



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

ANÁLISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA VENTILACIÓN PRINCIPAL
MINA SANTOS - SECTOR MALAQUITA SUR

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniería de Ejecución en Electricidad

Profesor guía: Juan Carlos Madrigal Lobos

Diego Andrés Araya Muñoz
Gerald Jordie Cortés Cuello

Copiapó, Chile 2023

DEDICATORIA

Con todo mi cariño y afecto le dedico este logro a mis hijos Santiago y Monserrat, que con su gran amor me han dado la fuerza necesaria para salir adelante y nunca bajar los brazos, a mi pareja Tessy, por estar siempre a mi lado en los momentos buenos y malos, alentándome a seguir superándome y a mis padres por creer en mí y darme las herramientas para luchar en la vida y alcanzar mis sueños.

Diego Araya Muñoz

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a todas las personas que me han apoyado durante este tiempo, a mis padres Sandra y Pablo, quienes desde el comienzo me han enseñado y ayudado a ser una mejor persona. Mis hermanos Sebastián y Constanza, quienes me motivan y me alientan a seguir estudiando. Shirley mi pareja, quien me apoya cuando los días son buenos y cuando no lo son tanto, con quien aceptamos el desafío de estudiar y trabajar apoyándonos mutuamente a ser mejores cada día. De todo corazón este proyecto se lo dedico a ustedes.

Gerald Cortés Cuello

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a Dios, por darme salud y la posibilidad de formar una hermosa familia, agradezco a mi pareja Tessy y a mis hijos Monserrat y Santiago por aportar a mi vida la alegría y fuerza para no decaer, creer en mí y amarme sin condición alguna, agradezco a mi madre, por haberme puesto en primer lugar aun cuando limitó su vida por hacerlo, a mi padre agradecerle infinitamente su amor desinteresado y constante preocupación, también agradezco a mis colegas por todas esas veces que me brindaron su apoyo para poder estudiar y descansar liberándome de la presión del trabajo, agradezco a don Julio Livacic por creer en mí y brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente apostándome todas sus fichas, a don Juan Madrigal, por aceptar el desafío de guiarnos con mucha paciencia durante este proceso y finalmente a mi compañero, quién fue un pilar fundamental en el proceso de estudios y proyecto final.

Diego Araya Muñoz

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar a mi familia, quienes me han apoyada con comprensión, contención y entusiasmo en este gran desafío de estudiar y trabajar, este apoyo es el empuje necesario que me motiva a continuar cada día. Agradecer al profesor Juan Madrigal quien desde el primer momento acepto este desafío apoyándonos como Profesor guía. Agradecer a mi compañero y amigo de proyecto de título quien me tubo la paciencia y me enseñó la materia cuando no podía asistir a clases por mi sistema de turno.

Por último, pero no menos importante agradecer a cada profesor, a cada profesional y cada trabajador quienes me han apoyado y enseñado a lo largo de mi carrera profesional, cada uno de sus consejos me han sido útiles a lo largo de mi carrera.

Gerald Cortés Cuello

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes de la empresa	1
1.2. Lundin Mining Corporation Distrito Candelaria	2
1.3. Mina Santos	3
1.4. Necesidad del proyecto	4
1.5. Problemática del proyecto	4
1.6. Soluciones propuestas al problema	4
1.7. Estrategias de trabajo	4
1.8. Objetivo general	5
1.9. Objetivos específicos	5
1.10. Resumen de capítulos	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO	7
2.1. Transformador de poder	7
2.2. Sistema de ventilación en minería subterránea	7
2.1.1. Ventilación Principal	8
2.2.2. Ventilación auxiliar	8
2.2.3. Consideraciones técnicas para ventilación de minas subterráneas	10
2.2.4. Determinación del caudal de aire necesario en el interior mina	11

CAPÍTULO III

PRUEBAS DE TERRENO	15
3.1. Transformador instalado	15
3.2. Pruebas eléctricas a transformador	16
3.2.1. DAR / IP	16
3.2.1.1. Pruebas DAR / IP en terreno	17
3.2.1.2. Resultado de las pruebas DAR / IP	21

3.2.1.3. Criterios de aceptación	22
3.2.2. Relación de transformación – TTR	23
3.2.2.1. Pruebas TTR en terreno	23
3.2.2.2. Resultado de las pruebas TTR	25
3.2.3. Resistencia de devanado	26
3.2.3.1. Pruebas de resistencia de devanado en terreno	27
3.2.3.2. Resultado de las pruebas de resistencia de devanado	27
3.3. Medición de malla a tierra	28
3.4. Medición de resistencia del sistema de puesta a tierra en terreno	29
3.5. Método de medición de resistencia de puesta a tierra con estacas	31
3.6. Resultados obtenidos de SPAT	32

CAPÍTULO IV

SISTEMA DE VENTILACIÓN DE MINAS	34
4.1. Ventiladores axiales de accionamiento eléctrico	34
4.2. Ventilador axial del tipo ZVN	35
4.2.1. Ventilador	35
4.3. Puesta en servicio ventilador ZITRON 110 kW	40
4.3.1. Advertencias generales	40
4.3.2. Verificaciones mecánicas previas en cada ventilador, sin tensión	41
4.3.3. Verificaciones eléctricas previas en cada ventilador, sin tensión	42
4.3.4. Arranque de un ventilador	43
4.3.4.1. Comprobación del sentido de giro	44
4.3.4.2. Arranque del ventilador	44
4.3.4.3. Medición de parámetros eléctricos	45
4.3.4.4. Ventiladores accionados con variador de frecuencia	45
4.4. Costo de equipos y montaje	48

CAPÍTULO V

CÁLCULOS DE POTENCIA Y ALIMENTADORES	50
5.1. Alimentador en MT	50

5.1.1. Empalme	50
5.1.2. Cálculo de caída de tensión en MT	51
5.2. Cálculos del transformador	52
5.3. Protección en MT	53
5.4. Protección en BT	54
5.5. Cálculo de banco de condensadores	54
5.6. Selección de conductores en BT	56
5.7. Costo de alimentadores y canalizaciones	63
CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Ubicación complejos mineros Lundin Mining Chile.	1
Figura N° 1.2: Presencia mundial Lundin Mining Corporation.	3
Figura N° 1.3: Ubicación Mina Santos.	3
Figura N° 2.1: Circuitos de ventilación.	8
Figura N° 2.2: Sistemas de ventilación auxiliar.	9
Figura N° 2.3: Referencia de soplador tipo Venturi.	10
Figura N° 2.4: Medición de caudal.	13
Figura N° 2.5: Instrumentos de medición de velocidad del aire.	14
Figura N° 3.1: Transformador CH 500 kVA. Malaquita Sur.	15
Figura N° 3.2: Placa característica de transformador instalado.	16
Figura N° 3.3: Medidor de aislación digital, METREL MI-3201.	18
Figura N° 3.4: Bushings de AT cortocircuitados.	18
Figura N° 3.5: Bushings de BT cortocircuitados.	19
Figura N° 3.6: Conexión de prueba para Alta v/s Baja con GUARD a Tierra.	19
Figura N° 3.7: Conexión de prueba para Alta v/s Baja + Tierra.	20
Figura N° 3.8: Conexión de prueba para Baja v/s Alta + Tierra.	20
Figura N° 3.9: Analizador de devanado de transformadores, MWA 300-47.	24
Figura N° 3.10: Conexión típica con un transformador de 2 devanados en YNyn o ZigZag de 8 terminales.	24
Figura N° 3.11: Conexión típica con un transformador de 6 terminales Delta delta o Yn (sin neutro).	25
Figura N° 3.12: Instrumento de medición Ground Tester AEMC 6471.	29
Figura N° 3.13: Método de caída de potencial.	29
Figura N° 3.14: Resistencia aparente v/s distancia X.	30
Figura N° 3.15: Método de medición de resistencia de puesta a tierra con estacas.	31
Figura N° 3.16: Gráfico R v/s D - Resistencia de puesta a tierra.	33
Figura N° 4.1: Esquema de ventilador ZITRON.	36
Figura N° 4.2: Conexión de terminales en bornera.	42
Figura N° 4.3: Pares de apriete a tuercas de fijación de los terminales.	43

Figura N° 4.4: Variador de frecuencia Power Electronics, serie SD700 Kompakt.	46
Figura N° 4.5: Diagrama de tarjeta de potencia SD700.	47
Figura N° 4.6: Conexionado de potencia.	48
Figura N° 4.7: Ejemplo de tarjeta de comunicación profibus.	48
Figura N° 5.1: Empalme en MT con fusibles tipo hilo de 15 (A).	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 3.1: Valores de resistencia de aislamiento medidos a 10 min.	21
Tabla N° 3.2: Resultado de mediciones resistencia de aislamiento en terreno.	21
Tabla N° 3.3: Valores mínimos de resistencia de aislamiento (ANSI C57.12.90).	22
Tabla N° 3.4: Valores iniciales de prueba.	25
Tabla N° 3.5: Resultado de prueba TTR con equipo MWA en terreno.	26
Tabla N° 3.6: % ERROR en pruebas de TTR.	26
Tabla N° 3.7: Resultado de prueba de resistencia de devanado con equipo MWA en terreno para lado primario.	27
Tabla N° 3.8: Resultado de prueba de resistencia de devanado con equipo MWA en terreno para lado secundario.	28
Tabla N° 3.9: Antecedente geográfico y atmosférico en Malaquita Sur.	32
Tabla N° 3.10: Valores de resistencia de puesta a tierra medidos en Ω .	32
Tabla N° 3.11: Valores de continuidad de equipos en Ω .	33
Tabla N° 4.1: Formas constructivas.	35
Tabla N° 4.2: Costo de equipos.	49
Tabla N° 4.3: Costo de obras civiles.	49
Tabla N° 5.1: Cuadro de carga general de fuerza 630 A.	52
Tabla N° 5.2: Selección de alimentador desde lado secundario a TDF N°1.	58
Tabla N° 5.3: Selección de alimentador desde TDF N°1 a VDF N°1.	59
Tabla N° 5.4: Selección de alimentador desde VDF N°1 a Ventilador N°1.	60
Tabla N° 5.5: Selección de alimentador desde TDF N°1 a VDF N°2.	62
Tabla N° 5.6: Selección de alimentador desde VDF N°2 a Ventilador N°2.	63
Tabla N° 5.7: Costo de alimentadores.	64
Tabla N° 5.8: Costo de canalizaciones y accesorios.	64
Tabla N° 6.1: Ingreso de aire fresco a mina.	66
Tabla N° 6.2: Extracción de aire viciado desde mina.	66
Tabla N° 6.3: Ingreso de aire fresco a mina.	67
Tabla N° 6.4: Extracción de aire viciado desde mina.	67

RESUMEN

Este proyecto de titulación, tiene como objetivo principal, aumentar los kcfm (mil pies cúbicos por minuto) de flujo de aire en ventilación principal de mina Santos UG (subterránea), adicionando 02 ventiladores de 110 kW en el sector Malaquita Sur, los cuales a través de chimenea aportarán 225 kcfm al sistema de ventilación, permitiendo cumplir con los acuerdos y compromisos adquiridos con Sernageomin (SNGM) por 733 kcfm para obtener los permisos de explotación hasta el año 2024, ya que por medio de la inclusión de estos nuevos equipos se alcanzará un flujo del orden de los 743 kcfm. Para llevar a cabo la implementación del proyecto, se requiere analizar instalaciones eléctricas preexistentes en el sector, esto con la finalidad de suministrar la energía eléctrica necesaria para habilitar los ventiladores. Por lo anterior, se realizan pruebas eléctricas a una subestación del tipo Pad Mounted, de la marca CH de 500 kVA, la cuál será objeto de análisis, pruebas y cálculos, con la finalidad de determinar su estado y si cumple con lo requerido para llevar a cabo el proyecto, además de los cálculos necesarios para seleccionar alimentadores y protecciones asociadas a los equipos. Adicionalmente se realizarán mediciones y análisis al sistema de puesta a tierra preexistente. Finalizado lo anterior, se describe el montaje y configuración de equipos, adicionando equipamiento de control y monitoreo para los ventiladores a través de variadores de frecuencia Power Electronics SD700, y su puesta en servicio.

ELECTRICIDAD - VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA

ABSTRACT

This titling project has as its main objective, to increase the kcfm (one thousand cubic feet per minute) of airflow in the main ventilation of Santos UG mine (underground), adding 02 110 kW fans in the Malachite South sector, which through chimney will contribute 225 kcfm to the ventilation system, allowing to comply with the agreements and commitments acquired with Sernageomin (SNGM) for 733 kcfm to obtain exploitation permits until the year 2024, since through the inclusion of these new equipment, a flow of the order of 743 kcfm will be reached. To carry out the implementation of the project, it is necessary to analyze pre-existing electrical installations in the sector, this in order to supply the necessary electrical energy to enable the fans. Therefore, electrical tests are carried out on a substation of the Pad Mounted type, of the CH brand of 500 kVA, which will be subject to analysis, tests and calculations, in order to determine its status and if it complies with what is required to carry out the project, in addition to the necessary calculations to select feeders and protections associated with the equipment. Additionally, measurements and analysis will be carried out on the pre-existing grounding system. After the above, the assembly and configuration of equipment is described, adding control and monitoring equipment for fans through Power Electronics SD700 frequency inverters, and its commissioning.

ELECTRICITY - UNDERGROUND VENTILATION

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes de la empresa

Lundin Mining Corporation es una empresa de origen canadiense, la cual sustenta su negocio en la explotación de recursos minerales principalmente cobre, níquel y zinc con operaciones en países como Estados Unidos, Suecia, Portugal y Chile. En Chile, en noviembre del año 2014, incorporó el 80 % de la propiedad de las compañías contractuales mineras Candelaria (CCMC) y Ojos del Salado (CCMO) ubicados en las cercanías de la comuna de Tierra Amarilla que está a 20 km de la ciudad de Copiapó en la región de Atacama y a 650 msnm (ver la figura N° 1.1).

Ambos complejos tienen un fácil acceso debido a la conexión mediante el sistema de carreteras públicas, significando tiempos de 30 minutos de traslado del personal desde Copiapó. El personal empleado por Candelaria y Ojos del Salado es principalmente de Copiapó y Tierra Amarilla, permitiendo que los trabajadores tengan acceso diario a los servicios regulares de una ciudad.



Figura N° 1.1: Ubicación complejos mineros Lundin Mining Chile.

Fuente: Google Maps.

