

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



T E S I S

**Automatización de los siete ventiladores principales para la optimización del control
y mejora del sistema de ventilación en la unidad minera El Porvenir – NEXA**

RESOURCES

Para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Bach. Emir Brandon HURTADO BERNACHEA

Bach. Moises Christoffer MALPICA BLAS

Asesor:

Mg. Silvestre Fabián BENAVIDES CHAGUA

Cerro de Pasco – Perú – 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



T E S I S

**Automatización de los siete ventiladores principales para la optimización del control
y mejora del sistema de ventilación en la unidad minera El Porvenir – NEXA**

RESOURCES

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg. Nelson MONTALVO CARHUARICRA
PRESIDENTE

Mg. David Odon SOSA POMA
MIEMBRO

Mg. Manuel Mayer CARHUARICRA RIVERA
MIEMBRO



Firmado digitalmente por CONDOR SURICHAQUI Sarita Silvia FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 06.02.2026 05:00:21 -05:00

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas

"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"



INFORME DE ORIGINALIDAD N° 001-2026

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

Bach. HURTADO BERNACHEA Emir Brandon
Bach. MALPICA BLAS Moises Christoffer

Escuela de Formación Profesional
Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:
Tesis

Título del trabajo
"AUTOMATIZACIÓN DE LOS SIETE VENTILADORES PRINCIPALES PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL Y MEJORA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN LA UNIDAD MINERA EL PORVENIR – NEXA RESOURCES".

Asesor:
Mg. Silvestre Fabian BENAVIDES CHAGUA

Índice de Similitud: **2 %**

Calificativo
APROBADO

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 5 de febrero de 2026.

Sello y Firma del responsable
de la Unidad de Investigación

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, pilares fundamentales que con su amor, paciencia y sacrificio nos impulsaron a alcanzar esta meta. Su apoyo incondicional ha sido la fuerza que nos sostuvo en cada desafío y el aliento que nos acompañó hasta el final.

A todos los mineros, cuya labor incansable y silenciosa representa el corazón mismo de nuestra profesión. A ellos, que enfrentan cada jornada con valentía bajo tierra, les dedicamos este esfuerzo, pues la automatización de los ventiladores que aquí proponemos busca ser un pequeño aporte para mejorar su seguridad, bienestar y calidad de vida.

A quienes creen en el esfuerzo, la perseverancia y en que la minería puede avanzar con humanidad y tecnología, les entregamos con orgullo esta tesis, fruto del compromiso, la gratitud y el amor por nuestra carrera.

AGRADECIMIENTO

A **Dios**, por guiarnos con su luz en los momentos de incertidumbre, por darnos fortaleza cuando el cansancio pesaba más que las palabras, y por permitirnos culminar este sueño que alguna vez pareció tan lejano.

A nuestras **familias**, por su amor infinito, su paciencia y su fe en nosotros. Ellos fueron el refugio en las noches largas de estudio y el impulso silencioso que nos empujó a no rendirnos.

A la **Unidad Minera El Porvenir – NEXA Resources**, por abrirnos sus puertas y permitir que esta investigación cobre vida; por confiar en el conocimiento joven y brindar las herramientas para hacerlo realidad.

A nuestros **docentes y asesores** de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, por su dedicación, su guía constante y su compromiso con formar profesionales que no solo piensen en la técnica, sino también en la seguridad y dignidad del trabajador minero.

Y a todos aquellos que, con una palabra, un consejo o un gesto, nos ayudaron a avanzar, les dejamos aquí nuestro más sincero agradecimiento.

Esta tesis no es solo un logro académico: es un homenaje al esfuerzo, a la fe y a la convicción de que todo sacrificio tiene su recompensa.

RESUMEN

La presente investigación titulada “Automatización de los siete ventiladores principales para la optimización del control y mejora del sistema de ventilación en la Unidad Minera El Porvenir – NEXA Resources” tiene como objetivo **optimizar la ventilación subterránea** mediante la implementación de un sistema automatizado de control de ventiladores, mejorando la eficiencia operativa y la seguridad ocupacional.

El estudio posee un **enfoque cuantitativo y aplicado**, empleando herramientas estadísticas (SPSS) para analizar variables técnicas como caudal, presión y potencia antes y después de la automatización. La población está conformada por los siete ventiladores principales y el personal beneficiado en las tres guardias.

El proyecto se enmarca en la línea de Ingeniería Minera – Ventilación y Seguridad Operacional y busca contribuir al cumplimiento del **D.S. N.º 024-2016-EM**, fortaleciendo la gestión de ventilación y la prevención de riesgos ocupacionales. Se espera evidenciar una **mejor regulación del flujo de aire, reducción en consumo energético y mayor seguridad laboral**.

Palabras clave: Automatización, ventilación minera, control operacional, seguridad ocupacional, NEXA Resources.

ABSTRACT

The research entitled “Automation of the seven main fans for the optimization of control and improvement of the ventilation system at the El Porvenir Mining Unit – NEXA Resources” aims to **optimize underground ventilation** through an automated fan control system that enhances operational efficiency and occupational safety.

The study follows a **quantitative and applied approach**, using statistical tools (SPSS) to analyze variables such as airflow, pressure, and power before and after automation. The population includes the seven main fans and the personnel working in the three shifts.

This project is part of the Mining Engineering – Ventilation and Operational Safety research line and contributes to compliance with **Supreme Decree No. 024-2016-EM**, strengthening ventilation management and occupational risk prevention. The results are expected to show **better airflow regulation, lower energy consumption, and improved worker safety**.

Keywords: Automation, mine ventilation, operational control, occupational safety, NEXA Resources.

INTRODUCCIÓN

La ventilación en minería subterránea constituye uno de los sistemas más críticos para garantizar la seguridad, salud y eficiencia operativa en las labores de extracción. Un flujo de aire insuficiente o mal controlado puede generar la acumulación de gases tóxicos, polvo respirable y condiciones térmicas adversas, afectando directamente la salud de los trabajadores y la continuidad de las operaciones. En este contexto, la automatización de los sistemas de ventilación se presenta como una herramienta moderna y eficaz que permite optimizar el control, reducir tiempos de respuesta ante emergencias y mejorar la gestión energética.

La **Unidad Minera El Porvenir**, operada por **NEXA Resources Perú S.A.A.**, se ubica en el distrito de Yarusyacan, provincia y región de Pasco, a una altitud aproximada de 4,300 m s. n. m. Es una mina subterránea polimetálica dedicada principalmente a la extracción de zinc, plomo y plata. La operación cuenta con una red compleja de ventiladores principales y secundarios que permiten mantener un flujo constante de aire fresco hacia los diferentes niveles de producción. En particular, se identifican **siete ventiladores principales** —cinco de extracción y dos de inyección— que garantizan la circulación de aire desde los niveles 9.40 hasta el 11.70. No obstante, el control manual actual genera limitaciones en el monitoreo en tiempo real y en la capacidad de respuesta ante variaciones operativas.

La presente investigación propone la **automatización de los siete ventiladores principales** mediante la implementación de un sistema de control supervisado que permita regular parámetros críticos como el caudal, la presión estática y el consumo energético, con el fin de **optimizar la ventilación subterránea** y mejorar las condiciones de seguridad ocupacional. Esta propuesta se enmarca en la línea de investigación de *Ingeniería Minera – Ventilación y Seguridad Operacional* y busca contribuir a la modernización tecnológica de los sistemas de soporte vital en

minería subterránea.

El estudio tiene un enfoque **cuantitativo y aplicado**, pues se analizan variables técnicas medibles antes y después de la automatización, empleando herramientas estadísticas de procesamiento y análisis de datos, como el software SPSS. Los resultados esperados permitirán demostrar mejoras en la eficiencia operativa de los ventiladores y en la calidad del aire suministrado a las labores, aportando beneficios directos al bienestar del personal minero y al cumplimiento del **Decreto Supremo N.º 024-2016-EM**, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería.

Finalmente, la tesis se estructura en **5 capítulos**: el primero desarrolla la descripción del problema de investigación, su delimitación, los objetivos, la justificación y las limitaciones del estudio; el segundo expone el marco teórico, los antecedentes y la base normativa que fundamenta la investigación; el tercero describe la metodología y las técnicas empleadas, la población y muestra, el tratamiento estadístico y la caracterización técnico - operativa de los siete ventiladores principales; el cuarto presenta los resultados del procesamiento estadístico y la discusión técnica de estos; el quinto analiza las implicancias de la automatización en la seguridad y salud ocupacional en la Unidad Minera El Porvenir; consecuente a ello contiene las conclusiones derivadas del trabajo realizado; las recomendaciones orientadas a la mejora continua del sistema de ventilación y de la gestión de seguridad y salud en el trabajo. Con ello, se busca ofrecer una propuesta técnica integral que contribuya a la sostenibilidad y seguridad de las operaciones mineras subterráneas en el Perú.

ÍNDICE

Página.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema	1
1.2.	Delimitación de la investigación.....	2
1.3.	Formulación del problema	2
1.3.1.	Problema general	2
1.3.2.	Problemas específicos	2
1.4.	Formulación de objetivos.....	2
1.4.1.	Objetivo general.....	2
1.4.2.	Objetivos específicos	2
1.5.	Justificación de investigación	3

1.6.	Limitación de investigación.....	3
------	----------------------------------	---

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio.....	4
2.1.1.	Antecedentes Nacionales	4
2.1.2.	Antecedentes Internacionales.....	7
2.2.	Bases teóricas – científicas	10
2.2.1.	Objetivos del sistema de ventilación.....	10
2.2.2.	Componentes del sistema de ventilación:	10
2.2.3.	Base normativa en seguridad minera	10
2.3.	Definición de términos básicos	11
2.4.	Formulación de hipótesis	13
2.4.1.	Hipótesis general.....	13
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	13
2.5.	Identificación de variables	14
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores	14

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de investigación.....	15
3.2.	Nivel de investigación.....	15
3.3.	Métodos de investigación	15
3.4.	Diseño de investigación	15
3.5.	Población y muestra	15

3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	17
3.7.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación	17
3.8.	Técnicas de procedimiento y análisis de datos	19
3.9.	Tratamiento estadístico	72
3.10.	Orientación ética filosófica y epistémica	72

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Descripción del trabajo de campo	73
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados	74
4.3.	Prueba de hipótesis	91
4.4.	Discusión de resultados	95

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS:

ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1. Caudal teórico de aire requerido en las diferentes áreas de la Unidad Minera El Porvenir	16
Tabla 2. Plano isométrico	22
Tabla 3. Comparativa Antes – Después	74

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 1. Variador process del ventilador EP-VE-106	24
Figura 2. Panel de monitoreo y operaciones en el variador del ventilador prinipal EP-VE-106..	24
Figura 3. Display de programación, arranque automático y variador del ventilador principal EP- VE-106.....	26
Figura 4. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-106	27
Figura 5. Central Hidroeléctrica Chaprin.....	28
Figura 6. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-106.....	30
Figura 7. Baterías de respaldo del panel de control de EP-VE-106.....	31
Figura 8. Panel de monitoreo y operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-44 ..	32
Figura 9. Panel de monitoero y operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-44 ..	32
Figura 10. Display de programación, arranque automático y variador del ventilador principal EP- VE-44	34
Figura 11. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-44	35
Figura 12. Baterías de respaldo del tablero arrancador del EP-VE-44.....	37
Figura 13. Batarías de respaldo de panel de control de EP-VE-44.....	38
Figura 14. panel de monitoreo operaciones en el SOFT STARTER del ventilador principal EP- VE-116.....	39
Figura 15. Display de programación, arranque automático del ventilador principal EP-VE-116	40
Figura 16. Dispositivo sonoro en caso de falla electrica y/o mecániaca EP-VE-116.....	42
Figura 17. baterías de respaldo del tablero arrancador del EP-VE-116.....	43
Figura 18. Baterías de respaldo de panel de control de EP-ve-116	44

