

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial

Tesis

**Model to improve the copper concentrate production  
process in a mine at Panama**

Milton Yersin Cabanillas Tafur  
Domenica Emperatriz Palomino Muñoz  
José Velásquez Costa  
Herbert Vílchez Baca

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Industrial

Lima, 2025

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## **INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**A** : Decano de la Facultad de Ingeniería  
**DE** : Jose Antonio Velásquez Costa  
Asesor de trabajo de investigación  
**ASUNTO** : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación  
**FECHA** : 24 de Julio de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

**Título:**

Model to improve the copper concentrate production process in a mine at Panama

**URL / DOI:**

URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85203815703&doi=10.18687%2fLACCEI2024.1.1.1197&partnerID=40&md5>  
DOI: 10.18687/LACCEI2024.1.1.1197

**Autores:**

1. Milton Yersin Cabanillas Tafur – EAP. Ingeniería Industrial
2. Domenica Emperatriz Palomino Muñoz – EAP. Ingeniería Industrial
3. Jose Antonio Velásquez Costa – EAP. Ingeniería Industrial
4. Herbert Antonio Vilchez Baca – EAP. Ingeniería Industrial

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 17 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- |                                                                                                           |                                        |                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| • Filtro de exclusión de bibliografía                                                                     | SI <input checked="" type="checkbox"/> | NO <input type="checkbox"/> |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores<br>Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): | SI <input checked="" type="checkbox"/> | NO <input type="checkbox"/> |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante                                           | SI <input checked="" type="checkbox"/> | NO <input type="checkbox"/> |

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

# Model to improve the copper concentrate production process in a mine at Panama

Milton Cabanillas-Tafur, Eng.,<sup>1</sup>, Domenica Palomino-Muñoz, Student,<sup>2</sup>, José Velásquez-Costa, PhD<sup>3</sup>, Herbert Vílchez-Baca, PhD<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Universidad Continental, Lima, Perú, 19331135@continental.edu.pe, 41717313@continental.edu.pe, jvelasquezc@continental.edu.pe, hvilchez@continental.edu.pe.

*Abstract– This research is based on the detection of problems through technical diagnostics to understand the root cause through the "5 Why?" methodology and determine the best practices that could be implemented to address the situation that does not allow for escalation to a higher impact on production. This study enabled the design, procurement, installation, commissioning, and implementation of two redundant direct starters and two variable speed drives to control the speed of two agitator motors in two copper concentrate tanks. One of the main issues was that unprocessed solids accumulated as sediment at the bottom of the tanks. This resulted in unplanned maintenance, which stopped production and necessitated the shutdown of the motors and the implementation of a lock-out/tag-out (LOTO) procedure to permit the entry of maintenance personnel for the purpose of cleaning the interior of the tank using extra labor and hand tools. The implementation of this cutting-edge technology has led to a 33% improvement in annual production, equating to 175,200 tons more than before. The technology has optimized the operation of the equipment, minimized downtime or stoppage of the equipment due to failures, and/or lack of speed control of the motors. The implementation has enabled the company to fulfill its commitment of an annual export of 700,800 metric tons of copper concentrate to China, a world record for one of the largest world-class mines in Panama.*

**Keywords:** Variable frequency drive (VFD), agitator, copper concentrate, thickener, motor, interlocks.

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Modelo para mejorar el proceso de producción de concentrado de cobre en una mina en Panamá

Milton Cabanillas-Tafur, Eng.,<sup>1</sup>, Domenica Palomino-Muñoz, Student,<sup>2</sup>, José Velásquez-Costa, PhD<sup>3</sup>, Herbert Vílchez-Baca, PhD<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Universidad Continental, Lima, Perú, 19331135@continental.edu.pe, 41717313@continental.edu.pe, jvelasquezc@continental.edu.pe, hvilchez@continental.edu.pe.

