FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

ESTUDIO COMPARATIVO DE VDF EN BAJA Y MEDIA TENSIÓN APLICADOS AL CONTROL DE VENTILADORES DE 500 HP EN OPERACIONES SUBTERRÁNEAS.

Profesor Guía**:** Juan Astorga Gómez

Diego Esteban Traslaviña Beiza

Diego Alexis Galleguillos Díaz.

Copiapó, Chile 2025

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

ESTUDIO COMPARATIVO DE VDF EN BAJA Y MEDIA TENSIÓN APLICADOS AL CONTROL DE VENTILADORES DE 500 HP EN OPERACIONES SUBTERRÁNEAS.

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero en Ejecución en Electricidad.

Profesor Guía**:** Juan Astorga Gómez

Diego Esteban Traslaviña Beiza
Diego Alexis Galleguillos Díaz.

Copiapó, Chile 2025

I. DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a cada una de las personas que han estado presente en mi formación universitaria, con dedicación especial a mis padres Elías y Edita que me han brindado todo su apoyo no solo en esta etapa sino a lo largo de una vida, que con amor y esfuerzo han inculcado valores en mí que hoy en día han sido clave para lograr mis metas.

A mi pareja Ana quien ha estado desde el minuto cero, apoyándome e incentivando desde el amor que cumpla esta meta.

A mis hijos Alonso y Florencia que son la razón principal en mi vida. ellos me dan las fuerzas para seguir adelante, querer demostrarle que los desafíos se pueden superar, que se sientan orgulloso por los logros de su padre.

II. AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por todo lo que me ha entregado, por darme salud, inteligencia, fé, amor y familia. Por estar presente en cada paso que he dado y que me han guiado por buen camino en la vida. A mi familia por estar siempre presente y su apoyo incondicional.

A mi profesor guía que con su conocimiento, paciencia y entrega ha podido iniciar, guiar y concluir este proceso, agradecer el apoyo constante durante el tiempo que ha llevado el poder lograr dar este paso tan importante.

A todos y cada uno de los profesores que han sido parte de esta etapa logrando inculcar conocimiento, valores y respeto a los estudiantes, han sido un pilar fundamental en la formación de profesionales.

Agradecer a mis compañeros de clases que al compartir tiempo de estudios nos motivamos unos a otros por sacar esta carrera adelante.

Agradecimientos a la universidad y a cada una de las personas que trabajan en esta institución ya que en el éxito de cada estudiante hay un gran grupo de personas que hacen que todo esto sea posible.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 10

INTRODUCCIÓN 10

1.1 Antecedentes generales. 11

1.2 Justificación del estudio. 11

1.3 Objetivo general. 12

1.4 Objetivos específicos. 12

1.5 Alcances y limitaciones del estudio. 12

CAPITULO 2 14

MARCO TEÓRICO 14

2.1 Variador de frecuencia. 15

2.2 Principio de funcionamiento del VDF. 15

2.3 Beneficios principales. 16

2.4 Comparativa teórica entre variadores de BT y MT 16

2.5 Fuente de tensión aplicado al VDF 17

2.6 Análisis de corriente aplicada a los VDF 19

2.7 Frecuencia 21

CAPITULO 3 23

NORMATIVA VIGENTE 23

3.1 Regulación de frecuencia 24

CAPITULO 4 28

ANTECEDENTES TÉCNICOS 28

4.1 Equipos a analizar 28

4.1.1 Variador Power Electronics SD700 series 28

4.1.2 Variador Eaton SC9000EP 30

4.1.2.1 Diseño mecánico 31
4.1.2.2 Prestaciones 32
4.2 Antecedentes lugar de implementación 33
CAPITULO 5 35
ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y COMPARATIVA ENTRE VDF 35
5.1 Análisis de niveles de voltaje 35
5.2 Análisis de voltaje en variadores de baja tensión (BT) 36
5.2.1 Características de la tensión suministrada. 36
5.3 Análisis de voltaje en variadores de media tensión (MT) 37
5.3.1 Características de la tensión suministrada 37
5.4 Comparación BT & MT 38
5.5 Análisis de niveles de corriente 39
5.6 Análisis de corriente en variadores de baja tensión (BT) 40
5.7 Análisis de corriente en variadores de media tensión (MT) 41
5.8 Comparación entre variadores en BT & MT aplicado a corriente 42
5.9 Análisis de la frecuencia 42
5.10 Análisis de la Frecuencia en Variadores de Baja Tensión (BT) 44
5.11 Análisis de la Frecuencia en Variadores de Media Tensión (MT) 45
CAPITULO 6 49
PROPUESTA PLAN DE MEJORAS 49
6.1 Problemas de corriente por el conductor neutro 49
6.2 Causas de corrientes elevadas en el neutro en presencia de variadores de frecuencia 49
6.3 Mejoras recomendadas para evitar problemas de corriente en el conductor neutro 50

6.4 Mejoras en la infraestructura eléctrica 52
6.5 Mejoras en la distribución de cargas y diseño del sistema 53
6.6 Control, monitoreo y mantenimiento 54
6.7 Propuesta de mejora a variables eléctricas anormales 56
6.8 Medidas Correctivas y Preventivas (Instalaciones Nuevas y Existentes) 57
6.9 Mejoras en la Configuración del Variador 59
6.10 Transformación Organizacional 59
6.11 Beneficios Esperados 60
CAPITULO 7 61
IDENTIFICACION Y CLASIFICACION DE VARIABLES ASOCIADOS A COSTOS INVOLUCRADOS. 61
7.1 Comparativa Económica en Variadores de Frecuencia de Media y baja tensión. 61
7.1.1 Objetivo del Estudio 61
7.1.2 Alcance y Metodología 61
7.1.3 Descripción Técnica de las Alternativas 62
7.1.4 Análisis Económico Comparativo 62
7.1.5 Costos de Instalación 63
7.1.6 Costos de Operación (OPEX) 63
7.1.7 Costos de Mantenimiento 63
7.1.8 Vida Útil y Depreciación 63
7.1.9 Costo Total de Propiedad (TCO) 64
Recomendaciones 64
CAPITULO 8 67
CONCLUSIÓN 67
BIBLIOGRAFIA 69

INDICE DE TABLAS

2.4.1 TABLA 1:COMPARATIVA DE VFD EN BAJA TENSIÓN VS MEDIA TENSIÓN. 17
5.1.1 TABLA 2: PARÁMETROS DE VOLTAJE ELÉCTRICO A ANALIZAR. 35
5.4.1 TABLA 3:COMPARACIÓN DE VDF BT & MT 38
5.5.1 TABLA 4:PARÁMETROS DE CORRIENTE A ANALIZAR 39
5.8.1 TABLA 5:COMPARATIVA APLICADA A LA CORRIENTE ELÉCTRICA. 42
5.9.1.1 TABLA 6: PARÁMETROS DE FRECUENCIA ANALIZADOS 43
5.12.1 TABLA 7: COMPARACIÓN FRECUENCIA EN BT & MT. 47
6.6.4.1 TABLA 8: TABLA DE RESUMEN DE MEJORAS RECOMENDADAS. 55

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: UBICACIÓN DISTRITO CANDELARIA. 14
FIGURA 2: DISPOSICIÓN DE VARIADORES EN MINA SUBTERRÁNEA. 34
FIGURA 3:ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS 65

III. **RESUMEN**

En el presente proyecto se realizó un análisis de dos variadores de frecuencia, uno de baja tensión y el otro de media tensión, con el fin de realizar una comparativa entre ambos variadores de frecuencia y por consiguiente elegir la mejor opción en términos de viabilidad. Para dar una buena selectividad se considerarán parámetros de puntos de alimentación, rutas existentes, etc. Para luego analizar detalladamente los datos y desarrollar una planilla de costos en términos de construcción y puesta en marcha y así determinar las recomendaciones para la instalación de estas a través de un instructivo.

En el capítulo 1 se hizo una pequeña descripción de la importancia de contar con un suministro eléctrico de calidad para un buen análisis de los variadores, además se describe los antecedentes generales, se explica la justificación del estudio, se establecen los objetivos generales y objetivos específicos, como también los alcances y limitaciones. El capítulo 2 está referido al marco teórico donde se definen las principales variables que influyen en la correcta elección de los variadores estudiados, como también la capacidad de cada uno y como puede impactar en una instalación. En el capítulo 3 se detallan los antecedentes técnicos del estudio donde se menciona brevemente información y descripción de la empresa, los equipos utilizados para el análisis, información del lugar donde se implementará el VDF, y la metodología utilizada en el procedimiento. En el capítulo 4 se describe la solución a la problemática aplicada al ventilador principal de mina subterránea tomando en consideración los variadores de frecuencia. Esto establece los parámetros contra los cuales se compararán los resultados del estudio.

En el capítulo 5 se presentan y analizan los datos obtenidos durante el estudio, se interpretan los resultados y se comparan con la normativa vigente dando como resultado si cumplen o no con los límites establecidos. En el capítulo 6 se identifican y se clasifican las variables asociadas a los costos involucrados en la implementación de los VDF con el propósito de cumplir con los estándares que la normativa vigente establece. En el capítulo 7 se muestran los principales resultados del estudio, se concluye que el plan de mejora propuesto optimizaría la eficiencia, seguridad y que tan viable es en términos de costos a la compañía.

IV. ABSTRACT

This project involved an analysis of two variable frequency drives (VFDs), one for low voltage and the other for medium voltage, to compare them and select the best option in terms of feasibility. To ensure good selectivity, parameters such as power supply points and existing routes were considered. The data was then analyzed in detail, and a cost spreadsheet was developed for construction and commissioning. This led to recommendations for their installation, which were then compiled into a user manual.

Chapter 1 briefly describes the importance of a reliable power supply for a proper analysis of the VFDs. It also provides the general background, explains the justification for the study, establishes the general and specific objectives, and outlines the scope and limitations. Chapter 2 presents the theoretical framework, defining the main variables that influence the correct selection of the VFDs studied, as well as the capacity of each and how it can impact an installation. Chapter 3 details the technical background of the study, briefly mentioning information and a description of the company, the equipment used for the analysis, information about the location where the variable frequency drive (VFD) will be implemented, and the methodology used in the procedure. Chapter 4 describes the solution to the problem applied to the main underground mine fan, taking into account variable frequency drives. This establishes the parameters against which the study results will be compared.

Chapter 5 presents and analyzes the data obtained during the study, interprets the results, and compares them with current regulations, determining whether or not they comply with the established limits. Chapter 6 identifies and classifies the variables associated with the costs involved in implementing the VFDs in order to comply with the standards established by current regulations. Chapter 7 presents the main results of the study, concluding that the proposed improvement plan would optimize efficiency and safety, and that it is cost-effective for the company.

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía eléctrica es una parte fundamental en el desarrollo y la operación de sistemas eléctricos en general. Por tal motivo durante su utilización es necesario garantizar una óptima operación de los equipos, ya que el suministro no solo debe ser confiable, sino que debe estar libre dentro de lo posible de perturbaciones que puedan generar fallas o bajas en el rendimiento de equipos. En las operaciones mineras subterráneas, el sistema de ventilación principal desempeña un papel fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia de las labores, al proporcionar el flujo de aire necesario para diluir gases, controlar la temperatura y mantener condiciones adecuadas para el personal y los equipos. Dentro de estos sistemas, los variadores de frecuencia (VFD) son componentes esenciales para el control eficiente de los ventiladores, ya que permiten ajustar la velocidad del motor de acuerdo con las necesidades operativas, optimizando así el consumo energético y prolongando la vida útil del equipo.