El complejo minero Ojos del Salado está compuesto por las minas subterráneas Santos y Alcaparrosa (Minas UG) y la planta Pedro Aguirre Cerda (PAC), que solo recibe mineral diario de Santos. Las Minas de Ojos del Salado son explotadas por el método subterráneo Sublevel Stopping con variación LBH y sus operaciones están a cargo de empresas contratistas.

Las producciones de las minas Santos y Alcaparrosa corresponden a 5,100 y 4,300 ton/día respectivamente, el 74 % de la producción de Santos alimenta la planta concentradora PAC y el resto se dirige a la Planta de Candelaria que, sumado a la producción de Alcaparrosa, Candelaria Norte y Rajo Candelaria procesa 75,000 ton/día.

Debido a que las minas se encuentran ubicadas en el radio urbano de la comuna de Tierra Amarilla es de suma importancia la interacción con la comunidad, ya que se generan una serie de limitaciones lo que hace relevante la necesidad de un transporte en superficie con camiones de carretera para cumplir con los permisos viales, realizar tronaduras con un mínimo de vibraciones y generar instancias de participación ciudadana para mantener de buena manera las relaciones comunitarias.

1.2 Lundin Mining Corporation Distrito Candelaria

El Cobre genera el 65 % de los ingresos de la compañía, los distritos que explotan dicho mineral corresponden a Eagle el cual se encuentra en Michigan, Estados Unidos y Candelaria, este último posee gran importancia, ya que es quién aporta con el 43 % del total de los ingresos de la compañía.



Figura N° 1.2: Presencia Mundial Lundin Mining Corporation.

Fuente: Sitio oficial Lundin Mining – www.lundinmining.com.

Este proyecto se centrará en Mina Santos, principalmente en su sistema de ventilación, haciendo su enfoque en la habilitación de ventiladores principales de la mina. Sector Malaquita Sur.

1.3 Mina Santos

Mina Santos gestiona una operación ubicada en la comuna de Tierra Amarilla a 16 kilómetros de Copiapó, que pertenece al denominado “Distrito Candelaria” (ver la figura N° 1.3). Produce concentrado de cobre a través de la explotación a un promedio de 15.400 toneladas anuales de cobre. [6]

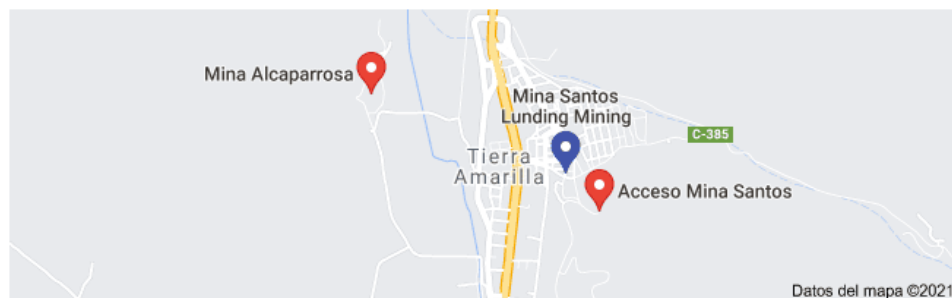


Figura N° 1.3: Ubicación Mina Santos.

Fuente: Google Maps.

1.4 Necesidad del proyecto

El proyecto en cuestión nace debido a la importancia del sistema de ventilación mina y principalmente a la expansión, en cuanto a desarrollos que ha tenido en el ámbito de explotación Mina Santos, además de los compromisos adquiridos con SNGM en el último proyecto de explotación presentado, el cual indica 733 kcfm, los cuales se deben cumplir para continuar con los trabajos hasta el año 2024.

1.5 Problemática del proyecto

Debido a la necesidad de aumento de flujo de aire en interior mina, se requiere buscar alternativa para cumplir y mejorar el sistema de ventilación, incluyendo 02 ventiladores principales de 150 HP en sector de malaquita sur, los cuales mediante chimenea aportarán al sistema 225 kcfm, alcanzando un total de 743 kcfm, por lo que se cumpliría acuerdo y compromisos con SNGM. Para ello se debe disponer del suministro eléctrico necesario para su funcionamiento.

1.6 Soluciones propuestas al problema

En primera instancia se propone analizar el sistema eléctrico existente, con la finalidad de ahorrar tiempo y costos en la habilitación del sistema adicional de ventilación, realizando pruebas eléctricas para determinar el estado actual de los equipos. Por otra parte, si se determina que los equipos e instalaciones no están en condiciones de operar, éstos deberán ser reemplazados para asegurar la calidad de suministro eléctrico.

1.7 Estrategias de trabajo

Se realizarán inspecciones y mediciones tanto de S/E, como del sistema de puesta a tierra (malla) instaladas en el sector, con el fin de cumplir todas las exigencias técnicas para la realización del proyecto. Una vez realizadas dichas pruebas e inspecciones, se procederá a determinar mediante el desarrollo de cálculos, la selección de conductores y

disposición de éstos, con el fin de encontrar la mejor alternativa de trayectoria hacia los motores que se desean alimentar. Además de lo anterior se deberá justificar la capacidad instalada de la S/E, tomando en consideración los equipos a alimentar y que éstos poseerán un régimen permanente de funcionamiento (24/7). Para el sistema de control se utilizará lógica básica.

1.8 Objetivo general

Mejorar sistema de ventilación de la mina subterránea, aumentando los kcfm.

1.9 Objetivos específicos

- ✚ Describir el sistema eléctrico de ventilación y evaluar costos del proyecto.
- ✚ Analizar la condición de los equipos y la infraestructura existentes, mediante pruebas en terreno (transformador – malla a tierra).
- ✚ Realizar cálculos para determinar capacidad requerida de transformador.
- ✚ Realizar cálculos de dimensionamiento para alimentadores en BT y sus respectivas pérdidas.
- ✚ Analizar los resultados obtenidos por medio de las pruebas de terreno y cálculos.

1.10 Resumen de capítulos

En el Capítulo II: Marco Teórico, se entregará toda la información general y fórmulas asociadas al sistema de ventilación, alcanzando objetivos y consideraciones de los equipos y sistema global en minería subterránea.

En el Capítulo III: Pruebas de terreno, estarán contenidas las pruebas y análisis de los equipos e instalaciones actualmente dispuestas en el sector de Malaquita Sur, las cuales se busca recuperar por medio de la verificación de su estado, con el fin de lograr suministrar la energía eléctrica necesaria para la puesta en servicio del sistema adicional de ventilación.

En el Capítulo IV: Sistema de ventilación, serán definidos y entregados los aspectos relevantes del sistema de ventilación en minería subterránea, además de aportar consideraciones y detalle de todos los equipos que lo conforman y sus distintas aplicaciones.

En el Capítulo V: Cálculos, es posible visualizar la justificación mediante el cálculo de los equipos y componentes a utilizar en la realización del proyecto, lo anterior con el fin de determinar los alimentadores necesarios en sus diferentes etapas, la inclusión (opcional) de un banco de condensadores, el cálculo de potencia requerida y el ajuste de protecciones adecuadas para los equipos.

En el Capítulo VI: Conclusiones, serán contenidos los análisis de resultados y comentarios finales, reafirmando que la solución propuesta cumplió satisfactoriamente con lo esperado y requerido, cuantificando el aumento de los kcfm en la ventilación mina.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Transformador de Poder

Un transformador es un dispositivo que cambia la potencia eléctrica alterna con un nivel de voltaje a potencia eléctrica alterna con otro nivel de voltaje, mediante la acción de un campo magnético. Consta de dos o más bobinas de alambre conductor enrolladas alrededor de un núcleo ferromagnético común. Estas bobinas (normalmente) no están conectadas en forma directa. La única conexión entre las bobinas es el flujo magnético común que se encuentra dentro del núcleo.

Uno de los devanados del transformador se conecta a una fuente de energía eléctrica alterna y el segundo (y quizá el tercero), suministra energía eléctrica a las cargas. El devanado del transformador que se conecta a la fuente de potencia se llama devanado primario o devanado de entrada, y el devanado que se conecta a la carga se llama devanado secundario o devanado de salida. Si hay un tercer devanado en el transformador, se llama devanado terciario. ^[2]

2.2 Sistema de ventilación en minería subterránea

La ventilación de Minas tiene por misión principal el suministro de aire fresco, con el objeto de lograr condiciones ambientales y termo ambientales adecuadas para todo el personal que labore en faenas mineras subterráneas, como también para atender la operación de diversos equipos e instalaciones subterráneas.

La ventilación en minas subterráneas debe cumplir con los siguientes objetivos:

- ✚ Suministrar oxígeno para la respiración de las personas.
- ✚ Proporcionar el volumen de aire para equipos diésel e instalaciones subterráneas.
- ✚ Evitar la formación de mezclas explosivas.

- ✚ Diluir y extraer los gases tóxicos y el polvo en suspensión.
- ✚ Reducir la temperatura.

2.2.1 Ventilación principal

Toda mina subterránea deberá disponer de circuitos de ventilación, natural o forzado, para mantener un suministro permanente de aire fresco y retorno del aire viciado (ver la figura N° 2.1).

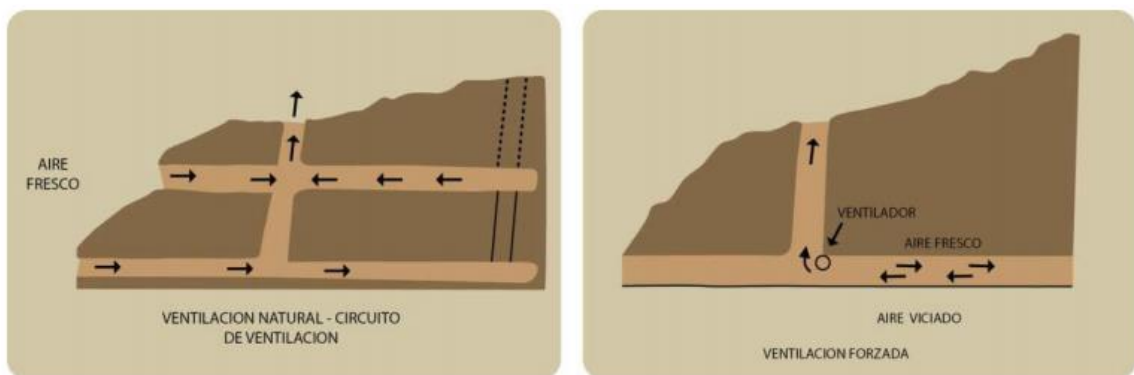


Figura N° 2.1: Circuitos de ventilación.

Fuente: Plan 2013 – Ventilación de minas SNGM.

El caudal de aire que circule por la mina dependerá del número de trabajadores, la extensión y sección de las labores, el tipo de maquinarias de combustión interna y las emanaciones de gases naturales de la mina.

2.2.2 Ventilación auxiliar

Como ventilación auxiliar se definen aquellos sistemas que haciendo uso de ductos y ventiladores auxiliares, ventilan áreas restringidas de las minas subterráneas. En este caso por tratarse de faenas mineras de bajo tonelaje, este sistema se asocia como sistema de ventilación principal de la mina.

El objetivo de la ventilación es mantener galerías en desarrollo y frentes de explotación, con un ambiente adecuado para el buen desempeño de hombres y máquinas, es decir, con un nivel de contaminación ambiental bajo las concentraciones máximas permitidas.

Los frentes de explotación o desarrollos que se encuentren distantes de la corriente y la aireación de dicho sitio se hagan lenta, deben emplearse ductos u otros medios auxiliares adecuados a fin de que se produzca la renovación continua del aire (ver la figura N° 2.2).

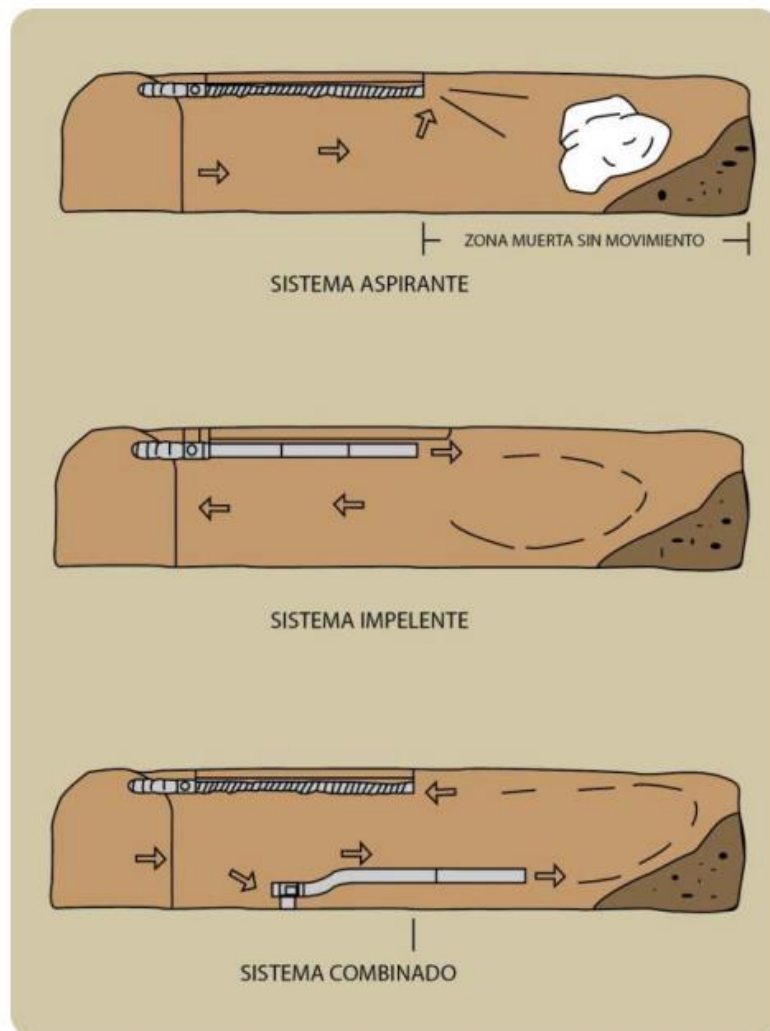


Figura N° 2.2: Sistemas de ventilación auxiliar.

Fuente: Plan 2013 – Ventilación de minas SNGM.