**Resumen**—Esta investigación se basa en la detección de problemas mediante diagnósticos técnicos para comprender la causa raíz a través de la metodología "5 ¿Por qué?" y determinar las mejores prácticas que podrían implementarse para abordar la situación que no permita escalar a un mayor impacto en la producción. Este estudio permitió diseñar, adquirir, instalar, poner en marcha e implementar dos arrancadores directos redundantes y dos variadores de velocidad para controlar la velocidad de dos motores agitadores en dos tanques de concentrado de cobre. Uno de los principales problemas era que los sólidos no procesados se acumulaban en forma de sedimentos en el fondo de los tanques. Esto provocaba un mantenimiento no planificado, que detenía la producción y obligaba a parar los motores y a aplicar un procedimiento de bloqueo y etiquetado (LOTO) para permitir la entrada del personal de mantenimiento con el fin de limpiar el interior del tanque utilizando mano de obra adicional y herramientas manuales. La implementación de esta tecnología punta ha llevado a una mejora del 33% en la producción anual, lo que equivale a 175.200 toneladas más que antes. La tecnología ha optimizado el funcionamiento de los equipos, minimizando los tiempos de inactividad o parada de los mismos por averías, y/o falta de control de velocidad de los motores. La implementación ha permitido a la empresa cumplir su compromiso de una exportación anual de 700.800 toneladas métricas de concentrado de cobre a China, un récord mundial para una de las mayores minas de clase mundial de Panamá.

**Palabras claves**—variador de frecuencia (VFD), agitador, concentrado de cobre, espesador, motor, enclavamientos.

## I. INTRODUCTION

Con el pasar del tiempo más empresas de la industria de minas de cobre aparecen para explotar minerales a nivel del mundo y siempre están buscando la mejora de sus procesos de producción. El cobre es un mineral importante en nuestra vida diaria y aparece en monedas, utensilios de cocina, joyería, objetos de arte, adornos, muebles, maquillajes, pinturas, instrumentos musicales y ropa. En el campo del transporte la presencia del cobre es muy importante. Este material está presente en automóviles, trenes, aviones, barcos e incluso en vehículos espaciales [1].

En electricidad y electrónica este metal está presente de forma discreta en casi todos los cables para la transmisión de electricidad, en las redes de computadoras, en las líneas telefónicas, en los equipos

electrónicos y en las líneas de televisión por cable y en la transmisión de datos [2].

En el mundo los países con más producción de cobre son Chile 28%, Perú 12%, China 7%, República del Congo 6%, Estados Unidos 6%, Zambia 5%, Australia 4% Indonesia 4% y otros países que hacen un 28% [3].

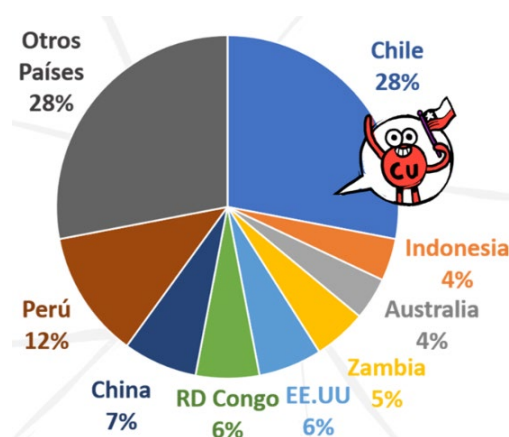


Fig. 1. Porcentaje de los principales países productores de cobre del mundo.

Debido a que el cobre se distribuye en concentraciones relativamente bajas en grandes áreas, la minería de superficie, o a cielo abierto, es el método de extracción predominante para el cobre en el mundo [4]. Para el proceso de la elaboración del cobre se muelen las rocas obtenidas del subsuelo a un tamaño aún más reducido usando molinos y trituradoras o chancadoras industriales. Luego mediante un proceso de flotación, el metal es separado del resto de elementos y sustancias [5].