El presente análisis se centra en la comparación y evaluación de dos variadores de frecuencia destinados al control del ventilador principal de una mina subterránea en minera candelaria norte UG: uno de bajo voltaje (típicamente en el rango de 380–690 V) y otro de media tensión (entre 2.3 kV y 6.6 kV). Esta comparación considera aspectos eléctricos, operativos y de eficiencia energética, con el fin de determinar la opción más adecuada según los requerimientos de potencia del motor, las condiciones de instalación y las restricciones propias del entorno minero.

Desde el punto de vista eléctrico, la elección entre un variador de bajo o medio voltaje implica analizar factores como las corrientes nominales, pérdidas por conversión, armónicos, costos de inversión y mantenimiento, así como la seguridad y confiabilidad del sistema. En este contexto, el estudio busca proporcionar una base técnica que permita seleccionar la alternativa más conveniente para optimizar el desempeño del sistema de ventilación principal, garantizando la continuidad y seguridad de la operación minera.

1.1 Antecedentes generales.

Minera Candelaria es una gran mina de cobre a cielo abierto y subterránea en la Región de Atacama, Chile, que produce concentrado de cobre y fue inaugurada en 1995. Su dueño es Lundin Mining Corporation (80%) y Sumitomo (20%). La minera se destaca por sus importantes inversiones, su impacto económico y social en la región, y un enfoque creciente en la sustentabilidad, el uso de energías renovables, el uso de agua de mar desalinizada y la inclusión de la mujer.

1.2 Justificación del estudio.

El análisis comparativo entre un variador de frecuencia de bajo voltaje y otro de media tensión aplicado al ventilador principal de una mina subterránea se justifica por la necesidad de optimizar el rendimiento energético, la confiabilidad operativa y los costos globales del sistema de ventilación. En la actualidad, el consumo de energía eléctrica en ventilación representa uno de los mayores porcentajes dentro del total de la demanda energética de una operación minera, por lo que cualquier mejora en la eficiencia del control de velocidad de los ventiladores tiene un impacto económico y ambiental significativo.

Asimismo, la selección adecuada del tipo de variador está directamente relacionada con la potencia nominal del motor, la distancia entre el tablero de control y el motor, las condiciones de instalación en ambiente minero y los requerimientos de seguridad eléctrica. Los variadores de bajo voltaje suelen presentar ventajas en términos de costo inicial, mantenimiento y facilidad de instalación, mientras que los de media tensión ofrecen mejor desempeño para motores de gran potencia y menores pérdidas en cables y transformadores. Por ello, un análisis comparativo resulta esencial para determinar cuál tecnología se adapta mejor a las condiciones específicas del ventilador.

Desde una perspectiva técnica y económica, este estudio permitirá fundamentar la decisión de inversión considerando no solo la eficiencia energética, sino también factores como confiabilidad, disponibilidad de repuestos, vida útil de los componentes, compatibilidad con sistemas de automatización y cumplimiento de normas de seguridad eléctrica (IEC, IEEE, NEMA, entre otras). De esta manera, se busca asegurar que la solución seleccionada contribuya a una operación minera más segura, sostenible y eficiente.

1.3 Objetivo general.

Evaluar el estado general de dos modelos de VDF, para el sistema de ventilación principal de una mina subterránea, con la finalidad de determinar la mejor alternativa en términos técnicos y económicos.

1.4 Objetivos específicos.

- Realizar comparativa de variador de frecuencia en baja tensión y media tensión.
- Analizar los datos obtenidos con el fin de discernir la mejor opción para la compañía en términos de confiabilidad.
- Identificar y clasificar las variables asociados a los costos involucrados.
- Proponer la mejor opción en términos de eficiencia y costos.

1.5 Alcances y limitaciones del estudio.

El estudio estará basado en el análisis de dos variadores de frecuencia, uno de baja tensión y el otro de media tensión. Los cuales se evaluarán las características de la energía eléctrica suministrada en una instalación para así poder identificar sus prestancias. El estudio consiste en realizar una comparativa entre ambos variadores de frecuencia donde serán evaluados técnicamente y que tan viables son para su implementación en mina subterranéa. Para esto se considerarán parámetros de puntos de alimentación rutas existentes etc. Para luego analizar detalladamente los datos y desarrollar una planilla de costos en términos de construcción y puesta en marcha, y así determinar las recomendaciones para su instalación.

1.5.1 El alcance incluye:

- La revisión de las características eléctricas y operativas de ambos tipos de variadores, considerando potencia, tensión nominal, corriente, eficiencia, armónicos y requerimientos de instalación.
- La evaluación del comportamiento del sistema de ventilación en función de las prestaciones del variador (control de velocidad, estabilidad del flujo de aire y confiabilidad).
- El análisis comparativo de costos de inversión, operación y mantenimiento.
- La valoración de los aspectos de seguridad eléctrica y compatibilidad con el entorno minero subterráneo, de acuerdo con normas y estándares vigentes.
- La propuesta de la alternativa más adecuada según criterios técnicos, económicos y operacionales, orientada a optimizar la eficiencia energética del sistema de ventilación principal.

1.5.2 Limitaciones del estudio:

- El análisis se basa en condiciones teóricas y de diseño, sin incluir pruebas experimentales o mediciones en campo.
- No se consideran variaciones en la geometría de los ductos de ventilación, pérdidas de carga ni otros factores aerodinámicos externos al sistema de control eléctrico.
- Los costos analizados se estiman a partir de valores de mercado y catálogos técnicos, por lo que pueden variar según proveedor, ubicación geográfica y condiciones contractuales.
- El estudio se limita a dos alternativas específicas de variadores, sin contemplar otras tecnologías de control o fabricantes adicionales.
- No se profundiza en la integración con sistemas SCADA o de automatización avanzada, más allá de los requerimientos básicos de control de velocidad y monitoreo.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

Compañía Contractual Minera Ojos del Salado y Compañía Contractual Minera Candelaria, son parte del Distrito Minero Candelaria Lundin Mining, el que se ubican a 640 msnm en la Región de Atacama, específicamente, a 10 kilómetros al interior de la Comuna de Tierra Amarilla y 29 kilómetros al sur de la ciudad de Copiapó y, a aproximadamente, 808 Km al norte de la Región Metropolitana.

Las instalaciones están integradas por Compañía Contractual Minera Candelaria y Compañía Contractual Minera Ojos del Salado, en la primera encontramos una mina rajo abierto y otra subterránea, más planta concentradora Candelaria, mientras que Minera Ojos del Salado la componen dos minas subterráneas, Santos y Alcaparrosa, junto a la planta concentradora Pedro Aguirre Cerda.

Del proceso productivo se obtiene concentrado de cobre con un promedio de 9% de humedad, el que es almacenado y enviado en camiones encapsulados hacia proveedores locales y, principalmente, al puerto del Distrito, Puerto Punta Padrones, ubicado en la comuna de Caldera y en cuyas instalaciones se encuentra la planta desalinizadora que permite un uso eficiente y sustentable de agua de calidad industrial para el proceso productivo del Distrito.

Cabe destacar que la distancia estimada entre la faena Minera Ojos del Salado (CCMO) y Minera Candelaria (CCMC) es de aproximadamente 12 kilómetros, de los cuales la mayor parte se encuentra sin pavimento, pero estabilizado y compactado con tratamiento de bischofita en buenas condiciones para cualquier tipo de vehículos.

Figura 1: Ubicación Distrito Candelaria.

Este capítulo tiene como propósito explicar de manera breve los conceptos teóricos que involucra un estudio comparativo de VDF en baja y media tensión aplicados al control de ventiladores de 500 hp en operaciones subterráneas, definir las variables en términos de capacidades, señalar el problema raíz, los costos que conlleva la implementación en ambos escenarios, etc.

2.1 Variador de frecuencia.

Un variador de frecuencia (VDF) es un dispositivo electrónico que controla la velocidad de los motores de corriente alterna (CA) ajustando la frecuencia y la tensión de la alimentación eléctrica. Se ubica entre la fuente de energía y el motor para modificar la potencia que llega a este y, de esa manera, optimizar el consumo energético, prolongar la vida útil del motor y controlar la aceleración/desaceleración.

2.2 Principio de funcionamiento del VDF.

- El proceso de funcionamiento se puede dividir en tres etapas principales:
- Rectificación: La corriente alterna (CA) de la red se convierte en corriente continua (CC) mediante un grupo de diodos.
- Filtrado: Se suaviza la corriente continua (CC) con condensadores para eliminar las ondulaciones.
- Inversión: La corriente continua se convierte de nuevo en corriente alterna (CA), pero esta vez con la frecuencia y la tensión deseadas, gracias a transistores (como los IGBT) que actúan como interruptores rápidos.

2.3 Beneficios principales.

Utilizar un variador de frecuencia en aplicaciones industriales ofrece varios beneficios significativos, como:

- Ahorro de energía: Al adaptar la velocidad del motor a la demanda exacta, se evita el consumo innecesario de electricidad.
- Control de velocidad preciso: Permite ajustar la velocidad del motor de forma precisa, lo que mejora la eficiencia de las máquinas y el proceso de producción.
- Mayor vida útil: Protege al motor de sobrecargas y reduce el estrés mecánico al suavizar los arranques y paradas, prolongando la vida del motor y otros componentes.
- Reducción de ruido: En aplicaciones como ventiladores y bombas, puede disminuir los niveles de ruido operativo.
- Control de picos de demanda: Limita los picos de consumo eléctrico que pueden suponer costes adicionales en la factura.
- Flexibilidad: permiten una amplia gama de velocidades y pueden adaptarse a diferentes condiciones de operación, lo que los hace versátiles para diversas aplicaciones.
- Menor mantenimiento: La reducción del desgaste y la operación más eficiente pueden llevar a menores costos de mantenimiento y reparaciones.

2.4 Comparativa teórica entre variadores de BT y MT

Los variadores de frecuencia (VDF) se utilizan para controlar la velocidad de motores eléctricos, optimizar el consumo energético y mejorar el proceso industrial. Sin embargo, su electrónica de potencia introduce efectos que pueden impactar la calidad de la energía, por lo que es indispensable evaluar su comportamiento tanto en sistemas de baja tensión (BT) como de media tensión (MT).

Los VDF de BT suelen generar mayor distorsión armónica y requieren filtros adicionales para cumplir normativas, pero su efecto total en la red es limitado debido a su potencia más baja.

Por otro lado, los VDF de MT reducen armónicos gracias a su tecnología avanzada, pero debido a su alta potencia requieren estudios detallados de interacción con la red, protecciones y compatibilidad electromagnética.

