERIMIENTOS | |
|--------------------------------|---|
| PROYECTO: | Diseño conceptual de un sistema de automatización que controla el flujo de mineral de cobre en una faja transportadora, cuyo límite son 9 400 tph |
| CLIENTE: | Empresa minera concentradora de cobre y molibdeno |
| Deseo o Exigencia | Descripción |
| E | Función principal: El sistema de control a desarrollar deberá controlar el flujo de mineral de cobre total, variando las señales de velocidad de los alimentadores de la faja. |
| E | Geometría: La distancia de medición entre el punto de alimentación de los feeders y el sensor de peso será tal que garantice una correcta medición del flujo de cobre. |
| D | Cinemática: El transporte de mineral en la faja transportadora debe ser continuo. No deben haber paradas imprevistas. |
| E | Cinemática: La velocidad de la faja será de 4.5 m/s |
| E | Flujo: El valor de flujo máximo de diseño debe ser de 9 400 tph. |
| D | Control: El valor de flujo debería alcanzar el valor del punto de ajuste en menor tiempo, para tener un mejor índice de producción. |
| E | Energía: La línea trifásica de alimentación es de 380V. |
| E | Energía: La línea monofásica de alimentación es de 220V. |

| | |
|---|--|
| E | Accionamiento: Los Apron feeders serán accionados por un motor hidráulico y la faja por un motor eléctrico. |
| E | Software: Se identificará el modelo matemático de la planta en Matlab |
| E | Software: Se simulará el proyecto en Matlab y Simulink |

3.2 Estructura de funciones

Se presenta un análisis del sistema definiendo las entradas y salidas de acuerdo a la lista de exigencias planteada anteriormente sin tener en cuenta los procesos internos (black box). Luego, se muestran las funciones del sistema, proponiendo los procesos con los que contará en la estructura de funciones.

3.2.1 Black Box

En la figura 26, se distinguen 3 tipos de entradas y salidas: materia, energía y señales. De acuerdo a las exigencias del sistema, existen dos entradas de materia que corresponden al mineral de cobre y una salida que equivale a la suma de ambas entradas. El fluido hidráulico y el aceite de engrase ingresan al sistema debido al accionamiento hidráulico del mismo, el cual necesita un sistema de engrase y lubricación. Para el funcionamiento de la máquina será necesario energía mecánica y eléctrica; como salida se tendrá energía transformada en ruido, vibración o calor. Por último, se consideran como entradas las señales de activación del sistema y una señal parada de emergencia; y como salida las señales de velocidad y peso, que dan lugar a la señal de flujo final, y una señal indicadora de emergencia.

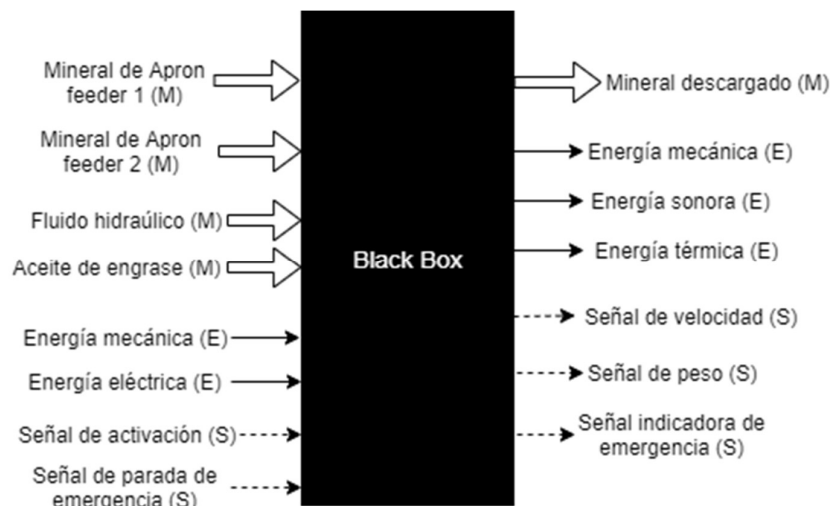


Fig 36. Black box del sistema
Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Lista de funciones

A continuación, se describen las funciones que contiene el sistema. Posteriormente, se presenta la estructura de funciones que integra los conceptos mostrados en esta sección.

- **Transportar mineral a través de alimentador 1:** Mecanismo que traslada la materia a lo largo del primer alimentador hacia la faja transportadora.
- **Transportar mineral a través de alimentador 2:** Mecanismo que traslada la materia a lo largo del segundo alimentador hacia la faja transportadora.
- **Transportar mineral sobre la faja hacia zona de apilamiento:** Mecanismo que traslada la materia hacia la estación de pesaje.
- **Accionar sistema de alimentación:** actuadores que generan el movimiento de los alimentadores de placas.
- **Accionar faja transportadora:** actuadores que genera el movimiento de la faja transportadora.
- **Energizar:** Dispositivo encargado de energizar componentes eléctricos tales como sensores y actuadores.

- ***Acondicionar energía para control:*** Componente que regula el voltaje ingresado a el voltaje que requiere el controlador.
- ***Acondicionar energía para actuadores:*** Componente que regula el voltaje ingresado a el voltaje que requieren los actuadores.
- ***Acondicionar energía para sensores:*** Componente que regula el voltaje ingresado a el voltaje que requieren los sensores.
- ***Sensar velocidad del alimentación:*** Sensor que detecta la velocidad de alimentación.
- ***Sensar velocidad de faja transportadora:*** Sensor que detecta la velocidad de la faja.
- ***Sensar peso:*** Sensores que miden el peso del mineral de la faja transportadora.
- ***Sensar parada de emergencia:*** Detección de movimiento de interruptor o a palanca en casos de emergencia.
- ***Controlar velocidad del alimentador:*** Controlador que regula variables asociadas a la velocidad del alimentador.
- ***Controlar velocidad de la faja transportadora:*** Controlador que regula variables asociadas a la velocidad de la faja transportadora.
- ***Controlar variables:*** Dispositivo de control usado para gobernar los sistemas de accionamiento y las variables de proceso tales como velocidad y peso.
- ***Notificar estado del proceso:*** Dispositivos que notifiquen el estado del proceso a través de alarmas e indicadores luminosos.
- ***Notificar emergencia:*** Dispositivos que notifiquen emergencias a través de alarmas e indicadores luminosos.

Con la lista de funciones previa y las entradas/salidas presentes en el black box se realiza la estructura global de funciones del sistema (Figura 37) dividido en 5 grupos: controlar, actuadores, energía, sensores, interfaz y sistema físico.