2.2.3 Consideraciones técnicas para ventilación de minas subterráneas

- ✚ En todos los lugares de la mina donde accede personal, el ambiente deberá ventilarse por medio de una corriente de aire fresco, de no menos de 3 metros cúbicos por minuto y por persona, en cualquier sitio de la mina, cuya velocidad promedio no podrá exceder de 150 [m/min], ni inferior a 15 [m/min].
- ✚ Se deberá realizar semestralmente un aforo de ventilación en las entradas y salidas principales de la mina, y anualmente un control general de toda la mina. Los resultados obtenidos a estos aforos deberán registrarse y mantenerse disponibles para el servicio.
- ✚ En las minas donde en el desarrollo de las galerías se use ventilación auxiliar, el extremo de la manga de ventilación no deberá estar a más de 30 metros de la frente.
- ✚ En caso de ser necesario ventilar galerías y/o chimeneas con aire comprimido, se deberá adicionar a esto sopladores tipo Venturi (ver la figura N° 2.3).

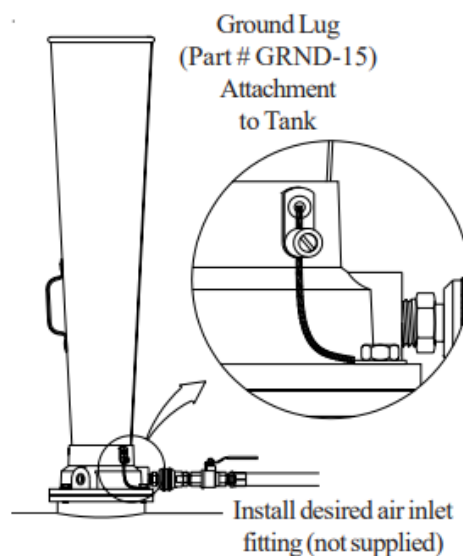


Figura N° 2.3: Referencia de soplador tipo Venturi.

Fuente: Imagen de Google.

Nota: No se permitirá la ejecución de trabajos en el interior de las minas subterráneas, cuya concentración de oxígeno en el aire, en cuanto a peso, sea inferior a 19,5 %.

- ✚ Los ventiladores principales de la mina se instalarán en lugares a prueba de fuego.
- ✚ En caso de paralización imprevista de los ventiladores principales, el personal deberá ser evacuado de los frentes, hacia lugares ventilados, o a la superficie si es necesario, según las condiciones ambientales existentes.
- ✚ Los reguladores de ventilación no deben ubicarse en galerías de acceso o de transporte.
- ✚ Los ductos de ventilación y los ventiladores deberán poseer descarga a tierra.
- ✚ Las puertas principales de ventilación y sus marcos deben ser construidas de materiales incombustibles o resistentes al fuego y empotrados en la galería. Tales puertas, serán dobles cuando constituyan la única separación entre los flujos de aire principal de entrada y de retorno a la mina. Deben instalarse convenientemente espaciadas, para que, durante su utilización, como el paso de personas y/o materiales, a lo menos una de ellas permanezca cerrada. Así también, la puerta que esté abierta debe estar bien sujeta a la caja, de manera que esta no se cierre por efecto de caudales de aire.
- ✚ En las minas que se haya comprobado la presencia de gases explosivos, estará prohibido ventilar los frentes de explotación por medio de una inyección de aire.

2.2.4 Determinación del caudal de aire necesario en el interior mina

a) Caudal según personal que trabaja:

$$Q = f \times N \text{ [m}^3\text{/min]} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.1})$$

Donde:

+ Q = Caudal de aire.

+ f = Volumen de aire necesario por persona 3 [m³/min].

+ N = Número de personas trabajando.

b) Caudal según desprendimiento de gas:

$$Q = 0,139 \times q \text{ [m}^3\text{/min]} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.2})$$

Donde:

+ Q = Caudal de aire.

+ q = Volumen de gas que se desprende de la mina durante 24 h, en m³.

c) Caudal según la producción:

$$Q = u \times T \text{ [m}^3\text{/min]} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.3})$$

Donde:

+ Q = Caudal de aire.

+ u = 1 a 1,7 [m³/min].

+ T = Producción diaria de ton.

d) Caudal según consumo de explosivos:

$$Q = 16,67 \times E \text{ [m}^3\text{/min]} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.4})$$

Donde:

+ Q = Caudal de aire.

+ E = Cantidad de explosivo a detonar (kg).

e) Caudal según equipos diésel:

$$Q = 2,83 \times \text{HP} \text{ [m}^3\text{/min]} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.5})$$

Donde:

- ✚ Q = Caudal de aire.
- ✚ HP = Caballos de fuerza de motor diésel.

2.2.4.1 Medición de caudal

$$Q = A \times V \text{ [m}^3\text{/min]} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.6})$$

Donde:

- ✚ Q = Caudal de aire.
- ✚ A = Área medida en galería.
- ✚ V = Velocidad media de flujo de aire [m/min].

El caudal de aire es un concepto fundamental en todas las instalaciones de ventilación, dado que nos indica la cantidad de aire que estamos renovando en una vivienda, local, oficina, industria, etc. Cuanto mayor sea el caudal, mayor será la renovación del aire en esos espacios cerrados (ver la figura N° 2.4). [13]

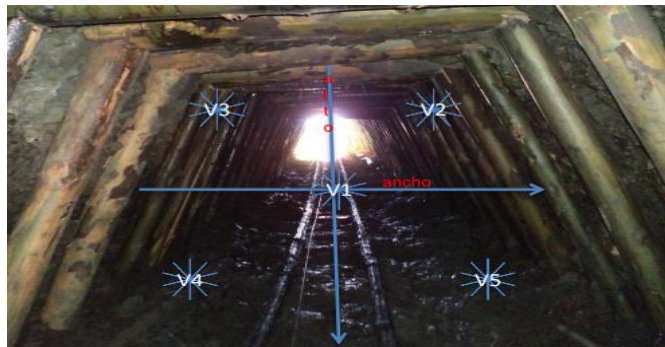


Figura N° 2.4: Medición de caudal.

Fuente: Plan 2013 – Ventilación de minas SNGM.

Para determinar el caudal y los flujos de aire presentes en la mina es necesario la utilización de instrumentos de medición tales como tubo de humo, paleta, anemómetro. (ver la figura N° 2.5).



Figura N° 2.5: Instrumentos de medición de velocidad del aire.

Fuente: Plan 2013 – Ventilación de minas SNGM.

Tubo de humo: está diseñado para verificar la velocidad y la dirección del flujo de aire con un tubo de humo que reacciona con el vapor en el aire y genera humo blanco.

Anemómetro mecánico (paleta): Instrumento analógico para medir la velocidad del aire. Gira con la fuerza del viento y el ángulo de inclinación del disco indica la fuerza del viento y la velocidad actual.

Anemómetro digital: Un anemómetro es un instrumento para medir la velocidad o rapidez de los gases ya sea en un flujo contenido, flujo de aire en un conducto, en flujos no confinados, como también un viento atmosférico. ^[12]

CAPÍTULO III

PRUEBAS DE TERRENO

3.1 Transformador instalado

El equipo instalado corresponde a una S/E marca CH de 500 kVA, con una tensión de trabajo de 23 kV en el lado primario y 400/231 V por el lado secundario. Incluye como protección por lado de MT, fusibles de bayoneta de 20 A, mientras que por lado de BT, posee breaker de 800 A (ver la figura N° 3.1 y la figura N° 3.2).



Figura N° 3.1: Transformador CH 500 kVA. Malaquita Sur.

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.



Figura N° 3.2: Placa característica de transformador instalado.

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

3.2 Pruebas eléctricas a transformador

Con la finalidad de determinar el estado del equipo se realizan una serie de pruebas de rutina, las cuales se encuentran previamente establecidas y dispuestas por la normativa vigente. Para este caso, las pruebas a realizar se encuentran descritas en la norma bajo la cual fue construido el transformador (ANSI/IEEE c57.12.90).

3.2.1 DAR / IP

Se define el índice de polarización (IP), como la relación entre la resistencia de aislamiento medida a 10 minutos sobre 1 minuto después de aplicada una tensión continua de prueba. Durante esos 10 minutos el nivel de tensión deberá ser estable.

$$IP = \frac{\text{Resistencia de aislamiento al minuto 10}}{\text{Resistencia de aislamiento al minuto 1}} \quad (\text{Ec. N° 3.1})$$

El índice de polarización es un valor que nos informa sobre el estado de humedad y limpieza de la máquina, basado en la suposición de que, transcurrido un cierto tiempo desde el comienzo del ensayo, la corriente de absorción se habrá anulado.

Un valor bajo del índice de polarización indicará que existe una corriente alta de conducción o de fugas, originada por la suciedad y humedad.

El índice de absorción (IA), DAR (Dielectric Absorption Rate), por sus siglas en inglés, refleja el grado de contaminación interna de los bobinados. la relación más común es de 60 segundos con respecto a 30 segundos.

$$\text{DAR} = \frac{\text{Resistencia de aislamiento al minuto 1}}{\text{Resistencia de aislamiento a los 30 seg.}} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 3.2})$$

Los valores del índice de polarización están muy poco afectados por la temperatura, salvo en condiciones en que la prueba se haya realizado a la elevada temperatura (por encima 40° C) no necesitan corrección. En este sentido, se debe considerar que no se produce un cambio de temperatura importante durante el tiempo en que dura el ensayo.

El índice de polarización de un aislamiento es un valor adimensional, que nos va a permitir hacer comparaciones sobre el estado del aislamiento de máquinas de distintas características (tamaño, potencias, tensiones).

3.2.1.1 Pruebas DAR / IP en terreno

Las pruebas de DAR/IP, se realizaron con Medidor de aislamiento digital, marca METREL, modelo MI-3201. Serial N°19040957 (ver la figura N° 3.3). [5]



Figura N° 3.3: Medidor de aislación digital, METREL MI-3201.

Fuente: Manual de funcionamiento METREL MI-3201. [8]

En primera instancia se realiza la desconexión de S/E (alimentación de MT y BT), luego se procede a realizar puentes en Bushings (lado primario y secundario), tal como se muestra en las figuras N° 3.4 y N° 3.5.



Figura N° 3.4: Bushings de AT cortocircuitados.

Fuente: Protocolo prueba DAR/IP subestación Malaquita Sur.



Figura N° 3.5: Bushings de BT cortocircuitados.

Fuente: Protocolo prueba DAR/IP subestación Malaquita Sur.

Las conexiones de prueba solicitadas o requeridas según aporte de la norma ANSI C57.12.90, son las siguientes:

- ⚡ Alta v/s Baja con GUARD a Tierra (ver la figura N° 3.6).

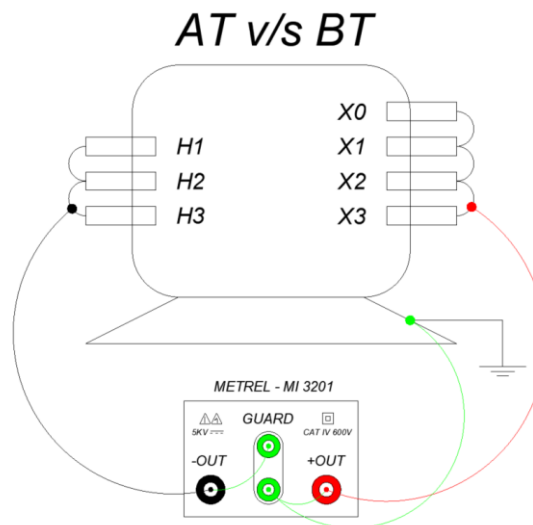


Figura N° 3.6: Conexión de prueba para Alta v/s Baja con GUARD a Tierra.

Fuente: Protocolo prueba DAR/IP subestación Malaquita Sur.

3.2.1.2 Resultado de las pruebas DAR / IP

Tabla N° 3.1: Valores de resistencia de aislamiento medidos a 10 min.

Tiempo	Alta v/s Baja	Alta v/s Baja -	Alta v/s Baja
	Tensión de prueba	Tensión de prueba	Tensión de prueba
	5000 V	5000 V	500 V
15 s	998 MΩ	959 MΩ	638,2 MΩ
30 s	1,40 GΩ	1,06 GΩ	856,4 MΩ
45 s	1,62 GΩ	1,38 GΩ	984,1 MΩ
60 s	1,83 GΩ	1,71 GΩ	1,02 GΩ
2 m	2,32 GΩ	2,11 GΩ	1,06 GΩ
3 m	2,66 GΩ	2,76 GΩ	1,08 GΩ
4 m	2,90 GΩ	3,01 GΩ	1,16 GΩ
5 m	3,13 GΩ	3,48 GΩ	1,46 GΩ
6 m	3,31 GΩ	3,73 GΩ	1,89 GΩ
7 m	3,47 GΩ	4,07 GΩ	2,21 GΩ
8 m	3,63 GΩ	4,55 GΩ	2,49 GΩ
9 m	3,77 GΩ	4,72 GΩ	2,62 GΩ
10 m	4,35 GΩ	4,93 GΩ	2,78 GΩ

Fuente: Protocolo DAR/IP subestación Malaquita Sur.

Tabla N° 3.2: Resultados de mediciones de resistencia de aislamiento en terreno.

DAR	1,83	1,78	1,60
IP	2,38	2,88	2,72

Fuente: Protocolo DAR/IP subestación Malaquita Sur.

3.2.1.3 Criterios de aceptación

Tabla N° 3.3: Valores mínimos de resistencia de aislamiento (ANSI C57.12.90).

Voltaje entre fases del transformador	Valor mínimo recomendado
1.2 kV	32 MΩ
2.5 kV	68 MΩ
5.0 kV	135 MΩ
8.6 kV	230 MΩ
15.0 kV	410 MΩ
25.0 kV	670 MΩ
34.5 kV	950 MΩ
46.0 kV	1240 MΩ
69.0 kV	1660 MΩ
115.0 kV	3100 MΩ
138.0 kV	3720 MΩ
161.0 kV	4350 MΩ
196.0 kV	5300 MΩ
230 kV	6200 MΩ

Fuente: Tabla 100.6 norma ANSI C57.12.90.

- ✚ El primer criterio de aceptación y más importante es el indicado por la tabla N° 3.3, la cual nos presenta los valores mínimos que debe poseer un equipo referido a su resistencia de aislación.
- ✚ El segundo criterio de aceptación será mediante la prueba DAR > 1,5.
- ✚ El tercer criterio de aceptación será mediante la prueba IP > 2.