Figura 19. Panel de monitoreo operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-110.	45
Figura 20. Display de programación, arranque automático del ventilador principal EP-VE-110	47
Figura 21. Dispositivo sonoro eb caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-110	48
Figura 22. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-110.....	50
Figura 23. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-110.....	51
Figura 24. Panel de monitoreo y operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-145	52
Figura 25. Display de programació, arranque automático y variaci´n del ventilador principal EP- ve-145	53
Figura 26. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventlador EP-VE-14555	
Figura 27. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-145.....	56
Figura 28. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-145.....	57
Figura 29. Panel de monitoreo y operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-138	58
Figura 30. Display de programación, arranque automático y variador del ventilador principal EP- VE-138.....	60
Figura 31. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-138	61
Figura 32. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-138.....	63
Figura 33. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-138.....	64
Figura 34. Panel de monitoreo operaciones en el SOFT STARTER del ventilador principal EP- VE-74.....	65

Figura 35. Display de programación, arranque automático del ventilador principal EP-VE-74...	67
Figura 36. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-74	68
Figura 37. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-74.....	70
Figura 38. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-74.....	71
Figura 39. P&ID simplificado del sistema de ventilación y control.....	72

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página.
Gráfico 1. Histograma.....	78
Gráfico 2. Gráfico Q-Q normal de eficiencia después de la automatización (%).....	79
Gráfico 3. Gráfico Q-Q normal sin tendencia de eficiencia después de la automatización (%)...	79
Gráfico 4. Eficiencia después de la automatización (%)	80
Gráfico 5. Histograma.....	80
Gráfico 6. Gráfico Q-Q normal de potencia después de la automatización (HP).....	81
Gráfico 7. Gráfico Q-Q normal sin tendencia de potencia después de la automatización (HP)...	81
Gráfico 8. Potencia después de la autorización (HP).....	82
Gráfico 9. Histograma.....	82
Gráfico 10. Gráfico Q-Q normal de coeficiente de variación después	83
Gráfico 11. Gráfico Q-Q normal sin tendencia de coeficiente de variación después	83
Gráfico 12. Coeficiente de variación después.....	84
Gráfico 13. Histograma.....	84
Gráfico 14. Gráfico Q-Q normal de caudal efectivo después (KCFM).....	85
Gráfico 15. Gráfico Q-Q normal sin tendencia de caudal efectivo después (KCFM).....	85
Gráfico 16. Caudal efectivo después (KCFM)	86
Gráfico 17. Comparación de la eficiencia (%) antes y después de la automatización en.....	87
Gráfico 18. Comparación de la potencia (kW) antes y después de la automatización en los 7 ventiladores principales.	87
Gráfico 19. Distribución del coeficiente de variación (CV) antes y después de la automatización.	88

Gráfico 20. Relación entre eficiencia (%) y coeficiente de variación (CV), con ajuste lineal y coeficiente de determinación (R^2).....	89
Gráfico 21. Histograma de la diferencia de eficiencia (Δ Eficiencia = Después – Antes) para evaluación de normalidad.	90
Gráfico 22. Dispersión entre eficiencia y coeficiente de variación (luego de la automatización)	95

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La ventilación en minería subterránea es un proceso esencial para garantizar condiciones seguras y eficientes de trabajo. En la Unidad Minera El Porvenir – NEXA Resources en el distrito de Yarusyacan, Provincia y Región de Pasco, el sistema de ventilación principal está conformado por siete ventiladores: cinco de inyección (inyectores de aire fresco) y dos de extracción (extracción de aire contaminado). Actualmente, estos equipos no cuentan con un sistema integral de automatización, lo cual limita el control operativo, la respuesta ante condiciones variables, y la eficiencia energética. Esta situación genera riesgos operacionales y un mayor costo de operación. La ubicación geográfica de la Unidad Minera El Porvenir se muestra en el Anexo 3 y la ubicación del derecho minero se presenta en el Anexo 4. (OIT, 2022; NIOSH, 2020; Ministerio de Energía y Minas, 2016)

1.2. Delimitación de la investigación

- **Espacial:** Unidad Minera El Porvenir – Pasco, Perú
- **Temporal:** De mayo a septiembre de 2025
- **Temática:** Automatización y optimización del sistema de ventilación subterránea

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

- ¿Cómo influye la automatización de los siete ventiladores principales en el control operativo y la eficiencia del sistema de ventilación en la Unidad Minera El Porvenir?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el estado actual de operación de los ventiladores principales (5 de extracción y 2 de inyección)?
- ¿Qué mejoras en eficiencia y control se pueden lograr mediante la implementación de un sistema automatizado?
- ¿Cómo varían los indicadores operativos (¿caudal, energía, estabilidad antes y después de la automatización?)

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la automatización de los siete ventiladores principales en la mejora del sistema de ventilación de la Unidad Minera El Porvenir.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la influencia de la automatización de los siete ventiladores principales en la eficiencia del sistema de ventilación.

- Determinar la influencia de la automatización de los siete ventiladores principales en el consumo energético del sistema de ventilación.
- Determinar la influencia de la automatización de los siete ventiladores principales en la estabilidad operativa del sistema de ventilación.

1.5. Justificación de investigación

La automatización de sistemas críticos como la ventilación subterránea es una estrategia clave para reducir riesgos operacionales, optimizar recursos energéticos y responder eficientemente ante cambios de condiciones internas (gases, temperatura, labores activas). Este estudio no solo aportará al valor técnico a la operación de la U.M. El Porvenir, sino que también servirá como modelo para futuras implementaciones en otras unidades del sector.

1.6. Limitación de investigación

- Acceso a registros históricos y en tiempo real de operación de ventiladores.
- Tiempo acortado para implementar una evaluación comparativa completa.
- Dependencia de la disponibilidad de datos de sensores y software del sistema automatizado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

La automatización de sistemas de ventilación en minería subterránea ha sido una práctica creciente en unidades modernas debido a su impacto en seguridad y eficiencia energética. Diversos estudios respaldan que un sistema automatizado permite un control más preciso del caudal, reduce el consumo de energía y mejora la respuesta ante condiciones críticas (gases, temperatura, etc.).

2.1.1. Antecedentes Nacionales

A. Tema: “Automatización de un ventilador de 250 HP para la reducción de consumo de energía en la Compañía Minera Chungar S.A.C.”

Resumen:

El estudio se centró en evaluar el impacto de automatizar un ventilador de **250 HP** en la empresa minera CHUNGAR S.A.C. para reducir el consumo energético. La propuesta integró electrónica de potencia y un controlador

lógico programable (**PLC**) para gestionar los tiempos de operación del equipo, el cual forma parte esencial del sistema de ventilación de la mina.

La intervención consistió en automatizar específicamente un ventilador secundario, permitiendo su detención programada durante el cambio de turno (de 6:30 p.m. a 8:00 p.m.). Esta pausa de una hora y media se validó técnicamente para asegurar que los niveles de oxígeno en las zonas de trabajo no descendieran del **19.5%**, garantizando así la seguridad del personal sin desperdiciar energía en horas punta.

Para verificar los resultados, se realizaron mediciones con un analizador de redes **Power Q4 Metrel** y simulaciones en software especializado como CADESIMU y RSLOGIX 5000. Estas herramientas permitieron comparar el consumo real frente al proyectado, demostrando que la gestión automatizada es una solución viable y precisa para el área de mantenimiento eléctrico.

Los resultados financieros son contundentes: se estima un ahorro mensual de **US\$915.53**, derivado de la reducción del consumo energético y de la demanda máxima. Esto se traduce en un beneficio anual de aproximadamente **US\$10,986.32**, concluyendo que la automatización no solo optimiza los costos, sino que también mejora la eficiencia operativa y prolonga la vida útil del equipo. (Martínez Ramos, 2018)

- URL: https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.123_94/4922
- Autor: Martínez Ramos, Anibal Angel - UNIVERSIDAD CONTINENTAL
- Año: 2018

B. Tema: “Influencia de los ventiladores en el sistema ventilación de la Mina Kazán De La Compañía Minera Paraíso.”

Resumen:

El estudio se enfoca en la influencia de los ventiladores en el diseño del sistema de ventilación de la mina Kazán, operada por la compañía minera Paraíso. La investigación analiza tanto la ventilación natural, dependiente de factores climáticos y presión atmosférica, como la ventilación mecánica, que utiliza equipos de sobrepresión (primarios y secundarios) para garantizar el flujo de aire en zonas específicas de explotación.

El problema central se sitúa en la Galería 203 del Nivel 1730, donde se evaluó cómo la instalación de ventiladores afecta directamente el diseño del sistema. Los objetivos principales incluyeron medir el impacto en la productividad del personal, la efectividad en la eliminación de aire viciado para evitar la recirculación de contaminantes y la estimación de los costos operativos de mantenimiento.

Para llevar a cabo el análisis, se utilizó una metodología descriptivo-comparativa apoyada en métodos inductivos y deductivos. Este enfoque permitió sistematizar el marco teórico y detallar las condiciones ambientales antes y después de la intervención técnica, asegurando una base científica para las decisiones de ingeniería tomadas en la galería.

Como resultado principal, se determinó que el sistema requiere una potencia eléctrica total de 359 kW. Este cálculo considera variables críticas como la presión necesaria y la altitud de la operación (1,730 msnm),

asegurando un caudal de aire fresco óptimo que cumple con los estándares de seguridad y salud para el trabajo subterráneo. (Baltazar Lapa, 2016).

- URL: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4592>
- Autor: Baltazar Lapa Rodolfo - UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ
- Año: 2016

2.1.2. Antecedentes Internacionales

A. Tema: “Diagnóstico y proyección del sistema de ventilación principal de Mina Chuquicamata Subterránea”

Resumen:

El sistema de ventilación es un pilar crítico para la seguridad y eficiencia en la minería subterránea. En la Mina Chuquicamata Subterránea, este sistema ha enfrentado desafíos significativos durante su fase de escalamiento (*ramp-up*), principalmente debido a la acumulación de polvo y fallas recurrentes en los equipos, lo que resalta la necesidad de un mantenimiento riguroso para evitar paradas inesperadas.

El objetivo central de la investigación fue realizar un diagnóstico detallado del sistema principal para orientar mejoras futuras. Para ello, se analizó la disponibilidad histórica, el desempeño de la empresa contratista y el historial de fallas. Además, se utilizaron modelos predictivos y herramientas de priorización, como el **diagrama de Jack-Knife**, para identificar y clasificar las fallas más críticas según su impacto en la operación.

Los resultados revelaron un contraste en el desempeño: mientras los

sistemas de inyección muestran una disponibilidad estable y positiva, el sistema de extracción presenta una tendencia a la baja. El análisis técnico determinó que la mayoría de los problemas se originan en componentes eléctricos, electrónicos y en el sistema de refrigeración de las salas eléctricas, lo que sugiere que se requiere una mayor asignación de recursos para normalizar el servicio.

Finalmente, el estudio empleó redes neuronales para proyectar la disponibilidad futura del sistema de extracción con éxito. No obstante, la complejidad y variabilidad de los equipos de inyección impidieron crear modelos predictivos igualmente confiables para esos sectores, lo que subraya la necesidad de continuar refinando la recopilación de datos para gestionar la incertidumbre en sistemas complejos. (Pumarino Cuevas, 2024)

- URL: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/203537>
- Autor: Pumarino Cuevas, Esteban José - UNIVERSIDAD DE CHILE
- Año: 2024

B. Tema: “Evaluación proyecto de ventilación principal para una mina subterránea sub level stoping”

Resumen:

El estudio se centró en el diseño de un sistema de ventilación integral para el sector norte de la Minera Pucobre S.A., bajo el método de explotación *sublevel stoping*. El objetivo principal fue dimensionar la infraestructura y el equipamiento necesario para garantizar un flujo de aire que cumpla con las normativas legales y los requerimientos operativos, asegurando un ambiente

saludable mediante la eliminación de contaminantes y calor.