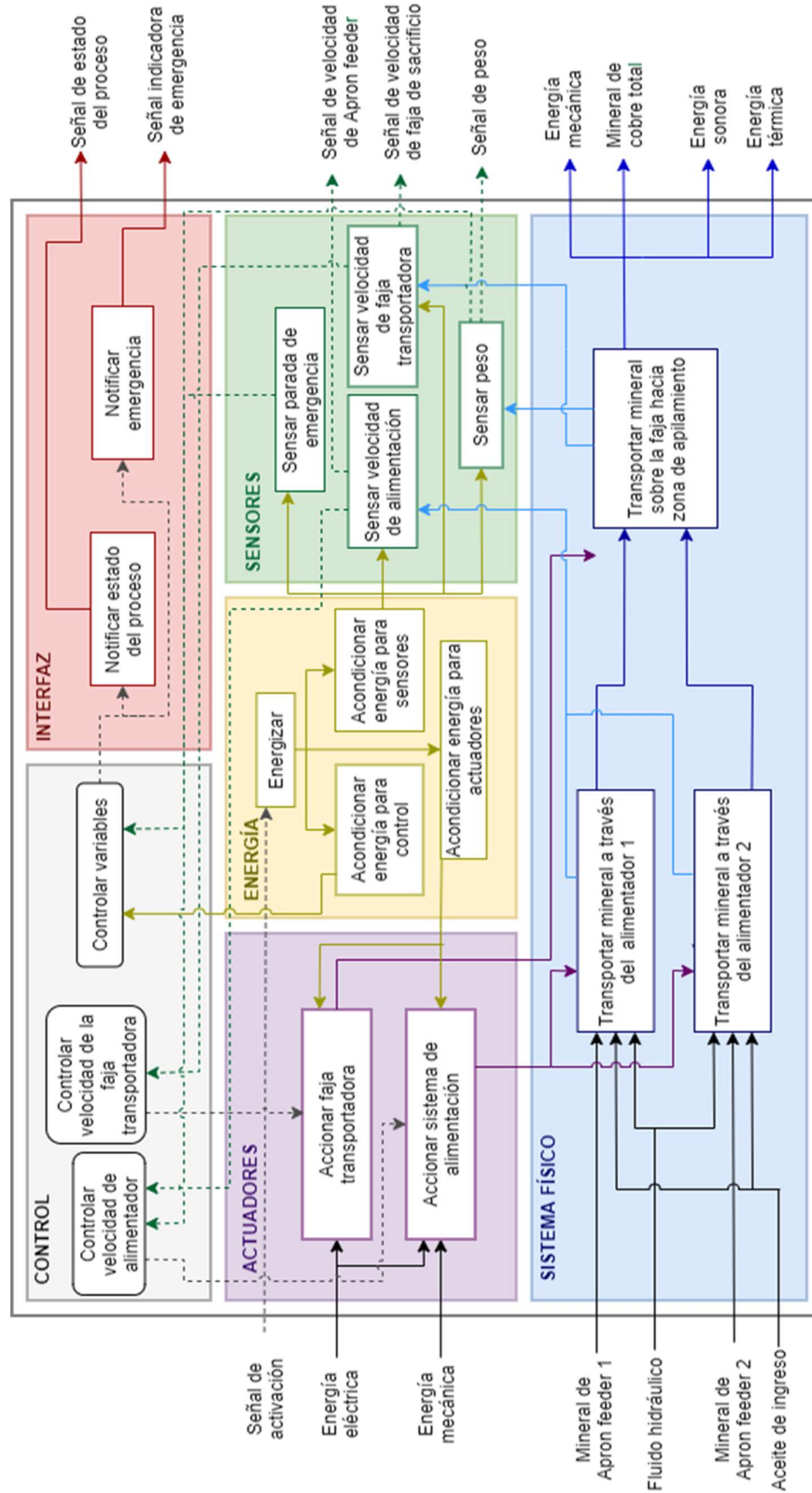
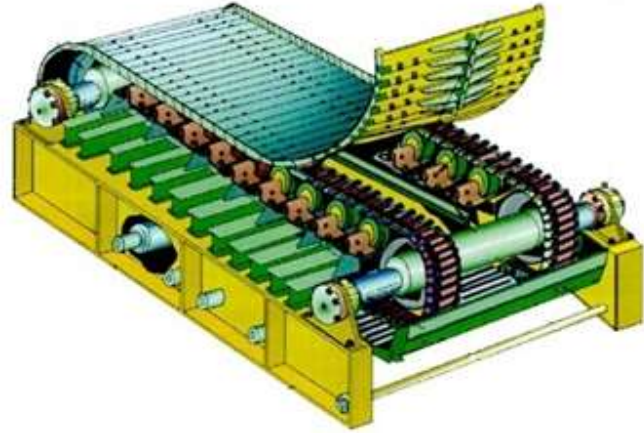