Mediante las pruebas DAR/IP realizadas al transformador, se demuestra que éste se encuentra en condiciones de operar, ya que cumple con los criterios de aceptación según aporte de la norma ANSI C57.12.90-2013 e IEC 60076-1. ^[3]

3.2.2 Relación de transformación – TTR

Las normas internacionales exigen que la relación de tensión medida entre dos bobinados esté dentro del ± 0.5 % de la relación indicada en la placa de características. Para comprobar este requerimiento, la prueba de relación de transformación mide la relación real de tensión, que se compara con la de la placa.

La prueba de relación de transformación en transformadores de potencia se realiza por inyección de baja tensión en transformadores desenergizados y la correspondiente medición de la tensión inducida en otro devanado, la prueba de relación de transformación se hace para cada fase y para cada posición de toma si el transformador tiene varias tomas para cambiar su relación de tensión.

Se utilizan generalmente equipos de prueba de relación de transformación específicamente diseñados para este tipo de pruebas, el equipo de prueba de relación de transformación trifásico hace la medición fase a fase, independientemente de la configuración, y emplea generalmente soluciones de conmutación internas para facilitar la prueba de las tres fases, teniendo en cuenta el grupo de conexión.

3.2.2.1 Pruebas TTR en terreno

Las pruebas de TTR, se realizaron con analizador de devanado de transformadores, marca MEGGER, modelo MWA 300-47. Serial N°1249 0820 (ver la figura N° 3.9).



Figura N° 3.9: Analizador de devanado de transformadores, MWA 300-47.

Fuente: MWA300/330A-UG-ES-V05 May 2017.

En primera instancia se realiza desconexión de S/E (alimentación de MT y BT), luego se procede a conectar terminales de prueba de equipo MWA en Bushings de lado primario (H1, H2 y H3), y Bushings de lado secundario (X0, X1, X2 y X3), (ver la figura N° 3.10 y la figura N° 3.11).

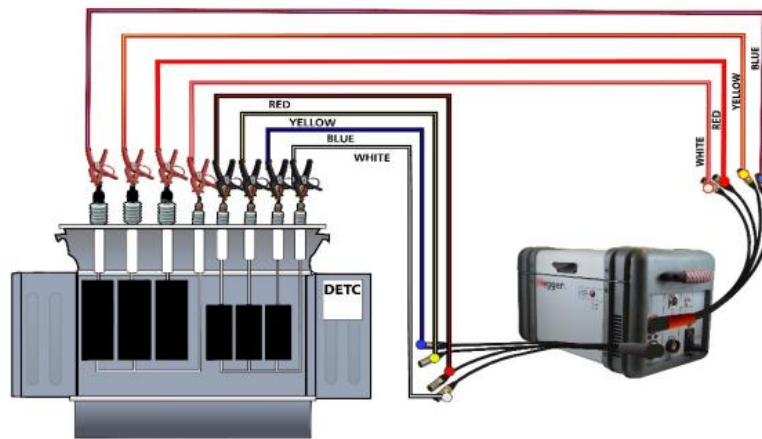


Figura N° 3.10: Conexión típica con un transformador de 2 devanados en YNyn o ZigZag de 8 terminales.

Fuente: MWA300/330A-UG-ES-V05 May 2017.

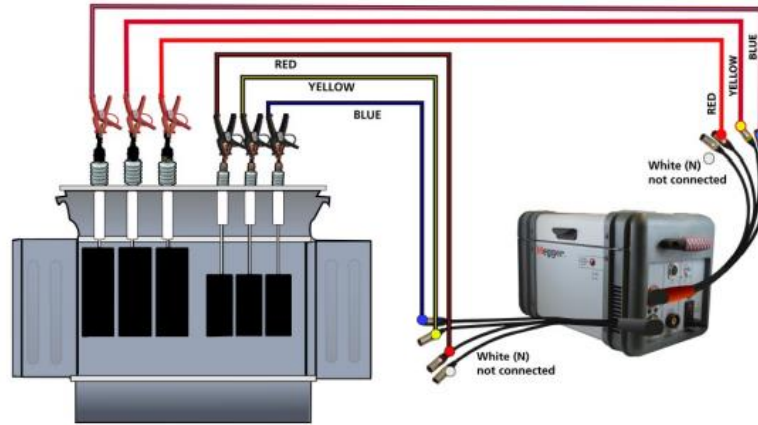


Figura N° 3.11: Conexión típica en un transformador de 6 terminales Delta delta o Yn (sin neutro).

Fuente: MWA300/330A-UG-ES-V05 May 2017. [7]

Nota: Los cables neutros se pueden quitar en esta prueba.

3.2.2.2 Resultado de las pruebas TTR

Tabla N° 3.4: Valores iniciales de prueba.

TAP	Tensión primaria	Tensión secundaria	TTR calculado
1	24150 V	400 V	104.573
2	23575 V	400 V	102.083
3	23000 V	400 V	99.593
4	22425 V	400 V	97.103
5	21850 V	400 V	94.613

Fuente: Protocolo TTR subestación Malaquita Sur.

Tabla N° 3.5: Resultado de prueba TTR con equipo MWA en terreno.

TAP	H1 - H3 / X0 - X1	H1 - H2 / X0 - X2	H2 - H3 / X0 - X3
1	104.174	104.685	104.457
2	101.846	102.172	102.024
3	99.258	99.451	99.725
4	96.907	96.854	97.304
5	94.486	94.725	94.416

Fuente: Protocolo TTR subestación Malaquita Sur.

Tabla N° 3.6: % ERROR en pruebas de TTR.

TAP	H1 - H3 / X0 - X1	H1 - H2 / X0 - X2	H2 - H3 / X0 - X3
1	-0.38	0.10	-0.11
2	-0.23	0.08	-0.05
3	-0.33	-0.14	0.13
4	-0.20	-0.25	0.20
5	-0.13	0.11	-0.20

Fuente: Protocolo TTR subestación Malaquita Sur.

Mediante las pruebas TTR realizadas al transformador, se demuestra que éste se encuentra en condiciones de operar, ya que cumple con los criterios de aceptación según aporte de la norma ANSI C57.12.90-2013 e IEC 60076-1.

3.2.3 Resistencia de devanado

Las mediciones de resistencia de devanados son fundamentales para la evaluación de la trayectoria de conducción de la corriente entre los terminales de los Bushings y puede revelar problemas tales como conexiones flojas o defectuosas, hilos conductores rotos o alta resistencia de contacto en los cambiadores en derivación.

El método más común utilizado para evaluar los resultados de la prueba es una comparación de los valores de resistencia medidos entre cada par de terminales de Bushings. Las diferencias entre las fases suelen ser inferiores al 2 - 3 por ciento.

3.2.3.1 Pruebas de resistencia de devanado en terreno

Las pruebas de resistencia de devanado se realizan con analizador de devanado de transformadores, marca MEGGER, modelo MWA 300-47. Serial N°1249 0820, (ver la figura N° 3.7).

En primera instancia se realiza desconexión de S/E (alimentación de MT y BT), luego se procede a conectar terminales de prueba de equipo MWA en Bushings de lado primario (H1, H2 y H3), y Bushings de lado secundario (X0, X1, X2 y X3), (ver la figura N° 3.8 y la figura N° 3.9).

3.2.3.2 Resultado de las pruebas de resistencia de devanado

Tabla N° 3.7: Resultado de prueba de resistencia de devanado con equipo MWA en terreno para lado primario.

TAP	H1 – H3	H2 – H1	H3 – H2	ERROR Máximo 2%
1	381.6 mΩ	379.4 mΩ	379.8 mΩ	0.556%
2	372.3 mΩ	370.2 mΩ	370.5 mΩ	0.558%
3	364.1 mΩ	361.1 mΩ	360.6 mΩ	0.981%
4	353.7 mΩ	351.5 mΩ	351.5 mΩ	0.627%
5	344.5 mΩ	342.4 mΩ	342.4 mΩ	0.611%

Fuente: Protocolo resistencia de devanado subestación Malaquita Sur.

Tabla N° 3.8: Resultado de prueba de resistencia de devanado con equipo MWA en terreno para lado secundario.

X0 – X1	X0 – X2	X0 – X3
13.75 $\mu\Omega$	14.13 $\mu\Omega$	14.13 $\mu\Omega$

Fuente: Protocolo resistencia de devanado subestación Malaquita Sur.

Mediante las pruebas de resistencia de los devanados realizadas al transformador, se demuestra que éste se encuentra en condiciones de operar, ya que cumple con los criterios de aceptación según aporte de la norma ANSI C57.12.90-2013 e IEC 60076-1. [1]

3.3 Medición de malla a tierra

El objetivo de realizar mediciones al sistema de puesta a tierra (SPAT), consiste principalmente en conocer el estado de esta, con la finalidad de evitar y atenuar la peligrosidad de perturbaciones eléctricas en el sistema y el funcionamiento de los equipos.

El trabajo se debe realizar considerando las exigencias de los estándares de las normas técnicas IEEE 81- 2012, IEEE 81.2–1991, IEEE 80-2013 y el Pliego Técnico Normativo RIC N° 06 de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, entre las principales.

Los criterios de aceptación para las mediciones de malla a tierra deben cumplir con los siguientes parámetros y normativa vigente:

- ✚ Para instalaciones en MT/AT, un máximo de 20 Ohm, de acuerdo con el artículo 8.27 del Pliego Técnico Normativo RPTD N°6, asociado al Decreto Supremo N°109 del Ministerio de Energía.
- ✚ Para instalaciones de consumo en baja tensión hasta 1000 V, un máximo de 5 Ohm, de acuerdo con el Pliego Técnico Normativo RPTD N°6 de la Superintendencia de electricidad y combustibles.

Las mediciones de resistencia de puesta a tierra se realizaron con equipo Telurómetro, marca AEMC, modelo 6471. Serial N° 131736TGDV (ver la figura N° 3.12).



Figura N° 3.12: Instrumento de medición Ground Tester AEMC 6471.

Fuente: Imagen de Google.

3.4 Medición de resistencia del sistema de puesta a tierra en terreno

La instalación del instrumento, para aplicar el método de la caída de potencial, se muestra en la figura N° 3.13 (esta figura es extraída desde la norma IEEE 81-2012).

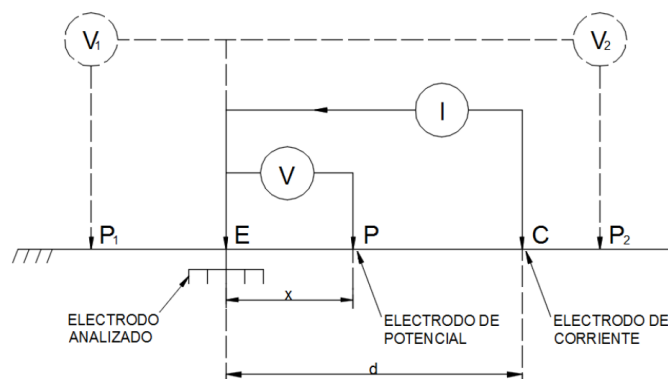


Figura N° 3.13: Método de caída de potencial.

Fuente: IF SPAT CCMC 2021.

Se registran las mediciones de resistencia cada vez que el electrodo de potencial (P) se va desplazando desde la malla de prueba (E) hacia el electrodo de corriente (C). Luego se traza una curva de resistencia versus distancia y la resistencia de la malla a tierra, resulta ser el valor donde ésta se estabiliza. La figura N° 3.13 (extraída desde la norma IEEE81-1983), muestra esta situación.

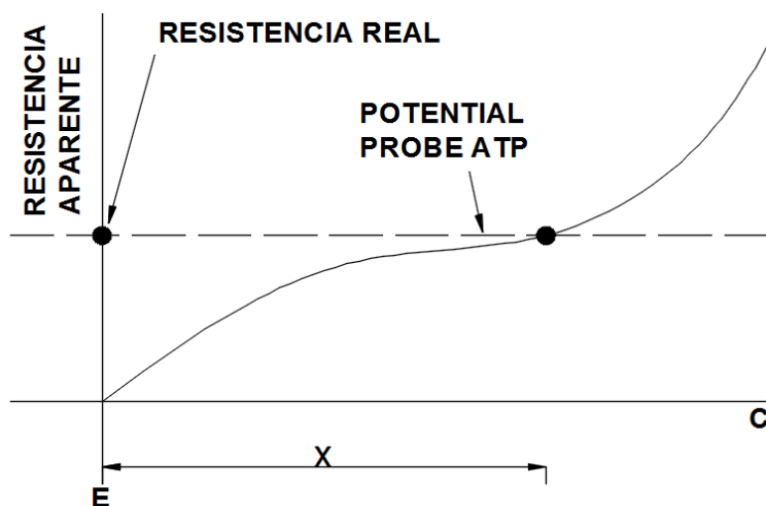


Figura N° 3.14: Resistencia aparente v/s distancia X.

Fuente: IF SPAT CCMC 2021.

La resistencia de la malla a tierra depende de los valores geométricos de la construcción de la malla que asocian la resistividad del terreno (ρ_a) con el nivel de enterramiento de malla (h), el área que cubre la malla (A) y al largo total de conductor que es utilizado (L).

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} + \left(\frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (\text{Ec. N° 3.3})$$

3.5 Método de medición de resistencia de puesta a tierra con estacas

Esta función permite medir una resistencia de tierra con 2 picas auxiliares. Existen varios métodos de medida. Se recomienda utilizar el método llamado del “62 %” o de “Caída de potencial” (ver la figura N° 3.14).

Clave las picas H y S de forma que estén alineadas con respecto a la toma de tierra. La distancia de la pica H será entre 3 a 6 veces la diagonal de la malla a tierra a medir, esta cantidad dependerá de las condiciones del terrero.

La distancia, entre pica S y la toma de tierra, es igual al 50 %, 55 %, 60 %, 65 %, 70 %, 75 % y 80 % de la distancia entre la pica H y la toma de tierra. Esto es con motivo de obtener una curva más representativa de resistencia vs distancia.