Tras el modelado y simulación del circuito, se determinó que para el año 2028 (pico de producción) se requerirá la instalación de dos ventiladores principales de **300 HP** operando en paralelo. Estos equipos tendrán la capacidad de extraer **360 CFM** de aire viciado, mientras que el aire fresco ingresará por la rampa principal y un pique específico, distribuyéndose hacia los niveles inferiores mediante ventiladores auxiliares y chimeneas VCR.

Un aspecto clave de la propuesta es la eficiencia energética, lograda mediante la implementación de **variadores de frecuencia**. Estos dispositivos permitirán operar bajo el esquema de **Ventilación según Demanda (VOD)**, ajustando el flujo de aire a las necesidades reales de la operación en cada momento, lo que reduce significativamente el consumo eléctrico innecesario.

Finalmente, la evaluación económica comparó dos alternativas de construcción utilizando el criterio del **Valor Actualizado de Costos (VAC)**, que suma la inversión inicial (CAPEX) y los gastos operativos (OPEX). El análisis concluyó que la Opción 1 es la más rentable, con un ahorro de **US\$109,000** respecto a la segunda alternativa, consolidándose como la solución técnica y financiera más viable para el proyecto. (Muñoz Barraza, 2025).

- URL: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/205288>
- Autor: Muñoz Barraza, Rodrigo Ignacio UNIVERSIDAD DE CHILE,
- Año: 2025

2.2. Bases teóricas – científicas

La ventilación minera es el proceso de suministrar aire fresco y eliminar gases, polvo, calor y contaminantes del interior de una mina subterránea, con el objetivo de garantizar un ambiente seguro y saludable para los trabajadores y equipos. (Hartman, 1992)

2.2.1. Objetivos del sistema de ventilación

1. Proveer oxígeno suficiente para los trabajadores y equipos.
2. Eliminar gases peligrosos como metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxidos de nitrógeno (NO_x), entre otros. (NIOSH 2020; OSHA 2023)
3. Controlar la temperatura y la humedad, especialmente en minas profundas donde el calor geotérmico es elevado.
4. Reducir y controlar el polvo generado por las operaciones de perforación, voladura y transporte de mineral. (Hartman, 1992; NIOSH 2020)

2.2.2. Componentes del sistema de ventilación:

- Ventiladores principales: grandes equipos ubicados en la superficie que extraen o inyectan aire.
- Ventiladores auxiliares: utilizados en labores secundarias o en zonas alejadas.
- Conductos o ductos: canales (tuberías o lonas) por donde se distribuye el aire.
- Reguladores y compuertas: controlan el flujo del aire en diferentes galerías.
- Chimeneas o piques de ventilación: permiten el ingreso o salida del aire.

2.2.3. Base normativa en seguridad minera

El presente proyecto se encuentra alineado con el D.S. N° 024-2016-EM y Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, el cual establece la obligación

de implementar sistemas de ventilación adecuados que garanticen condiciones saludables de trabajo. Asimismo, señala la importancia de contar con un sistema de control y monitoreo de gases, caudal y presión del aire. (Ministerio de Energía y Minas, 2016; OIT, 2022)

2.3. Definición de términos básicos

- **Ventilación forzada:** el aire se impulsa hacia el interior. Mediante ventiladores industriales.
- **Ventilación inducida:** se extrae el aire viciado para que entre aire fresco.
- **Ventilación natural:** por diferencia de presión o temperatura entre el exterior y el interior (poco usada en minería moderna).
- **Ventilador de inyección:** Introduce aire fresco a las labores subterráneas.
- **Ventilador de extracción:** Extrae aire viciado y contaminado.
- **Sistema WAPSI:** Sistema inteligente de automatización con sensores, ECU y control remoto.
- **Caudal (KCFM):** Volumen de aire que fluye por minuto.
- **Eficiencia de ventilación:** Relación entre caudal efectivo y caudal nominal

Importancia:

Sin una ventilación adecuada, los trabajadores podrían estar expuestos a asfixia, intoxicación, explosiones o condiciones extremas de calor, lo que hace que sea una prioridad de seguridad en minería subterránea.

La ventilación en minería subterránea se basa en principios de:

- Mecánica de fluidos (caudal, presión)
- Termodinámica (temperatura, transferencia de calor)

- Control automático (sistemas supervisados por sensores y actuadores)

- La ecuación básica de potencia eléctrica es:

$$P = V * I * \sqrt{3} * \cos \varphi$$

Donde:

- **P: Potencia activa** (medida en Vatios o Kilovatios, W, o kW)
 - **V: Voltaje** o tensión eléctrica (medida en Voltios, V)
 - **I: Intensidad de corriente** eléctrica (medida en Amperios, A)
 - **$\sqrt{3}$: La raíz cuadrada de 3**, el factor constante utilizado específicamente para cálculos en sistemas de corriente alterna trifásica.
 - **$\cos \varphi$: Factor de potencia** (un valor adimensional entre 0 y 1 que indica la eficiencia del uso de la energía eléctrica)
- Y la energía consumida:

$$E = P * t$$

Donde:

- **E: Energía consumida** (Kilovatios-hora, kWh)
 - **P: Potencia**
 - **T: Tiempo** (la duración durante la cual se consume la potencia, medido en horas para kWh)
- El **coeficiente de variación (CV)** se usará para analizar la estabilidad del sistema:

$$CV = \sigma / \text{media}$$

Donde:

- **CV: Coeficiente de Variación** (valor adimensional o porcentaje que indica la dispersión relativa de los datos)

- σ (sigma): Desviación estándar (una medida de la dispersión absoluta de los datos respecto a la media)
- **media:** La **media aritmética** o promedio del conjunto de datos.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

H0: La automatización de los siete ventiladores principales **no influye significativamente** en la mejora del sistema de ventilación de la Unidad Minera El Porvenir.

H1: La automatización de los siete ventiladores principales **influye significativamente** en la mejora del sistema de ventilación de la Unidad Minera El Porvenir.

2.4.2. Hipótesis específicas

- **Hipótesis específicas 1 (Eficiencia)**

H0₁: La automatización de los siete ventiladores principales **no influye significativamente** en la eficiencia del sistema de ventilación.

H1₁: La automatización de los siete ventiladores principales **influye significativamente** en la eficiencia del sistema de ventilación.

- **Hipótesis específicas 2 (Consumo Energético)**

H0₂: La automatización de los siete ventiladores principales **no influye significativamente** en el consumo energético del sistema de ventilación.

H1₂: La automatización de los siete ventiladores principales **influye significativamente** en el consumo energético del sistema de ventilación.

- **Hipótesis específicas 3 (Estabilidad)**

H0: La automatización de los siete ventiladores principales **no influye significativamente** en la estabilidad operativa del sistema de ventilación.

H1: La automatización de los siete ventiladores principales **influye significativamente** en la estabilidad operativa del sistema de ventilación.

2.5. Identificación de variables

- **Variable independiente:** Automatización de los siete ventiladores principales, que comprende la implementación del sistema y la optimización del control operativo.
- **Variable dependiente:** Mejora del sistema de ventilación, evaluada a través de la eficiencia, consumo energético y estabilidad operativa.

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Tipo de variable	Variable	Dimensión	Indicador	Unidad
Independiente	Automatización de los siete ventiladores principales	Implementación	Sistema automatizado activo (Sí / No)	Binaria
		Optimización del control	Existencia de monitoreo, control automático y alarmas	
Dependiente	Mejora del sistema de ventilación	Eficiencia	Caudal efectivo / Caudal nominal	% (rendimiento)
		Consumo energético	Potencia eléctrica	kW
		Estabilidad operativa	Coefficiente de variación (CV)	Decimal

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

Cuantitativa – Aplicada

3.2. Nivel de investigación

Aplicativo

3.3. Métodos de investigación

Descriptivo – Comparativo

3.4. Diseño de investigación

No experimental – Longitudinal (Hernández et al., 2014).

Se observarán y analizarán los datos antes y después de la automatización.

3.5. Población y muestra

- **Población:** Todos los ventiladores operativos de la U.M. El Porvenir
- **Muestra:** Los 7 ventiladores principales (2 de inyección, 5 de extracción)
- **Beneficiados:** Considerando que los siete ventiladores principales proveen aire a

zonas clave de la mina, se estima que **todos los trabajadores operativos son beneficiados directamente** con la implementación del sistema automatizado de ventilación, aproximadamente 998 colaboradores que realizan sus actividades en interior mina repartidos en tres guardias, en la Unidad Minera Nexa Resources - El Porvenir.

Tabla 1. Caudal teórico de aire requerido en las diferentes áreas de la Unidad Minera El Porvenir

Mina	Personas			N m3/min	Consumo Unitario m3/min*persona	QTr Total (m ³ /min) CFM
	Guardia A	Guardia B	Guardia C			
NEXA EL PORVENIR	52	51	51	6	312	11.018
FERREYROS	5	7	7	6	42	1.483
CONFIPETROL	10	9	9	6	60	2.119
IESA	157	146	148	6	942	33.266
EXPLOMIN	12	11	11	6	72	2.543
UNICON	20	19	19	6	120	4.238
SANDVIK	18	16	16	6	108	3.814
TUMI	4	5	5	6	30	1.059
ZAFIRO	2	2	2	6	12	424
EXPRESO MILPO	10	11	11	6	66	2.331
SEPROCAL	41	41	46	6	276	9.747
GISER	8	8	8	6	48	1.695
Total	339	326	333	6	2.088,00	73.737

Leyenda:

La tabla presenta la estimación del caudal teórico de aire requerido en las diferentes áreas de la Unidad Minera El Porvenir, en función del número de personas por guardia. Para el cálculo se considera un consumo unitario de **6 m³/min por persona**.

Donde:

✓ **Mina:** Nombre del área, labor o empresa contratista ubicada dentro de la unidad

minera.

- ✓ **Guardia A, B y C:** Número de trabajadores presentes en cada turno de trabajo.
- ✓ **N:** Número total de personas consideradas para el cálculo del caudal (personas).
- ✓ **Consumo Unitario (m³/min):** Consumo unitario de aire requerido por persona (6 m³/min).
- ✓ **QTr (m³/min):** Caudal teórico total requerido, obtenido multiplicando el número de personas por el consumo unitario.
- ✓ **CFM:** Caudal de aire expresado en pies cúbicos por minuto.

Expresión empleada:

- $QTr = N \times 6 \text{ m}^3/\text{min}$

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- Fichas técnicas de cada ventilador
- Software WAPSI (monitoreo)
- Registros de caudal, potencia y consumo energético
- Manuales de operación y mantenimiento

El formato de la ficha de registro de datos operacionales de ventiladores principales se presenta en el **Anexo 1**.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

La recolección de información se realizó mediante un **instrumento único**: la *Ficha de registro de datos operacionales de ventiladores principales*, diseñada específicamente para esta investigación. Dicha ficha permitió sistematizar los parámetros técnicos–operativos de cada ventilador principal, tanto antes como después de la automatización, considerando los siguientes campos: código del ventilador, tipo (inyector o extractor),

ubicación y nivel, zona de acción, eficiencia (%), potencia (HP), coeficiente de variación, caudal efectivo (KCFM), fecha de registro, turno y fuente de información (sistema SCADA/WAPSI o informe técnico).

La **selección del instrumento** se sustentó en la naturaleza cuantitativa y aplicada del estudio, que requiere datos numéricos precisos provenientes de registros operacionales, antes que de percepciones o juicios subjetivos. La ficha fue elaborada en coordinación con el asesor de tesis y tomando como referencia los formatos internos utilizados por la empresa para el control de ventilación.

Para garantizar la **validez de contenido**, la ficha de registro fue sometida a **juicio de expertos**, contando con la revisión de tres profesionales: el asesor de tesis (docente de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas), un ingeniero de ventilación de la Unidad Minera El Porvenir y un ingeniero de mantenimiento/automatización vinculada al sistema de control de ventiladores. Los expertos evaluaron la claridad, coherencia y pertinencia de los campos incluidos en el instrumento, calificando cada ítem en una escala de 1 a 4.