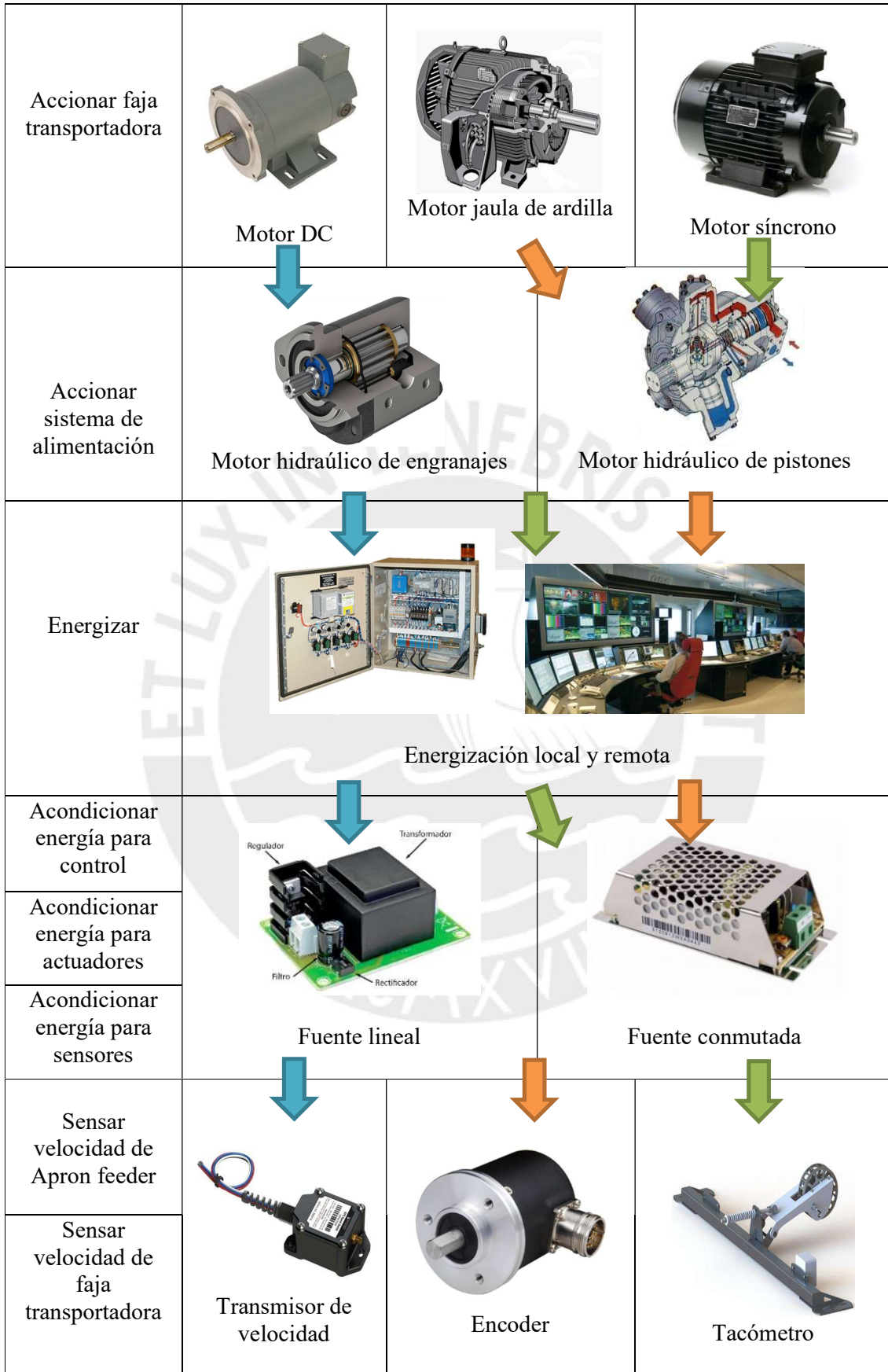


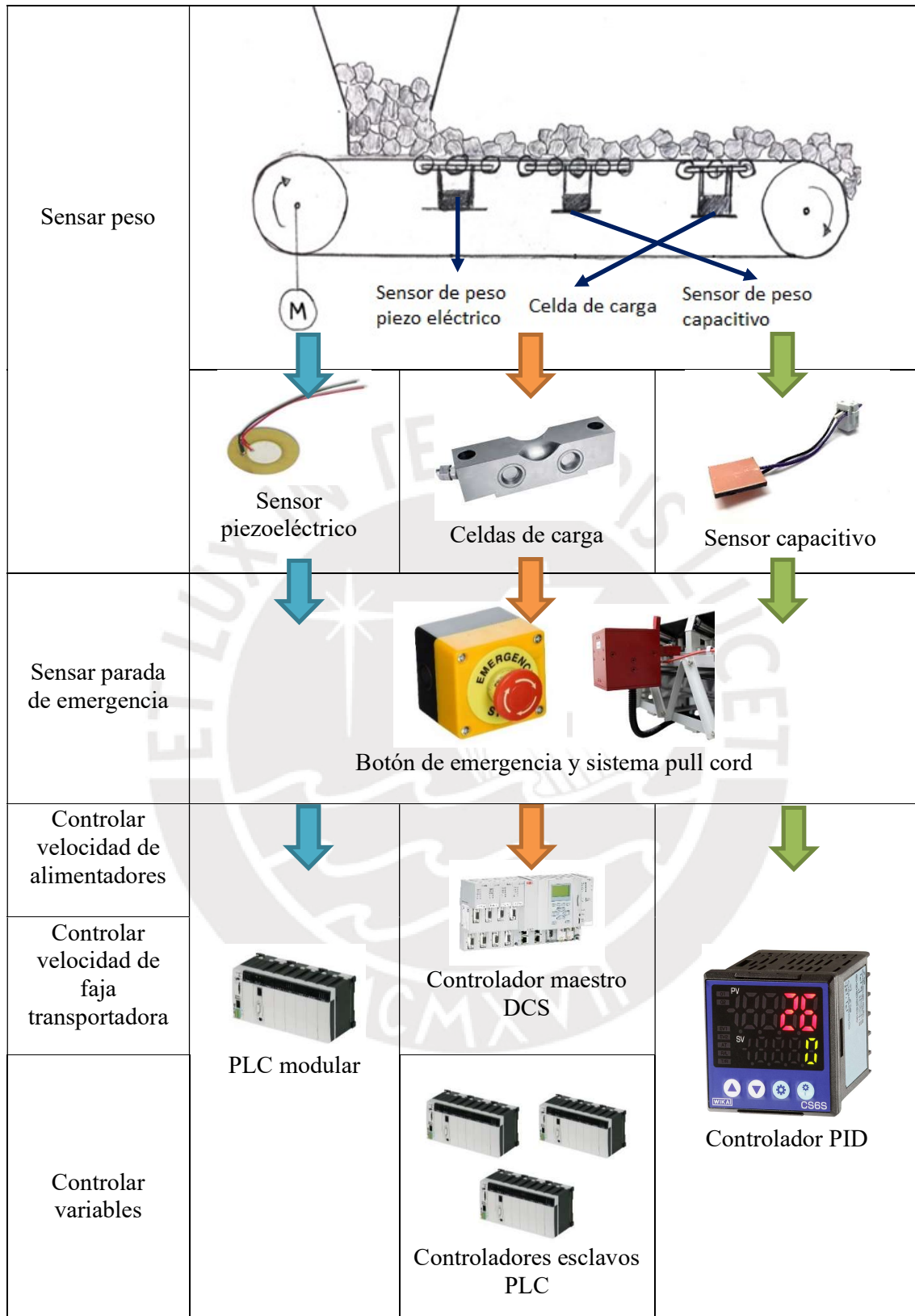
Fig 37. Estructura global de funciones
Fuente: Elaboración propia


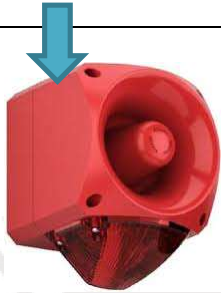
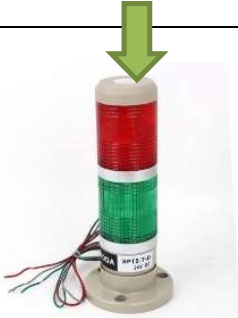
3.3 Matriz morfológica

Para cada función detallada en la estructura de funciones se plantean como máximo 3 opciones de solución en base a las tecnologías presentadas en el estado del arte. Cabe destacar que las funciones relacionadas al transporte de material deben hacerse a través de los alimentadores y la faja transportadora por exigencia del cliente. Las alternativas de solución se basan en el rediseño de la filosofía de control e instrumentación del sistema

| Función | Conceptos de solución | | |
|---|--|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Transportar mineral en alimentador 1 |  <p>Alimentador de placas</p> | | |
| Transportar mineral en alimentador 2 | | | |
| Transportar mineral sobre la faja hacia zona de apilamiento |  <p>Faja transportadora</p> | | |



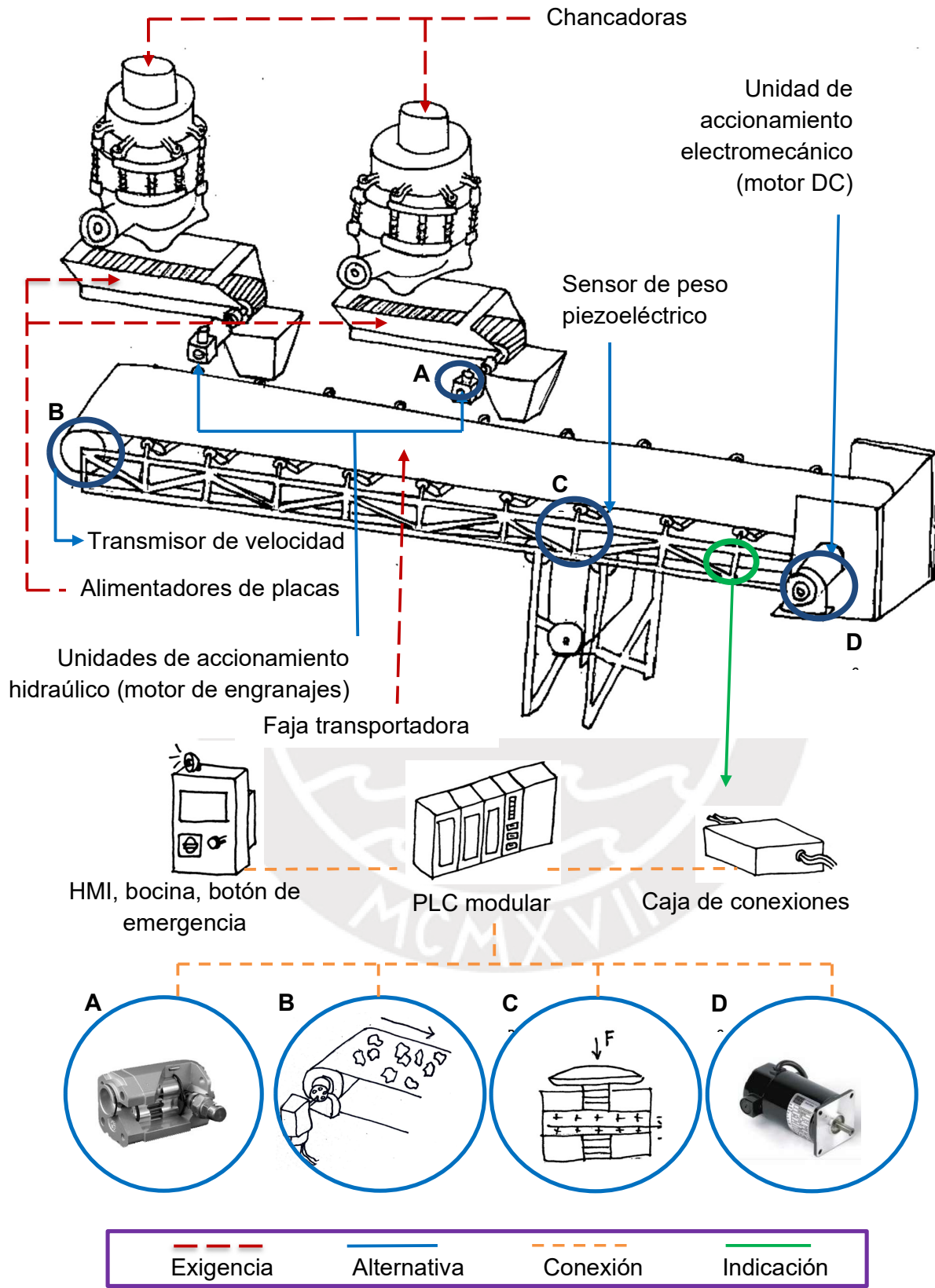


| | | |
|---------------------------------------|---|--|
| <p>Visualizar estados del proceso</p> |  | |
| <p>Notificar emergencia</p> | <p style="text-align: center;">HMI</p>  <p style="text-align: center;">Bocina industrial</p> |  <p style="text-align: center;">Baliza industrial</p> |

3.4 Conceptos de solución

A partir de las tecnologías escogidas en la matriz morfológica, se procede a describir cada solución. Se incluyen bosquejos a mano alzada y detalles por cada concepto. Se presenta un esquema general del sistema, las variaciones corresponden a la disposición y tipo de instrumentos utilizados, así las diferentes unidades de control. Se indica la tecnología correspondiente mediante flechas y también se muestran algunos elementos a, se incluye una leyenda para una mejor comprensión.