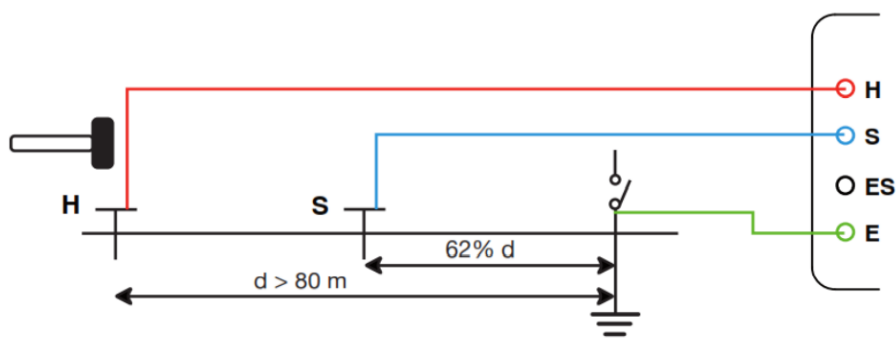


Figura N° 3.15: Método de medición de resistencia de puesta a tierra con estacas.

Fuente: Manual AEMC 6471.

Con fin de evitar interferencias electromagnéticas, se recomienda devanar el cable del tensor por completo, colocar los cables en el suelo, sin hacer bucle, tan lejos como sea posible unos de otros y evitar la proximidad directa o paralela con conductores metálicos. Conectar los bornes H y S, desconecte el puente de comprobación, luego conecte el borne E a la toma de tierra a controlar. [4]

3.6 Resultados obtenidos de SPAT

Tabla N° 3.9: Antecedente geográfico y atmosférico en Malaquita Sur.

Punto de Medición	Condición Atmosférica	Tipo de Suelo	Humedad Relativa %	Temperatura Ambiente °C
Malaquita Sur	Normal	Rocas Relleno	27.8%	29.7°C

Fuente: IF SPAT CCMC 2021.

Tabla N° 3.10: Valores de resistencia de puesta a tierra medidos en Ω .

Electrodo de medición	Distancia	Resistencia
50 %	25.0 m.	6.70 Ω
55 %	27.5 m.	6.83 Ω
60 %	30.0 m.	6.92 Ω
65 %	32.5 m.	6.97 Ω
70 %	35.0 m.	7.19 Ω
75 %	37.5 m.	7.2 Ω
80 %	40.0 m.	7.25 Ω
Resistencia Promedio		7.01 Ω

Fuente: IF SPAT CCMC 2021.

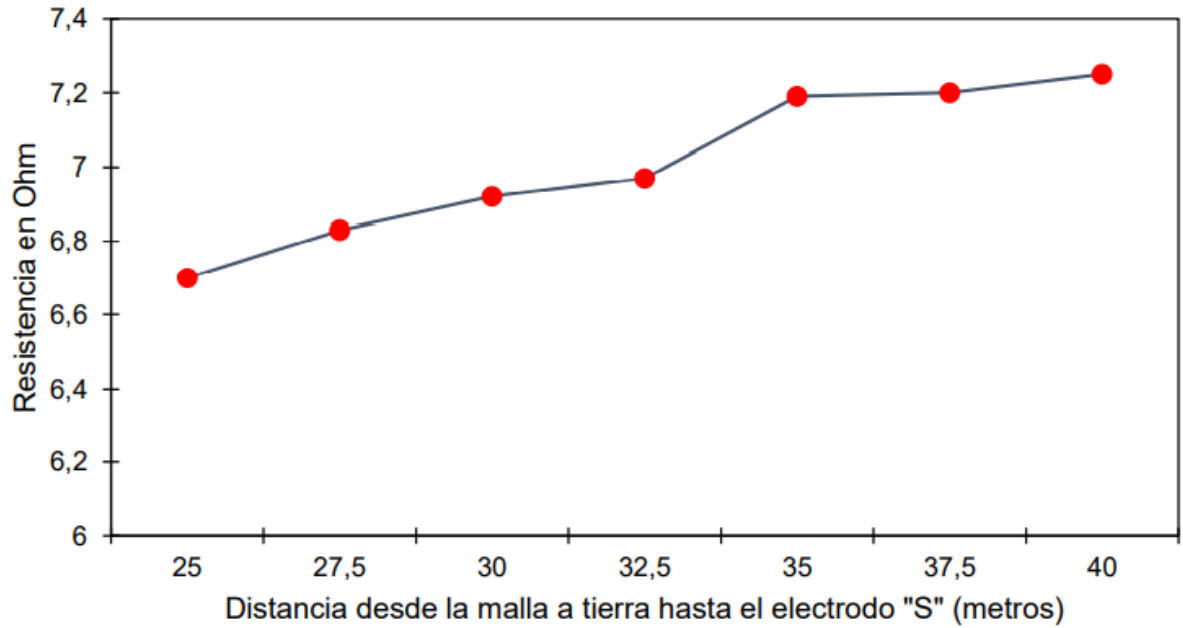


Figura N° 3.16: Grafico R v/s D - Resistencia puesta a tierra.

Fuente: IF SPAT CCMC 2021.

Tabla N° 3.11: Valores de continuidad de equipos en Ω .

Punto de Medición	Sector	Continuidad
Malaquita Sur	105-SE-16	5.34 Ω
	Sala VDF	6.03 Ω
	Área Ventiladores	5.34 Ω

Fuente: IF SPAT CCMC 2021.

Mediante las pruebas de resistencia de puesta a tierra y continuidad realizadas en las instalaciones, se puede concluir que éstas cumplen con los criterios descritos en la normativa vigente.

CAPÍTULO IV

SISTEMA DE VENTILACIÓN DE MINAS

La ventilación en una mina subterránea es el proceso mediante el cual se hace circular por el interior de esta el aire necesario para asegurar una atmósfera respirable y segura para el desarrollo de los trabajos.

La ventilación se realiza estableciendo un circuito para la circulación del aire a través de todas las labores. Para ello es indispensable que la mina tenga dos labores de acceso independientes: dos pozos, dos socavones, un pozo y un socavón, etc.

4.1 Ventiladores axiales de accionamiento eléctrico

Un ventilador es axial cuando el aire (o gas) entra y sale del ventilador siguiendo una trayectoria paralela al eje de la hélice. En los ventiladores axiales el aire es impulsado por una hélice dotada de un número variable de álabes o palas que están ancladas en un núcleo o cubo que es el elemento que transmite la energía del eje a los álabes.

Los ventiladores axiales, a diferencia de los centrífugos, son apropiados cuando se requiere mover mucho caudal de aire con una relativamente baja presión. Así pues, serán utilizados bien sea traspasando aire de forma libre o en instalaciones en las que haya poca pérdida de carga.

Tabla N° 4.1: Formas constructivas.

ZVN	Ventiladores en construcción horizontal con el rodete colocado en el eje motor.
ZVM	
ZVT	
ZV	Ventiladores en construcción horizontal con motor en el exterior. transmisión cardan entre motor y rodete.
ZEL	Ventiladores en construcción horizontal con motor eléctrico antideflagrante.
ZVHV	Ventiladores en construcción horizontal con difusor vertical.
ZVV	Ventiladores en construcción vertical.

Fuente: Manual de operación y mantenimiento ventiladores ZVN – ZITRON.

4.2 Ventilador axial del tipo ZVN

Un ventilador axial tipo ZVN es una turbo-máquina que consume energía eléctrica con el fin de impulsar de manera continua un caudal de aire en función de los objetivos que se desean alcanzar con la instalación de un ventilador, este puede tener un diseño u otro, así como llevar diferentes accesorios.

En este apartado se presentan las configuraciones más frecuentes, así como los accesorios más comunes, explicando su función y ámbito de aplicación (ver la figura N° 4.1).

4.2.1 Ventilador

Se considera ventilador, propiamente tal, a la parte activa del conjunto, y está compuesto por carcasa, rodete y motor.

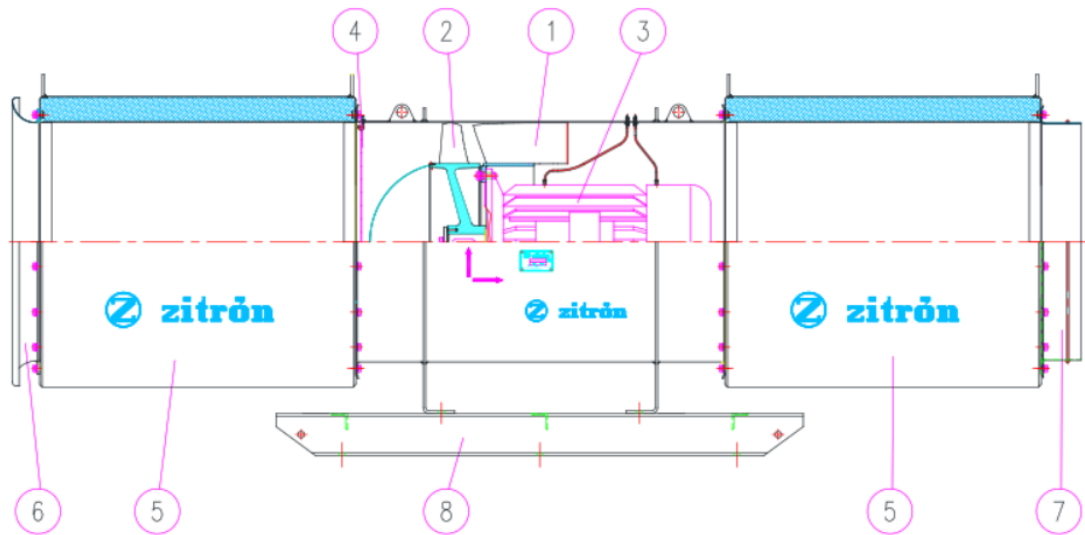


Figura N° 4.1: Esquema de ventilador ZITRON.

Fuente: Manual de operación y mantenimiento ventiladores ZVN – ZITRON.

Donde:

1. Carcasa ventilador.
2. Rodete.
3. Motor.
4. Rejilla de protección.

Accesorios Opcionales:

5. Amortiguador de ruido.
6. Tobera de admisión.
7. Pieza de conexión a tubería.
8. Bastidor de apoyo.

El motor eléctrico va fijado en un cubo central, que a su vez va sujeto a la envolvente exterior con unas directrices aerodinámicas cuya misión específica es enderezar el flujo de aire en el lado de impulsión del rodete.

- 1) **Carcasa:** La carcasa se completa con unos soportes para su apoyo en el suelo. Normalmente está construida en acero al carbono galvanizado en caliente y pintado, o en acero inoxidable.
- 2) **Rodete:** El rodete del ventilador es la parte móvil del mismo. Se compone de álabes con perfil aerodinámico y un núcleo central, donde se fijan los álabes.

El rodete va acoplado al eje del motor. El equilibrado del rodete se realiza siguiendo las normas internacionales vigentes ISO 1940-1 y AMCA 204.

- 3) **Motor:** El tipo de motor del ventilador depende de las características elegidas para el mismo en el momento del diseño del sistema de ventilación.

Algunas características que reseñar son:

- ✚ La forma constructiva más habitual es B5, aunque ocasionalmente puede ser también B3.
- ✚ Si el ventilador este certificado a temperatura, por ejemplo, 400 °C durante 2 horas, el motor lógicamente también debe estarlo.
- ✚ El motor puede ir preparado para llevar sondas de temperatura si así se requiere.
- ✚ En la selección del motor se considerará también el tipo de arranque que se proyecte para el mismo (variador de frecuencia, arrancador suave, arranque directo o arranque estrella triángulo).
- ✚ Si el ventilador va a trabajar a grandes altitudes (mayor de 1000 m), en atmósferas con elevadas humedades relativas (mayores del 90 %) y/o temperaturas mayores de 40 °C o menores de -20 °C, hay que transmitir estos factores al fabricante para que dimensione adecuadamente el motor.

- 4) **Rejilla:** Este accesorio sirve para proteger el rodete de la entrada de elementos no deseados que puedan dañar el ventilador. Normalmente se coloca en la zona de aspiración del ventilador, por lo que, si el ventilador fuese reversible, debería colocarse a ambos lados.

Accesorios opcionales

- 5) **Silenciadores Tubulares:** Se trata de un accesorio que se coloca a ambos lados del cuerpo del ventilador (aspiración e impulsión) y que reducen el ruido que genera el ventilador en funcionamiento.

Es un elemento especialmente importante en la mayoría de los casos, ya que las restricciones de niveles sonoros impuestas en los túneles, galerías y entornos de las obras donde se instalan son bastante exigentes.

Variando la longitud de los silenciadores se consigue atenuar más ruido, pero también reduce el empuje del ventilador y por lo tanto la eficiencia del sistema de ventilación.

Consta de una envolvente exterior de chapa lisa y otra exterior de chapa perforada con un material amortiguador de ruido entre ambas.

- 6) **Tobera de admisión:** se coloca en el extremo de la carcasa del ventilador, en la zona de salida de aire, o en su defecto en el silenciador tubular (si lo lleva como opción), también en la zona de salida de aire.
- 7) **Pieza de conexión a tubería:** Se trata de un accesorio que sirve para la conexión del ventilador a la tubería que lleva el aire desde el punto en que está situado, hasta la zona que se pretende ventilar.

- 8) **Bastidor de Apoyo:** Se trata de un accesorio que sirve para el apoyo del ventilador en el suelo, anclaje al mismo o arrastre.

Protecciones y monitoreo

Siendo el motor una máquina robusta y de construcción simple, su vida útil depende casi exclusivamente de la vida útil del aislamiento de los bobinados. Esta es afectada por muchos factores como humedad, vibraciones, ambientes corrosivos y otros. Entre todos los factores, el más importante es, sin duda, la temperatura de trabajo de los materiales aislantes empleados. Un aumento de 8 a 10 grados en la temperatura del aislante reduce su vida útil a la mitad.

La protección térmica de los motores se efectúa por medio de termo-resistencias (resistencia calibrada), termistores y termostatos. Los tipos de detectores a ser utilizados son determinados en función de la clase de temperatura del aislante empleado, de cada tipo de máquina y de la exigencia del usuario.

Las protecciones que se utilizan, aparte de las protecciones eléctricas del motor (sobretensión, sobre intensidad,) y de las propias de los componentes del armario eléctrico son:

- ✚ Sondas de Temperaturas de los devanados, generalmente tipo PTC.
- ✚ Sondas de Temperaturas de los rodamientos, generalmente tipo PT100.
- ✚ Sensores de vibraciones.
- ✚ Resistencias de caldeo.

Actualmente, se pueden implementar en los armarios de control PLC's de manera que todos los parámetros que puedan tener un valor, por ejemplo, temperaturas, velocidad de vibración (mm/s), se muestren en una pantalla. Además, el PLC gestionará los fallos, como pueden ser el de vibraciones, el de las sondas PTC, etc. indicando avisos con alarmas y en su caso procediendo al paro del ventilador.