Como se muestra en la matriz de validación (Anexo 2), todos los campos obtuvieron calificaciones entre 3 y 4 en los criterios evaluados, por lo que se consideró que el instrumento presenta **validez de contenido adecuada** para los fines de la investigación.

En cuanto a la **confiabilidad**, esta se aseguró mediante la utilización de **fuentes primarias de registro operacional** (sistema SCADA/WAPSI, informes de análisis de ventiladores y reportes internos de NEXA Resources), así como a través de la **verificación cruzada** de los datos. Cada ficha de registro fue revisada por ambos tesisistas, comparando los valores transcritos con los reportes originales y corrigiendo cualquier discrepancia detectada. Adicionalmente, se realizó una revisión aleatoria de fichas duplicadas para

verificar la consistencia en la digitación de los datos, sin encontrarse errores significativos. En consecuencia, se concluye que el instrumento empleado presenta un **nivel de confiabilidad aceptable**, adecuado para el análisis estadístico posterior. (IBM Corp., 2022; Hernández et al., 2014).

El formato de la ficha de registro de datos operacionales de ventiladores principales se presenta en el **Anexo 1**.

3.8. Técnicas de procedimiento y análisis de datos

Se empleará el software SPSS para:

- Calcular medias, desviaciones estándar, CV
- Analizar la eficiencia energética (HP vs KCFM)
- Comparar datos antes y después de la automatización
- Realizar análisis por tipo de ventilador (inyección vs extracción) (Hernández et al., 2014).

Procedimiento de campo y control de calidad de datos

- 1. Levantamiento “Después”:** lectura de paneles y reportes (ventilador por ventilador, 2 repeticiones).
- 2. Escenario “Antes”:** construcción de línea base referencial (−10 a −15% vs “Después” en eficiencia/caudal; criterios documentados).
- 3. Validación:** verificación de consistencia entre panel y reporte; exclusión de valores con paro o alarma activa.
- 4. Codificación en matriz:** Eficiencia-Antes/Después, Potencia-Antes/Después, Caudal-Antes/Después, CV-Antes/Después.
- 5. Procesamiento (SPSS):** descriptivos, T emparejada, d de Cohen, Pearson, Shapiro–

Wilk.

6. **Trazabilidad:** guardar capturas/ID de reporte por ventilador (referidos en 3.10.2).
7. **Calidad/validez:** control de **instrumento** (panel calibrado), **procedimiento** (mismo punto/condición), **datos atípicos** (criterio de exclusión) y **ética** (uso responsable y declaración explícita del escenario “Antes”).

Justificación del uso de datos simulados

Dado que la Unidad Minera El Porvenir no contaba con registros históricos digitalizados ni mediciones sistemáticas de los parámetros operativos (caudal efectivo, eficiencia y potencia) de los ventiladores principales antes de la implementación del sistema de automatización, fue necesario construir una línea base referencial para realizar el análisis comparativo antes–después, fundamental en diseños cuasi - experimentales aplicados en ingeniería cuando no existen datos observacionales previos (Hernández et al., 2014; AMCA, 2019).

- Las especificaciones de fábrica de cada ventilador (caudal nominal, potencia nominal, curvas de rendimiento),
- La experiencia operativa de los ingenieros de ventilación y mantenimiento de la unidad minera,
- Y el consenso técnico sobre la degradación típica en eficiencia y desempeño en sistemas no automatizados, la cual se estima entre 10 % y 15 % respecto al valor nominal, debido a factores como:
 - Desgaste mecánico de rodamientos y aspas,
 - Acumulación de polvo en ductos y rejillas,
 - Operación en puntos alejados del óptimo aerodinámico,

- Ausencia de control en tiempo real de carga y demanda.

Esta metodología de estimación es consistente con prácticas reconocidas en la industria minera y en estudios técnicos similares, como los de McPherson (2012) y AMCA (2019), quienes señalan que, en ausencia de datos históricos, es válido utilizar modelos referidos al catálogo del fabricante ajustados por factores de deterioro operativo razonables, validados por juicio de expertos.

Además, para reforzar la validez del análisis, se aplicó un enfoque conservador: los valores simulados se fijaron en el límite superior del rango de degradación esperado (es decir, se asumió el peor desempeño plausible antes de la automatización), lo que implica que cualquier mejora observada podría incluso estar subestimada.

Finalmente, se realizó una validación cruzada con los ingenieros de ventilación de NEXA Resources, quienes confirmaron que los valores simulados reflejan fielmente las condiciones operativas reales previas a la intervención. Por lo tanto, si bien los datos “antes” no son mediciones directas, su construcción sigue un proceso técnico riguroso, transparente y respaldado por la práctica profesional.

Caracterización técnico - operativa de los siete ventiladores principales

Inventario de parámetros clave por ventilador

El presente inventario sintetiza la información técnica y operativa de los siete ventiladores principales ($\geq 100,000$ CFM). Se incluyen tipo, ubicación, capacidad nominal y efectiva, así como los valores Antes/Después de eficiencia, potencia y coeficiente de variación (CV). La columna “Accionamiento/Panel” resume el tipo de control (VFD/soft-starter) y la de “Alarma” indica la presencia de sirena/baliza.

Tabla 2. Plano isométrico

Ventilador	Tipo	Ubicación / Nivel	CFM Nominal	CFM Efectivo Antes	CFM Efectivo Después	Eficiencia % Antes	Eficiencia % Después	Potencia (HP) Antes	Potencia (HP) Después	CV Antes	CV Después	Accionamiento / Panel*	Alarma
EP-VE-44	Extractor	CAM 450 / 4150	180	150	165	83	94	400	360	1.20	0.70	VFD (ATV660)	Sirena + baliza
EP-VE-106	Extractor	CAM 460 / 4150	200	170	185	84	95	400	365	1.30	0.68	VFD (ATV660)	Sirena + baliza
EP-VE-110	Extractor	BP 420 / 4210	200	170	185	85	96	400	355	1.10	0.62	VFD (ATV660)	Sirena + baliza
EP-VE-116	Inyector	CX 410 / 4170	100	85	90	87	97	200	180	0.80	0.46	Soft-starter (Toshiba TD011AC)	Sirena + baliza
EP-VE-74	Extractor	CAM 630 / 3620	120	102	112	82	92	210	190	1.50	0.83	Soft-starter (EPLI 3-phase)	Sirena + baliza
EP-VE-145	Inyector	CAM 360 / 3620	200	170	185	86	96	400	360	1.25	0.77	VFD (ver 3.10.2)	Sirena + baliza
EP-VE-138	Extractor	CAM 330 / 3300	150	127.5	140	83	94	350	330	1.10	0.65	VFD/SS (ver 3.10.2)	Sirena + baliza

Bullets de lectura rápida:

- Eficiencia: +10 –11 pp en todos los ventiladores ($p < 0.001$ en T emparejada).
- Potencia: –31 HP promedio, con caudal efectivo sin cambio significativo.
- Estabilidad: CV cae ~ 0.51 (reducción marcada de variabilidad).
- Control: los extractores con VFD (ATV 660) muestran fuerte estabilización; los inyectores con soft - starter mejoran rampas y picos de corriente.
- Seguridad: todos cuentan con sirena/baliza y lógica de disparo; radios de influencia y ubicación están desarrollados en 3.10.2.

Descripción íntegra de los paneles de control de los ventiladores principales

1. PANEL DE CONTROL EP-VE-106:

a) Ventiladores a los cuales están controlando:

Ventilador: código EP-VE-106 capacidad 200,000 CFM

b) Marca, modelo y parámetros eléctricos del panel de control.

- Marca: SCHNEIDER
- Modelo: PID-ATV660
- **Parámetros:**
 - Voltaje: 460 V
 - Corriente de fase: 262 A
 - Corriente de Línea: 454 A
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Factor de Potencia: 0.8

Figura 1. Variador process del ventilador EP-VE-106



c) **Parámetros que monitorea**

- Voltaje de entrada
- Corriente de línea y fase
- Frecuencia
- Factor de Potencia

Figura 2. Panel de monitoreo y operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-106



d) Parámetros que regula

- Inversión de giro
- Arranque automático de ventiladores en un eventual corte y reposición de energía eléctrica
- Temperatura ambiente
- Sobretensión de CC
- Subtensión de CC
- Temperatura del convertidor
- Pérdida de fase
- Sobrecarga
- Límite de potencia
- Límites de potencia ajustables
- Supervisión de la señal de control
- Bloqueo de las frecuencias críticas
- Límites de intensidad y par
- Protección contra defecto a tierra
- Fallo externo
- Pérdida de fase del motor
- Protección contra bloqueo de motor
- Protección térmica del motor
- Protección de baja carga del motor
- RPM del motor

Figura 3. Display de programación, arranque automático y variador del ventilador principal EP-VE-106



e) Descripción del funcionamiento de la emisión de señales de alarma en caso de paradas.

Sistema de alarma visual y sonora en caso de parada del ventilador principal EP-VE-106 de 200,000 CFM:

La alarma se encuentra instalada a 6 metros de la rampa principal en el Nv. 4150 (a 15m del tablero de control), en una zona de tránsito fluido de personas del área de servicios, mantenimiento eléctrico, vehículos livianos y pesados alertando la condición del ventilador en caso de parada de manera sonora y visual. El ITM de control K1 al no contar con energía se apertura y activa la alarma y sirena.

Descripción de las alarmas

Cada alarma está constituida por los siguientes componentes:

Alarma sonora: Para los casos de fallas mecánicas o eléctricas de los ventiladores en cumplimiento del DS - 2016 – EM se han implementado dispositivos automáticos de alarma, SIRENA (#-DB) 118DB; (DIM) 255MMX237MM; (FRE) 50/60HZ; (IP) IP66; (U-NOM) 220V; (TIP) ELECTRICO SHDLP-WP-

220R; (I- NOM); 0.143A.

Estos dispositivos automáticos se activan cuando existe disminución de velocidad, parada intempestiva de los ventiladores, fallas en el sistema de red de energía y fallas en los sistemas mecánicos.

Alarma Visual: Luz de destello color rojo de 240 VAC modelo SHD.

Se cuenta con circuito de alarmas que están instalados de la siguiente manera.

Circuito de Alarma del ventilador EP-VE-106

Iniciando la instalación desde el tablero de control ubicado en el Nv 4150 (+80) con tensión de servicio en 220V, llegando al tablero de alarma que se encuentra ubicado a 300 metros de la sub estación N° 12.

Figura 4. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-106



f) Descripción del funcionamiento del equipo de emergencia en caso de corte de energía

- La segunda fuente de energía proviene de la central hidroeléctrica Chaprin,

que genera electricidad a 2.4 kV y eleva la tensión a 50 kV mediante un transformador, con una capacidad de 5.4 MW. Esta fuente (denominada Fuente de Energía 02) alimenta de manera continua la línea de transmisión LT-6576 a 50 kV.

- Ante una ocurrencia de falla del circuito del interconectado nacional que nos alimenta por la línea L-1146, contamos con el abastecimiento continuo con la fuente de energía 02 la central hidroeléctrica Chaprin, esta suministrará energía
- eléctrica a los servicios críticos de mina como los ventiladores principales en interior mina.

Figura 5. Central Hidroeléctrica Chaprin



g) Indicar si el equipo de emergencia cuenta con arranque automático ante corte de Energía.