En esta investigación hablaremos de una mina que procesa concentrado de cobre que extraen a cielo abierto, pasándolo por plantas de proceso, con un sistema de espesadores que sirve para realizar la separación sólido-líquido del concentrado recuperando el agua por sobre flujo e incrementando el porcentaje de sólidos en la descarga del espesador, el cual consta de dos tanques con sus respectivos agitadores, cada agitador con su respectivo motor y cada motor con su respectivo arrancador directo.

Durante los primeros años de operación de la mina se ha detectado algunos problemas, oportunidades de mejora en procesos de producción y encontrar una metodología que permita usar tecnología de última generación para la optimización de procesos industriales que ayude a mantener el

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

sistema de producción de concentrado de cobre estable y minimizar tiempos de paradas de planta por fallas y /o por trabajos de mantenimiento no programados.

Uno de los problemas principales detectados, durante el tratamiento de los minerales en bruto hasta la obtención de la materia prima ósea hasta el concentrado de cobre, es que los sólidos no procesados se acumulan en el fondo de los dos tanques como sedimento, de modo que ni la propia hélice del agitador del tanque puede removerlos, provocando mantenimientos no programados por lo que se tiene que detener la producción debido a que los motores deben ser apagados y bloqueados, para el ingreso del personal de mantenimiento a realizar la tarea de limpieza (remover los sólidos dentro de los tanques) usando herramientas manuales tales como pico, pala y utilizando fuerza laboral adicional o extra.

Una consecuencia generada por causa de la limpieza de la acumulación del sedimento dentro de los tanques agitadores es que se detiene la producción por un tiempo, dejando de producir concentrado de cobre continuamente.

El objetivo es estabilizar y conseguir un funcionamiento continuo de los equipos, sin paradas por mantenimientos no programados y/o fallas de los mismos.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Ubicación y Análisis

El estudio fue realizado dentro de los talleres de ingeniería de mantenimiento de las instalaciones de la mina. La detección de los problemas se realizó a través de diagnósticos técnicos para comprender la causa-raíz a través de la metodología de los "5 porqués", y de esa manera determinar las buenas prácticas que pudiesen ser implementadas para atender la situación que no permita escalar a un estado de mayor desempeño y/o producción.

Los 5 porqués es el método basado en la realización de preguntas donde buscamos explorar la causa-efecto del problema en este caso que los sólidos no procesados se acumulen en el fondo de los tanques como sedimento, para el cual, la producción debe ser detenida porque los motores deben ser apagados y bloqueados completamente para realizar las tareas del mantenimiento de limpieza.

Como ya tenemos identificado el problema, preguntaremos "por qué" por cinco veces, hasta llegar a la causa del problema. A continuación, encontrar el análisis realizado:

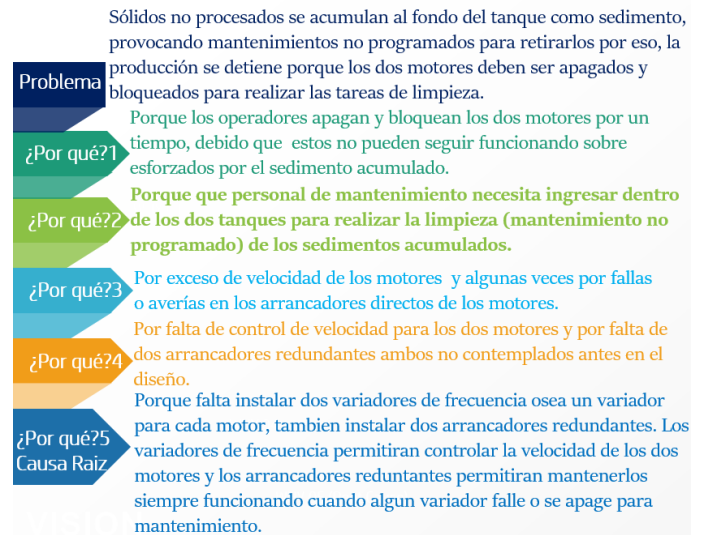


Fig. 2. Análisis de los 5 porqués, para encontrar la causa raíz del problema

Después del análisis realizado se determinó que la causa raíz del problema es la falta de control de velocidad de los dos motores, porque falta instalar dos variadores de frecuencia, ósea un variador de frecuencia para controlar la velocidad a cada motor, también se debe instalar dos arrancadores redundantes que servirán para mantener continuamente funcionando los motores que antes no podían funcionar durante una falla de sus arrancadores, ósea estos arrancadores servirán como un respaldo cuando uno de los variadores de frecuencia entren en falla o se detengan para algún mantenimiento.