4.3 Puesta en servicio Ventilador ZITRON 110 kW

Para una correcta puesta en servicio se debe verificar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico y mecánico del ventilador, siguiendo las especificaciones técnicas, advertencias y recomendaciones del fabricante.

4.3.1 Advertencias generales

Para realizar una correcta puesta en servicio del sistema de ventilación se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✚ Las instrucciones y recomendaciones de este apartado son específicas para ventiladores de la marca ZITRON.
- ✚ Solamente personal cualificado, puede llevar a cabo los trabajos descritos en este apartado.
- ✚ No realizar acción alguna sobre los ventiladores, sin antes leer y comprender el manual correspondiente. Un mal manejo de la instalación puede provocar daños personales y materiales.
- ✚ Antes de realizar trabajos en el ventilador, asegurarse de que la alimentación eléctrica esté desconectada.
- ✚ Si fuera preciso efectuar algún trabajo en el interior del ventilador, el rodete debe ser bloqueado para evitar peligros.

4.3.2 Verificaciones mecánicas previas en cada ventilador, sin tensión

Sin conectar el ventilador a la red eléctrica, comprobar que:

- ✚ Visualmente el ventilador no ha recibido ningún golpe, durante el transporte o montaje, que pueda afectar a su correcto funcionamiento.
- ✚ En el interior del ventilador no exista ningún objeto extraño (piedras, tornillos, cartones).
- ✚ En las proximidades del ventilador no existan objetos que pudieran ser aspirados por el ventilador dañándolo.
- ✚ En las proximidades del lado de impulsión del ventilador no existan objetos que pudieran ser dañados por la salida de aire del ventilador en forma de chorro, a gran velocidad.
- ✚ Manualmente el rodete gira libremente, sin dificultad y sin roces entre las partes móviles y fijas.
- ✚ El ventilador se encuentre bien alineado horizontal y verticalmente.
- ✚ Las rejillas de protección del ventilador (si va equipado con ellas), estén bien fijadas.
- ✚ El ventilador esté correctamente anclado en su punto de instalación.

4.3.3 Verificaciones eléctricas previas en cada ventilador, sin tensión

La empresa instaladora, ha de garantizar:

- ✚ Que las secciones de los cables son apropiadas en función de la potencia y consumo de los ventiladores.

- ✚ Que la tensión de acometida sea la adecuada para el funcionamiento del/los motor/es a accionar, con tolerancias de $\pm 5\%$ en la tensión y $\pm 2\%$ en la frecuencia (norma EN 60034-1/DIN VDE 0530, parte 1).
- ✚ Que el cable es el adecuado en función del tipo de arranque que se va a utilizar para el ventilador y las condiciones de la obra o túnel donde está instalado.

Comprobar:

- ✚ Que los cables de fuerza hayan sido conectados correctamente tanto en la caja de bornes de los motores como en los armarios de control.
- ✚ La correcta conexión de los terminales en el bornero, colocando terminal sobre terminal (ver la figura N° 4.2).

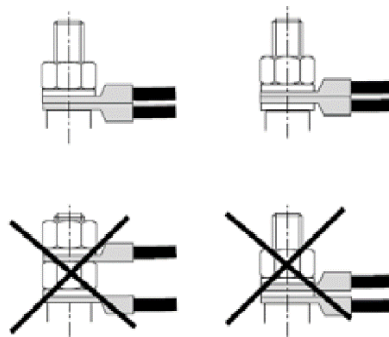


Figura N° 4.2: Conexión de terminales en bornera.

Fuente: Manual de operación y mantenimiento ventiladores ZVN – ZITRON.

- ✚ Que el modo de conexión del motor sea acorde al indicado en la placa suministrada por el fabricante.
- ✚ Que los pares de apriete de las tuercas de fijación de los terminales de los cables estén de acuerdo con los valores señalados en la figura N° 4.3.

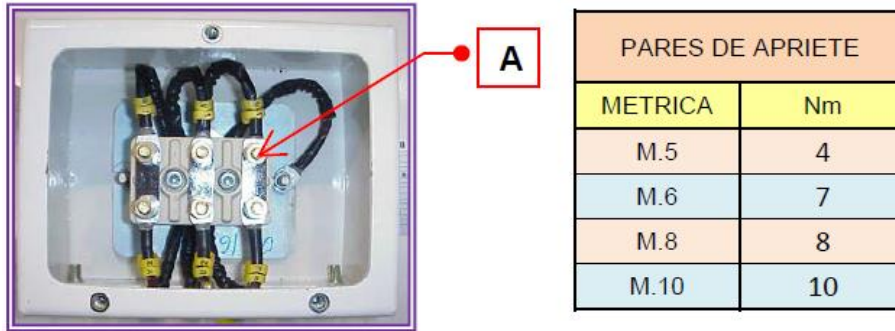


Figura N° 4.3: Pares de apriete a tuercas de fijación de los terminales.

Fuente: Manual de operación y mantenimiento ventiladores ZVN – ZITRON.

- ✚ Que de igual modo todos los cables de señales estén perfectamente cableados y conexiónados, (si los ventiladores disponen de elementos de control).
- ✚ Que la caja de conexiones esté libre de objetos extraños, polvo, humedad, etc.
- ✚ Los prensaestopas no usados en la caja de bornes deben ser tapadas para asegurarse de que al interior de la caja no entren polvo y humedad. ^[15]

4.3.4 Arranque de un ventilador

Antes de dar arranque al ventilador se deben realizar pruebas funcionales y mediciones de parámetros que aseguren su correcta operación y resguarden la seguridad del sistema eléctrico.

4.3.4.1 Comprobación del sentido de giro

Es de vital importancia conocer la función que tendrá el ventilador, ya que de esto dependerá el sentido de giro al que deberá responder, ya sea como ventilador o extractor.

Para una correcta verificación de sentido de giro se debe considerar:

- ✚ Dar orden de marcha por un pequeño periodo de tiempo para comprobar que el sentido de giro del ventilador sea el correcto.

- ✚ Si el sentido de giro es contrario, proceder al cambio de dos fases de alimentación en la caja de bornes del motor o a la salida del armario de fuerza.

- ✚ En ventiladores unidireccionales, el sentido de giro y la dirección del flujo de aire están indicados mediante flechas colocadas sobre la carcasa del ventilador.

- ✚ En ventiladores reversibles, se ha de determinar previamente cuales son los modos de funcionamiento directo e inverso, para fijar el criterio de giro correcto o incorrecto.

Nota: Durante la puesta en marcha del ventilador, la cantidad de arranques quedará limitada a un máximo de 6 a la hora. El exceso de este número de arranques podría producir graves daños en el motor.

4.3.4.2 Arranque del ventilador

Una vez realizadas todas las pruebas previamente descritas, efectuar un primer arranque del ventilador, comprobando que éste gire libremente, sin roces, ruidos extraños o vibraciones anormales.

Ante cualquier anomalía, durante el arranque del ventilador, proceder a su inmediata parada, y a investigar la causa.

Nota: Cuando el accionamiento del ventilador sea con variador de frecuencia, durante el arranque del ventilador a diferentes velocidades desde 0 hasta la velocidad nominal, comprobar que no existan velocidades a las cuales se produzcan resonancias.

4.3.4.3 Medición de parámetros eléctricos

Durante la puesta en marcha se realizarán mediciones al menos de consumo en amperios y tensión de alimentación, para saber si el motor está trabajando adecuadamente sin superar su intensidad nominal. [9]

4.3.4.4 Ventiladores accionados con variador de frecuencia

Durante el funcionamiento del ventilador a diferentes velocidades de accionamiento (aprovechando el rodaje del ventilador en la fase de medición de vibraciones) y a su velocidad nominal se obtendrán de la consola del variador parámetros eléctricos tales como, tensión de red, tensión alimentación motor, potencia e intensidad de salida de variador.

Para este proyecto serán utilizados variadores de frecuencia de baja tensión, marca Power Electronics, de la serie SD700 KOMPAKT (ver la figura N° 4.4).



Figura N° 4.4: Variador de frecuencia Power Electronics, Serie SD700 Kompakt.

Fuente: Manual de software y programación SD 700.

El principio de funcionamiento del variador SD700 Kompakt es el de la modulación por ancho de pulso (PWM). Variando la tensión de entrada y la frecuencia de la red, es posible controlar la velocidad y el par de los motores trifásicos de inducción conectados gracias a sus componentes principales: puente rectificador, bus DC, puente inversor y tarjetas de potencia y control.

El variador SD700 Kompakt incluye una tarjeta de potencia (ver la figura N° 4.5) y otra de control que se encargan de; el disparo del puente rectificador, el disparo del puente inversor, la gestión de la carga suave, el control de la tensión del bus DC y el funcionamiento del motor. Además, la tarjeta de control integra terminales como puertos de comunicación, entradas y salidas analógicas y digitales, display alfanumérico, display táctil a color, etc.

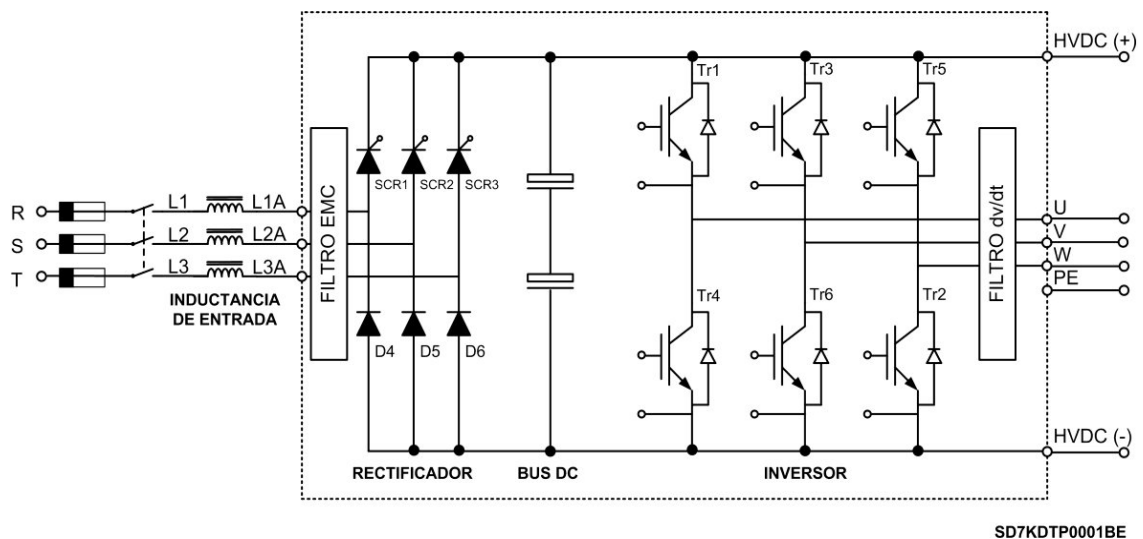


Figura N° 4.5: Diagrama de tarjeta de potencia SD700.

Fuente: Manual de software y programación SD 700.

Se recomienda instalar fusibles ultra rápidos que protejan el variador frente a sobre corrientes aguas abajo. El SD700 Kompakt integra múltiples protecciones eléctricas que protegen el variador y el motor, semejantes a las proporcionadas por un relé de protección de motor. [10]

En cuanto al cableado y alimentación, el SD700 KOMPAKT ha sido diseñado para trabajar con alimentación trifásica con el neutro conectado a tierra. Los terminales de entrada (alimentación) se sitúan en la parte superior y los de salida (alimentación del motor) desde la parte inferior del SD700 KOMPAKT (ver la figura N° 4.6).

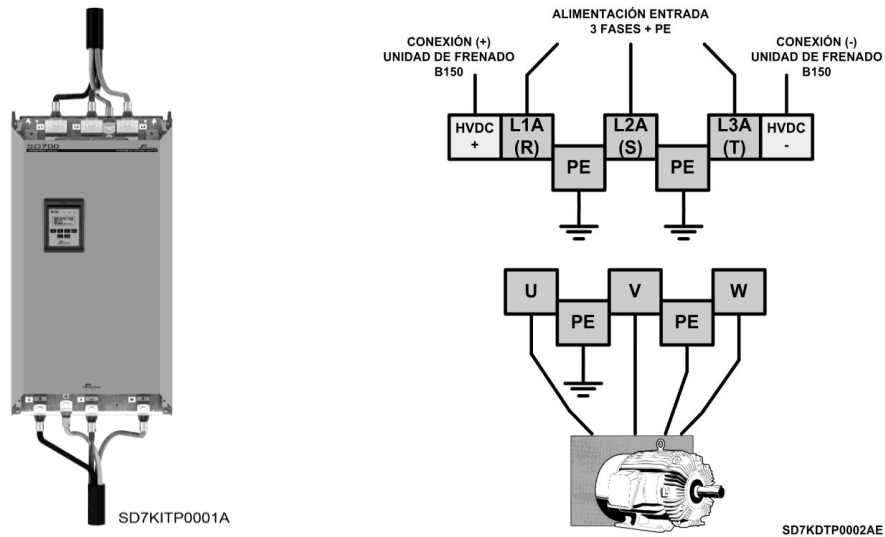


Figura N° 4.6: Conexión de potencia.

Fuente: Manual de software y programación SD 700.

La serie SD700 Kompakt es compatible con los protocolos de comunicación más habituales (Profibus-DP, DeviceNet, Modbus TCP, Ethernet IP, N2 Metasys, CAN Open), gracias a sus tarjetas de comunicación opcionales (ver la figura N° 4.7).

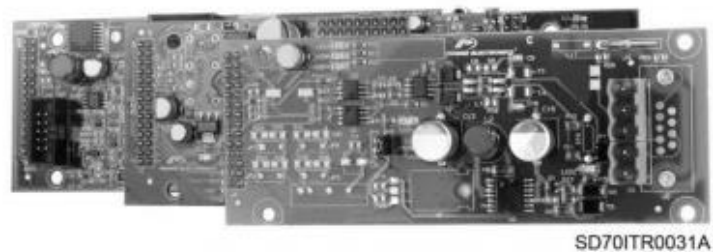


Figura N° 4.7: Ejemplo de tarjeta de comunicación profibus.

Fuente: Manual de software y programación SD 700. [11]

4.4 Costo de equipos y montaje

Por medio de las tablas N° 4.2 y N° 4.3, se presentan los costos generales del proyecto, asociados a obras civiles, equipos y montaje.