2.4.1 Tabla 1:Comparativa de VFD en Baja Tensión vs Media Tensión.

Aspecto	Variador de Frecuencia BT (400–690 V)	Variador de Frecuencia MT (2.3–13.8 kV)
Topología típica de rectificador	6 y 12 pulsos	Multinivel, 18/24 pulsos
Distorsión armónica (THDi)	35–45% sin filtrado; 8–12% con filtrado	<10% típicamente
Necesidad de filtros	Alta (pasivos, activos, reactores)	Baja (integrados o innecesarios)
Factor de potencia verdadero	Medio (afectado por armónicos)	Alto (≈1)
Impacto en la red	Moderado; depende del cortocircuito disponible	Alto; requiere estudios avanzados
Flicker	Bajo a moderado	Alto si no se controla
EMC / Interferencias	Alta susceptibilidad en ambientes industriales	Menor por diseño multinivel, pero requiere blindaje
Protecciones	Estándar: sobrecorriente, falla a tierra	Avanzadas: DP, sobretensiones, coordinación con transformador
Riesgos de dv/dt	Moderado	Alto (PWM MT) – motor debe ser apto
Costo del sistema	Bajo a medio	Alto
Aplicación típica	Bombas, ventiladores, cintas, maquinaria ligera	Compresores, ventiladores grandes, molinos, bombeo de alta potencia

2.5 Fuente de tensión aplicado al VDF

El voltaje es uno de los parámetros centrales en la evaluación de la calidad de la energía eléctrica, ya que su estabilidad y forma de onda determinan el desempeño, la eficiencia y la vida útil de los equipos conectados. La incorporación de variadores de frecuencia de baja tensión (BT) y media tensión (MT) introduce fenómenos particulares que afectan el comportamiento del voltaje tanto en la red como en el motor alimentado. Estos efectos derivan principalmente de la conversión electrónica de potencia utilizada para controlar la velocidad y el par del motor.

En los variadores de frecuencia de baja tensión, el voltaje suministrado al motor se genera mediante técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM). Esta modulación produce una señal compuesta por pulsos de alta frecuencia que, aunque equivalen a un voltaje eficaz controlado, difieren significativamente de una onda sinusoidal pura. El resultado es un elevado dv/dt, que genera esfuerzos dieléctricos sobre el aislamiento del motor y puede ocasionar sobretensiones reflejadas en cables largos. A nivel de red, el rectificador de entrada puede generar depresiones momentáneas de voltaje, especialmente cuando la red tiene baja potencia de cortocircuito, así como distorsión armónica en la tensión, afectando la calidad del suministro para otros equipos sensibles.

En los variadores de frecuencia en media tension, aunque también se emplea modulación electrónica, las topologías son usualmente multinivel. Estas arquitecturas producen una forma de onda de voltaje más escalonada y más cercana a la sinusoidal, reduciendo considerablemente los valores de dv/dt en comparación con los variadores de baja tensión. Sin embargo, debido a los mayores niveles de voltaje, los equipos del sistema—incluyendo cables, transformadores y motores—requieren una coordinación de aislamiento adecuada para soportar las sobretensiones producidas por los procesos de conmutación. Además, la interacción del VDF con la red puede generar fluctuaciones de voltaje o flicker, especialmente cuando se controlan motores de gran potencia cuya variación de carga produce oscilaciones perceptibles en el nivel de tensión.

El análisis del voltaje en sistemas con VDF incluye el estudio de fenómenos como variaciones de tensión (sags y swells), distorsión armónica de voltaje, transitorios de conmutación, flicker, sobrevoltajes reflejados y compatibilidad electromagnética (EMC). Comprender estos fenómenos es esencial para garantizar el funcionamiento óptimo del variador y del motor, así como para prevenir fallas prematuras en la infraestructura eléctrica. Normas reconocidas, como IEEE 519 o IEC 61000, establecen límites aceptables de distorsión y fluctuación del voltaje, y sirven como referencia para evaluar el impacto de variadores de frecuencia en la calidad de la energía.

En conjunto, el análisis del voltaje permite determinar si un sistema eléctrico es capaz de soportar la operación de un VDF sin comprometer la confiabilidad del proceso industrial. Asimismo, facilita la selección de medidas de mitigación, tales como filtros, reactores,

transformadores específicos, cables aptos para altos dv/dt y estrategias de control que minimicen fluctuaciones y distorsiones en el voltaje suministrado.

2.6 Análisis de corriente aplicada a los VDF

El análisis de la corriente es un elemento esencial dentro de la calidad de la energía eléctrica, ya que la forma, magnitud y comportamiento dinámico de las corrientes determinan el impacto que un equipo ejerce sobre la red y sobre los dispositivos asociados. En sistemas que emplean variadores de frecuencia (VDF) de baja tensión (BT) y media tensión (MT), la corriente presenta características particulares derivadas de los procesos de rectificación, filtrado y conmutación electrónica utilizados para el control del motor.

En los variadores de frecuencia de baja tensión, la etapa de entrada está formada comúnmente por un rectificador de 6 o 12 pulsos. Debido a esta conversión, la corriente absorbida desde la red no es sinusoidal, sino que contiene un conjunto significativo de armónicos de corriente, especialmente de orden bajo (5°, 7°, 11°, 13°, etc.). Estos armónicos incrementan la corriente RMS total, reducen el factor de potencia verdadero y provocan efectos negativos como sobrecalentamiento en transformadores, cables y equipos de protección. Además, cuando el sistema posee baja potencia de cortocircuito, la presencia de estos armónicos puede distorsionar la forma de onda de tensión y deteriorar la calidad general del suministro eléctrico.

En la etapa de salida del VDF de baja tensión, la corriente que se entrega al motor depende directamente de la señal PWM generada por el inversor. Aunque el voltaje de salida es altamente pulsado, la corriente del motor tiende a ser casi sinusoidal debido a la inductancia propia del motor, que actúa como un filtro. Sin embargo, pueden presentarse armónicos de corriente en la salida, especialmente bajo cargas no lineales o cuando existen longitudes de cable elevadas, pudiendo incrementar las pérdidas térmicas en el motor y reducir su vida útil.

En los variadores de frecuencia de media tensión, las corrientes de entrada presentan un comportamiento más favorable debido al uso de topologías avanzadas como rectificadores multinivel o convertidores de múltiples pulsos (18, 24 o más). Estas configuraciones permiten que la corriente absorbida desde la red sea más cercana a una forma sinusoidal, reduciendo de manera significativa la distorsión armónica y mejorando el factor de potencia. No obstante, debido a las mayores potencias involucradas, incluso pequeñas distorsiones pueden tener un impacto considerable en la red, por lo que se requiere una evaluación rigurosa mediante estudios de armónicos conforme a normativas internacionales.

En la salida del VDF de media tensión, la corriente del motor también es suavizada por la inductancia del devanado, pero la presencia de múltiples niveles de voltaje hace que las corrientes reflejen menos distorsión en comparación con los VDF de baja tensión. Aun así, debe considerarse la interacción entre la frecuencia de conmutación, la impedancia del sistema y la carga, ya que estos factores pueden generar corrientes circulantes, transitorios o resonancias si el sistema no está adecuadamente diseñado.

El análisis de la corriente en ambos tipos de variadores incluye la evaluación de la distorsión armónica total de corriente (THDi)**,** la corriente RMS**,** las corrientes transitorias**,** el factor de cresta, la conformidad con estándares aplicables y el comportamiento en condiciones de arranque, frenado o cambios bruscos de carga. Comprender estos aspectos permite dimensionar correctamente cables, transformadores, protecciones y equipos de mitigación, así como garantizar la operación segura y eficiente del variador y del motor asociado.

2.7 Frecuencia

La frecuencia es el parámetro central en el funcionamiento de un variador de frecuencia (VDF), porque controla directamente la velocidad y el torque de un motor eléctrico de corriente alterna (generalmente un motor de inducción)

La frecuencia es una variable fundamental, ya que determina la velocidad de rotación de los motores y el comportamiento dinámico de los sistemas eléctricos. En condiciones ideales, la frecuencia del sistema eléctrico debe mantenerse constante (50 o 60 Hz, según región), ya que variaciones significativas pueden afectar el funcionamiento de equipos sensibles, reducir la eficiencia de los motores y causar inestabilidad en procesos productivos. La incorporación de variadores de frecuencia (VDF) de baja tensión (BT) y media tensión (MT) introduce fenómenos particulares relacionados con el control y la modulación de la frecuencia que influyen directamente en la calidad del suministro y en el desempeño del motor alimentado.

En los variadores de frecuencia de baja tensión, la frecuencia suministrada al motor es generada artificialmente mediante técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM). Esta técnica crea una señal compuesta por pulsos de alta frecuencia que sintetizan una onda de frecuencia variable. Aunque la frecuencia efectiva del motor es controlada con precisión, la señal contiene componentes de frecuencia muy superiores a las fundamentales, derivadas de la frecuencia de conmutación del inversor. Estas altas frecuencias no afectan directamente la operación mecánica del motor, pero pueden inducir efectos no deseados como corrientes parásitas, pérdidas adicionales en el hierro, y ruido acústico. Además, la interacción entre la frecuencia de conmutación y las impedancias del sistema puede generar resonancias, afectando la estabilidad del convertidor y la integridad de equipos cercanos.

En los variadores de media tensión, la frecuencia entregada al motor también es modulada electrónicamente, pero la arquitectura del convertidor suele ser multinivel, lo que reduce la cantidad de armónicos y componentes de alta frecuencia presentes en la señal. Esto produce una forma de onda más suave y amigable para el motor, disminuyendo pérdidas

adicionales y reduciendo riesgos como corrientes circulantes o vibraciones mecánicas inducidas. No obstante, la alta potencia manejada en estos equipos implica que cualquier inestabilidad en la frecuencia —ya sea por fallas en el control o por desbalances en la red— puede generar oscilaciones significativas que afecten a la red de distribución o a otros equipos de potencia conectados.

El análisis de la frecuencia en la calidad de la energía eléctrica con VDF incluye el estudio de fenómenos como estabilidad de la frecuencia suministrada**,** interacción entre la frecuencia de salida y la carga mecánica**,** armónicos de frecuencia superior derivados de la modulación**, y** compatibilidad electromagnética. También se consideran aspectos como la respuesta del motor ante variaciones rápidas de frecuencia, el comportamiento durante rampas de aceleración y desaceleración, y la influencia que tiene la frecuencia de conmutación en el calentamiento, vibraciones y ruidos.

Un adecuado análisis de frecuencia permite asegurar que el variador opere de forma estable y eficiente, que el motor reciba una señal adecuada a su diseño, y que el sistema eléctrico no experimente perturbaciones que comprometan la calidad del suministro. Las normas internacionales (como IEC 61800 e IEC 61000) establecen lineamientos para evaluar los efectos de las conmutaciones de alta frecuencia y los armónicos relacionados, garantizando que los variadores de frecuencia cumplan con criterios estrictos de calidad de energía.

CAPITULO 3
NORMATIVA VIGENTE

La regulación de frecuencia es uno de los pilares fundamentales para la operación segura y confiable de los sistemas eléctricos de potencia. Mantener la frecuencia del sistema cercana a su valor nominal es esencial para garantizar la estabilidad de la red, la continuidad del suministro y la protección de los equipos conectados. En contextos donde la generación y la demanda deben mantenerse en equilibrio permanente, cualquier desajuste puede provocar variaciones de frecuencia que, de no ser corregidas oportunamente, afectan la calidad y seguridad del servicio eléctrico.

En el caso de Chile, la regulación de frecuencia se encuentra respaldada por un marco normativo y técnico robusto, que define los límites operativos, los mecanismos de control y los servicios complementarios necesarios para mantener la estabilidad del Sistema Eléctrico Nacional. Dicho marco está compuesto por decretos, normas técnicas y lineamientos estratégicos que adquieren especial relevancia en el actual escenario de transición energética, caracterizado por una creciente penetración de energías renovables y una mayor necesidad de flexibilidad operativa.

A continuación, se presenta una descripción de los principales conceptos asociados a la regulación de frecuencia, así como las normas, regulaciones y desafíos actuales que rigen su aplicación en Chile.