En el contexto y el análisis evidenciamos claramente que los operadores de los motores apagaban los mismos porque no tenían una forma de cómo controlar la velocidad de los motores, debido a que estos estaban instalados directamente a unos arrancadores directos, que por su diseño no permiten hacer variaciones de la velocidad y que cuando fallaba alguno de los arrancadores directos no había forma de que los motores sigan funcionando u operando, porque no tenían arrancadores redundantes o de respaldo.

Investigando casos similares en otras minas en Sudamérica pudimos notar que también fueron resueltos con la implementación de variadores de frecuencia [6].

Estos antecedentes nos permiten comprender la necesidad de generar un proyecto e implementar un modelo de mejora para la producción de concentrado de cobre.

Para la implementación de la propuesta de solución diseñaremos agregar dos arrancadores redundantes y un sistema de control con dos variadores de frecuencia que permitan controlar la velocidad de los motores.

El uso de esta tecnología de última generación ayudara la optimización de los procesos industriales del sistema de espesadores de la mina, eliminaremos los tiempos de paradas de los equipos por fallas o mantenimiento no programados, evitaremos que los sólidos se sedimenten o se acumulen al fondo de los tanques de los dos agitadores, evitaremos que la producción se detenga y mejoraremos el control de procesos del sistema de los espesadores de concentrado de cobre.

Haremos una inspección y análisis de campo que nos permita seleccionar el variador de frecuencia adecuado según el tipo de carga, potencia, voltaje, corriente, frecuencia, y determinar el tamaño y el costo.

Con los datos obtenidos de campo y de los equipos existentes solicitaremos cotización a los fabricantes de variadores de frecuencia.

Desarrollaremos un procedimiento para la programación y diagnóstico de las fallas de los variadores de frecuencia. Agregaremos una red digital de campo abierto (bus de campo PROFIBUS) para la comunicación entre los variadores de frecuencia y el sistema de control existente, Siemens PCS 7 (Interface campo y sala de control).

### B. Definición y términos básicos.

VSD Variador de Frecuencia o Velocidad.

MCC Centro de Control de Motores.

VFD Variador de Frecuencia o Velocidad.

DCS Sistema de Control Distribuido,

PROFIBUS protocolo de comunicación.

PCS Sistema de Control de Procesos.

Variador de frecuencia se utiliza para regular la velocidad de un motor eléctrico con el fin de mejorar el control del proceso, disminuir el esfuerzo mecánico en aplicaciones que implican el control de motores, mejorar el rendimiento de muchas aplicaciones que dependan de motores eléctricos [7]. También se les llama convertidores de frecuencia, variadores de velocidad ajustables, inversores o convertidores de potencia [8].

Además, los VFDs pueden utilizarse en otras aplicaciones tales como para convertir la energía de fuentes renovables y naturales, como el sol, el viento o las mareas, y utilizarla localmente o transferirla a la red eléctrica. Los variadores de frecuencia se emplean en el ámbito de las tecnologías híbridas para integrar fuentes de energía tradicionales con reservas de energía para producir sistemas integrados de gestión de la energía [9].

### C. Materiales.

Lista de equipos y materiales para la implementación:  
 2 variadores de frecuencia de 185kW cada uno.  
 2 tableros con arrancadores redundantes para motores de 185kW cada uno.  
 100m de cable 3C-500Kcmil + un conductor de tierra.  
 Un paquete de terminales de cables.  
 2 cubículos con interruptores para el MCC.  
 50m de cable Profibus (comunicación entre VSD y PCS 7).  
 500m de cable de control 7Cx14 AWG.