Tabla N° 4.2: Costo de equipos.

DETALLE	CANTIDAD (c/u)	VALOR (\$)	TOTAL (\$)
Ventilador ZITRON ZVN 110kW	2	37.817.000	75.634.000
Difusor de salida	2	14.657.000	29.314.000
Juego de juntas flexibles	2	1.202.000	2.404.000
Válvula de corte – Flujo anti-retorno	2	4.930.000	9.860.000
POWER ELECTRONICS SD700	2	17.534.000	35.068.000
Tablero de distribución 630 A	1	5.895.509	5.895.509
TOTAL (\$)			158.175.509

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

Tabla N° 4.3: Costo de obras civiles.

DETALLE	CANTIDAD (c/u)	VALOR (\$)	TOTAL (\$)
Arriendo de equipos - Camionetas	2	30.000 (8)	480.000
Arriendo de equipos - Camiones	2	45.000 (4)	360.000
Arriendo de equipos - Manitou	1	45.000 (3)	135.000
Mano de obra - Supervisor	1	85.000 (8)	680.000
Mano de obra - APR	1	70.000 (8)	560.000
Mano de obra - Capataz	1	55.000 (8)	440.000
Mano de obra - Maestro	4	48.000 (8)	1.536.000
Materiales – Tecle de cadena	2	63.990	127.980

Materiales – Cubos de hormigón (m ³)	65	188.000	12.220.000
Materiales – Tableros de madera	32	35.000	1.120.000
Materiales – Herramientas	-	-	340.260
Utilidad 13%	TOTAL (\$)		20.339.141

Fuente: Cotización empresa de construcción.

CAPÍTULO V

CÁLCULOS DE POTENCIA Y ALIMENTADORES

5.1 Alimentador en MT

Un alimentador en media tensión es el encargado de distribuir la energía eléctrica hacia los puntos de transformación. Estos alimentadores trabajan con altos niveles de tensión con el fin de reducir pérdidas de tensión durante el transporte de la energía.

5.1.1 Empalme

La alimentación principal en MT se encuentra seccionada desde empalme ubicado en el sector de Malaquita Sur (postación ubicada al interior del recinto S/E), el cual contempla como protección, fusibles de 15 A. La tensión de alimentación corresponderá a 23 kV y 50 Hz (ver la figura N° 5.1).



Figura N° 5.1: Empalme en MT con fusibles tipo hilo de 15 (A).

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

Corriente nominal subestación (500 kVA – 23 kV).

$$I_p(A) = \frac{S [kVA]}{\sqrt{3} \times V_L [kV]} \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.1)$$

Donde:

- ✚ Ip: Intensidad de corriente nominal lado primario [A].
- ✚ S: Potencia aparente [kVA].
- ✚ VL: Tensión de línea lado primario [kV].

Una vez reemplazados los valores en la ecuación N° 5.1, se obtendrá la corriente nominal primaria de la subestación, tal como se muestra a continuación:

$$I_p(A) = \frac{S [kVA]}{\sqrt{3} \times V_L [kV]} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 23} = 12.55 [A]$$

5.1.2 Cálculo de caída de tensión en MT

Para una capacidad de transporte de 12.55 A en 23 kV, la sección seleccionada es de 67.4 mm² (2/0 AWG), clase 25 kV, 133 % IL capacidad de corriente 246 A. Sección única proporcionada por LMC.

$$V_p = \sqrt{3} \times L \times I \times \sqrt{R_c^2 + X_c^2} \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.2)$$

Donde:

- ✚ Vp: Voltaje de pérdida (caída de tensión) [V].
- ✚ L: largo de la línea [km].
- ✚ I: Intensidad de corriente nominal [A].
- ✚ Rc: Resistencia del conductor [Ω /km].
- ✚ Xc: Reactancia del conductor [Ω /km].

Para desarrollar el cálculo de caída de tensión del alimentador en MT, se considerarán los datos técnicos proporcionados por el fabricante.

CB/FREETOX-MZG 25 kV 3x2/0+3x6 AWG

- ✚ Resistencia del conductor a T° de servicio [Ω/km] = 0.266.
- ✚ T° Servicio [$^{\circ}\text{C}$] = 20.
- ✚ Reactancia a 50 Hz [Ω/km] = 0.13.

Una vez reemplazados los valores en la ecuación N° 5.2, se obtendrá la caída de tensión correspondiente al alimentador en MT.

$$V_p = \sqrt{3} \times 0.45 \times 12.55 \times \sqrt{0.266^2 + 0.13^2} = 28.328 \text{ [V]}$$

5.2 Cálculos del transformador

A continuación, se presenta el cuadro general de cargas, considerando equipos a alimentar.

Tabla N° 5.1: Cuadro de carga general de fuerza 630 A.

CUADRO DE CARGA GENERAL DE FUERZA INT 630 A – MALAQUITA SUR								
DESIGNACION TABLERO	CIRCUITO N°	POTENCIA (KW)	CORRIENTE (A)	PROTECCIONES		SECCION mm ²	UBICACION	DESCRIPCION
				REL-DIF	DISY (A)			
TDF 01	1	110	196.62	300mA	3 X 250	95	Malaquita Sur	VDF - Ventilador 1
	2	110	196.62	300mA	3 X 250	95	Malaquita Sur	VDF - Ventilador 2
	3	3	13.63	300mA	3 X 32	3x12 AWG	Malaquita Sur	Iluminación y Control
TOTAL	3	223	406.87					

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

Para el cálculo del transformador se considera la potencia total de la tabla anterior, con un 25 % para ampliaciones o modificaciones. La siguiente expresión entrega el cálculo del transformador considerando un factor de potencia no corregido de 0.85.

$$S [\text{kVA}] = \frac{P [\text{kW}]}{F_p} \times 1.25 (\text{Ampliación}) \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.3)$$

Donde:

- ✚ S: Potencia aparente [kVA].
- ✚ P: Potencia activa (instalada) [kW].
- ✚ Fp: Factor de potencia [$\text{Cos}\Theta = 0.85$].

Reemplazando los valores en la ecuación N° 5.3, se obtiene la potencia necesaria para alimentar las cargas asociadas.

$$S [\text{kVA}] = \frac{223}{0.85} \times 1.25 = 327.94 [\text{kVA}]$$

La potencia nominal del transformador requerido debe ser no inferior a 327.94 kVA, debido a que ese es el valor nominal de potencia instalada, más un 25 % por futuras modificaciones. Considerando que la instalación cuenta con una S/E de 500 kVA, se verifica que cumple con lo requerido para llevar a cabo el proyecto.

5.3 Protección en MT

Para un sistema de distribución trifásica, la definición de la intensidad de corriente por el lado primario del transformador se determina según la ecuación N° 5.4, la cual considera un 25 % de sobrecarga para el transformador, esto de acuerdo con los datos proporcionados por el fabricante.

$$I_p = \frac{S [\text{kVA}]}{\sqrt{3} \times V_L [\text{kV}]} \times 1.25 \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.4)$$

Donde:

- ✚ S: Potencia nominal del transformador [kVA].
- ✚ VL: Tensión de línea primaria [kV] (distribución de la zona en 23 kV).
- ✚ Ip: Corriente nominal en el lado primario [A].

$$I_p = \frac{500 \text{ [kVA]}}{\sqrt{3} \times 23 \text{ [kV]}} \times 1.25 = 15.68 \text{ [A]}$$

La protección actual del circuito en MT es por medio de hilo fusibles de 15 A, lo cual se encuentra dentro de los parámetros permitidos de sobrecarga para el transformador.

5.4 Protección en BT

Para un sistema de distribución trifásica, la definición de la intensidad de corriente por el lado secundario del transformador se determina por la ecuación N° 5.5.

$$I_s = \frac{S \text{ [kVA]}}{\sqrt{3} \times V_L \text{ [kV]}} \quad (\text{Ec. N° 5.5})$$

Donde:

- ✚ Is: Intensidad de corriente nominal lado secundario [A].
- ✚ S: Potencia aparente [kVA].
- ✚ VL: Tensión de línea lado secundario [kV].

Una vez reemplazados los valores en la ecuación N° 5.5, se obtendrá la corriente nominal primaria de la subestación, tal como se muestra a continuación:

$$I_s = \frac{S \text{ [kVA]}}{\sqrt{3} \times V_L \text{ [kV]}} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 0.400} = 721.6 \text{ [A]}$$

5.5 Cálculo de banco de condensadores

Con el fin de aportar eficiencia energética al proyecto, además de reducir posibles efectos de caída de tensión, se realiza el cálculo estimativo de un banco de condensadores necesario para corregir el FP de la instalación a un valor de 0.99, considerando una potencia de 220 kW, equivalente a la carga de 02 ventiladores de 110 kW c/u.

Datos:

- ✚ Potencia activa (P) = 220 kW.
- ✚ Factor de potencia inicial (Cosφ_i) = 0.85.
- ✚ Factor de potencia final (Cosφ_f) = 0.99.

$$S = \frac{P \text{ [kW]}}{\text{Cos}\varphi} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.6})$$

$$S_i = \frac{P \text{ [kW]}}{\text{Cos}\varphi_i} = \frac{220}{0.85} = 258.82 \text{ [kVA]}$$

$$S_f = \frac{P \text{ [kW]}}{\text{Cos}\varphi_f} = \frac{220}{0.99} = 222.22 \text{ [kVA]}$$

$$\varphi_i = \text{ArcCos}(0,85) = 31,79^\circ$$

$$\varphi_f = \text{ArcCos}(0,99) = 8,11^\circ$$

$$\text{Sen}\varphi_i = \text{Sen}(31.79^\circ) = 0.5268$$

$$\text{Sen}\varphi_f = \text{Sen}(8.11^\circ) = 0.141$$

$$Q = S \times \text{Sen}\varphi \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.7})$$

$$Q_i = S_i \times \text{Sen}\varphi_i$$

$$Q_f = S_f \times \text{Sen}\varphi_f$$

$$Q_i = 258.82 \times 0.5268 = 136.34 \text{ [kVAr]}$$

$$Q_f = 222.22 \times 0.141 = 31.33 \text{ [kVAr]}$$

$$Q_c = Q_i - Q_f \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.8)$$

$$Q_c = 136,34 - 31,33 = 105,01 \text{ [kVAr]}$$

Se recomienda la instalación de un banco de condensadores de 100 kVAr.

Nota: No se recomienda conectar el banco de condensadores en la salida de variadores de frecuencia, por posibles daños a los equipos (Banco – VDF).

5.6 Selección de conductores en BT

Cada conductor será de cobre, con aislaciones adecuadas al uso y lugar de montaje, preferentemente de fabricación nacional. El alimentador se definirá calculando como sigue:

✚ La caída de tensión no será mayor de 3,0 % de la tensión nominal de la línea según el Pliego Técnico Normativo RIC N° 03 de la Superintendencia de Electricidad y Combustible.

✚ El cálculo de sección mínima del conductor está definido por la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times L \times I_n \cos \theta}{V_p \times k} \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.9)$$

✚ El cálculo de caída de tensión del conductor está definido por la siguiente expresión:

$$V_p = \frac{\sqrt{3} \times L \times I_n \cos \theta}{S \times k} \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.10)$$

Donde:

- ✚ S: Sección del conductor [mm²].
- ✚ Vp: Voltaje de pérdida [V].
- ✚ k: Factor 2 para sistema monofásico.
- ✚ L: Largo en metros [m].
- ✚ In: Intensidad nominal [A].
- ✚ ρ: Resistividad específica del cobre = 0.018 [Ω*mm²].

No obstante, los valores obtenidos, no deben superar el Vp, permitido según la norma.

- ✚ Vp: Sistema Trifásico = 11,4 V
- ✚ Vp: Sistema Monofásico = 6,6 V

El cálculo de sección mínima del conductor desde el lado de BT hacia TDF N°1, está definido por la ecuación N° 5.9:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 10 \times 500 \times 0.85}{11.4 \times 56} = 11.54 \text{ [mm}^2\text{]}$$

De acuerdo con la recomendación del fabricante, la sección mínima para alimentar un VDF con carga de 110 kW, será de 120 mm², por lo tanto, la sección adecuada para la alimentación de 02 VDF de 110 kW, corresponde a un mínimo de 240mm².

El cálculo de caída de tensión del conductor de 240 mm², desde el lado de BT hacia TDF N° 1, está definido por la ecuación N° 5.10:

$$V_p = \frac{\sqrt{3} \times 10 \times 500 \times 0.85}{240 \times 56} = 0.547 \text{ [V]}$$

Una vez calculada la sección de acuerdo con el criterio de la caída de tensión, el segundo paso es la comparación con tablas de fabricante de conductores, para verificar que la sección calculada cumple con la capacidad de transporte de corrientes de acuerdo con la capacidad del automático general. Para este caso será regulada a 500 A.

Tabla N° 5.2: Selección de alimentador desde lado secundario a TDF N°1.

N° x SECCIÓN [mm ²]	In AIRE LIBRE [A]	In ENTERRADO [A]	CAIDA DE TENSION [V/A x Km]
3 x 35 + 1 x 16	158	122	1,23
3 x 50 + 1 x 25	192	144	0,86
3 x 70 + 1 x 35	246	178	0.603
3 x 95 + 1 x 50	298	211	0.457
3 x 120 + 1 x 70	346	240	0.357
3 x 150 + 1 x 70	399	271	0,286
3 x 185 + 1 x 95	456	304	0,235
3 x 240 + 1 x 120	538	351	0.178

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

Cálculo de protección para CTO N°1 según la ecuación N° 5.4:

$$I_p = \frac{110 \text{ [kW]}}{\sqrt{3} \times 0.380 \text{ [kV]} \times 0.85} = 196.62 \text{ [A]}$$

Adicionando un 25 %, de acuerdo con criterio de cálculo de alimentadores para motores de régimen permanente, se tiene:

$$I_{p_{SCC}} = 196.62 \times 1.25 = 245.78 \text{ [A]}$$

La protección para el circuito N°1 deberá ser ajustada en 250 A.