BOSQUEJO DEL CONCEPTO 1

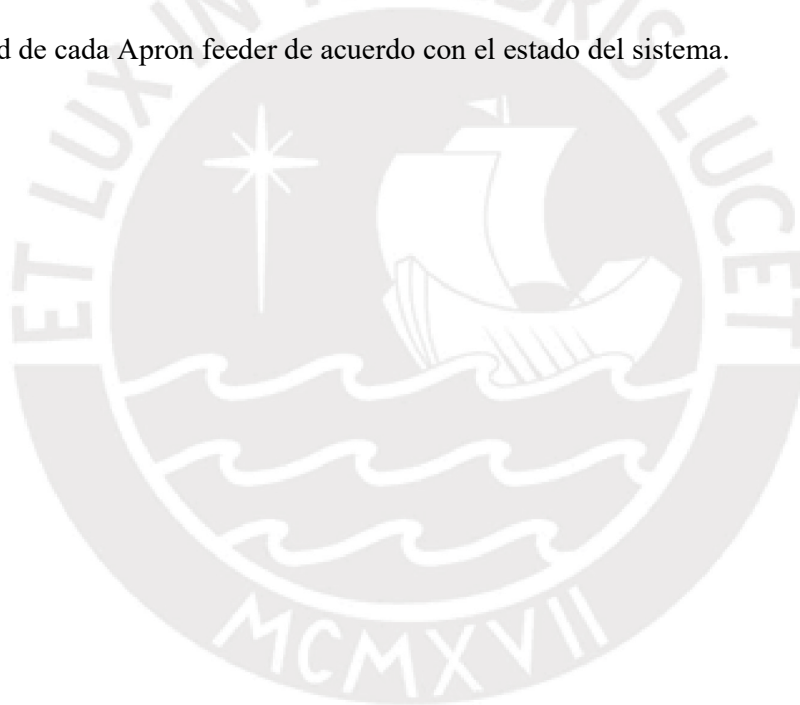


LEYENDA

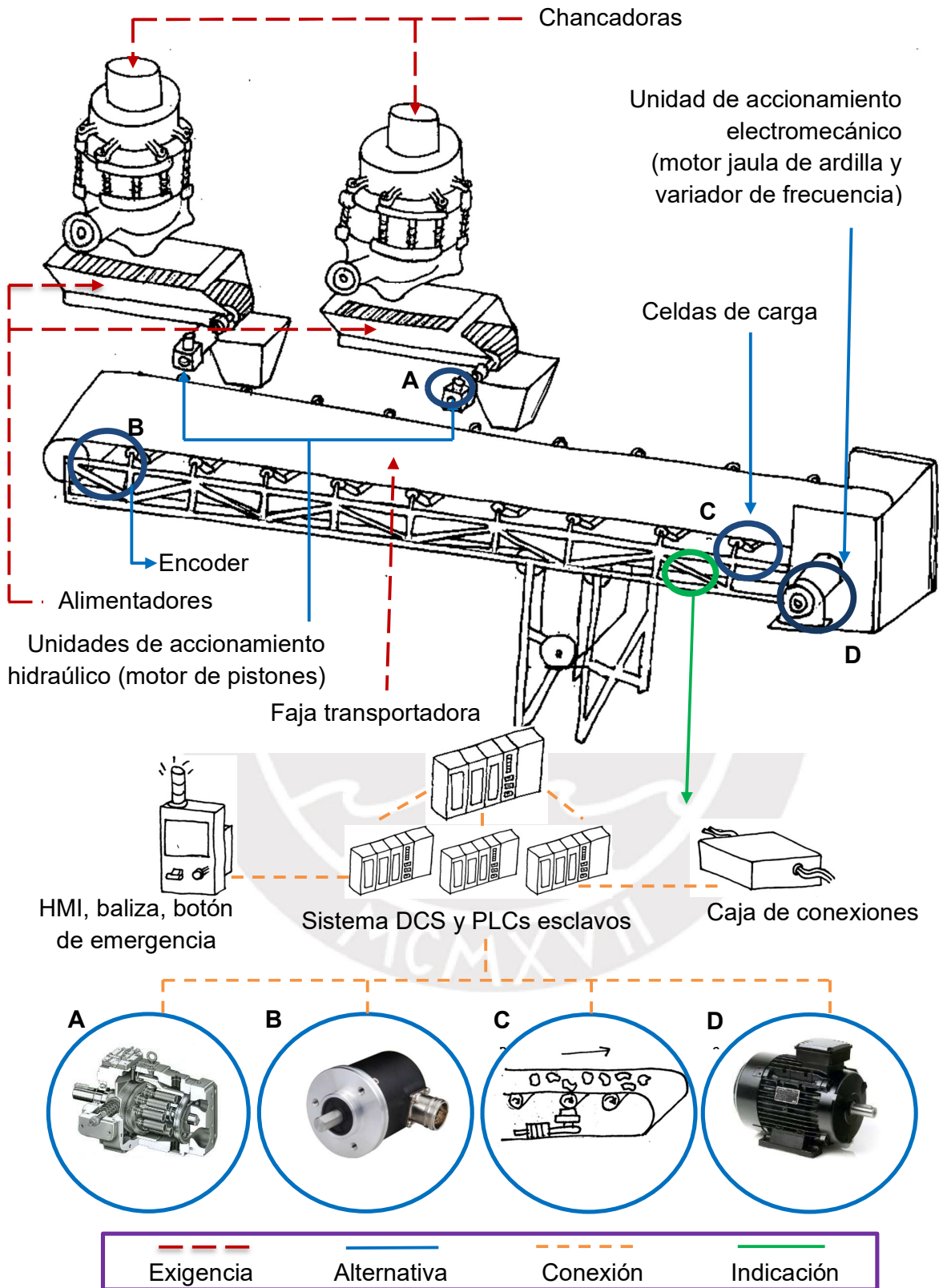
DESCRIPCIÓN DEL CONCEPTO 1

1. El sistema es controlado por un PLC modular, el cual se expande con módulos de comunicación, entrada y salida para satisfacer todos los requerimientos.
2. El sistema empieza con la descarga de mineral triturado de las chancadoras primarias sobre los alimentadores de placas.
3. Estos últimos se encuentran en serie, uno detrás de otro, y se encargan de trasladar el material a lo largo de sus bandejas. El movimiento de los alimentadores ocurre gracias a un accionamiento hidráulico, el cual consiste en un motor de engranajes.
4. Posteriormente, los alimentadores transportan las rocas hacia la faja transportadora. Previo a la precipitación de cobre sobre la faja transportadora, el mineral es vertido sobre unas tolvas de alimentación, las cuales reducen el impacto sobre la faja. Las velocidades de alimentación de cada alimentador de placas son independientes entre sí.
5. La conducción de mineral a través de la faja se debe a su motor DC, el cual requiere de una fuente de alimentación de corriente directa.
6. La velocidad de la faja transportadora es medida por un transmisor de velocidad que se encuentra en la cola del equipo.
7. El peso del material que transcurre al largo de la faja, es obtenido a partir de un sistema de pesaje dinámico compuesto por sensores piezoeléctricos, este se ubica a aproximadamente 10 metros de la zona descarga del segundo alimentador.

8. A partir de las magnitudes peso y velocidad, el controlador determina el flujo de mineral que es conducido a través de la faja transportadora.
9. El valor del flujo de material es comparado con la capacidad de diseño de la faja transportadora: 9 400 tph.
10. Si el valor de real del flujo es inferior a los límites de diseño, el controlador envía una señal que incrementa la velocidad de alimentación de los Apron feeders. Caso contrario, la velocidad de los alimentadores se ve reducida. El controlador regula el valor de la velocidad de cada Apron feeder de acuerdo con el estado del sistema.