### D. Presupuesto

La aplicación de los variadores o convertidores de frecuencia en la industria genera ahorro de energía además de una mayor operatividad, están bien integrados.

TABLE I  
LISTA DE EQUIPOS Y PRECIOS  
CORTESÍA DEL FABRICANTE DE VARIADORES DANFOSS

| ITEM   | CANTIDAD | DESCRIPCIÓN                            | PRECIO UNITARIO (USD) | PRECIO TOTAL (USD) |
|--------|----------|----------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| 1      | 2        | Tablero con Drive- Bypass de 250Hp     | 19,767.42             | 39,534.84          |
| 2      | 2        | Cooling Kit, in back/out back, D2h/D4h | 482.16                | 964.32             |
| 3      | 2        | Profibus Sub-D9 Adapter kit, D, E      | 137.55                | 275.10             |
| TOTAL: |          |                                        |                       | 40,774.26          |

### E. Diseño y Programación de Variadores de Frecuencia.

Abajo está el diseño red line del diagrama control.

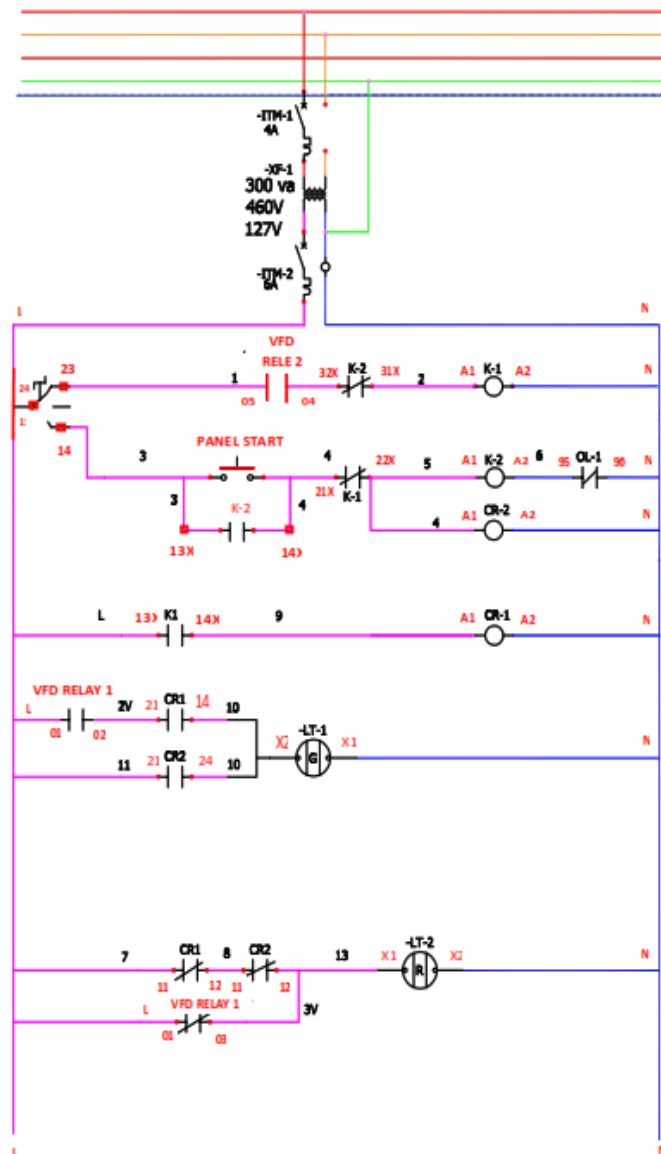


Fig. 3. Red line de diagrama de control con enclavamientos.