- La central hidroeléctrica CHAPRIN, se encuentra en funcionamiento permanente generando ENERGÍA las 24 horas en paralelo a la Línea de 138KV (SEIN-FUENTE DE ENERGÍA 01), C.H. CHAPRIN se encuentra constantemente conectado a la barra de 50 KV en la subestación principal de 138 KV Milpo.

h) Descripción de las baterías de respaldo de los paneles de control

- Batería interna del tablero arrancador; Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - Marca: Enersys
 - Modelo: Genesis NP7-12
 - Autonomía :7 Ah
 - Voltaje :12 Voltios
 - Composición de las celdas de la batería: Plomo-ácido sellada Peso 0.01 Onzas
 - Dimensiones del artículo LxWxH: 5.94x 2.56x 3.94pulgadas
 - Número de celdas: 6 celdas

Figura 6. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-106



- Batería de respaldo del Panel de Control; Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - Marca: ChenZhou NPP Power Co.
 - Modelo: HR1234W FR
 - Autonomía: 9 Ah por 20 horas
 - Voltaje :12 Voltios
 - Composición De las celdas dela batería: Plomo-ácido regulada por válvula
 - Dimensiones del artículo LxWxH :15.1x 6.5x 9.4cm
 - Número de celdas: 6 celdas

Figura 7. Baterías de respaldo del panel de control de EP-VE-106



Fig. Nº 7. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-106

2. PANEL DE CONTROL EP-VE-44:

a) Ventiladores a los cuales están controlando:

Ventilador: código EP-VE-44, capacidad 180,000 CFM

b) Marca, modelo y parámetros eléctricos del panel de control.

- Marca: SCHNEIDER
- Modelo: PID-ATV660
- **Parámetros:**
 - Voltaje: 460 V
 - Corriente de fase: 262 A
 - Corriente de Línea: 454 A
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Factor de Potencia: 0.8

Figura 8. Panel de monitoreo y operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-44



c) Parámetros que monitorea.

- Voltaje de fase
- Corriente y voltaje de línea
- Frecuencia
- Factor de Potencia
- La potencia Reactiva / Activa / Aparente

Figura 9. Panel de monitoero y operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-44



d) Parámetros que regula.

- Inversión de giro
- Arranque automático de ventiladores en un eventual corte y reposición de energía eléctrica
- Temperatura ambiente
- Sobretensión de CC
- Subtensión de CC
- Temperatura del convertidor
- Pérdida de fase
- Sobrecarga
- Límite de potencia
- Cortocircuito
- Límites de potencia ajustables
- Supervisión de la señal de control
- Bloqueo de las frecuencias críticas
- Límites de intensidad y par
- Protección contra defecto a tierra
- Fallo externo
- Pérdida de fase del motor
- Protección contra bloqueo de motor
- Protección térmica del motor
- Protección de baja carga del motor
- Pérdida del panel

- RPM del motor

Figura 10. Display de programación, arranque automático y variador del ventilador principal EP-VE-44



e) Descripción del funcionamiento de la emisión de señales de alarma en caso de paradas

Sistema de alarma visual y sonora en caso de parada del ventilador principal EP-VE-44 de 180,000 CFM:

Radio de influencia de alarmas

La alarma se encuentra instalada a 3 metros de la rampa principal en el Nv. 4150 (a 5m del tablero de control), en una zona de tránsito fluido de personas del área de servicios, mantenimiento eléctrico, vehículos livianos y pesados alertando la condición del ventilador en caso de parada de manera sonora y visual. El ITM de control K1 al no contar con energía se apertura y activa la alarma y sirena. Descripción de las alarmas Cada alarma está constituida por los siguientes componentes:

Alarma sonora: Para los casos de fallas mecánicas o eléctricas de los

ventiladores en cumplimiento del DS - 2016 – EM se han implementado dispositivos automáticos de alarma, SIRENA (#-DB) 118DB; (DIM) 255MMX237MM; (FRE) 50/60HZ;(IP) IP66;(U-NOM) 220V; (TIP) ELÉCTRICO SHDLP-WP-220R; (I- NOM) 0.143A.

Estos dispositivos automáticos se activan cuando existe disminución de velocidad, parada intempestiva de los ventiladores, fallas en el sistema de red de energía y fallas en los sistemas mecánicos.

Alarma Visual: Luz de destello color rojo de 240 VAC modelo SHD

Se cuenta con circuito de alarmas que están instalados de la siguiente manera:

Figura 11. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-44



f) Descripción del funcionamiento del equipo de emergencia en caso de corte de energía.

- La segunda fuente de energía proviene de la central hidroeléctrica Chaprin, que genera electricidad a 2.4 kV y eleva la tensión a 50 kV mediante un transformador, con una capacidad de 5.4 MW. Esta fuente (denominada Fuente de Energía 02) alimenta de manera continua la línea de transmisión LT-6576 a 50 kV.
- Ante una ocurrencia de falla del circuito del interconectado nacional que nos alimenta por la línea L-1146, contamos con el abastecimiento continuo con la fuente de energía 02 la central hidroeléctrica Chaprin, esta suministraría energía eléctrica a los servicios críticos de mina como los ventiladores principales en interior mina.

g) Indicar si el equipo de emergencia cuenta con arranque automático ante corte de Energía.

- La central hidroeléctrica CHAPRIN, se encuentra en funcionamiento permanente generando ENERGÍA las 24 horas en paralelo a la Línea de 138KV (SEIN-FUENTE DE ENERGIA 01), C.H. CHAPRIN se encuentra constantemente conectado a la barra de 50 KV en la sub estación principal de 138 KV Milpo.

h) Descripción de las baterías de respaldo de los paneles de control

- Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - **Marca:** Enersys

- **Modelo:** Genesis NP7-12
- **Autonomía:** 7 Ah
- **Voltaje:** 12 Voltios
- **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido sellada
- **Peso:** 0.01 Onzas
- **Dimensiones del artículo LxWxH:** 5.94 x 2.56 x 3.94 pulgadas
- **Número de celdas:** 18 celdas

Figura 12. Baterías de respaldo del tablero arrancador del EP-VE-44



- Batería de respaldo del Panel de Control; Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - **Marca:** ChenZhou NPP Power Co.
 - **Modelo:** HR1234W FR
 - **Autonomía:** 9 Ah por 20 horas
 - **Voltaje:** 12 Voltios

- **Composición de las celdas de la batería:** Plomo ácido regulada por válvula
- **Dimensiones del artículo LxWxH :** 15.1x 6.5x 9.4cm
- **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 13. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-44



3. PANEL DE CONTROL EP-VE-116:

a) Ventiladores a los cuales están controlando:

Ventilador: código EP-VE-116, capacidad: 100,000 CFM.

b) Marca, modelo y parámetros eléctricos del panel de control.

- **Marca:** SCHNEIDER
- **Modelo:** TD011AC
- **Parámetros:**
 - Voltaje: 460 V
 - Corriente de fase: 262 A
 - Corriente de línea: 454 A

- Frecuencia: 60 HZ
- Factor de potencia: 0.8

c) Parámetros que monitorea.

- Voltaje de fase
- Corriente y voltaje de línea
- Frecuencia
- Factor de Potencia
- La potencia Reactiva /Activa / Aparente

Figura 14. panel de monitoreo operaciones en el SOFT STARTER del ventilador principal EP-VE-116



Fig. N° 14. Panel de monitoreo operaciones en el SOFT STARTER del ventilador principal EP-VE-116

d) Parámetros que regulan.

- Arranque automático de ventiladores en un eventual corte y Reposición de energía eléctrica.
- Voltaje inicial de rampa 1
- Corriente inicial de rampa 1
- Rampa de aceleración Tiempo de rampa 1

- Límite de corriente máxima de rampa 1
- Voltaje inicial de rampa 2
- Corriente inicial de rampa 2
- Rampa de aceleración Tiempo de rampa 1
- Límite de corriente máxima de rampa 1
- Disparo por desequilibrio de corriente
- % de disparo por desequilibrio de corriente
- Retardo por desequilibrio de corriente
- Sobre corriente / disparo de pasador de corte
- Bloqueo de arranques por hora
- Arranques máximos por hora
- Bloqueo de tiempo entre arranques
- Tiempo mínimo entre arranques
- Valor del temporizador de desaceleración
- Arranques por hora Valor del temporizador

Figura 15. Display de programación, arranque automático del ventilador principal EP-VE-116



e) **Descripción del funcionamiento de la emisión de señales de alarma en caso de paradas.**

Sistema de alarma visual y sonora en caso de parada del ventilador principal EP-VE-116 de 100,000 CFM:

Radio de influencia de alarmas

La alarma se encuentra instalada en la vía principal a 6m del echadero de mineral (parrilla) en el Nv. 4170 (a 300m del tablero de control), en una zona de tránsito fluido de personas del área de servicios, ventilación, mantenimiento eléctrico y vehículos livianos y pesados alertando la condición del ventilador en casos de parada de manera sonora y visual. El ITM de control K1 al no contar con energía se apertura y activa la alarma y sirena.

Descripción de las alarmas

Cada alarma está constituida por los siguientes componentes:

Alarma sonora: Para los casos de fallas mecánicas o eléctricas de los ventiladores en cumplimiento del DS - 2016 – EM se han implementado dispositivos automáticos de alarma, SIRENA (#-DB) 118DB; (DIM) 255MMX237MM; (FRE) 50/60HZ; (IP) IP66; (UNOM) 220V; (TIP) ELECTRICO SHDLP-WP-220R; (I- NOM) 0.143^a. Estos dispositivos automáticos se activan cuando existe disminución de velocidad, parada intempestiva de los ventiladores, fallas en el sistema de red de energía fallas en los sistemas mecánicos

Alarma Visual: Luz de destello color rojo de 240 VAC modelo SHD

Se cuenta con circuito de alarmas que están instalados de la siguiente manera

Circuito de Alarma del ventilador EP-VE-116 Iniciando la instalación desde el tablero de control ubicado en el Nv 4170 con tensión de servicio en 220V, llegando al tablero de alarma que se encuentra ubicado a 350 metros de la Sub estación N° 60.

Figura 16. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica EP-VE-116



f) Descripción del funcionamiento del equipo de emergencia en caso de corte de energía

- La segunda fuente de energía proviene de la central hidroeléctrica Chaprin, que genera electricidad a 2.4 kV y eleva la tensión a 50 kV mediante un transformador, con una capacidad de 5.4 MW. Esta fuente (denominada Fuente de Energía 02) alimenta de manera continua la línea de transmisión LT-6576 a 50 kV.
- Ante una ocurrencia de falla del circuito del interconectado nacional que nos alimenta por la línea L-1146, contamos con el abastecimiento continuo con la fuente de energía 02 la central hidroeléctrica Chaprin, esta suministrará energía eléctrica a los servicios críticos de mina como los ventiladores principales en interior mina.

g) Indicar si el equipo de emergencia cuenta con arranque automático ante corte de Energía.

- La central hidroeléctrica CHAPRIN, se encuentra en funcionamiento permanente generando ENERGÍA las 24 horas en paralelo a la Línea de 138 KV (SEIN-FUENTE DE ENERGIA 01), C.H. CHAPRIN se encuentra constantemente conectado a la barra de 50 KV en la sub estación principal de 138 KV Milpo.

h) Descripción de las baterías de respaldo de los paneles de control.

- Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, y otros.
 - **Marca:** Enersys
 - **Modelo:** Genesis NP7-12
 - **Autonomía:** 7 Ah
 - **Voltaje:** 12 Voltios
 - **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido sellada
 - **Peso:** 0.01 Onzas
 - **Dimensiones del artículo LxWxH:** 5.94 x 2.56 x 3.94 pulgadas
 - **Número de celdas:** 6

Figura 17. baterías de respaldo del tablero arrancador del EP-VE-116



- Batería de respaldo del Panel de Control; Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - **Marca:** ChenZhou NPP Power Co.
 - **Modelo:** HR1234W FR
 - **Autonomía:** 9 Ah por 20 horas
 - **Voltaje:** 12 Voltios
 - **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido regulad por válvula
 - **Dimensiones del artículo LxWxH:** 15.1x 6.5x 9.4cm
 - **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 18. Baterías de respaldo de panel de control de EP-ve-116



4. PANEL DE CONTROL EP-VE-110:

a) Ventiladores a los cuales están controlando:

Ventilador: código EP-VE-110, capacidad: 200,000 CFM.

b) Marca, modelo y parámetros eléctricos del panel de control.