BOSQUEJO DEL CONCEPTO 2

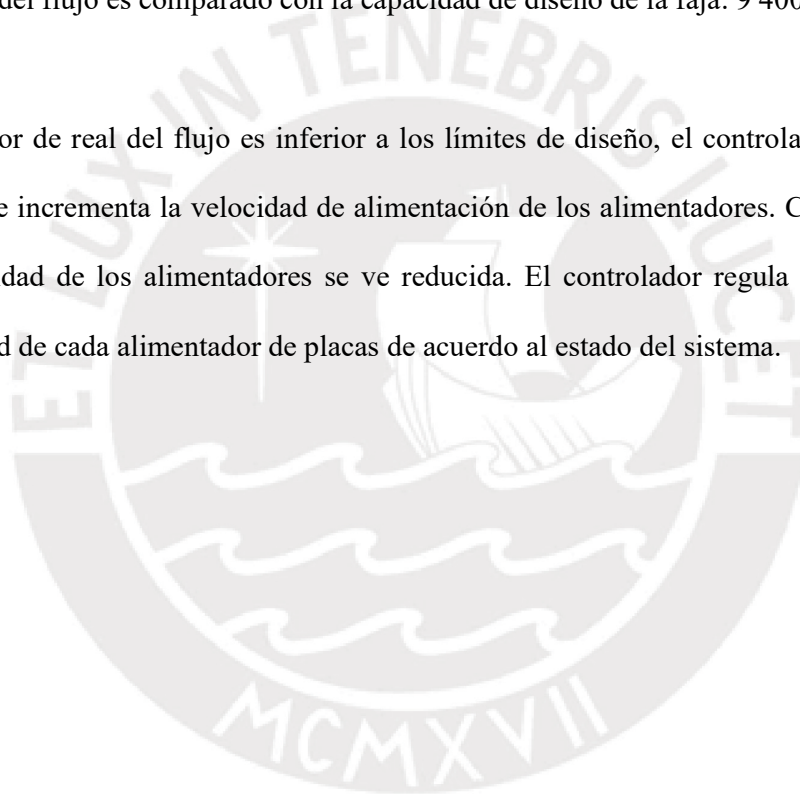


LEYENDA

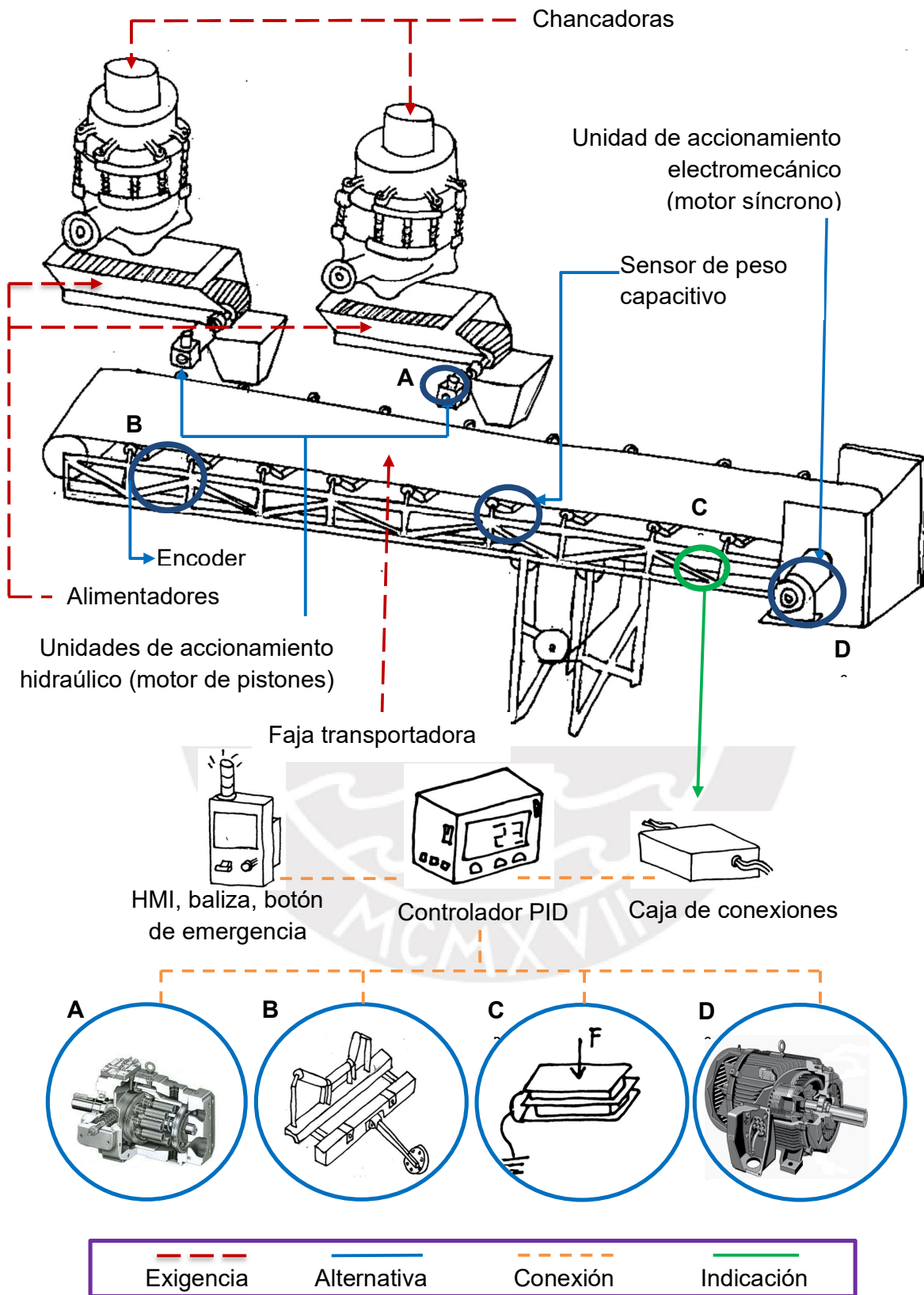
DESCRIPCIÓN DEL CONCEPTO 2

1. El sistema es controlado por un Controlador DCS (Sistema de control distribuido), en este sistema se integran los PLC que corresponden a los dos alimentadores y la faja transportadora. Por lo tanto, el sistema consiste en un controlador maestro y 3 esclavos.
2. El mineral triturado es entregado por las chancadoras primarias y se descarga sobre los alimentadores de placas.
3. Los alimentadores se encuentran ubicados en serie de forma lineal, uno detrás de otro. Estos son accionados gracias a un motor hidráulico de pistones axiales.
4. Posteriormente, los alimentadores transportan el mineral de cobre hacia la faja transportadora por medio de sus bandejas. La colisión entre las rocas y la faja transportadora es aminorada por la presencia de tolvas de alimentación, que se encuentran debajo de la cola de los alimentadores. Las velocidades de alimentación de los alimentadores son independientes entre sí.
5. Un motor asíncrono jaula de ardilla junto a un variador de frecuencia son los encargados de transportar la materia a lo largo de la faja hasta la zona de apilamiento
6. Se sensa la velocidad de movimiento de la faja transportadora por medio de un encoder. Este sistema de medición consiste en una rueda acoplada a un encoder, la cual capta el movimiento lineal de una de las superficies internas de la faja.

7. A 25 metros de la zona de descarga del segundo alimentador se ubica la zona de pesaje dinámico que consta de celdas de carga ubicadas debajo de los polines que comprenden el área de medición.
8. A partir de las magnitudes peso y velocidad, el controlador determina el flujo de mineral que es conducido a través de la faja transportadora.
9. El valor del flujo es comparado con la capacidad de diseño de la faja: 9 400 tph.
10. Si el valor de real del flujo es inferior a los límites de diseño, el controlador envía una señal que incrementa la velocidad de alimentación de los alimentadores. Caso contrario, la velocidad de los alimentadores se ve reducida. El controlador regula el valor de la velocidad de cada alimentador de placas de acuerdo al estado del sistema.