3.1 Regulación de frecuencia

La frecuencia eléctrica (“frecuencia de red”) es la tasa de oscilación de la corriente alterna en la red eléctrica, medida en Hz (hertz). En sistemas de potencia, mantener la frecuencia muy cerca de su valor nominal es fundamental para la estabilidad del sistema.

Las variaciones de frecuencia ocurren cuando hay desbalances entre generación y demanda: si la demanda sobrepasa la generación, la frecuencia baja; si la generación sobrepasa la demanda, la frecuencia sube.

Hay “servicios complementarios” (o auxiliares) que ayudan a regular la frecuencia: por ejemplo, control primario, secundario y terciario de frecuencia.

3.1.1 Principales normas y regulaciones aplicables en Chile

a) Decreto 327 (Ministerio de Minería / SEC)

- El Decreto Supremo n.º 327 fija el reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos.
- Establece que la frecuencia nominal del voltaje para sistemas con servicio público de distribución es 50 Hz. Sec Chile
- Define rangos de variación tolerable en operación normal: por ejemplo, para ciertos sistemas, indica límites con desviaciones temporales de frecuencia (bajos y altos) respecto a los 50 Hz.
- También regula, por ejemplo, tolerancias de tensión (pero eso es parte del control de calidad eléctrico, no solo frecuencia).

b) Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS)

- La Comisión Nacional de Energía (CNE) tiene una Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS).
- En la versión de enero 2025 se regulan varios aspectos relacionados con el control de frecuencia, incluyendo:
- Reserva para control de frecuencia ("margen de potencia activa" que las instalaciones deben tener para poder responder a desvíos de frecuencia).
- Evaluación del desempeño del control de frecuencia (medición periódica, indicadores) para garantizar la calidad del servicio.
- Parámetros mínimos para el "Factor de Eficiencia del Control de Frecuencia" (FECF), que es un indicador técnico para medir cómo responde el sistema a perturbaciones de frecuencia. Según la NT SyCS, el valor mínimo del FECF no debe ser menor a 0,45.
- La medición de frecuencia se debe hacer con un intervalo de muestreo (por ejemplo, 10 segundos) y filtrar para calcular promedios útiles para control.
- Además, la CNE ha iniciado (en 2024) un proceso para modificar esta normativa, con el fin de adaptarla al escenario actual de transición energética (más renovables, sistemas que requieren más flexibilidad).

c) Norma Técnica de Servicios Complementarios (NT SSCC)

- La Norma Técnica de Servicios Complementarios (SSCC) define los requisitos, metodologías y condiciones para los servicios que ayudan a estabilizar la red — entre ellos los controles de frecuencia.
- Abarca cómo se debe verificar la disponibilidad de las instalaciones para prestar estos servicios, cómo se evalúa su desempeño y cómo remunerarlos, según la normativa vigente.

d) Normas de instalaciones eléctricas

- Reglamento de Seguridad de las Instalaciones de Consumo de Energía Eléctrica. Dentro de los 19 pliegos Normativos RIC, decreto supremo N°8, aplican directamente para la instalación de un VDF;

  RIC N°2 Diseño seguro de tableros de se aloja el variador de frecuencia.

  RIC N°5 Protecciones (diferenciales, aislamiento) para evitar choques eléctricos por fallas del variador o su circuito.

  RIC N°6 Puesta a tierra y enlace equipotencial correctos para que la falla sea evacuada y las protecciones actúen.

- En las "Norma Técnica de Conexión y Operación de Equipos de Generación" de la CNE también hay requisitos para que las centrales (incluyendo renovables) participen en el control de frecuencia (mediante controladores de potencia/frecuencia).

3.1.2 Marco estratégico / de política energética

- El Ministerio de Energía tiene la "Estrategia de Flexibilidad para el Sistema Eléctrico Nacional", donde se reconoce que el control de frecuencia es crucial en un sistema con gran presencia de energías renovables.

- Esta estrategia promueve mecanismos para mejorar la operación en tiempo real, manejar desvíos de generación/demanda y fortalecer los servicios complementarios (como control de frecuencia), para garantizar la estabilidad del sistema.

3.1.3 Desafíos y consideraciones actuales

- Transición energética: Con más energía renovable (solar, eólica), muchos generadores no tienen la inercia clásica de las centrales térmicas o hidráulicas, lo que dificulta el control de frecuencia.
- Necesidad de almacenamiento: Para responder rápido a variaciones de frecuencia se necesitan recursos flexibles (almacenamiento, baterías) que puedan actuar como reserva.
- Actualización normativa: El proceso que inició la CNE para modificar la NTSyCS sugiere que la regulación actual se está adaptando para estos nuevos desafíos.
- Medición y monitoreo: Se requiere un monitoreo muy fino de la frecuencia (y otros parámetros) para evaluar el desempeño del control del sistema, lo cual implica infraestructura de medición, comunicaciones, etc.

CAPITULO 4

ANTECEDENTES TÉCNICOS

4.1 Equipos a analizar

4.1.1 Variador Power Electronics SD700 series

El variador SD700 es un dispositivo electrónico industrial diseñado para el control de motores de corriente alterna, con potencias que varían desde 50 kW hasta 150% del valor nominal del equipo. Es compatible con diferentes tensiones de motor, desde 5 hasta 500 VAC. Ofrece control vectorial sin encoder (sensorless) y control vectorial con lazo cerrado y V/Hz, con frecuencias de modulación de 4 a 8 kHz (PEWave). Tiene protección contra diversas fallas como sobretemperatura, sobrecarga, bloqueo de rotor, desequilibrio de fase y pérdida de fase, además de protección contra sobretensiones y baja tensión de entrada.

4.1.1.1 Diseño Mecánico: El equipo está diseñado con un concepto de FFA (Full Frontal Access), que permite un acceso completo a los componentes desde el frente, facilitando la instalación y el mantenimiento. Esto brinda un acceso fácil, una instalación sencilla y un mantenimiento cómodo gracias a su independencia modular.

Está disponible en dos grados de protección: IP20 e IP54, adaptándose a diferentes entornos de trabajo.

4.1.1.2 Prestaciones:

- **Display Táctil Gráfico:** Es el primer variador que incorpora una pantalla TFT-LCD de 3,5 pulgadas, que permite una programación rápida y cómoda, visualización personalizada, ayuda integrada, registro de fallos y selección de idioma. Lo que facilita la programación rápida y cómoda.

- **Modularidad y Accesibilidad:** Gracias a su diseño mecánico FFA (Full Frontal Access), ofrece un acceso sencillo para instalación y mantenimiento, en variantes IP20 e IP54.
- Incluye funciones avanzadas como reloj horario y calendario perpetuo.
- **Comunicación y Conectividad:** Dispone de un puerto USB 2.1, puertos de fibra óptica, y comunicación GSM y GPRS vía SMS, facilitando la monitorización y control remoto.
- Cuenta con puertos para fibra óptica, permitiendo comunicaciones eficientes y seguras.

4.1.1.3 Fiabilidad:

- Utiliza algoritmos "Fault Preventing Algorithms" (FPA) que detectan situaciones críticas en funcionamiento y las corrigen, evitando paradas innecesarias en la producción.
- Emplea la estrategia de control MCA (Motion Combined Algorithms), que combina diferentes métodos de control de motores para ofrecer robustez y estabilidad adicional.

Estas características hacen del SD700 un variador de velocidad avanzado, confiable y fácil de gestionar, ideal para aplicaciones industriales que requieren control de motores de manera eficiente y segura.

4.1.1.4 Montaje y Conexión:

Para el montaje, es fundamental respetar las condiciones ambientales indicadas, como temperaturas de -30°C a +50°C y humedad relativa inferior a 95%. La instalación debe realizarse siguiendo las instrucciones del manual, asegurando una correcta orientación y distancia de separación entre componentes. Las conexiones eléctricas incluyen la alimentación de potencia, donde se recomienda utilizar un interruptor automátic o fusible adecuado, y un contactor si es necesario. La conexión del motor debe evitar condensadores, filtros de ruido, o supresores en la salida del variador.

Este conjunto de características hace que el SD700 sea un variador de velocidad avanzado, con un diseño fácil de montar y mantener, además de ofrecer alto rendimiento y fiabilidad en aplicaciones industriales.

4.1.1.5 Configuración Básica:

El proceso de configuración involucra seleccionar los parámetros adecuados para el control del motor y garantizar la protección del equipo. Se debe configurar la tensión del motor, la potencia, los límites de velocidad y par, y las funciones de protección específicas. Además, la comunicación vía Modbus puede ser configurada para integraciones del sistema, asegurando un correcto funcionamiento del variador en su entorno industrial.

4.1.1.6 Seguridad:

Es imprescindible desconectar la alimentación antes de realizar tareas de mantenimiento o conexión, verificar que la tensión en el bus DC esté descargada (menos de 30VDC) y manejar el equipo con precaución, incluyendo el uso de equipo de protección personal.

4.1.2 Variador Eaton SC9000EP

El variador de velocidad SC9000 EP es un sistema integral de control de motores de media tensión, diseñado para ofrecer un control preciso y protección de equipos hasta 12,000 hp. Está completamente integrado e incluye componentes como un interruptor de aislamiento, contactor fusible, transformador de aislamiento, rectificador e inversor en una sola unidad.

Se destaca su alta integración, facilidad de mantenimiento, seguridad para el personal y cumplimiento con normas como IEEE 519. Además, cuenta con características como un transformador de 24 pulsos, conmutadores de aislamiento, fusibles limitadores de corriente, y un diseño compacto ideal para espacios reducidos.

4.1.2.1 Diseño mecánico

El equipo está diseñado con una estructura robusta que integra todos los componentes principales en un solo ensamblaje.

Los componentes eléctricos y de control son accesibles desde la parte frontal, lo que simplifica inspecciones, mantenimiento y reemplazos sin tener que desmontar la unidad completa.

Las guías y los soportes están diseñados para su colocación en pisos o bases estructurales estándar, con agujeros de montaje que cumplen con dimensiones específicas para asegurar estabilidad.

El sistema incluye ventiladores integrados (normales y opcionalmente redundantes) en posiciones específicas para garantizar la refrigeración adecuada del equipo durante la operación, ubicados en la parte superior o lateral según el diseño del marco.

La carcasa y componentes estructurales están diseñados con materiales resistentes que cumplen con estándares para aplicaciones industriales, asegurando durabilidad y protección contra condiciones ambientales adversas, especialmente en enclosures NEMA 1 estándar, con opciones para construcción resistente al arco.

4.1.2.2 Prestaciones

El variador SC9000 EP ofrece varias prestaciones diseñadas para garantizar una operación eficiente, segura y flexible en aplicaciones de media tensión.

Entre las cuales destacan las siguientes:

- **Alta eficiencia y protección térmica:** Uso de tecnología de tubos de calor que mejora la eficiencia en la refrigeración, permitiendo una operación silenciosa y de bajo consumo energético.
- **Diseño modular y de rápido mantenimiento:** La configuración roll-in/roll-Out permite retirar y reemplazar rápidamente el inversor en caso de fallos, minimizando el tiempo de inactividad y facilitando el mantenimiento.
- **Protección completa y seguridad para el personal:** Incluye interlocks y mecanismos que aseguran que las puertas y accesos se bloqueen cuando el equipo está en funcionamiento, protegiendo a los operarios.
- **Control y monitoreo avanzado:** Opciones integradas de monitoreo con medidores Power Xpert, protección con relés de control y respaldo de energía mediante UPS, para una supervisión continua y protección de la maquinaria.
- **Varias opciones de entrada y salida:** Flexibilidad para recibir diferentes rangos de tensión de entrada (de 2.4 a 13.8 kV) y salidas en voltajes de 2400 V, 3300 V y 4160 V, simplificando la integración en diferentes aplicaciones y reduciendo componentes adicionales como transformadores.
- **Sistemas de enfriamiento y protección ambiental:** Encapsulación de componentes en entornos adversos y protección contra contaminantes, asegurando una larga vida y funcionamiento fiable en condiciones duras.
- **Opciones de control y accesorios:** Opciones como control integrado, opciones de enclausurado en NEMA 1 y montaje en gabinetes modulares, además de funciones adicionales como protección contra sobrecorriente, bloqueo de arranque, detección de fallas y más

- **Componentes de alta fiabilidad:** Uso de rectificadores, transformadores y fusibles de alta calidad para garantizar una operación estable y segura en aplicaciones de potencia media en diversas condiciones operativas [T1–T5].