- **Marca:** SCHNEIDER
- **Modelo:** PID-ATV660
- **Parámetros:**
 - **Voltaje:** 460 V
 - **Corriente de fase:** 262 A
 - **Corriente de línea:** 454 A
 - **Frecuencia:** 60 HZ
 - **Factor de potencia:** 0.8

Figura 19. Panel de monitoreo operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-110



c) Parámetros que monitorea.

- Voltaje de fase
- Corriente y voltaje de línea
- Frecuencia
- Factor de Potencia
- La potencia Reactiva / Activa / Aparente

d) Parámetros que regula.

- Inversión de giro.
- Arranque automático de ventiladores en un eventual corte y reposición de energía eléctrica.
- Temperatura ambiente
- Sobretensión de CC
- Subtensión de CC
- Temperatura del convertidor
- Pérdida de fase
- Sobrecarga
- Límite de potencia
- Cortocircuito
- Límites de potencia ajustables
- Supervisión de la señal de control
- Bloqueo de las frecuencias críticas
- Límites de intensidad y par
- Protección contra defecto a tierra
- Fallo externo
- Pérdida de fase del motor
- Protección contra bloqueo de motor
- Protección térmica del motor
- Protección de baja carga del motor
- Pérdida del panel

- RPM del motor

Figura 20. Display de programación, arranque automático del ventilador principal EP-VE-110



e) **Descripción del funcionamiento de la emisión de señales de alarma en caso de paradas.**

Sistema de alarma visual y sonora en caso de parada del ventilador principal EP-VE-110 de 200,000 CFM: Radio de influencia de alarmas La alarma se encuentra instalada a 15m de la rampa principal en el Nv. 4210 (a 300 m del tablero de control), en una zona de tránsito fluido de personas de la empresa especializada Seprocal, vehículos livianos y pesados alertando la condición del ventilador en casos de parada de manera sonora y visual. El ITM de control K1 al no contar con energía se apertura y activa la alarma y sirena.

Descripción de las alarmas

Cada alarma está constituida por los siguientes componentes:

Alarma sonora: Para los casos de fallas mecánicas o eléctricas de los ventiladores en cumplimiento del DS - 2016 – EM se han implementado dispositivos automáticos de alarma, SIRENA (#-DB) 115DB; (DIM)

214MMX217MM; (FRE) 50/60HZ; (IP) IP44; (U-NOM) 240V; (TIP) ELECTROMECAÁNICO SCT240DA; (I- NOM) 1.2A. Estos dispositivos automáticos se activan cuando existe disminución de velocidad, parada intempestiva de los ventiladores, fallas en el sistema de red de energía y fallas en los sistemas mecánicos.

Alarma Visual: Luz de destello color rojo de 240 VAC modelo 877698 Se cuenta con circuito de alarmas que están instalados de la siguiente manera:

Circuito de Alarma del ventilador EP-VE-110

Iniciando la instalación desde el tablero de control ubicado en el Nv. 4210 con tensión de servicio en 220V, llegando al tablero de alarma que se encuentra ubicado a 400 metros de la Sub estación SN.

Figura 21. Dispositivo sonoro eb caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-110



f) Descripción del funcionamiento del equipo de emergencia en caso de corte de energía.

- La segunda fuente de energía proviene de la central hidroeléctrica Chaprin, que genera electricidad a 2.4 kV y eleva la tensión a 50 kV mediante un

transformador, con una capacidad de 5.4 MW. Esta fuente (denominada Fuente de Energía 02) alimenta de manera continua la línea de transmisión LT-6576 a 50 kV.

- Ante una ocurrencia de falla del circuito del interconectado nacional que nos alimenta por la línea L-1146, contamos con el abastecimiento continuo con la fuente de energía 02 la central hidroeléctrica Chaprin, está suministrará energía eléctrica a los servicios críticos de mina como los ventiladores principales en interior mina.

g) Indicar si el equipo de emergencia cuenta con arranque automático ante corte de Energía.

- La central hidroeléctrica CHAPRIN, se encuentra en funcionamiento permanente generando ENERGÍA las 24 horas en paralelo a la Línea de 138KV (SEIN-FUENTE DE ENERGÍA 01), C.H. CHAPRIN se encuentra constantemente conectado a la barra de 50 KV en la subestación principal de 138 KV Milpo.

h) Descripción de las baterías de respaldo de los paneles de control

- Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - **Marca:** Enersys
 - **Modelo:** Genesis NP7-12
 - **Autonomía:** 7 Ah
 - **Voltaje:** 12 Voltios
 - **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido sellada

- **Peso:** 0.01 Onzas
- **Dimensiones del artículo LxWxH:** 5.94 x 2.56 x 3.94 pulgadas
- **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 22. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-110



- Batería de respaldo del Panel de Control; Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - **Marca:** ChenZhou NPP Power Co.
 - **Modelo:** HR1234W FR
 - **Autonomía:** 9 Ah por 20 horas
 - **Voltaje:** 12 Voltios
 - **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido regulada por válvula
 - **Dimensiones del artículo LxWxH:** 15.1x 6.5x 9.4 cm
 - **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 23. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-110



5. PANEL DE CONTROL EP-VE-145:

a) Ventiladores a los cuales están controlando:

Ventilador: código EP-VE-145, capacidad: 200,000 CFM.

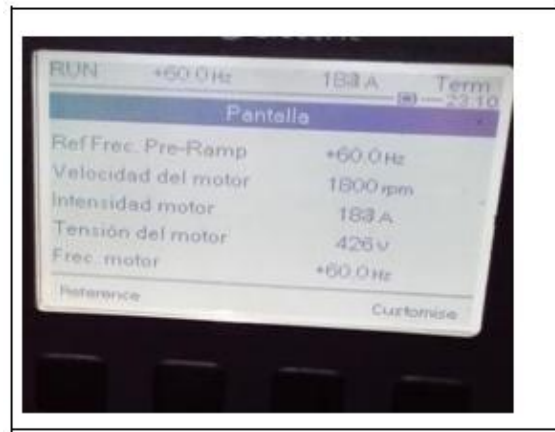
b) Marca, modelo y parámetros eléctricos del panel de control.

- **Marca:** SCHNEIDER
- **Modelo:** PID-ATV930
- **Parámetros:**
 - Voltaje: 460 V
 - Corriente de fase: 262 A
 - Corriente de línea: 454 A
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Factor de potencia: 0.8

c) Parámetros que monitorea.

- Voltaje de fase
- Corriente y voltaje de línea
- Frecuencia
- Factor de Potencia
- La potencia Reactiva /Activa / Aparente

Figura 24. Panel de monitoreo y operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-145

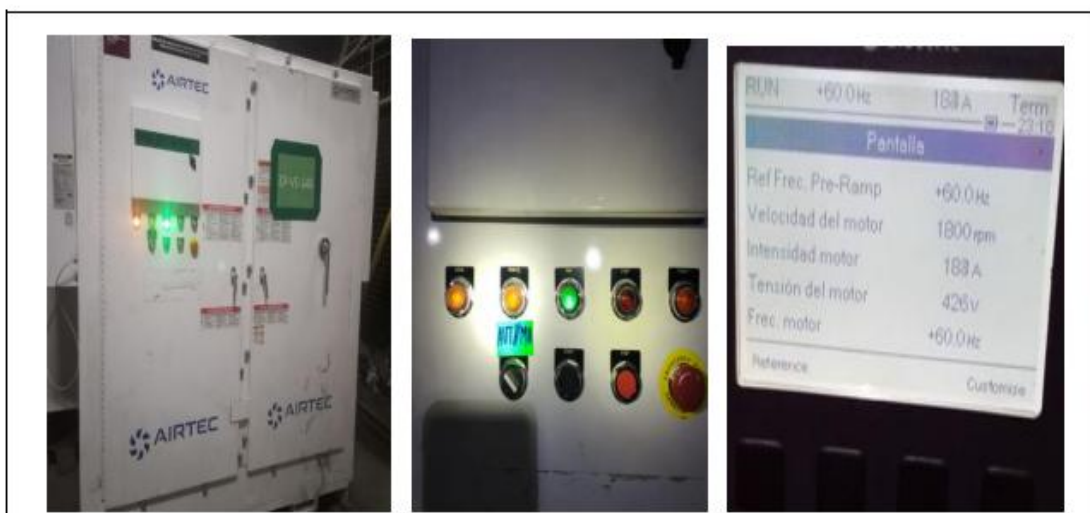


d) Parámetros que regula.

- Inversión de giro.
- Arranque automático de ventiladores en un eventual corte y reposición de energía eléctrica.
- Temperatura ambiente
- Sobretensión de CC
- Subtensión de CC
- Temperatura del convertidor
- Pérdida de fase

- Sobrecarga
- Límite de potencia
- Cortocircuito
- Límites de potencia ajustables
- Supervisión de la señal de control
- Bloqueo de las frecuencias críticas
- Límites de intensidad y par
- Protección contra defecto a tierra
- Fallo externo
- Pérdida de fase del motor
- Protección contra bloqueo de motor
- Protección térmica del motor
- Protección de baja carga del motor
- Pérdida del panel
- RPM del motor

Figura 25. Display de programació, arranque automático y variaci' n del ventilador principal EP-ve-145



e) **Descripción del funcionamiento de la emisión de señales de alarma en caso de paradas.**

Sistema de alarma visual y sonora en caso de parada del ventilador principal EP-VE-145 de 200,000 CFM: Radio de influencia de alarmas La alarma se encuentra instalada en ex vía férrea en el Nv. 3620 (a 380 m del tablero de control), al ingreso del túnel la quinua en una zona de presencia constante del personal del área de servicios, y vehículos livianos alertando la condición del ventilador en casos de parada de manera sonora y visual. El ITM de control K1 al no contar con energía se apertura y activa la alarma y sirena.

Descripción de las alarmas

Cada alarma está constituida por los siguientes componentes:

Alarma sonora: Para los casos de fallas mecánicas o eléctricas de los ventiladores en cumplimiento del DS - 2016 – EM se han implementado dispositivos automáticos de alarma, SIRENA (#-DB) 118DB; (DIM) 255MMX237MM; (FRE) 50/60HZ; (IP) IP66; (UNOM) 220V; (TIP) ELÉCTRICO SHDLP-WP-220R; (I- NOM) 0.143

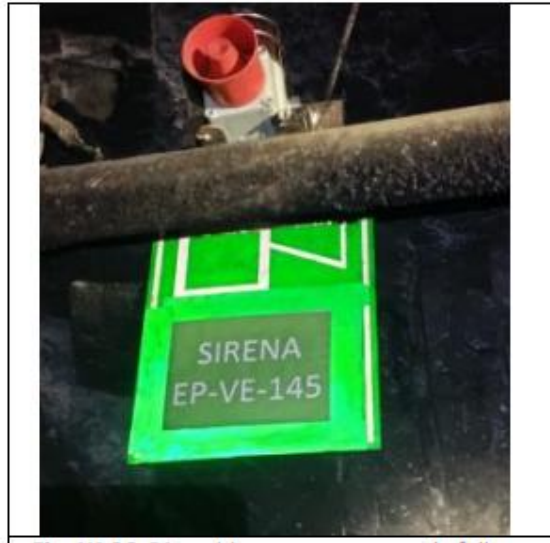
Estos dispositivos automáticos se activan cuando existe disminución de velocidad, parada intempestiva de los ventiladores, fallas en el sistema de red de energía y fallas en los sistemas mecánicos.

Alarma Visual: Luz de destello color rojo de 240 VAC modelo SHD Se cuenta con circuito de alarmas que están instalados de la siguiente manera:

Circuito de Alarma del ventilador EP-VE-110 Iniciando la instalación desde el tablero de control ubicado en Nv 3620 túnel de la quinua con tensión de servicio

en 220V, llegando al tablero de alarma que se encuentra ubicada a 300 metros de la Sub estación N° 39.