BOSQUEJO DEL CONCEPTO 3



LEYENDA

DESCRIPCIÓN DEL CONCEPTO 3

1. El sistema es gobernado por un controlador PID.
2. Las chancadoras primarias descargan sobre los alimentadores mineral de cobre triturado.
3. Los alimentadores se encuentran contiguos, y alimentan a la misma faja transportadora.
El traslado de material sucede gracias al motor hidráulico de pistones axiales.
4. El mineral viaja a través de los alimentadores hasta llegar a las tolvas de alimentación.
Finalmente, la materia cae sobre la faja transportadora. Cabe mencionar que las velocidades de alimentación de los alimentadores son independientes entre sí.
5. La faja transportadora es accionada por un motor asíncrono. El mineral es trasladado por medio de la faja hacia la zona de *stockpile*.
6. Se sensa la velocidad de movimiento de la faja transportadora por medio de un tacómetro de rueda medidora. Este sistema de medición consiste en una rueda acoplada a un tacómetro, la cual capta el movimiento lineal de una de las superficies internas de la faja.
La señal de velocidad es enviada hacia el controlador PID.
7. El peso del mineral es medido por medio de sensores de carga capacitivos. Estos se ubican justo debajo de la tolva alimentadora del segundo alimentador, con el propósito de evitar el uso de compensadores en el diseño de control del sistema.

8. A partir de las magnitudes peso y velocidad, el controlador determina el flujo de mineral que es conducido a través de la faja transportadora.
9. El valor del flujo de cobre es comparado con la capacidad de diseño de la faja: 9 400 tph.
10. Si el valor de real del flujo es inferior a los límites de diseño, el controlador envía una señal que incrementa la velocidad de alimentación de los alimentadores de placas. Caso contrario, la velocidad de los alimentadores se ve reducida. El controlador PID regula el valor de la velocidad de cada alimentador de acuerdo al estado del sistema.

3.5 Evaluación técnica - económica

Con el propósito de escoger la alternativa de solución más adecuada, se realizó una evaluación a cada concepto bajo criterios técnicos - económicos. La definición y valoración de los parámetros a evaluar se obtuvieron a partir de una breve encuesta realizada a ingenieros de ventas técnicas de Metso Perú, quienes cuentan con una sólida experiencia en asesoramiento técnico a empresas del sector metalúrgico. La descripción de los criterios técnicos y económicos se muestra a continuación:

3.5.1 Criterios técnicos de evaluación

- **Confiabilidad:** Según los estándares internacionales ISO/DIS 14224:2016 y IEC 60050-191:2011, este parámetro refiere a la “confianza” del sistema de activos o equipos para realizar sus funciones en determinadas condiciones durante un periodo continuo de tiempo preestablecido (ISO, 2016)(IEC, 2011).

- Disponibilidad: Es el consciente del tiempo en el cual el equipo está disponible para producir entre un tiempo predeterminado. El porcentaje restante corresponde a tiempos de preparación, tiempos de parada por mantenimiento correctivo, pausas por mantenimiento preventivo, entre otros (Christensen, 2005). Este criterio junto al de confiabilidad forman parte de la cotidianidad del mantenimiento, cuyo propósito es “garantizar” la continuidad operativa de los equipos e instalaciones (Mesa, Ortiz, & Pinzon, 2006).
- Facilidad de montaje: Refiere a la facilidad del montaje, ensamblado e implementación del sistema y sus partes.
- Precisión: Este criterio evalúa la dispersión de los valores medidos de flujo másico en la faja transportadora.
- Tiempo de respuesta: Capacidad de rapidez del sistema de corregir los valores de sobrecarga en la faja, aproximando el valor del flujo en tiempo real hacia el valor del punto de ajuste.

3.5.2 Criterios económicos de evaluación

- Costos de tecnología: Refiere a la fracción del presupuesto que está destinada a la adquisición de sensores, actuadores, controladores y mecanismos del sistema.
- Costos energéticos: El costo de la energía empleada para energizar los sensores, actuadores, controladores y mecanismos incluidos en cada concepto de solución. En concreto, gastos de energía del sistema funcionando en conjunto.
- Costos de mantenimiento: Monto que será utilizado en la compra de repuestos y piezas de desgaste para el mantenimiento de los equipos del sistema.
- Facilidad de adquisición de repuestos: Capacidad de conseguir de manera rápida y fácil los componentes necesarios para la fabricación de la máquina.

Los 3 conceptos de solución han sido calificados en un rango de valores del 1 al 5 según los parámetros previamente descritos. Los resultados de la evaluación se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Evaluación técnica - económica de conceptos de solución

| Parámetros técnicos | | Concepto 1 | | Concepto 2 | | Concepto 3 | | Solución ideal | |
|---|------|------------|------|------------|------|------------|------|----------------|------|
| Criterio | k | p | pxk | p | pxk | p | pxk | p | pxk |
| Confiabilidad | 0.25 | 3 | 0.75 | 4 | 1 | 3 | 0.75 | 5 | 1.25 |
| Disponibilidad | 0.25 | 2 | 0.5 | 4 | 1 | 2 | 0.50 | 5 | 1.25 |
| Facilidad de montaje | 0.10 | 2 | 0.20 | 2 | 0.2 | 3 | 0.30 | 5 | 0.5 |
| Precisión | 0.15 | 2 | 0.30 | 4 | 0.6 | 2 | 0.30 | 5 | 0.75 |
| Tiempo de respuesta | 0.25 | 3 | 0.75 | 4 | 1 | 3 | 0.75 | 5 | 1.25 |
| Suma | 1 | - | 2.5 | - | 3.8 | - | 2.75 | - | 5 |
| Valor relativo | | 0.50 | | 0.76 | | 0.52 | | 1 | |
| Parámetros económicos | | Concepto 1 | | Concepto 2 | | Concepto 3 | | Solución ideal | |
| Criterio | k | p | pxk | p | pxk | p | pxk | p | pxk |
| Costos de tecnología | 0.30 | 2 | 0.60 | 2 | 0.60 | 4 | 1.20 | 5 | 1.5 |
| Costos energéticos | 0.25 | 1 | 0.25 | 2 | 0.50 | 3 | 0.75 | 5 | 1.25 |
| Costos de mantenimiento | 0.30 | 2 | 0.60 | 3 | 0.90 | 2 | 0.60 | 5 | 1.5 |
| Facilidad de adquisición de componentes | 0.15 | 3 | 0.45 | 3 | 0.45 | 2 | 0.30 | 5 | 0.75 |
| Suma | 1 | | 1.90 | | 2.45 | | 2.85 | | 5 |
| Valor relativo | | 0.38 | | 0.49 | | 0.57 | | 1 | |

En gráfica 38, se observa que el concepto de solución número 3 es la alternativa que presenta un mayor equilibrio entre los criterios técnicos y económicos, mientras que la alternativa 2 presenta una ventaja considerable en el aspecto técnico frente a las otras opciones. Cabe resaltar, que el proyecto está destinado a una empresa del sector metalúrgico, por lo que se cuenta con una sólida espalda financiera. Por tal motivo, los aspectos técnicos son de carácter primordial en comparación a los criterios económicos.