En conjunto, el SC9000 EP combina capacidades avanzadas de control, protección, enfriamiento y mantenimiento para ofrecer una solución robusta y eficiente para la operación de motores de media tensión en aplicaciones industriales.

4.2 Antecedentes lugar de implementación

Las condiciones operativas de una mina subterránea son determinantes para garantizar tanto la seguridad como la eficiencia del proceso extractivo. Para ello, se requiere una planificación rigurosa que considere aspectos fundamentales como la geomecánica, la estabilidad de la roca y la identificación de riesgos geotécnicos e hidrogeológicos. La construcción de túneles demanda un diseño detallado y la aplicación de tecnologías adecuadas que aseguren la estabilidad y seguridad estructural durante todas las etapas de la excavación subterránea. Asimismo, es indispensable implementar controles de riesgos que contribuyan a disminuir la probabilidad de accidentes graves o fatales en las distintas fases del ciclo minero, tales como perforación, tronadura, carguío y transporte.

La ventilación en una mina subterránea constituye un elemento esencial para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores. Su importancia radica en diversas funciones críticas, entre las cuales destacan:

- **Suministro de aire fresco:** Proporciona un flujo continuo de oxígeno necesario para la respiración de los trabajadores.

- **Dilución de gases peligrosos:** Permite dispersar y reducir la concentración de gases tóxicos, asfixiantes o explosivos, como metano, monóxido de carbono y dióxido de azufre, generados por las operaciones mineras y el funcionamiento de equipos.

- **Control de temperatura:** Regula las condiciones térmicas del ambiente subterráneo, que tiende a experimentar aumentos debido a la profundidad y al uso de maquinaria.

- **Reducción del polvo en suspensión:** Disminuye la presencia de partículas en el aire, contribuyendo a la protección de la salud respiratoria del personal.

Una ventilación adecuada no solo mejora las condiciones de seguridad y salud ocupacional, sino que también favorece la continuidad y eficiencia operativa de la actividad minera.

En Minera Candelaria, la instalación de infraestructura se lleva a cabo, en algunos casos, en estocadas previamente definidas. No obstante, la mayoría de las intervenciones se realizan en estocadas de inversión, carguío u otras, las cuales deben ser reacondicionadas mediante labores de fortificación y habilitación eléctrica. Además, estos espacios deben contar con un sistema de ventilación que garantice condiciones óptimas para la operación segura y eficiente de equipos como los variadores de frecuencia.

Figura 2: Disposición de variadores en mina subterránea.

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y COMPARATIVA ENTRE VDF

5.1 Análisis de niveles de voltaje

Los variadores de frecuencia (VDF o drives) son equipos electrónicos que permiten controlar la velocidad y el torque de motores eléctricos, modulando la frecuencia y tensión de alimentación. Su uso es común tanto en aplicaciones de baja tensión (hasta 690 V) como de media tensión (desde 1 kV hasta 6 kV o más).

El análisis de voltaje en un sistema alimentado por VDF es crítico para garantizar la calidad de la energía, la protección del motor y la eficiencia operativa. La distorsión, sobretensiones y fluctuaciones pueden afectar la vida útil de los equipos y la confiabilidad del sistema.

Para el análisis de voltaje en variadores se consideran los siguientes parámetros:

5.1.1 Tabla 2: Parámetros de voltaje eléctrico a analizar.

Parámetro	Definición	Relevancia
Voltaje RMS	Valor eficaz de la tensión aplicada al motor	Indica si el motor recibe la tensión correcta según su nominal
Sobretensión y subvoltaje	Exceso o caída de tensión respecto al valor nominal	Puede dañar el aislamiento del motor o generar mal funcionamiento
Distorsión armónica de tensión (THD_V)	Porcentaje de distorsión respecto a la componente fundamental	Influye en calentamiento y vibraciones en el motor
Variación de tensión	Fluctuaciones rápidas de voltaje	Puede generar parpadeo de iluminación o errores en equipos electrónicos
Fase a fase / fase a neutro	Simetría de la tensión en sistemas trifásicos	Desequilibrios generan sobrecarga en fases y pérdidas de eficiencia

5.2 Análisis de voltaje en variadores de baja tensión (BT)

Rango típico: 230 V, 400 V o 690 V.
Potencia típica: hasta 1 MW.

5.2.1 Características de la tensión suministrada.

5.2.1.1 Topología de salida

- Los variadores BT suelen usar PWM (modulación por ancho de pulso).
- La salida es pulsante, simulando una onda sinusoidal, pero con altas frecuencias de conmutación (2–16 kHz típicamente).

5.2.1.2 Distorsión de voltaje (THD_V)

- THD_V generalmente <5% si el motor está cerca del variador.
- El cableado largo o filtros insuficientes puede aumentar THD_V, generando sobrecalentamiento en motores y pérdidas adicionales.

5.2.1.3 Sobretensiones y dv/dt

- La tensión de conmutación produce picos (dv/dt) que pueden superar los 2–3 kV/µs en motores de BT.
- Requiere cables apantallados y, en algunos casos, filtros dv/dt o sinusoides de salida para proteger el aislamiento del motor.

5.2.1.4 Equilibrio de fases

- Es crítico mantener la simetría de tensión, ya que desequilibrios superiores al 2% pueden generar sobrecorriente y pérdidas por calentamiento.

5.2.1.5 Recomendaciones de medición

- Medir tensión RMS en cada fase y línea a neutro.
- Evaluar THD_V usando analizadores de potencia.
- Verificar la caída de tensión si el motor está lejos del variador (>50 m).

5.3 Análisis de voltaje en variadores de media tensión (MT)

Rango típico: 1 kV a 6 kV.

Potencia típica: 1 MW a >50 MW.

5.3.1 Características de la tensión suministrada

5.3.1.1 Topología de salida

- Variadores MT usan inversores modulares de IGBTs o multinivel.
- La forma de onda es más cercana a sinusoidal debido a la multiplicidad de niveles de tensión.

5.3.1.2 Distorsión de voltaje (THD_V)

- THD_V <3% es el objetivo típico en motores de media tensión.
- Los filtros pasivos o reactivos suelen instalarse para limitar armónicas y evitar resonancia con transformadores y líneas.

5.3.1.3 Sobretensiones y dv/dt

- La dv/dt es menor que en BT, pero los picos aún pueden afectar motores y aislamiento de cables largos.
- Se utilizan reactores de línea o filtros de salida de alta frecuencia para proteger motores MT.

5.3.1.4 Equilibrio de fases y neutro

- Los desequilibrios deben ser menores a 1–2% en MT, dado que afectan significativamente la corriente de magnetización de los motores.

5.3.1.5 Recomendaciones de medición

- Medir tensión RMS de cada fase y línea a neutro.
- Monitorear THD_V y armónicas superiores usando analizadores de calidad eléctrica de MT.
- Evaluar sobretensiones transitorias usando osciloscopios con registros de alta velocidad (para detectar picos de conmutación).

5.4 Comparación BT & MT

5.4.1 Tabla 3:Comparación de VDF BT & MT

Característica	Baja Tensión (BT)	Media Tensión (MT)
THD_V típica	<5%	<3%
Topología de PWM	Simple	Multinivel / modular
dv/dt	Alto, 2–3 kV/µs	Medio, menor que BT
Protección de motor	Filtros dv/dt, cables cortos	Reactores de línea, filtros pasivos
Sensibilidad al desequilibrio	Moderada	Alta, afecta corriente de magnetización

5.5 Análisis de niveles de corriente

Los variadores de frecuencia (VDF) ajustan la velocidad y torque de motores eléctricos mediante el control de frecuencia y tensión. Un análisis detallado de los niveles de corriente es fundamental para garantizar:

- Protección de motores y variadores.
- Correcto dimensionamiento de protecciones y conductores.
- Cumplimiento de la normativa de calidad de energía (armónicas de corriente, THD_I, factor de potencia).

Los niveles de corriente dependen de la topología del VDF, la carga conectada y la distancia del motor al variador.

5.5.1 Tabla 4:Parámetros de corriente a analizar

Parámetro	Definición	Relevancia
Corriente RMS (I_RMS)	Valor eficaz de la corriente en cada fase	Determina sobrecarga térmica y dimensionamiento de cables
Sobrecorriente	Corriente que excede la nominal del motor	Puede activar protecciones o dañar equipos
Distorsión armónica de corriente (THD_I)	Porcentaje de armónicas respecto a la componente fundamental	Afecta eficiencia, aumenta pérdidas y sobrecalentamiento en transformadores y motores
Corriente de arranque / transitoria	Corriente máxima al arrancar	Relevante para dimensionamiento de protecciones y capacitores de arranque
Desbalance de corriente	Diferencia entre fases	Provoca sobrecalentamiento y reducción de vida útil del motor
Factor de potencia (FP)	Relación entre corriente activa y reactiva	Influye en la eficiencia y penalizaciones por energía reactiva

5.6 Análisis de corriente en variadores de baja tensión (BT)

Rango típico: 230 V, 400 V, 690 V.

Potencia típica: hasta 1 MW.

5.6.1 Características de la corriente suministrada

5.6.1.1 Forma de onda de corriente

- La corriente es no sinusoidal, con picos en los transitorios de conmutación debido a la modulación PWM.
- La corriente RMS efectiva puede ser superior al valor nominal durante arranques rápidos o cambios de velocidad.

5.6.1.2 Distorsión de corriente (THD_I)

- THD_I típico: 30–35% sin filtros.
- Los filtros pasivos (reactores de línea, filtros de salida) pueden reducir THD_I a <10–15%.
- Las armónicas afectan transformadores, cables y protecciones, generando sobrecalentamiento y vibraciones.

5.6.1.3 Corrientes de arranque y transitoria

- Picos de corriente hasta 1,5–2 veces la nominal durante arranque suave (soft-start) o cambios de frecuencia rápidos.
- Proteger motores y variadores mediante fusibles o interruptores automáticos ajustados a la corriente RMS media.

5.6.1.4 Equilibrio de fases

- Desequilibrio >2% puede causar sobrecalentamiento de una fase y disminución de eficiencia.

5.6.1.5 Recomendaciones de medición

- Medir corriente RMS y THD_I en cada fase usando analizadores de potencia o pinzas de corriente de alta frecuencia.
- Observar picos transitorios y evaluar el dimensionamiento de protecciones.

5.7 Análisis de corriente en variadores de media tensión (MT)

Rango típico: 1 kV a 6 kV.

Potencia típica: 1 MW a >50 MW.