Estos variadores de frecuencia serán controlados remotamente a ser operados desde la sala de control y permitirán controlar la velocidad de los motores evitando que los sólidos se acumulen dentro de los dos tanques de los

agitadores. Para la configuración de los VFDs usaremos el software MCT 10 e ingresaremos todos los parámetros como necesitamos, incluyendo los datos de placa de los motores existentes tales como voltaje, frecuencia, corriente, potencia, tipo de comunicación, rampas (tiempo de aceleración y desaceleración), torques entre otros más.

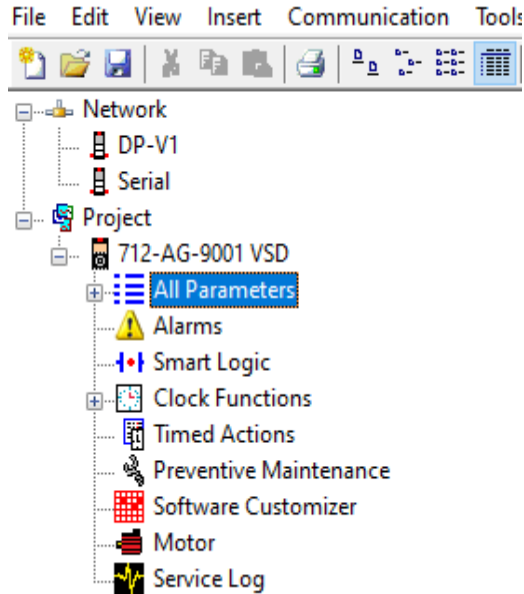


Fig. 4. Programación de variadores de frecuencia con software MCT 10.

La filosofía de diseño incluirá protecciones y enclavamientos que cuando una falla ocurra en uno de los variadores de frecuencia o se detengan para realizar mantenimiento, permitirán que los motores de los agitadores continúen operando o funcionando y evitando que la producción del concentrado de cobre se detenga. Los enclavamientos (Interlocks) eléctricos y lógicos de protección permitirán que cuando los variadores de frecuencia estén funcionando o en operación, los arrancadores redundantes estén apagados, y viceversa cuando los arrancadores redundantes estén en operación o funcionamiento, los variadores de frecuencia estén apagados o detenidos.

A continuación, el diseño del diagrama de fuerza de los arrancadores directos redundantes.