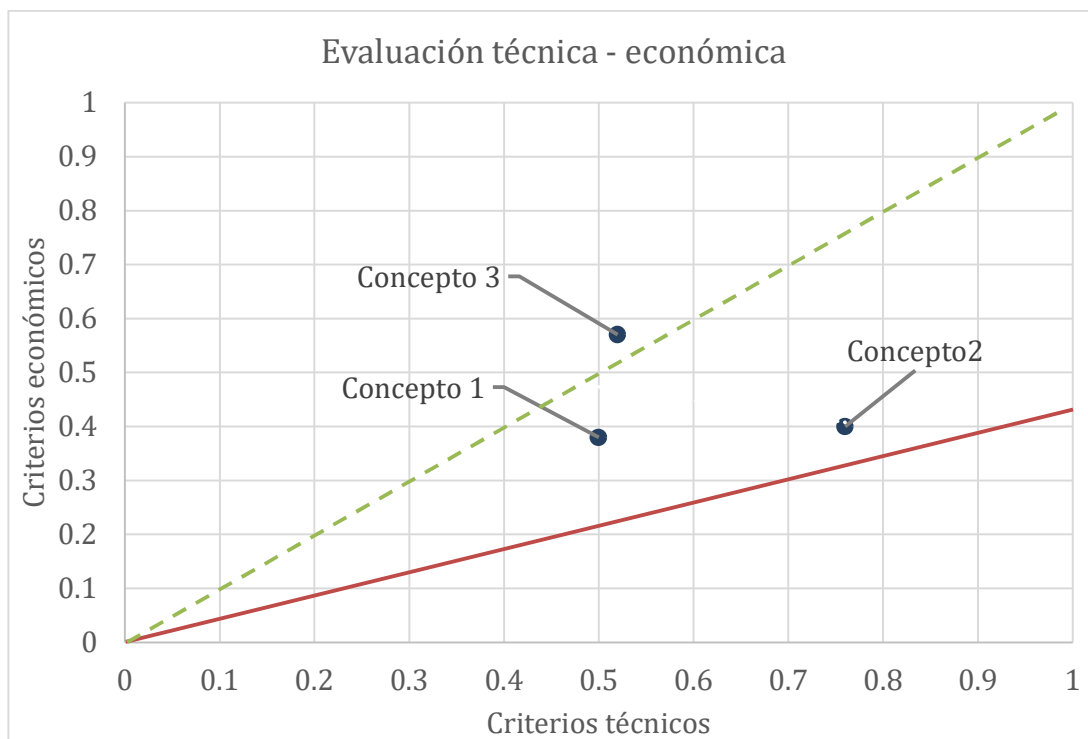


Fig. 38. Balance técnico – económico
Fuente: Elaboración propia

Con el propósito de obtener una valoración más acertada entre las alternativas de solución, se realizó un análisis similar al de costo-beneficio, técnica frecuentemente aplicada en la evaluación de proyectos, la cual brinda un esquema y un panorama más amplio en la toma de decisiones, permitiendo al evaluador escoger la opción más rentable para el proyecto (Aguilera, 2017). Para ello, se realizó otra encuesta a los ingenieros de Metso Perú, para reflejar cuán importante son los criterios técnicos en un proyecto de este tipo. De acuerdo con los resultados de la encuesta, los aspectos técnicos tienen una importancia equivalente al 70% en la selección del concepto, mientras que los criterios económicos representan un 30% de relevancia en la decisión. Para definir el peso de cada criterio se tomó en cuenta la viabilidad financiera y ciclo de vida del proyecto, considerando el valor agregado que podría brindar una alternativa con altos beneficios técnicos (Ortega, 2012). En la tabla 8, se puede observar los nuevos valores obtenidos:

Tabla 7. Valoración ponderada de los conceptos de solución

| | Valoración técnica | | | Valoración económica | | | Valor ponderado total |
|------------|--------------------|-----|------|----------------------|------|-------|-----------------------|
| | k | p | pxk | k | p | pxk | |
| Concepto 1 | 0.70 | 2.5 | 1.75 | 0.30 | 1.9 | 0.57 | 3.07 |
| Concepto 2 | | 3.8 | 2.66 | | 2.45 | 0.735 | 4.535 |
| Concepto 3 | | 2.6 | 1.82 | | 2.85 | 0.855 | 3.605 |

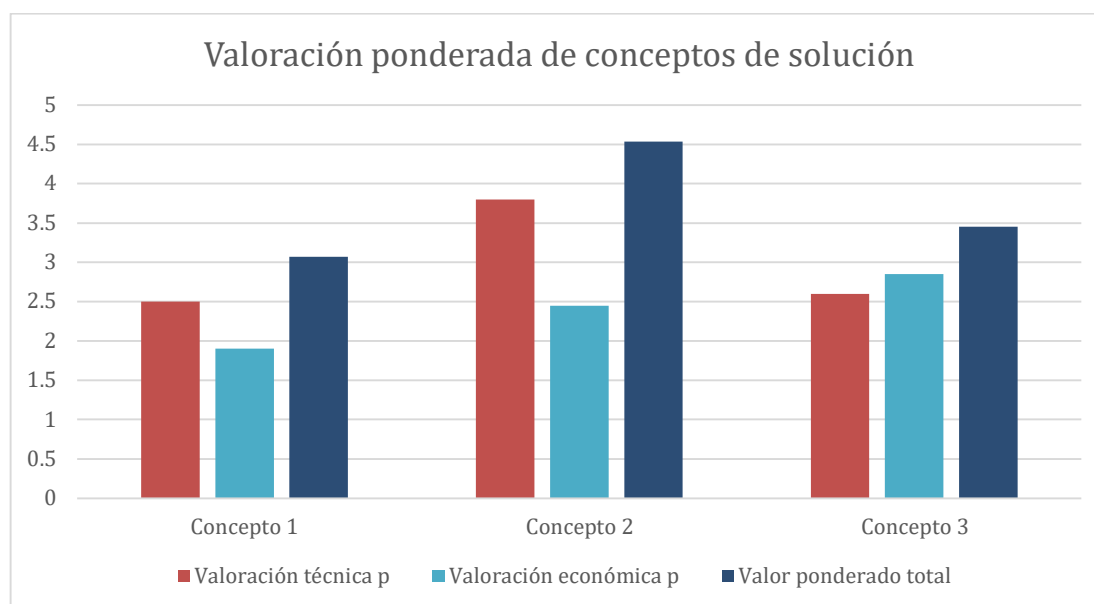


Fig 39. Valoración ponderada de conceptos de solución
Fuente: Elaboración propia

Los valores mostrados en la figura 39, reflejan una valoración más real entre las alternativas del proyecto. Como puede observarse, se obtiene un nuevo valor ponderado por cada concepto de solución, el cual balanza los valores técnicos y económicos según su relevancia en el proyecto. Por consiguiente, la solución elegida es el concepto número 2.

CONCLUSIONES

- Se consiguió realizar un diseño conceptual que brinde una solución al problema propuesto dirigida a las exigencias y deseos del proyecto. Se plantearon y esquematizaron 3 posibles conceptos de solución, los cuales incluían tecnología investigada en el estado del arte.
- Se tomó en cuenta las tecnologías actuales, patentes y trabajos de investigación relacionadas al proyecto. A partir de esta información, se identificó ventajas, desventajas, logros y falencias en la solución actual del problema. Gracias a esta retroalimentación se seleccionó e integró las técnicas, estrategias y tecnologías adecuadas para rediseñar un sistema más óptimo.
- Se concluye que es relevante una adecuada integración entre la instrumentación y las estrategias de control aplicadas. Pues como lo dice su nombre, los sensores son solo instrumentos para conocer el estado del sistema.

RECOMENDACIONES

- En cuanto la lógica del sistema, se sugiere usar un software matemático y de simulación para obtener la función de transferencia mediante el método no paramétrico. Este modelo surgiría a partir del comportamiento de la salida frente a las entradas del sistema.
- Se recomienda que los mecanismos que requieran un rediseño en el sistema sean modelados con un software de diseño CAD, el cual debe ser desarrollado en base a cálculos y restricciones mecánicas. Además en un diseño de 3D debería determinarse la disposición de cada instrumento en el sistema.
- Se debe evaluar la estrategia de control más adecuada. Se recomienda realizar diversas simulaciones del sistema a través del software Matlab y Simulink para la obtención de los parámetros del sistema (k_p , k_i , k_d).
- Se recomienda considerar tiempos de retardo al analizar la dinámica del sistema básico, así como en el diseño del controlador, pues estos afectan la estabilidad.
- Factores como la ubicación y disposición mecánica de los instrumentos y el tiempo de respuesta de los sensores son perturbaciones que afectan al sistema, por ende, deben ser tomados en cuenta.