5.7.1 Características de la corriente suministrada

5.7.1.1 Forma de onda de corriente

- Corriente más cercana a sinusoidal gracias a topologías multinivel o inversores modulares.
- Los picos de corriente durante transitorios son menores que en BT pero aún presentes.

5.7.1.2 Distorsión de corriente (THD_I)

- THD_I típico: <5–8% con filtros de línea y reactores.
- Menos perjudicial para motores y transformadores, pero se debe verificar compatibilidad con normas de red (IEC 61000-3-12, IEEE 519).

5.7.1.3 Corrientes de arranque y transitoria

- Corriente máxima limitada por la topología del VDF y control de rampa de frecuencia.
- Generalmente <1,5 veces la nominal en arranques suaves, evitando sobrecarga de la red MT.

5.7.1.4 Equilibrio de fases y neutro

- Desequilibrio crítico: >1–2% puede afectar la corriente de magnetización de motores MT.
- Es fundamental medir corriente en cada fase para asegurar distribución equilibrada.

5.7.1.5 Recomendaciones de medición

- Analizadores de calidad eléctrica MT con registro de armónicas hasta el 50º orden.
- Medición de corriente RMS y THD_I en tiempo real para control de sobrecarga y eficiencia.
- Evaluar corriente de cortocircuito mínima y máxima para ajustar protecciones de interruptores automáticos y relés de sobrecorriente.

5.8 Comparación entre variadores en BT & MT aplicado a corriente

5.8.1 Tabla 5:Comparativa aplicada a la corriente eléctrica.

Característica	Baja Tensión (BT)	Media Tensión (MT)
THD_I típico	30–35% sin filtros, <15% con filtros	<5–8%
Picos de corriente	1,5–2 veces nominal	<1,5 veces nominal
Corriente transitoria	Alta, sensible al cableado	Moderada, controlada por rampa
Sensibilidad al desequilibrio	Moderada	Alta, afecta magnetización del motor
Protección	Fusibles, interruptores BT	Interruptores MT y relés de sobrecorriente
Relevancia armónicas	Alta, afecta transformadores y cables	Media, afecta redes de distribución y motores

5.9 Análisis de la frecuencia

Los variadores de frecuencia (VDF) controlan la velocidad y torque de motores eléctricos mediante el ajuste de la frecuencia eléctrica aplicada al motor. La calidad, estabilidad y forma de la señal de frecuencia son fundamentales para garantizar:

- Funcionamiento seguro del motor.
- Reducción de vibraciones y fallas mecánicas.
- Control adecuado de procesos industriales.
- Minimización del estrés eléctrico sobre bobinados.

El análisis de frecuencia es distinto para variadores de baja tensión (BT) y media tensión (MT) debido a las diferencias en topología del inversor, electrónica de potencia, capacidad del bus DC y las características del motor.

5.9.1 Parámetros de Frecuencia Analizados

5.9.1.1 Tabla 6: parámetros de frecuencia analizados

Parámetro	Descripción	Importancia
Frecuencia de salida (Hz)	Frecuencia entregada por el VDF al motor	Determina velocidad síncrona del motor
Estabilidad de la frecuencia	Variaciones o fluctuaciones en la frecuencia	Impacta uniformidad del torque y vibraciones
Frecuencia de conmutación (kHz)	Frecuencia PWM usada por el VDF	Afecta ruido, calentamiento y armónicas
Rampa de aceleración / desaceleración	Tiempo requerido para cambiar frecuencia	Protege mecánicamente al motor y carga
Frecuencia mínima y máxima permitida	Límites configurables según motor	Evita sobrecalentamiento o pérdida de torque
Relación V/f	Control tensión–frecuencia	Mantiene flujo magnético adecuado

5.10 Análisis de la Frecuencia en Variadores de Baja Tensión (BT)

Rangos típicos: 0–400 Hz

Tensiones comunes: 230 V, 400 V, 690 V

Aplicaciones típicas: bombas, ventiladores, cintas, pequeñas cargas industriales.

5.10.1 Frecuencia de salida

Los variadores BT generan la frecuencia mediante PWM, "simulando" una onda sinusoidal.

- Rango típico configurable: 0,1 Hz hasta 400 Hz (algunos equipos especiales llegan a 600–1000 Hz).
- La estabilidad es alta, pero la forma de onda no es perfectamente sinusoidal.
- Observaciones técnicas
- A bajas frecuencias (<5 Hz) se requiere boost de voltaje para mantener el torque.
- A frecuencias elevadas (>60 Hz), el motor entra en zona de potencia constante, reduciendo torque.

5.10.2 Frecuencia de conmutación

- En variadores BT suele ser alta: 2–16 kHz.
- Alta frecuencia de conmutación implica:
- Menos ruido acústico.
- Mayor distorsión armónica de corriente.
- Mayor calentamiento en IGBTs y motor.

5.10.3 Estabilidad de frecuencia y rampas

- La frecuencia debe variar según curvas controladas de aceleración y desaceleración.
- Rampas típicas: 1–60 segundos.

Si la rampa es muy rápida → riesgo de sobrecorriente y disparo del variador.

5.10.4 Relación V/f en BT

- El VDF mantiene una relación tensión–frecuencia constante para mantener flujo magnético.
- Desajustes generan:
- Pérdida de torque.
- Sobrecalentamiento.
- Ruidos o vibraciones.

5.11 Análisis de la Frecuencia en Variadores de Media Tensión (MT)

Rangos típicos: 0–120 Hz
Tensiones típicas: 1 kV a 6 kV
Aplicaciones: minería, petróleo, HVAC industrial, bombas de gran caudal, ventiladores de túnel, compresores.

5.11.1 Frecuencia de salida

Los variadores MT usan topologías multinivel, lo que proporciona una frecuencia más sinusoidal y menos distorsionada.

- Rango típico configurable: 0,1 Hz hasta 120 Hz.
- Estabilidad superior a la de BT debido al mayor tamaño del bus DC y mejor filtrado.

5.11.2 Frecuencia de conmutación

Mucho más baja que en BT: 300 Hz a 2 kHz.

Razones:

- Las celdas de potencia y dispositivos de semiconductores soportan más corriente y tensión.
- Evita sobrecalentamiento y pérdidas en MT.
- Consecuencia:
- Menos ruido electromagnético.
- Menos armónicas en la corriente.

5.11.3 Estabilidad de frecuencia y rampas

- Rampas de aceleración típicas: 3 a 120 segundos, debido a la inercia de grandes cargas.
- La frecuencia es más estable y con menor ripple que en BT.

5.11.4 Relación V/f en MT

- El control V/f requiere mayor precisión por la potencia involucrada.
- Los variadores MT suelen usar control vectorial para mejorar desempeño en bajas frecuencias.

5.12 Comparación frecuencia en BT vs MT

5.12.1 Tabla 7: Comparación frecuencia en BT & MT.

Característica	Baja Tensión (BT)	Media Tensión (MT)
Frecuencia típica de salida	0–400 Hz	0–120 Hz
Frecuencia PWM	2–16 kHz	300 Hz – 2 kHz
Forma de onda	PWM más distorsionada	Multinivel casi sinusoidal
Ripple de frecuencia	Moderado	Muy bajo
Estabilidad	Alta	Muy alta
Relación V/f	Básica	Precisa / control vectorial
Rampas	1–60 s	3–120 s

Tras la revisión de los planos y de la distribución eléctrica en Candelaria UG, se observa que la red de media tensión presenta un diseño adecuado; sin embargo, su aplicación está limitada principalmente a equipos de media tensión, como celdas destinadas a la distribución de 6,9 kV para la alimentación de subestaciones (6,9 kV / 400 V). Estas subestaciones suministran energía a los distintos circuitos asociados a las áreas de desarrollo, producción e infraestructura de la mina.

En contraste, la red de baja tensión dispone de una mayor flexibilidad y capacidad de distribución. Ante una eventual incorporación de un variador de frecuencia (VDF), únicamente sería necesario el tendido del alimentador y su conexión a un punto existente, como un interruptor de subestación, un tablero de barras, un tablero de fuerza o un centro de control de motores (CCM).

De acuerdo con los proyectos eléctricos y de infraestructura de la mina, la implementación de variadores de frecuencia en media tensión implica un incremento significativo en los costos de inversión. Esto se debe a que la infraestructura de media tensión se encuentra actualmente en operación, lo que obligaría a la instalación de nuevas celdas de media tensión, con un costo aproximado de USD 70.000, además del alimentador requerido para la habilitación de dichos VDF.

A lo anterior se suma el diseño de las galerías, factor relevante considerando que el cableado debe instalarse sobre el splitline mediante una vía portacables, quedando expuesto en sectores críticos de tránsito de flota de mineral, estéril y otros vehículos.

Finalmente, desde el punto de vista del mantenimiento, una reparación por daño de cable en media tensión requiere un tiempo estimado de entre 4 y 5 horas para la ejecución de la mufa, mientras que en baja tensión el tiempo de reparación es cercano a una hora. Esta diferencia genera impactos productivos considerablemente mayores en sistemas de media tensión en comparación con los de baja tensión.

CAPITULO 6

PROPUESTA PLAN DE MEJORAS

6.1 Problemas de corriente por el conductor neutro

En los sistemas eléctricos trifásicos con conductor neutro, los variadores de frecuencia (VDF) introducen fenómenos adicionales de calidad de energía que pueden generar corrientes excesivas en el neutro, especialmente cuando coexisten cargas lineales, no lineales y equipos electrónicos de potencia.
La presencia de armónicos de secuencia cero, el desbalance de fases y la conmutación electrónica típica de los variadores son factores que incrementan el flujo de corriente por el conductor neutro, afectando la estabilidad, eficiencia y seguridad de la instalación.

El presente informe presenta un conjunto integral de mejoras técnicas, estructurales y correctivas orientadas a evitar o mitigar los problemas de corriente en el conductor neutro en sistemas que integran variadores de frecuencia de baja tensión (≤690 V) y media tensión (>1 kV).

6.2 Causas de corrientes elevadas en el neutro en presencia de variadores de frecuencia

6.2.1 Armónicos producidos por VDF

Los VDF generan corrientes armónicas debido a su rectificador de entrada (generalmente de 6 pulsos en baja tensión y multipulsos o multinivel en media tensión).
Los armónicos triplénicos (3°, 9°, 15°…) se suman en el neutro, pudiendo triplicar la corriente de fase en condiciones severas.

6.2.2 Desbalance de cargas trifásicas

Las cargas monofásicas conectadas a un sistema común con los VDF contribuyen a corrientes no uniformes en cada fase, lo que incrementa la corriente en el neutro.

6.2.3 Conexiones inadecuadas o incorrectas del neutro

Un neutro con mala continuidad o impedancia elevada amplifica la circulación de corrientes no deseadas.

6.2.4 Interacción entre variadores y transformadores

Transformadores mal seleccionados o sin aislamiento frente a armónicos permiten que los armónicos de secuencia cero ingresen hacia los sistemas aguas arriba.

6.3 Mejoras recomendadas para evitar problemas de corriente en el conductor neutro

La mitigación debe abordarse desde tres frentes principales:
(1) calidad de energía, (2) infraestructura eléctrica, y (3) control y supervisión.

- Mejoras orientadas a la mitigación de armónicos
- Uso de reactores de línea en variadores de baja tensión
- Instalación de reactores de línea del 3%–5% para reducir armónicos.
- Disminuye la magnitud de armónicos triplénicos generados por rectificadores de 6 pulsos.

Aplicación: Variadores BT de 6 pulsos.