Figura 26. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-145



f) Descripción del funcionamiento del equipo de emergencia en caso de corte de energía.

- La segunda fuente de energía proviene de la central hidroeléctrica Chaprin, que genera electricidad a 2.4 kV y eleva la tensión a 50 kV mediante un transformador, con una capacidad de 5.4 MW. Esta fuente (denominada Fuente de Energía 02) alimenta de manera continua la línea de transmisión LT-6576 a 50 kV.
- Ante una ocurrencia de falla del circuito del interconectado nacional que nos alimenta por la línea L-1146, contamos con el abastecimiento continuo con la fuente de energía 02 la central hidroeléctrica Chaprin, está suministrará energía eléctrica a los servicios críticos de mina como los ventiladores principales en interior mina.

g) Indicar si el equipo de emergencia cuenta con arranque automático ante corte de Energía.

- La central hidroeléctrica CHAPRIN, se encuentra en funcionamiento permanente generando ENERGÍA las 24 horas en paralelo a la Línea de 138KV (SEIN-FUENTE DE ENERGIA 01), C.H. CHAPRIN se encuentra constantemente conectado a la barra de 50 KV en la subestación principal de 138 KV Milpo.

h) Descripción de las baterías de respaldo de los paneles de control

- Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, modelo y otros.
 - **Marca:** Enersys
 - **Modelo:** Genesis NP7-12
 - **Autonomía:** 7 Ah
 - **Voltaje:** 12 Voltios
 - **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido sellada
 - **Peso:** 0.01 Onzas
 - **Dimensiones del artículo LxWxH:** 5.94 x 2.56 x 3.94 pulgadas
 - **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 27. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-145



- Batería de respaldo del Panel de Control; Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - **Marca:** ChenZhou NPP Power Co.
 - **Modelo:** HR1234W FR
 - **Autonomía:** 9 Ah por 20 horas
 - **Voltaje:** 12 Voltios
 - **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido regulada por válvula
 - **Dimensiones del artículo LxWxH:** 15.1x 6.5x 9.4 cm
 - **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 28. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-145



6. PANEL DE CONTROL EP-VE-138:

a) Ventiladores a los cuales están controlando:

Ventilador: código EP-VE-138, capacidad: 150,000 CFM.

b) Marca, modelo y parámetros eléctricos del panel de control.

- Marca: POWER ELECTRONIC
- Modelo: SD750
- **Parámetros:**
 - Voltaje: 460 V
 - Corriente de fase: 262 A
 - Corriente de línea: 454 A
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Factor de potencia: 0.8

c) Parámetros que monitorea.

- Voltaje de fase
- Corriente y voltaje de línea
- Frecuencia
- Factor de Potencia
- La potencia Reactiva /Activa / Aparente

Figura 29. Panel de monitoreo y operaciones en el variador del ventilador principal EP-VE-138



d) Parámetros que regula.

- Inversión de giro.
- Arranque automático de ventiladores en un eventual corte y reposición de energía eléctrica.
- Temperatura ambiente
- Sobretensión de CC
- Subtensión de CC
- Temperatura del convertidor
- Pérdida de fase
- Sobrecarga
- Límite de potencia
- Cortocircuito
- Límites de potencia ajustables
- Supervisión de la señal de control
- Bloqueo de las frecuencias críticas
- Límites de intensidad y par
- Protección contra defecto a tierra
- Fallo externo
- Pérdida de fase del motor
- Protección contra bloqueo de motor
- Protección térmica del motor
- Protección de baja carga del motor
- Pérdida del panel

- RPM del motor

Figura 30. Display de programación, arranque automático y variador del ventilador principal EP-VE-138



e) Descripción del funcionamiento de la emisión de señales de alarma en caso de paradas.

Sistema de alarma visual y sonora en caso de parada del ventilador principal EP-VE-138 de 150,000 CFM: Radio de influencia de alarmas La alarma se encuentra instalada a 15m de la rampa principal en el Nv. -3300 (a 250m del tablero de control), en una zona de tránsito fluido de personas del área de servicios, mantenimiento eléctrico, vehículos livianos y pesados alertando la condición del ventilador en caso de parada de manera sonora y visual. El ITM de control K1 al no contar con energía se apertura y activa la alarma y sirena.

Descripción de las alarmas

Cada alarma está constituida por los siguientes componentes:

Alarma sonora: Para los casos de fallas mecánicas o eléctricas de los

ventiladores en cumplimiento del DS - 2016 – EM se han implementado dispositivos automáticos de alarma, SIRENA (#-DB) 118DB; (DIM) 255MMX237MM; (FRE) 50/60HZ; (IP) IP66; (UNOM) 220V; (TIP) ELECTRICO SHDLP-WP-220R; (I- NOM) 0.143A. Estos dispositivos automáticos se activan cuando existe disminución de velocidad, parada intempestiva de los ventiladores, fallas en el sistema de red de energía fallas en los sistemas mecánicos.

Alarma Visual: Luz de destello color rojo de 240 VAC modelo SHD Se cuenta con circuito de alarmas que están instalados de la siguiente manera:

Circuito de Alarma del ventilador EP-VE-138

Iniciando la instalación desde el tablero de control ubicado en el Nv. 3300 con tensión de servicio en 220V, llegando al tablero de alarma que se encuentra ubicado a 380 metros de la sub estación N° 14.

Figura 31. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-138



f) Descripción del funcionamiento del equipo de emergencia en caso de corte de energía.

- La segunda fuente de energía proviene de la central hidroeléctrica Chaprin, que genera electricidad a 2.4 kV y eleva la tensión a 50 kV mediante un transformador, con una capacidad de 5.4 MW. Esta fuente (denominada Fuente de Energía 02) alimenta de manera continua la línea de transmisión LT-6576 a 50 kV.
- Ante una ocurrencia de falla del circuito del interconectado nacional que nos alimenta por la línea L-1146, contamos con el abastecimiento continuo con la fuente de energía 02 la central hidroeléctrica Chaprin, está suministrará energía eléctrica a los servicios críticos de mina como los ventiladores principales en interior mina.

g) Indicar si el equipo de emergencia cuenta con arranque automático ante corte de Energía.

- La central hidroeléctrica CHAPRIN, se encuentra en funcionamiento permanente generando ENERGÍA las 24 horas en paralelo a la Línea de 138KV (SEIN-FUENTE DE ENERGIA 01), C.H. CHAPRIN se encuentra constantemente conectado a la barra de 50 KV en la subestación principal de 138 KV Milpo.

h) Descripción de las baterías de respaldo de los paneles de control

- Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - **Marca:** Enersys

- **Modelo:** Genesis NP7-12
- **Autonomía:** 7 Ah
- **Voltaje:** 12 Voltios
- **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido sellada
- **Peso:** 0.01 Onzas
- **Dimensiones del artículo LxWxH:** 5.94 x 2.56 x 3.94 pulgadas
- **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 32. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-138



- Batería de respaldo del Panel de Control; Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.

- **Marca:** ChenZhou NPP Power Co.
- **Modelo:** HR1234W FR
- **Autonomía:** 9 Ah por 20 horas
- **Voltaje:** 12 Voltios

- **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido regulada por válvula
- **Dimensiones del artículo LxWxH:** 15.1x 6.5x 9.4 cm
- **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 33. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-138



6. PANEL DE CONTROL EP-VE-74:

a) Ventiladores a los cuales están controlando:

Ventilador: código EP-VE-74, capacidad: 120,000 CFM.

b) Marca, modelo y parámetros eléctricos del panel de control.

- **Marca:** EPLI
- **Modelo:** 3PHASE
- **Parámetros**
 - Voltaje: 460 V
 - Corriente de fase: 262 A
 - Corriente de línea: 454 A

- Frecuencia: 60 HZ
- Factor de potencia: 0.8

c) Parámetros que monitorea.

- Voltaje de fase
- Corriente y voltaje de línea
- Frecuencia
- Factor de Potencia
- La potencia Reactiva /Activa / Aparente

Figura 34. Panel de monitoreo operaciones en el SOFT STARTER del ventilador principal EP-VE-74



d) Parámetros que regula.

- Arranque automático de ventiladores en un eventual corte y reposición de energía eléctrica.
- Ausencia de fases
- Límite de corriente en el arranque

- Sobrecarga de motor
- Baja carga de motor
- Torque inicial
- Tiempo del torque inicial
- Rampa de aceleración
- Rampa de desaceleración
- Límite de corriente: 1 a 5 In
- Sobrecarga: 0.8 a 1.2 In
- Curva de tiempo de sobrecarga
- Inicio de arranque
- Falla
- Fin de arranque
- Señalización
- Listo
- Marcha
- Sobre temperatura
- Falla de fase
- Sobre/baja carga activa
- Sobrecarga

Figura 35. Display de programación, arranque automático del ventilador principal EP-VE-74



e) Descripción del funcionamiento de la emisión de señales de alarma en caso de paradas.

Sistema de alarma visual y sonora en caso de parada del ventilador principal EP-VE-74 de 120,000 CFM:

Radio de influencia de alarmas

La alarma se encuentra instalada a 20m de la vía principal en el Nv. 4090 (a 250m del tablero de control), en una zona de tránsito fluido de personas de la empresa especializada Seprocal, vehículos livianos y pesados alertando la condición del ventilador en casos de parada de manera sonora y visual. El ITM de control K1 al no contar con energía se apertura y activa la alarma y sirena.

Descripción de las alarmas

Cada alarma está constituida por los siguientes componentes:

Alarma sonora: Para los casos de fallas mecánicas o eléctricas de los ventiladores en cumplimiento del DS - 2016 – EM se han implementado dispositivos automáticos de alarma, SIRENA (#-DB) 118DB; (DIM)

255MMX237MM; (FRE) 50/60HZ; (IP) IP66; (UNOM) 220V; (TIP) ELÉCTRICON SHDLP-WP-220R; (I- NOM); 0.143A. Estos dispositivos automáticos se activan cuando existe disminución de velocidad, parada intempestiva de los ventiladores, fallas en el sistema de red de energía y fallas en los sistemas mecánicos.

Alarma Visual: Luz de destello color rojo de 240 VAC modelo SHD Se cuenta con circuito de alarmas que están instalados de la siguiente manera:

Circuito de Alarma del ventilador EP-VE-74

Iniciando la instalación desde el tablero de control ubicado en el Nv 4090 con tensión de servicio en 220V, llegando al tablero de alarma que se encuentra ubicado a 350 metros de la Sub estación N° 73.

Figura 36. Dispositivo sonoro en caso de falla eléctrica y/o mecánica del ventilador EP-VE-74



f) Descripción del funcionamiento del equipo de emergencia en caso de corte de energía.

- La segunda fuente de energía proviene de la central hidroeléctrica Chaprin, que genera electricidad a 2.4 kV y eleva la tensión a 50 kV mediante un

transformador, con una capacidad de 5.4 MW. Esta fuente (denominada Fuente de Energía 02) alimenta de manera continua la línea de transmisión LT-6576 a 50 kV.

- Ante una ocurrencia de falla del circuito del interconectado nacional que nos alimenta por la línea L-1146, contamos con el abastecimiento continuo con la fuente de energía 02 la central hidroeléctrica Chaprin, esta suministrará energía eléctrica a los servicios críticos de mina como los ventiladores principales en interior mina.

g) Indicar si el equipo de emergencia cuenta con arranque automático ante corte de Energía.