BIBLIOGRAFÍA

1. AEBELT. (s/f). *Control - pesómetro para fajas transportadoras*.
2. Aguilera, A. (2017). *El costo-beneficio como herramienta de decisión en la inversión en actividades científicas*. La Habana.
3. Alexandrov, M. (1976). *Aparatos y máquinas de elevación y transporte*. Moscú: MIR.
4. Almodarresi Yasin, S. M. T., & White, N. M. (1999). Application of artificial neural networks to intelligent weighing systems. *IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology*, 146(6), 265–269. <https://doi.org/10.1049/ip-smt:19990679>
5. Azo Sensors. (2018). What is a Tachometer? Recuperado el 28 de junio de 2020, de <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=310>
6. Benavides, R. (2012). La Minería Responsable. *Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión (UNDAC)*.
7. Canelon, A. (2018). Diferencia entre Sistemas SCADA y Sistemas DCS. | LinkedIn. Recuperado el 21 de noviembre de 2019, de <https://www.linkedin.com/pulse/diferencia-entre-sistemas-scada-y-dcs-andrés-canelón/>
8. Castellón, R., Contreras, A., Rivera, M., Rodas, C. A., Tobar, J. C., & Zamora, R. A. (2015). *MOTORES HIDRÁULICOS Y MOTORES ELÉCTRICOS EN SISTEMAS HIDRÁULICOS*.
9. Christensen, C. (2005). *Confiabilidad & Disponibilidad*.
10. Conveyor belt speed switch for mining industry - EE Publishers. (s/f). Recuperado el 2 de octubre de 2019, de <https://www.ee.co.za/article/process-automation-056-01-conveyor-belt-speed-switch-sensor.html>
11. Diario Gestión. (2019). SNMPE: Minería aporta 20% de recaudación del IR pero la

- carga fiscal a empresas es mayor a otros países | Economía | Gestión. 24/01/2019.
Recuperado de <https://gestion.pe/economia/snmpe-mineria-aporta-20-recaudacion-carga-fiscal-empresas-mayor-otros-paises-256718-noticia/>
12. Eli, S. R., & Mondragón, P. (2003). *Universidad nacional de ingeniería facultad de ciencias*. 984.
 13. Ernst and Young. (2019). *Peru's mining & metals investment guide 2019/2020*. 87.
Recuperado de [http://www.embajadadelperu.org.co/docs/Mining 2019 - 2020.pdf](http://www.embajadadelperu.org.co/docs/Mining%202019%20-%202020.pdf)
 14. Fernández, A. (2018). *Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza*. Universidad Politécnica de Valencia.
 15. Ferreyros. (2001). *Hidráulica I y II: Conceptos Básicos, Componentes y Diagramas Esquemáticos*.
 16. Gao, H. Bin, & Pang, W. Y. (2009). A high-accuracy dynamic weighing system based on single-idler conveyor belt. *Proceedings of the 2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 4(July), 2483–2487.
<https://doi.org/10.1109/ICMLC.2009.5212175>
 17. Gleisberg, D. (2019). Mineral Commodity Summaries 2019. En *Handbook of Environmental Chemistry* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-47108-0-4>
 18. Gugliandolo, F., & Ísmodes, A. (1989). *Como seleccionar un motor eléctrico* (A. Gugliandolo, Ed.). Lima: CONCYTEC.
 19. Halimic, M., & Balachandran, W. (1995). Kalman filter for dynamic weighing system. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2, 786–791.
 20. HBM. (2019). Cómo funciona una célula de carga de galgas extensométricas.
Recuperado el 30 de octubre de 2019, de
<https://www.hbm.com/es/6768/funcionamiento-de-una-celula-de-carga-de-galgas-extensometricas/>

21. IEC. (2011). *IEC 61810-2 INTERNATIONAL STANDARD NORME INTERNATIONALE*. Recuperado de www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm
22. ISO. (2016). *ISO 14224*. Ginebra.
23. Koniditsiotis, C. (2006). *Weigh-In Motion Technology*. Sidney.
24. Lobosco, O., & Pereira, J. L. (1989). *Selección y aplicación de motores eléctricos*. Munich: Siemens & Marcombo S.A.
25. Mahajan, N. P., Deshpande, S. B., & Kadwane, S. G. (2016). Optimizing weigh feeder performance using modeling and simulation. *IET Conference Publications*, 2016(CP700), 8–14.
26. Mahajan, Nayana P., Kadwane, S., & Deshpande, S. B. (2017). Design of PI fuzzy logic controller to overcome belt weigh feeder system nonlinearity. *Proceedings of the International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2017, 2017-Janua*, 653–659.
<https://doi.org/10.1109/ICECA.2017.8203620>
27. Martinez, E., & Tapia, J. (2016). Sensores y actuadores. En *Universidad Autónoma de México*.
28. Mesa, D., Ortiz, Y., & Pinzon, M. (2006). *La Confiabilidad, la Disponibilidad y la Mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento*.
29. Metso. (s/f). Apron feeders - Metso. Recuperado el 2 de octubre de 2019, de <https://www.metso.com/products/feeders/apron-feeders/>
30. Metso. (2011). *Antapaccay Project Manual*.
31. METSO. (2004). *Conocimientos Básicos en el Procesamiento de Minerales*. 1–346.
Recuperado de minerals.info@metso.com

32. Ministerio de Economía y Finanzas, Vizcarra, M., Del Solar, S., Oliva, C., Canta, M., Bazán, B., & Alvarez, R. (2019). Marco macroeconómico multianual 2020-2023. *Diario El Peruano*.
33. Ortega, B. (2012). Análisis coste-beneficio. *Evaluación económica de medicamentos y tecnologías sanitarias*, 5, 85–92. https://doi.org/10.1007/978-84-940346-6-4_7
34. Ortega Ñahuin, D. (2017). *Determinacion de las fallas funcionales de los equipos criticos del transporte de mineral grueso en minera las bambas S.A.* 130. Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/3674>
35. Perez De La Cruz, F. (2007). *Tratamiento de fangos*.
36. Rockwell Automation. (2018). *Rethink What You Should Expect From Your Distributed Control System*.
37. Romero Baylón, A., Flores Chávez, S., & Arévalo, W. (2014). Análisis granulométrico para la producción industrial del cobre a partir de la calcopirita. *Industrial Data*, 12(2), 021. <https://doi.org/10.15381/idata.v12i2.6099>
38. Roydisa. (s/f). ¿Porque el motor eléctrico de corriente alterna se utiliza más? Recuperado el 20 de octubre de 2019, de <https://www.roydisa.es/archivos/2996>
39. Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., & Davenport, W. G. (2011). Overview. *Extractive Metallurgy of Copper*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-096789-9.10001-0>
40. Springer. (2008). Mining equipment reliability. En *Springer Series in Reliability Engineering* (Vol. 26).
41. The Grid. (2018). Motor de Inducción y Motor Síncrono: Similitudes y Diferencias - Wiki - Electricista Wiki Español. Recuperado el 20 de octubre de 2019, de <https://thegrid.rexel.com/en-us/knowledge/electricista-wiki-espanol/w/wiki/812/motor-de-induccion-y-motor-sincrono-similitudes-y-diferencias>

42. TT Motor. (2017). ¿Cuál es la diferencia entre un motor de corriente alterna y un motor de corriente continua? Recuperado el 20 de octubre de 2019, de <http://www.usattmotor.com/news/what-is-the-difference-between-an-ac-motor-and-6012145.html>
43. UNED. (2017). *PAC-Performance-centered Adaptive Curriculum for Employment Needs*.
44. Valdés, F., & Ramón, P. (2007). *Microcontroladores Fundamentos y Aplicaciones con PIC* - Fernando Valdes, Ramón Pallás Areny - Google Libros. Recuperado el 29 de junio de 2020, de Marcombo website: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ODenKGOHMRkC&oi=fnd&pg=PA9&dq=micro+controladores&ots=umxO0h7a1x&sig=qeGdxcEDVsiC4XvJVzVvkyJU13k#v=onepage&q&f=false>
45. Vargas-Machuca, F. (1990). *Máquinas eléctricas rotativas* (Megaprint Ediciones, Ed.). Lima.
46. Villajulca, J. C. (2011). Que es realmente un sistema SCADA: diferencias con un DCS – Instrumentacion, Control y Automatizacion Industrial. Recuperado el 21 de noviembre de 2019, de <https://instrumentacionycontrol.net/que-es-realmente-un-sistema-scada-diferencias-con-un-dcs/>