6.3.1 Filtros pasivos sintonizados o de banda ancha

- Diseñados específicamente para neutralizar armónicos de secuencia cero.
- Recomendados para instalaciones con alta densidad de VDF de baja tensión.

Beneficio: Reducción del THDi y de corrientes en el neutro.

6.3.2 Filtros activos de armónicos (AF)

- Eliminan armónicos en tiempo real mediante inyección de corriente compensatoria.
- Altamente efectivos cuando la carga varía, como en sistemas con múltiples VDF.

Beneficio: Eliminan armónicos triples antes de llegar al neutro.

6.3.3 Uso de variadores multipulsos (12, 18 o 24 pulsos)

- Los variadores multipulsos reducen armónicos sin necesidad de filtrado intensivo.
- En baja tensión: varía entre 12 o 18 pulsos.
- En media tensión: comúnmente 18 o más pulsos.

Resultado: Menor generación de armónicos triplénicos.

6.3.4 Variadores de media tensión con topologías multinivel (NPC, cascada H-bridge)

- Disminuyen significativamente el THD en corriente.
- Armónicos de secuencia cero casi nulos.

Beneficio: Reducción drástica de corriente en el neutro por armónicos.

6.3.5 Transformadores zig-zag o en delta para suprimir armónicos triplénicos

- Los transformadores zig-zag derivan la corriente de secuencia cero hacia el transformador, no hacia el neutro del sistema.
- Los transformadores en delta bloquean los armónicos triples.

Aplicación**:** Sistemas con numerosos VDF BT o MT en instalaciones industriales.

6.4 Mejoras en la infraestructura eléctrica

6.4.1 Aumento del calibre del conductor neutro

- En presencia de variadores de baja tensión, cargas no lineales y armónicos triplénicos, se recomienda dimensionar el neutro al 150% o 200% del calibre de fase.
- En media tensión, las topologías multipulsos permiten mantener un neutro de calibre habitual.

Beneficio: Evita sobrecalentamiento y saturación térmica del neutro.

6.4.2 Instalación de conductores neutros paralelos

- Para instalaciones existentes donde no se pueda aumentar el calibre del neutro actual.
- Incrementa la capacidad de transporte de corriente.

6.4.3 Mejoras en la puesta a tierra

- Reducción de impedancia de tierra.
- Verificación de equipotencialidad entre barras de tierra y neutro.
- Eliminación de múltiples conexiones indebidas que inducen corrientes circulantes.

Beneficio: Minimiza corrientes armónicas que retornan por neutro o tierra.

6.4.4 Uso de transformadores K-factor o especiales para cargas no lineales

- Diseñados para soportar armónicos generados por VDF.
- Evitan que los armónicos triple-n ingresen hacia el neutro del sistema principal.

6.5 Mejoras en la distribución de cargas y diseño del sistema

6.5.1 Balanceo de cargas entre fases

- Reorganizar cargas monofásicas para minimizar desbalances.
- Fundamental en sistemas donde coexisten VDF y cargas no lineales de oficina (computadores, UPS, LED).

6.5.2 Segregación de cargas no lineales

- Realizar tableros separados para cargas lineales y no lineales.
- Evita la superposición de armónicos de diferentes equipos en el neutro común.

6.5.3 Conexiones adecuadas entre neutro y tierra

- Debe respetarse el punto único de unión N–T (según normas).
- Evita corrientes circulantes no controladas.

6.6 Control, monitoreo y mantenimiento

6.6.1 Análisis permanente de calidad de energía

- Instalar analizadores de red con capacidad de registrar THDi, THDv, armónicos triplénicos, corriente de neutro y desbalance.
- Generar informes periódicos.

6.6.2 Mantenimiento preventivo de tableros y neutros

- Verificación de continuidad del neutro.
- Medición térmica infrarroja de puntos calientes.
- Apriete de bornes críticos.

6.6.3 Modelación y simulación eléctrica

- Simulaciones en software (ETAP, DIgSILENT, SKM) para predecir corrientes de neutro bajo distintos escenarios de VDF.
- Permite seleccionar filtros, calibres y transformadores adecuados.

6.6.4 Tabla de resumen de mejoras recomendadas

6.6.4.1 Tabla 8: Tabla de resumen de mejoras recomendadas.

Área	Mejora	Aplicación BT	Aplicación MT	Impacto
Armónicos	Filtros activos	Alta	Media	Reducción dinámica de armónicos triplénicos
Armónicos	Filtros pasivos	Alta	Media	Eliminación parcial de 3°, 9°, 15°
Armónicos	Reactores de línea	Alta	Baja	Reducción de THDi en VFD BT
Armónicos	Variadores multipulsos	Media	Alta	Minimiza armónicos de secuencia cero
Infraestructura	Aumento del neutro	Alta	Baja	Evita sobrecalentamiento
Infraestructura	Neutro paralelo	Alta	Baja	Mayor capacidad de retorno
Infraestructura	Transformador zig-zag	Media	Alta	Derivación de armónicos triple-n
Distribución	Balanceo de cargas	Alta	Media	Disminuye corriente fundamental del neutro
Control	Analizadores de red	Alta	Alta	Supervisión continua de armónicos
Control	Simulación eléctrica	Media	Alta	Optimiza diseño y mitigación

6.7 Propuesta de mejora a variables eléctricas anormales

Los variadores de frecuencia (VDF) de baja tensión (BT) y media tensión (MT) son equipos sensibles a perturbaciones eléctricas que pueden generar fallas, paros no programados, desgaste prematuro e ineficiencias energéticas.

Controlar y mejorar las variables eléctricas anormales es fundamental para aumentar la confiabilidad, vida útil y disponibilidad operacional de los sistemas.

6.7.1 Principales variables eléctricas anormales y su impacto

6.7.1.1 Sobretensiones y transientes

- Causadas por maniobras, descargas atmosféricas o fallas.
- Impacto: daño en IGBT/rectificadores, disparos por OV, fallos prematuros de capacitores DC-link.

6.7.1.2 Caídas de tensión o fluctuaciones (sags, flicker)

- Comunes por arranque de grandes motores o baja rigidez de red.
- Impacto: reinicio del VDF, pérdida de referencia, calentamiento adicional.

6.7.1.3 Armónicos en la red

- Generados por cargas no lineales y por los mismos VDF.
- Impacto: calentamiento de transformadores, disparo de protecciones, distorsión del bus DC.

6.7.1.4 Desequilibrio de tensión entre fases

- Común en redes industriales cargadas asimétricamente.
- Impacto: sobrecorriente en el inversor, caída de eficiencia, vibraciones en motores.

6.7.1.5 Frecuencia fuera de tolerancia

- Menos común, pero posible en sistemas con generación local.
- Impacto: errores en control vectorial, fallos en controladores.

6.7.1.6 Ruido eléctrico / EMI

- Debido a cables largos, mala puesta a tierra o blindaje insuficiente.
- Impacto: fallos intermitentes, lectura incorrecta de sensores.

6.8 Medidas Correctivas y Preventivas (Instalaciones Nuevas y Existentes)

6.8.1 Protección contra sobretensiones

- Instalar supresores de transientes (TVSS/ SPD) tipo 1 y tipo 2 en tableros principales y en la entrada del VDF.
- Agregar filtros dv/dt o filtros senoidales cuando existan cables largos (>50–100 m) hacia el motor.

6.8.2 Mejora en la estabilidad de tensión

- Implementar transformadores con toma ajustable (tap changing).
- Instalar bancos de capacitores o sistemas de compensación reactiva estática (SVG/STATCOM) para sostener el nivel de tensión en redes débiles.
- Para MT, priorizar transformadores dedicados para grandes variadores.

3.1.3 Mitigación de armónicos

- Usar:
- Reactores AC y DC en VFD BT.
- Puentes de 12 o 18 pulsos en MT.
- Filtros pasivos sintonizados o filtros activos (AFR) cuando la THD exceda estándares (IEEE 519 o IEC 61000-3-2/12).

6.8.3 Corrección del desequilibrio de fases

- Balancear cargas trifásicas en tableros.
- Usar transformadores zig-zag si la red es altamente asimétrica.
- Verificar estado de empalmes, interruptores y barras.

6.8.4 Control de EMI y ruidos eléctricos

- Emplear cables apantallados y conectorización adecuada en motores.
- Mantener separación física entre cables de potencia y control.
- Mejorar mallas de puesta a tierra siguiendo IEC 60364 o IEEE 142 (Green Book).

6.8.5 Monitoreo continuo de calidad eléctrica

Implementar un sistema de PQMS (Power Quality Monitoring System) para registrar:

- THD de corriente y tensión
- Sags / Swells
- Transientes
- Desequilibrio
- Armónicos dominantes
- Factor de potencia

Esto permite mantenimiento predictivo y decisiones basadas en datos.

6.9 Mejoras en la Configuración del Variador

6.9.1 Ajustes de protección más robustos

Ajustar límites de:

- Sobretensión DC-link
- Subtensión
- Sobretemperatura
- Torque y corriente máxima
- Deshabilitar “auto-reset” si causa re-arranques inseguros.

6.9.2 Optimización del tiempo de rampa

- Aumentar tiempos de aceleración para evitar fluctuaciones en redes débiles.
- Usar control vectorial para mejorar desempeño bajo variaciones eléctricas.

6.9.3 Implementación de secuencias de arranque seguras

- “Pre-charge” del bus DC en arranques repetitivos.
- Sincronización con generadores en sistemas híbridos.

6.10 Transformación Organizacional

6.10.1 Procedimientos operativos

- Crear protocolos para arranque y paro de grandes motores.
- Capacitar operadores en reacción a alarmas del VDF.

6.10.2 Mantenimiento Predictivo

- Termografía en conexiones.
- Revisión periódica del THD.
- Inspección de cables y puestas a tierra.

6.10.3 Estandarización

Usar normas:

- IEEE 519 (armónicos)
- IEEE 1159 (calidad de energía)
- IEC 61800-3 (CEM en variadores)
- IEC 61000-4-30 (métodos de medición PQ)

6.11 Beneficios Esperados

- Mayor disponibilidad y confiabilidad de VDF.
- Reducción de fallas en motores y electrónica de potencia.
- Menos paros no programados y menor costo de mantenimiento.
- Prolongación de la vida útil del sistema.
- Mejora de la eficiencia energética.
- Cumplimiento normativo y reducción de riesgos operativos.

CAPITULO 7

IDENTIFICACION Y CLASIFICACION DE VARIABLES ASOCIADOS A COSTOS INVOLUCRADOS.

7.1 Comparativa Económica en Variadores de Frecuencia de Media y baja tensión.

El uso de variadores de frecuencia (VDF) constituye una práctica estándar en la industria para optimizar el consumo energético y mejorar el control de motores eléctricos. La selección entre un variador de baja tensión (BT) y uno de media tensión (MT) tiene importantes implicaciones técnicas y económicas, especialmente en sistemas de potencia elevada. Este informe realiza un análisis comparativo en términos financieros para orientar una decisión fundamentada.

7.1.1 Objetivo del Estudio

Evaluar económicamente las diferencias entre un variador de frecuencia de baja tensión y uno de media tensión, considerando los costos iniciales, operativos y de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del equipo.

7.1.2 Alcance y Metodología

El análisis incluye:

- Costos de compra, instalación y puesta en marcha.
- Costos operativos asociados a eficiencia y pérdidas.
- Costos de mantenimiento y repuestos.
- Vida útil esperada y costo total de propiedad (TCO).
- La metodología se basa en estimaciones típicas de mercado y valores industriales para potencias entre 1,000 y 3,000 HP.