El cálculo de sección mínima del conductor desde el TDF N°1 a VDF N°1, está definido por la ecuación N° 5.9:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 5 \times 245.78 \times 0.85}{11.4 \times 56} = 2.83 \text{ [mm}^2\text{]}$$

De acuerdo con la recomendación del fabricante, la sección mínima para alimentar un VDF con carga de 110 kW, será de 120 mm², por lo tanto, el cálculo de caída de tensión para conductor de 120 mm², desde TDF N°1, hacia VDF N°1, está definido por la ecuación N° 5.10:

$$V_p = \frac{\sqrt{3} \times 5 \times 245.78 \times 0.85}{120 \times 56} = 0.27 \text{ [V]}$$

Para cálculos se considerarán 245.78 A, debido a que será la capacidad nominal del equipo, más un 25 % adicionales por concepto de criterio de cálculo de alimentadores para motores de régimen permanente.

Tabla N° 5.3: Selección de alimentador desde TDF N°1 a VDF N°1.

N° x SECCIÓN [mm ²]	In AIRE LIBRE [A]	In ENTERRADO [A]	CAIDA DE TENSION [V/A x Km]
3 x 35 + 1 x 16	158	122	1,23
3 x 50 + 1 x 25	192	144	0,86
3 x 70 + 1 x 35	246	178	0.603
3 x 95 + 1 x 50	298	211	0.457
3 x 120 + 1 x 70	346	240	0.357
3 x 150 + 1 x 70	399	271	0,286
3 x 185 + 1 x 95	456	304	0,235
3 x 240 + 1 x 120	538	351	0.178

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

El cálculo de sección mínima del conductor desde el VDF N°1 a ventilador N°1, está definido por la ecuación N° 5.9:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 50 \times 245.78 \times 0.85}{11.4 \times 56} = 28.3 \text{ [mm}^2\text{]}$$

De acuerdo con la recomendación del fabricante, la sección mínima para alimentar un ventilador ZITRON de 110 kW, será de 95 mm², por lo tanto, el cálculo de caída de tensión para conductor de 95 mm², desde VDF N°1, hacia ventilador N°1, está definido por la ecuación N° 5.10:

$$V_p = \frac{\sqrt{3} \times 50 \times 245.78 \times 0.85}{95 \times 56} = 3.4 \text{ [V]}$$

Para cálculos se considerarán 245.78 A, debido a que será la capacidad nominal del equipo, más un 25 % adicionales por concepto de criterio de cálculo de alimentadores para motores de régimen permanente.

Tabla N° 5.4: Selección de alimentador desde VDF N°1 a Ventilador N°1.

N° x SECCIÓN [mm ²]	In AIRE LIBRE [A]	In ENTERRADO [A]	CAIDA DE TENSION [V/A x Km]
3 x 35 + 1 x 16	158	122	1,23
3 x 50 + 1 x 25	192	144	0,86
3 x 70 + 1 x 35	246	178	0.603
3 x 95 + 1 x 50	298	211	0.457
3 x 120 + 1 x 70	346	240	0.357
3 x 150 + 1 x 70	399	271	0,286
3 x 185 + 1 x 95	456	304	0,235
3 x 240 + 1 x 120	538	351	0.178

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

La sección seleccionada para este tramo será de 95 mm², sección que asegura la capacidad necesaria de transporte.

Cálculo de protección para el CTO N°2 según la ecuación N° 5.4:

$$I_p = \frac{110 \text{ [kW]}}{\sqrt{3} \times 0.380 \text{ [kV]} \times 0.85} = 196.62 \text{ [A]}$$

Adicionando un 25 %, de acuerdo con criterio de cálculo de alimentadores para motores de régimen permanente, tenemos:

$$I_{p_{scc}} = 196.62 \times 1.25 = 245.78 \text{ [A]}$$

La protección para el circuito N°2 deberá ser ajustada en 250 A.

El cálculo de sección mínima del conductor desde el TDF N°1 a VDF N°2, está definido por la ecuación N° 5.9.:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 5 \times 245.78 \times 0.85}{11.4 \times 56} = 2.83 \text{ [mm}^2\text{]}$$

De acuerdo con la recomendación del fabricante, la sección mínima para alimentar un VDF con carga de 110 kW, será de 120 mm², por lo tanto, el cálculo de caída de tensión para conductor de 120 mm², desde TDF N°1, hacia VDF N°2, está definido por la ecuación N° 5.10:

$$V_p = \frac{\sqrt{3} \times 5 \times 245.78 \times 0.85}{120 \times 56} = 0.27 \text{ [V]}$$

Para cálculos se considerarán 245.78 A, debido a que será la capacidad nominal del equipo, más un 25 % adicionales por concepto de criterio de cálculo de alimentadores para motores de régimen permanente.

Tabla N° 5.5: Selección de alimentador desde TDF N°1 a VDF N°2.

N° x SECCIÓN [mm ²]	In AIRE LIBRE [A]	In ENTERRADO [A]	CAIDA DE TENSION [V/A x Km]
3 x 35 + 1 x 16	158	122	1,23
3 x 50 + 1 x 25	192	144	0,86
3 x 70 + 1 x 35	246	178	0.603
3 x 95 + 1 x 50	298	211	0.457
3 x 120 + 1 x 70	346	240	0.357
3 x 150 + 1 x 70	399	271	0,286
3 x 185 + 1 x 95	456	304	0,235
3 x 240 + 1 x 120	538	351	0.178

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

La sección seleccionada para este tramo será de 120 mm², sección que asegura la capacidad necesaria de transporte.

El cálculo de sección mínima del conductor desde el VDF N°2 a ventilador N°2, está definido por la ecuación N° 5.9:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 50 \times 245.78 \times 0.85}{11.4 \times 56} = 28.3 \text{ [mm}^2\text{]}$$

De acuerdo con la recomendación del fabricante, la sección mínima para alimentar un ventilador ZITRON de 110 kW, será de 95mm², por lo tanto, el cálculo de caída de tensión para conductor de 95 mm², desde VDF N°2, hacia ventilador N°2, está definido por la ecuación N° 5.10:

$$V_p = \frac{\sqrt{3} \times 50 \times 245.78 \times 0.85}{95 \times 56} = 3.4 \text{ [V]}$$

Para cálculos se considerarán 245.78 A, debido a que será la capacidad nominal del equipo, más un 25 % adicionales por concepto de criterio de cálculo de alimentadores para motores de régimen permanente.

Tabla N° 5.6: Selección de alimentador desde VDF N°2 a Ventilador N°2.

N° x SECCIÓN [mm ²]	In AIRE LIBRE [A]	In ENTERRADO [A]	CAIDA DE TENSION [V/A x Km]
3 x 35 + 1 x 16	158	122	1,23
3 x 50 + 1 x 25	192	144	0,86
3 x 70 + 1 x 35	246	178	0.603
3 x 95 + 1 x 50	298	211	0.457
3 x 120 + 1 x 70	346	240	0.357
3 x 150 + 1 x 70	399	271	0,286
3 x 185 + 1 x 95	456	304	0,235
3 x 240 + 1 x 120	538	351	0.178

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

La sección seleccionada para este tramo será de 95 mm², sección que nos asegura la capacidad necesaria de transporte. ^[14]

5.7 Costo de alimentadores y canalizaciones

Por medio de las tablas N° 5.7 y N° 5.8, se conoce el detalle de los costos asociados a canalizaciones y alimentadores requeridos para habilitar los 02 ventiladores de 110 kW que se deben adicionar al sistema de ventilación principal mina.

Tabla N° 5.7: Costo de alimentadores.

Detalle	Cantidad (m)	Valor (\$)	Total (\$)
FREETOX 3 x 240 + 1 x 120 mm ²	10	99.472	994.720
FREETOX 3 x 120 + 1 x 70 mm ²	10	49.602	496.020
FREETOX 3 x 95 + 1 x 50 mm ²	100	45.602	4.560.200
Cobre desnudo 2/0 AWG	150	11.215	1.682.298
Total (\$)			7.733.238

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

Tabla N° 5.8: Costo de canalizaciones y accesorios.

Detalle	Cantidad (c/u)	Valor (\$)	Total (\$)
Escalerilla recta 300 x 100 x 3000 mm	15	54.206	813.090
Curva horizontal 300 x 100 mm	5	14.337	71.685
Curva vertical interior 300 x 100 mm	3	14.304	42.912
Curva vertical exterior 300 x 100 mm	3	25.867	77.601
Terminal tipo ojo 500 MCM	10	13.820	138.200
Terminal tipo ojo 250 MCM	15	2.040	30.600
Terminal tipo ojo 3/0 AWG	15	2.179	32.685
Terminal tipo ojo 2/0 AWG	20	1.289	25.780
Prensa paralela ½ “	20	2.853	57.060
Total (\$)			1.289.613

Fuente: Proyecto habilitación ventiladores Malaquita Sur – Mina Santos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Luego de revisar, verificar, probar y analizar todos y cada uno de los componentes utilizados en este proyecto, se puede concluir en que se realizó correctamente el desarrollo de la solución del problema, ya que, por medio de la habilitación de los nuevos ventiladores, se logra aumentar los niveles de kcfm, dando cumplimiento a los acuerdos y alcances pactados con SNGM, además de mantener niveles de contaminación y tiempos de evacuación de gases óptimos y eficientes para aportar en el desarrollo mina. Con la inclusión de ventiladores modernos, se aporta eficiencia y confiabilidad al sistema eléctrico, además de reducir los costos asociados tanto en mantenimiento, como en pérdidas y multas por parte de la compañía distribuidora.

Al realizar las pruebas de rutina al transformador, se logra determinar su estado en condiciones normales, lo que nos da garantías de que aportará al sistema calidad, confiabilidad y durabilidad. Las pruebas se realizan mediante aporte de la norma ANSI/IEEE C57.12.90, mediante las cuales se concluye que el transformador se encuentra en excelentes condiciones.

La instalación de variadores de frecuencia SD700, permite poseer control total sobre los equipos (ventiladores), incluyendo monitoreo en línea, pudiendo conocer su estado en todo momento, lo que, por cierto, resulta beneficioso para determinar sus plazos correctos de mantenimiento y operación.

Realizar las mediciones de resistencia de malla a tierra, da garantías a la seguridad de las instalaciones para con las personas, cumpliendo con lo establecido en las normativas vigentes:

- ✚ IEEE 81-2012
- ✚ IEEE 80-2013
- ✚ Pliego Técnico RPTD N°6

El último paso, luego de realizar todo lo anteriormente mencionado, son las pruebas de control y operación de los equipos, logrando resultados inmediatamente favorables, y paulatinos de acuerdo con su configuración y frecuencia de trabajo.

Una vez definida su frecuencia de trabajo (90 %), se debe realizar aforo de ventilación final para cuantificar el aumento de los kcfm requeridos.

Resultado de aforo de ventilación inicial. Septiembre 2022. Ver tablas N° 6.1, N° 6.2.

Tabla N° 6.1: Ingreso de aire fresco a mina.

Nivel	Punto de medición	Caudal (kcfm)
512	Acceso por rampa principal	75
470	Chimenea evacuación Norte	11
430	Acceso Banco 430 Glory Hole	153
370	Acceso por GT Glory Hole	163
350	Acceso desde Glory Hole	103
Total ingreso aire fresco		505

Fuente: Aforo de ventilación tercer trimestre año 2022 – Mina Santos.

Tabla N° 6.2: Extracción de aire viciado desde mina.

Nivel	Punto de medición	Caudal (kcfm)
560	Galería de ventilación Meléndez	105
460	Acceso Banco 460 Glory Hole	132
380	Chimenea Malaquita Sur (MQS)	0
265	Chimenea Malaquita Sur Este (MQSE)	281
Total extracción aire viciado		518

Fuente: Aforo de ventilación tercer trimestre año 2022 – Mina Santos.

Resultado de aforo de ventilación inicial. Diciembre 2022. Ver tablas N° 6.3, N° 6.4.

Tabla N° 6.3: Ingreso de aire fresco a mina.

Nivel	Punto de medición	Caudal (kcfm)
512	Acceso por rampa principal	58
470	Chimenea evacuación Norte	26
430	Acceso Banco 430 Glory Hole	136
370	Acceso por GT Glory Hole	389
350	Acceso desde Glory Hole	129
Total ingreso aire fresco		738

Fuente: Aforo de ventilación cuarto trimestre año 2022 – Mina Santos.

Tabla N° 6.4: Extracción de aire viciado desde mina.

Nivel	Punto de medición	Caudal (kcfm)
560	Galería de ventilación Meléndez	105
460	Acceso Banco 460 Glory Hole	171
380	Chimenea Malaquita Sur (MQS)	213
265	Chimenea Malaquita Sur Este (MQSE)	254
Total extracción aire viciado		743

Fuente: Aforo de ventilación cuarto trimestre año 2022 – Mina Santos.

Como conclusión general, se destaca la importancia del sistema eléctrico y sus componentes para el desarrollo de la actividad minera y la seguridad de la misma, además de comprobar por medio de aforos de ventilación realizados previos y posteriores a la instalación del sistema adicional de ventilación, los cuales demuestran la mejora sustancial de los kcfm y el cumplimiento de los acuerdos adquiridos con Sernageomin, pasando de 518 kcfm a 743 kcfm como flujo constante de extracción de aire mina.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANSI. (2017). Acceptance Testing Specifications. USA.
2. Chapman, S. J. (2020). Máquinas eléctricas. Mexico: mcgraw hill.
3. Icasel Ingeniería Eléctrica. (n.d.). Icasel. Retrieved 2022, from Icasel.
4. IEEE Standards Association. (2012). Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System.
5. IEEE Standards association. (2013). Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, USA.
6. lundinmining. (n.d.). Retrieved 2022, from lundinmining: www.lundinmining.com
7. Megger. (n.d.). Megger. Retrieved Octubre 2022, from Megger: <https://es.megger.com/analizador-de-resistencia-de-devanado-y-relacion-trifasica-mwa300-y-mwa330a>
8. Metrel. (2015). TeraOhm 5kV Plus MI 3201 Manual de funcionamiento. Madrid, España.
9. Power Electronics. (2011). SD700 Series Manual de servicio.
10. power electronics. (2012). Manual de hardware e instalación SD700.
11. Power Electronics. (2013). Manual de software y programación SD700.
12. Safety Instruments. (2018). Safety instruments. Retrieved 2023, from <https://www.safetyinstruments.com.co/medicionventilacion/>
13. Servicio Nacional de Geología y Minería. (2008). Guía Metodológica de Seguridad. Santiago, Chile.
14. Superintendencia de Electricidad y Combustible. (2020, Diciembre 30). Pliegos técnicos normativos RIC N° 1-19. Reglamento de seguridad de las instalaciones de consumo de energía eléctrica.
15. Zitron. (2019). Manual de operación y mantenimiento ventiladores ZVN. Copiapó.