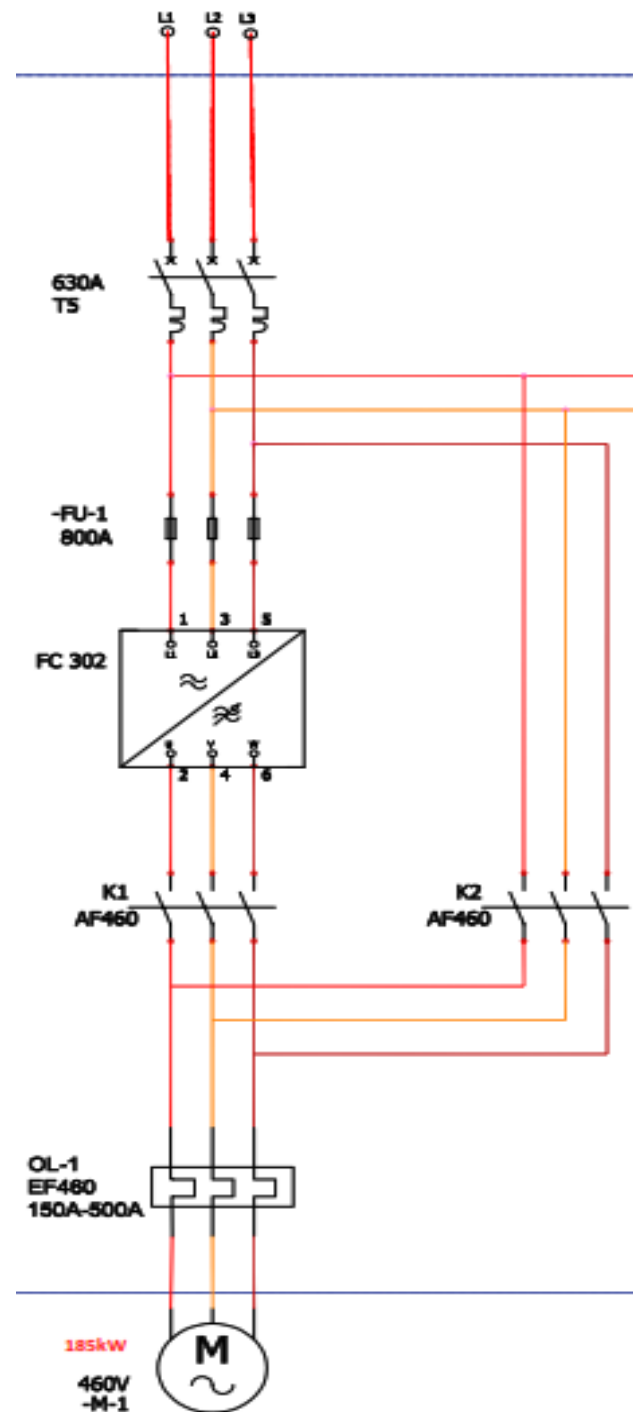


Fig. 5. Red line del diagrama de fuerza del arrancador directo redundante.

Líneas abajo es el diseño en red line del diagrama del variador de frecuencia que incluye los enclavamientos entre variadores de frecuencia, el alambrado para el LCS o botonera de campo, alambrado para los cables que vienen del termistor del motor y alambrado de fuerza.



\$4,567,464,000 dólares, después de la implementación la producción anual de concentrado de cobre se ha incrementado a 700,800 toneladas por año equivalente en dólares de US \$6,089,952,000 ósea 175,200 toneladas más que antes equivalente a un 33% de mejora en los procesos de producción de concentrado de cobre que hacen un monto de US \$1,522,488,000 dólares. Esta mejora en el proceso permitió cumplir con el compromiso de una exportación anual de 700,800 toneladas métricas de concentrado de cobre hacia China, record mundial como una de las minas más grandes de clase mundial de Panamá.

#### IV. DISCUSIÓN

El objetivo de esta investigación fue eliminar los tiempos que se dejaba sin funcionar o se detenían los equipos y evitar que los sólidos no procesados se acumulen, dentro de los dos tanques agitadores y se detenga la producción de concentrado de cobre. Los resultados obtenidos han superado las expectativas en producción y la operación, monitoreo y control de los equipos de campo no solo se puede realizar localmente sino remotamente en tiempo real desde la sala de control permitiendo ver las diferentes variables tales como eléctricas, lógicas y las condiciones de los equipos mediante la red profibus. Esta solución de ingeniería nos permitió no solo controlar la velocidad de los dos motores de los dos agitadores de los dos tanques, sino agregar los dos arrancadores redundantes que permitieron continuar la operación de los dos motores durante algún mantenimiento o durante alguna falla de los VFDs. Durante el monitoreo del impacto de la solución también los variadores de frecuencia proporcionaron mayor eficiencia energética, debido a la baja corriente de arranque que cualquier otro tipo de arrancador, redujeron la temperatura y las tensiones mecánicas en los motores. Estos beneficios permitieron a ingenieros y operadores aplicar variadores de frecuencia (VFD) con confianza y lograr la mayor operatividad y ahorro de energía.

#### V. CONCLUSIONES

La aplicación de los variadores de frecuencia en el control de velocidad de los motores eléctricos en la industria minera, logra una mayor eficiencia y racionalidad de la operación del sistema y permite un ahorro de energía eléctrica [10]. Por eso se recomienda continuar promoviendo el conocimiento e innovación sobre su utilización, además es una implementación probada, en las instalaciones de esta mina y en otros países donde la industria minera está más desarrollada en cuanto a implementación de tecnologías [11].

Figura 7 abajo es la foto de la evidencia del resultado exitoso de esta investigación.