7.1.3 Descripción Técnica de las Alternativas

Variador de Frecuencia de Baja Tensión (BT)

- Tensión típica: 380–690 V
- Corrientes elevadas
- Componentes de potencia modulados por IGBTs
- Aplicable hasta ~1 MW de forma eficiente

Variador de Frecuencia de Media Tensión (MT)

- Tensión típica: 2.3 kV – 13.8 kV
- Corrientes reducidas y menores pérdidas en cables
- Tecnología multinivel, aislamiento reforzado
- Especialmente eficiente para potencias superiores a 1 MW

7.1.4 Análisis Económico Comparativo

Costos de Inversión (CAPEX)

Potencia del motor	VDF BT (USD)	VDF MT (USD)
1,000 HP	40,000–80,000	150,000–250,000
2,000 HP	80,000–150,000	250,000–450,000
3,000+ HP	120,000–220,000	400,000–800,000+

Los equipos MT presentan mayor costo inicial debido a su diseño y requisitos de aislamiento.

7.1.5 Costos de Instalación

BT: mayor sección de cableado, protección y barras → 20–40 % del costo del equipo.

MT: requisitos de sala eléctrica, blindaje y seguridad → 30–60 % del costo del equipo.

7.1.6 Costos de Operación (OPEX)

Eficiencia BT: 95–97 %

Eficiencia MT: 97–99 %

En cargas de más de 1 MW, cada 1 % de eficiencia implica ahorros de 30,000–80,000 USD/año.

7.1.7 Costos de Mantenimiento

Concepto	BT	MT
Frecuencia	Media	Baja
Costo anual	3–6 % del equipo	2–4 % del equipo
Repuestos	Económicos	Costosos y especializados

7.1.8 Vida Útil y Depreciación

BT: 10–15 años

MT: 15–25 años

La mayor vida útil de MT mejora su costo anual equivalente.

7.1.9 Costo Total de Propiedad (TCO)

Ejemplo: Motor 1,500 HP – operación 8,000 h/año

Concepto	BT	MT
CAPEX total	200,000 USD	350,000 USD
OPEX 15 años	520,000 USD	380,000 USD
Mantenimiento	120,000 USD	120,000 USD
TCO total	840,000 USD	850,000 USD

A potencias mayores, MT se vuelve claramente más rentable.

Recomendaciones

Utilizar BT cuando el sistema no exceda 1,000–1,500 HP y exista infraestructura BT disponible.

Preferir MT para motores >1 MW, procesos críticos y operación 24/7.

Realizar un análisis detallado con datos reales del motor, demanda energética y proyecciones tarifarias.

Formulario Económico de costo en términos de obras civiles estandarizado para el montaje de Variadores de frecuencia de ventiladores principales en mina UG.

Candelaria
lundin mining

Revisión
A

FORMULARIO B-02
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Nº Licitación	Nombre Proceso
XXXXXXXX	Servicio de Obras Civiles para las Minas Subterráneas

Item	1.11
Descripción Partida	Construcción de Losa para VDF
Unidad	C/U
Cantidad a Ejecutar	1

1.- MANO DE OBRA (B-02)

Categorias	Unidad	Cantidad	Dias trabajados	P.U.	Precio Total
Supervisor OO.CC	hh	1	3	$ 108.762	$ 326.286
APR	hh	1	3	$ 122.320	$ 366.960
Supervisor de calidad	hh	1	3	$ 108.762	$ 326.286
Capataz	hh	1	3	$ 89.244	$ 267.732
Maestros	hh	3	3	$ 62.480	$ 562.320
Operador Camión 3/4	hh	1	1	$ 86.290	$ 86.290
Operador Camión mixer	hh	1	1	$ 86.290	$ 86.290
Operador equipo de levante	hh	1	1	$ 86.290	$ 86.290
				Subtotal 1	$ 2.108.454

2.- MATERIALES E INSUMOS

Categorias	Unidad	Cantidad	P.U.	Precio Total
Ericogel	c/u	10	$ 45.000	$ 450.000
Tierra vegetal	metros cubicos	2	$ 163.500	$ 327.000
Cargas cadwell 250 (Validar seccion de cable y precio)	c/u	4	$ 55.990	$ 223.960
Cargas cadwell 300 (Validar seccion de cable y precio)	c/u	25	$ 84.990	$ 2.124.750
Molde porta cadwell tipo T	c/u	2	$ 63.500	$ 127.000
Molde porta cadwell tipo X	c/u	2	$ 63.500	$ 127.000
Hormigón	metros cubicos	5	$ 261.000	$ 1.305.000
Tableros de madera	metros lineales	20	$ 22.000	$ 440.000
Puntales	c/u	8	$ 900	$ 7.200
Sonda vibradora	c/u	1	$ 142.136	$ 142.136
Picota	c/u	2	$ 24.000	$ 48.000
Chuzo	c/u	2	$ 28.000	$ 56.000
Palas	c/u	4	$ 21.000	$ 84.000
Carretillas	c/u	2	$ 75.000	$ 150.000
Pintura epoxica	Galon	2	$ 54.990	$ 109.980
Aditivo epoxico	Galon	2	$ 54.990	$ 109.980
Brochas y rodillo	c/u	4	$ 8.000	$ 32.000
Malla acma For c257	c/u	6	$ 89.000	$ 534.000
			Subtotal 2	$ 6.398.006

3.- EQUIPOS Y MAQUINARIAS

Categorias	Unidad	Cantidad	Dias trabajados	P.U.	Precio Total
Camioneta	hm	2	3	$ 56.667	$ 340.002
Camión 3/4	hm	1	1	$ 73.333	$ 73.333
Equipo de Levante	hm	1	1	$ 106.667	$ 106.667
Camion Mixer	hm	1	1	$ 126.667	$ 126.667
				Subtotal 3	$ 646.669

4.-HERRAMIENTAS Y FUNGIBLES

Categorias	Unidad	Cantidad	Dias trabajados	P.U.	Precio Total
Herramientas manuales	caja	3	3	$ 105.000	$ 315.000
				Subtotal 4	$ 315.000

5.- OTROS

Categorias	Unidad	Cantidad	Dias trabajados	P.U.	Precio Total
Mantención general	GL	5	3	$ 8.370	$ 125.550
Combustible	Lts	120	3	$ 1.200	$ 432.000
Alimentación	GL	10	3	$ 13.000	$ 390.000
EPP Personal	GL	10	3	$ 6.500	$ 195.000
Insumos Equipos	GL	6	3	$ 8.338	$ 150.084
				Subtotal 5	$ 1.292.634

6.- Gastos Generales

Categorias	Unidad	Cantidad	Dias trabajados	P.U.	Precio Total
Administrador	Día	1	1	$ 205.450	$ 205.450
Oficina Central (Taller)	%Cd	10%	3	$ 10.760.763	$ 1.076.076
				Subtotal 6	$ 1.281.526

PRECIO TOTAL UNITARIO DE LA PARTIDAS 1-2-3-4-5		$ 10.760.763
GASTOS GENERALES		$ 1.281.526
% UTILIDAD	12%	$ 1.291.292
PRECIO TOTAL		$ 13.333.581

NOMBRE DE LA EMPRESA POSTULANTE

NOMBRE DEL REPRESENTANTE LEGAL

Figura 3:Análisis de precios unitarios

Valor equipo baja tensión 500 hp: 18,220 USD

Costo Puesta en servicio de variador de frecuencia de baja tensión: 6,200 USD

- Uso de Harware
- Uso sofware
- Ingeniero asesor en puesta en servicio.

Valor equipo media tensión 500 hp: 254,430 USD

Costo Puesta en servicio de Variador de frecuencia de media tensión: 12,125 USD

- Uso de Harware
- Uso sofware
- Ingeniero asesor en puesta en servicio.

CAPITULO 8
CONCLUSIÓN

El proyecto de tesis se centró en un Estudio Comparativo de Variadores de Frecuencia (VDF) en Baja y Media Tensión aplicados al control de ventiladores de 500 HP en operaciones subterráneas, con el objetivo principal de determinar la mejor alternativa técnica y económica para el sistema de ventilación principal de una mina subterránea, específicamente en Minera Candelaria Norte UG.

Conclusión General del Estudio:

El estudio comparativo demostró ser esencial para la toma de decisiones de inversión, ya que la selección del VDF impacta directamente en la optimización del rendimiento energético, la confiabilidad operativa y los costos globales del sistema de ventilación, el cual representa uno de los mayores porcentajes de consumo de energía en una operación minera.

La tesis abordó la problemática analizando dos alternativas:

- VDF de Baja Tensión (380–690 V): Generalmente con ventajas en costo inicial, mantenimiento y facilidad de instalación, pero con consideraciones sobre la corriente nominal y pérdidas de conversión.

- VDF de Media Tensión (2.3 kV – 6.6 kV): Ofrecen un mejor desempeño para motores de gran potencia y menores pérdidas en cables y transformadores, lo que es crucial para un ventilador principal de 500 HP.

A través de la metodología que incluyó el análisis de antecedentes técnicos, la definición de variables, la comparación de datos obtenidos y el desarrollo de una planilla detallada de costos (incluyendo construcción y puesta en marcha), el estudio buscó determinar cuál tecnología se adapta mejor a las condiciones específicas del entorno minero.

En última instancia, el proyecto concluyó con la identificación y clasificación de las variables de costos y la propuesta de un plan de mejora que optimizaría la eficiencia, la seguridad y la viabilidad económica de la implementación del VDF seleccionado para la compañía.

Del análisis de la distribución eléctrica en Candelaria UG se concluye que, si bien la infraestructura de media tensión presenta un diseño adecuado para la alimentación de subestaciones y equipos asociados, su utilización para la implementación de variadores de frecuencia resulta técnica y económicamente menos conveniente. La necesidad de incorporar nuevas celdas de media tensión, junto con el tendido de alimentadores adicionales, incrementa significativamente los costos de inversión y complejiza la integración con la infraestructura existente.

Por el contrario, la red de baja tensión ofrece mayores ventajas en términos de flexibilidad operativa, facilidad de conexión y menores costos de implementación, lo que la convierte en una alternativa más eficiente para la incorporación de variadores de frecuencia. Asimismo, las condiciones de instalación en galerías y la exposición del cableado en zonas críticas de tránsito incrementan los riesgos operacionales en sistemas de media tensión, afectando la continuidad del proceso productivo.

Finalmente, los mayores tiempos de reparación asociados a fallas en cables de media tensión generan impactos productivos significativamente superiores en comparación con los sistemas de baja tensión. En este contexto, se establece que la utilización de variadores de frecuencia en baja tensión representa una solución más segura, económica y operativamente eficiente para las condiciones actuales de la mina.

BIBLIOGRAFIA

1.- Comisión Nacional de Energía (CNE). Resolución Exenta N° 290. Santiago, 2024. Disponible en: https://vlex.cl/vid/resolucion-num-209-exenta-1034233064

2.- Comisión Nacional de Energía (CNE). Resolución Exenta N° 210 – Anexo técnico de sistemas de medición, monitoreo y control. Santiago 2024. Disponible en: https://vlex.cl/vid/resolucion-num-210-exenta-1034233069

3.- Comisión Nacional de Energía (CNE). Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución. Santiago, 2024. Disponible en: https://www.cne.cl/normativas/electrica/normas-tecnicas/

4.- Superintendencia de electricidad y combustibles (SEC). Fiscalización de la calidad de servicio en distribución eléctrica. Santiago, 2024.