Fig. 7. Foto del variador de frecuencia de uno de los agitadores funcionando

Figura 8 abajo, la foto de evidencia de éxito de esta investigación mostrando los dos paneles de los dos variadores de frecuencia y los dos arrancadores directos redundantes.



Fig. 6. Foto de paneles con variadores de frecuencia y arrancadores redundante

#### VI. PREGUNTAS Y RESPUESTAS

¿Se hicieron entrevistas?

Respuesta: No se realizaron entrevistas.

¿Hubo encuestas?

Respuesta: No se hicieron encuestas.

¿Se realizó alguna experimentación?

Respuesta: No se realizó alguna experimentación porque por teoría sabíamos que con los variadores de frecuencia se podía controlar la velocidad de los motores.

¿Cómo se determinó/seleccionó la solución propuesta?

Respuesta: Con la metodología de los 5 ¿porqués? concluimos la falta de control de velocidad como la causa del problema. Y que los variadores de frecuencia era la solución que más se acoplaba a la necesidad.

¿Había pérdidas?

Respuesta: No se calcularon las pérdidas antes de la implementación, pero si después de la implementación la producción se incrementó en un 33% anual.

¿Cuánto se estaba perdiendo por cada mantenimiento?

Respuesta: No se realizó un cálculo previo.

¿Antecedentes?

Respuesta: Fueron las constantes paradas de los motores para realizar la limpieza de los sólidos acumulados en los tanques.

¿Datos estadístico de respaldo del problema?

Respuesta: No se colecciono datos estadísticos, sin embargo, existen ordenes de trabajo de cada mantenimiento no programado.

¿Justificación para buscar soluciones técnicas?

Respuesta: La justificación es que no había continuidad con la operación del proceso porque se tenían que detener los equipos para realizar la limpieza.

## VII. REFERENCIAS

- [1] Usos del Cobre, CODELCO.  
<https://www.codelco.com/innovacion/nuevos-usos-del-cobre/usuarios-del-cobre>.
- [2] El Cobre en la Era Digital, LA JORNADA.  
<https://www.jornada.com.mx/2006/04/06/index.php?section=opinion&article=a04a3cie>.
- [3] Los 10 Principales Países Productores de Cobre, TECNOLOGIA MINERA.  
<https://tecnologiaminera.com/noticia/los-10-principales-paises-productores-de-cobre-1648135659>
- [4] Ciclos de vida del cobre, INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION.  
<https://internationalcopper.org/es/sustainable-copper/about-copper/copper-life-cycle/>
- [5] Todo sobre la Minería de Cobre, CODELCO EDUCA.  
<https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/molienda.html>.
- [6] G. Morales, A. Andia, T. Niceforo, B. Caycho and S. Quispe “Automation of the stone materials dosing process, controlled by variable frequency drives,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 24, no. 2, pp. 784-802, November 2021.
- [7] A Shankar, V. Umashankar, P. Shanmugam, S. Padmanaban and D. Sathish “Experimental investigation of VFD-fed scalar control of induction motor for pumping application,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 435, no.1, pp.287-295, December 2018.
- [8] L. Piron, y L. Delfin, “Simulador para Análisis de Motores de Inducción con Mando Adaptivo de Inversores Sinusoidales de Potencia,” *Minería y Geología*, vol. 16, no. 1, pp. 83-86, 1999.
- [9] R. Chandrasekaran, and K. Selvajothi, “Design of bidirectional DC - DC converters and controllers for hybrid energy sources in electric vehicles,” *Power Converters, Drives and Controls for Sustainable Operations*, pp. 437 - 461, August 2024.
- [10] A. Mohammad, E. Lokshin, and M. Averbukh, “Energy losses modeling in induction motors fed by Danfoss VF micro drive FC51,” *2014 IEEE 28th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, IEEEI 2014*, vol. 24, no. 2, pp. 784-802, December 2014.
- [11] C. Arati, N. Keerthi, and N. Sonal, “Self-commissioning of induction motor drives-A critical review,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol.906, no.1, pp. 784-802, August 2020.