- La central hidroeléctrica CHAPRIN, se encuentra en funcionamiento permanente generando ENERGÍA las 24 horas en paralelo a la Línea de 138KV (SEIN-FUENTE DE ENERGIA 01), C.H. CHAPRIN se encuentra constantemente conectado a la barra de 50 KV en la subestación principal de 138 KV Milpo.

h) Descripción de las baterías de respaldo de los paneles de control

- Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - **Marca:** Enersys
 - **Modelo:** Genesis NP7-12
 - **Autonomía:** 7 Ah
 - **Voltaje:** 12 Voltios
 - **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido sellada

- **Peso:** 0.01 Onzas
- **Dimensiones del artículo LxWxH:** 5.94 x 2.56 x 3.94 pulgadas
- **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 37. Baterías de respaldo del tablero arrancador EP-VE-74



- Batería de respaldo del Panel de Control; Detalle de parámetros eléctricos; características: capacidad, marca, modelo y otros.
 - **Marca:** ChenZhou NPP Power Co.
 - **Modelo:** HR1234W FR
 - **Autonomía:** 9 Ah por 20 horas
 - **Voltaje:** 12 Voltios
 - **Composición de las celdas de la batería:** Plomo-ácido regulada por válvula
 - **Dimensiones del artículo LxWxH:** 15.1x 6.5x 9.4 cm
 - **Número de celdas:** 6 celdas

Figura 38. Baterías de respaldo de panel de control de EP-VE-74

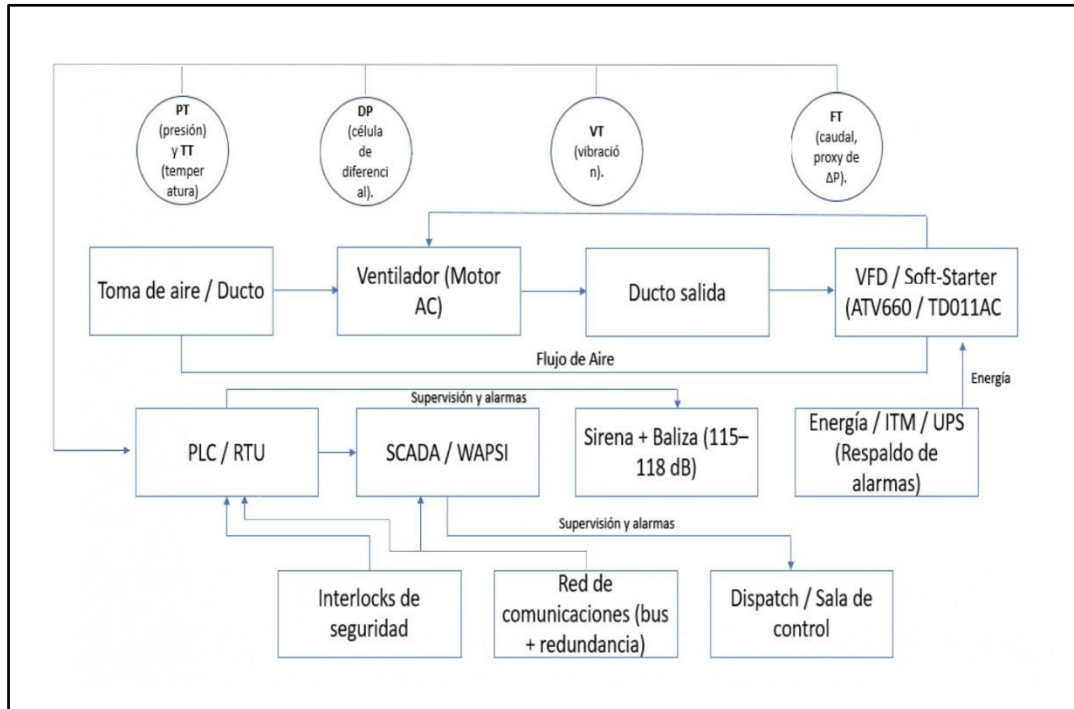


Arquitectura de automatización y lógica de control

Arquitectura:

- **Nivel campo:** VFD/Soft-Starter (ATV 660, TD011AC), sensores eléctricos (V/I, rpm), protecciones térmicas y de tierra, sirenas y balizas.
- **Nivel control:** PLC/RTU con secuencias de arranque escalonado, setpoints de caudal/ ΔP , interlocks (puertas, temperatura, sobrecorriente).
- **Supervisión (WAPSI/SCADA):** tendencias, alarmas, confirmación de estados y telecomando hacia despacho.
- **Comunicaciones:** bus industrial con redundancia.

Figura 39. P&ID simplificado del sistema de ventilación y control



El P&ID resume el lazo de instrumentación y control: transmisores (**PT**, **TT**, **DP**, **VT**, **FT**) e **interlocks de seguridad** alimentan al **PLC/RTU**, que comanda el **VFD/Soft-Starter** del motor-ventilador; **SCADA/WAPSI** supervisa tendencias, alarmas y telecomando. Se incluye el circuito de **energía (ITM/UPS)**, **sirena/baliza** y la **red industrial** con redundancia.

3.9. Tratamiento estadístico

Se empleará el software SPSS para:

- Estadística descriptiva
- Correlación de Pearson (potencia vs caudal)
- Gráficos comparativos
- Tablas dinámicas

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

Los datos serán manejados con confidencialidad, con fines exclusivamente académicos y autorizados por el área de Ingeniería de NEXA Resources.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El trabajo de campo se ejecutó entre mayo y septiembre del 2025 en la Unidad Minera El Porvenir de NEXA Resources. Se evaluaron los **siete ventiladores principales**, cinco extractores y dos inyectores, ubicados en los niveles 3300 a 4210.

La matriz de datos se estructuró bajo un **diseño emparejado**, donde cada ventilador constituye su propio caso *Antes vs Después* de la automatización. Se midieron:

- Eficiencia (%)
- Caudal efectivo (KCFM)
- Potencia demandada (HP)
- Coeficiente de variación (CV)
- Registros de panel automatizado
- Lecturas del sistema SCADA/WAPSI

Se descartaron mediciones con alarmas, arranques, fluctuaciones >5%, o

vibraciones anómalas. (El registro fotográfico del trabajo de campo se presenta en el **Anexo 9**, donde se muestran las mediciones de caudal y parámetros ambientales, así como el monitoreo del sistema WAPSI y de los ventiladores principales automatizados).

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

Tabla 3. Comparativa Antes – Después

Tipo de ventilador	Ventilador	Eficiencia Antes (%)	Eficiencia Después (%)	Potencia Antes (HP)	Potencia Después (HP)	CV Antes	CV Después	Caudal Antes (CFM)	Caudal Después (CFM)
Extractor	EP-VE-44	83	94	400	360	1,2	0,7	150	165
Extractor	EP-VE-106	84	95	400	365	1,3	0,68	170	185
Extractor	EP-VE-110	85	96	400	355	1,1	0,62	170	185
Inyector	EP-VE-116	87	97	200	180	0,8	0,46	85	90
Extractor	EP-VE-74	82	92	210	190	1,5	0,83	102	112
Inyector	EP-VE-145	86	96	400	360	1,25	0,77	170	185
Extractor	EP-VE-138	83	94	350	330	1,1	0,65	127,5	140

Fuente: Elaboración propia

Nota: La eficiencia se expresa en porcentaje (%), la potencia en caballos de fuerza (HP), el coeficiente de variación (CV) es adimensional y el caudal de aire en pies cúbicos por minuto (CFM).

Interpretación individual de cada ventilador:

1. Ventilador EP-VE-44

Se observa que la eficiencia aumenta de 83 % a 94 %, lo que representa una mejora de **11 puntos porcentuales**. La potencia disminuye de 400 HP a 360 HP, evidenciando una reducción de **40 HP**. Asimismo, el coeficiente de variación disminuye de 1,2 a 0,7, indicando mayor estabilidad del sistema. El caudal de aire se incrementa de 150 CFM a 165 CFM, logrando un aumento de **15 CFM**.

2. Ventilador EP-VE-106

La eficiencia se incrementa de 84 % a 95 %, obteniéndose una mejora de **11 puntos porcentuales**. La potencia disminuye de 400 HP a 365 HP, equivalente a **35 HP menos**. El coeficiente de variación se reduce de 1,3 a 0,68, reflejando un comportamiento más estable. El caudal aumenta de 170 CFM a 185 CFM, es decir, **15 CFM adicionales**.

3. Ventilador EP-VE-110

La eficiencia pasa de 85 % a 96 %, con una mejora de **11 puntos porcentuales**. La potencia disminuye de 400 HP a 355 HP, representando una reducción de **45 HP**. El CV baja de 1,1 a 0,62, mostrando mayor uniformidad operativa. El caudal se incrementa de 170 CFM a 185 CFM, con un aumento de **15 CFM**.

4. Ventilador EP-VE-116

La eficiencia aumenta de 87 % a 97 %, logrando una mejora de **10 puntos porcentuales**. La potencia se reduce de 200 HP a 180 HP, equivalente a **20 HP**. El CV disminuye de 0,8 a 0,46, evidenciando mayor estabilidad. El caudal aumenta de 85 CFM a 90 CFM, obteniendo **5 CFM adicionales**.

5. Ventilador EP-VE-74

La eficiencia se incrementa de 82 % a 92 %, es decir, **10 puntos porcentuales**. La potencia disminuye de 210 HP a 190 HP, representando **20 HP menos**. El CV se reduce de 1,5 a 0,83. El caudal pasa de 102 CFM a 112 CFM, incrementándose en **10 CFM**.

6. Ventilador EP-VE-145

La eficiencia aumenta de 86 % a 96 %, con una mejora de **10 puntos**

porcentuales. La potencia disminuye de 400 HP a 360 HP (**40 HP menos**). El CV baja de 1,25 a 0,77. El caudal se incrementa de 170 CFM a 185 CFM, con un aumento de **15 CFM**.

7. Ventilador EP-VE-138

La eficiencia se incrementa de 83 % a 94 %, obteniendo una mejora de **11 puntos porcentuales**. La potencia disminuye de 350 HP a 330 HP (**20 HP menos**). El CV se reduce de 1,1 a 0,65. El caudal aumenta de 127,5 CFM a 140 CFM, logrando **12,5 CFM adicionales**.

Estadísticos descriptivos (SPSS)

a. Eficiencia

	Variable	Media	N	Desv. estándar	Error estándar
EFICIENCIA %	Eficiencia antes	84.2857	7	1.79947	0.68014
	Eficiencia después	94.8571	7	1.67616	0.63353

Interpretación: La eficiencia promedio de los ventiladores antes de la automatización fue de **84.29 %**, mientras que después de la automatización aumentó a **94.86 %**, evidenciando un incremento aproximado de **10.57 puntos porcentuales**. Asimismo, la desviación estándar se mantiene baja tanto antes (1.80) como después (1.68), lo que indica que los valores de eficiencia presentan poca dispersión respecto a la media. Estos resultados muestran una mejora consistente en la eficiencia del sistema de ventilación tras la implementación del sistema automatizado.

b. Potencia (HP)

POTENCIA (HP)	Variable	Media	N	Desv. estándar	Error estándar
	Potencia antes	337.1429	7	92.14378	34.82708
	Potencia después	305.7143	7	83.28808	31.47994

Interpretación: La potencia promedio consumida por los ventiladores antes de la automatización fue de **337.14 HP**, reduciéndose a **305.71 HP** después de la automatización, lo que representa una disminución aproximada de **31.43 HP**. La reducción de la media, junto con valores de desviación estándar similares, evidencia una tendencia hacia un menor consumo energético de los ventiladores, asociado al control automatizado de su operación.

c. Coeficiente de Variación

COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)	Variable	Media	N	Desv. estándar	Error estándar
	CV antes	1.1786	7	0.21575	0.08155
	CV después	0.6729	7	0.118	0.0446

Interpretación: El coeficiente de variación promedio antes de la automatización fue de **1.18**, mientras que después disminuyó a **0.67**, reflejando una reducción significativa en la variabilidad del sistema. Esta disminución indica una mayor estabilidad en el comportamiento operativo de los ventiladores, evidenciando que la automatización contribuye a reducir fluctuaciones en el funcionamiento del sistema de ventilación.

d. Caudal Efectivo

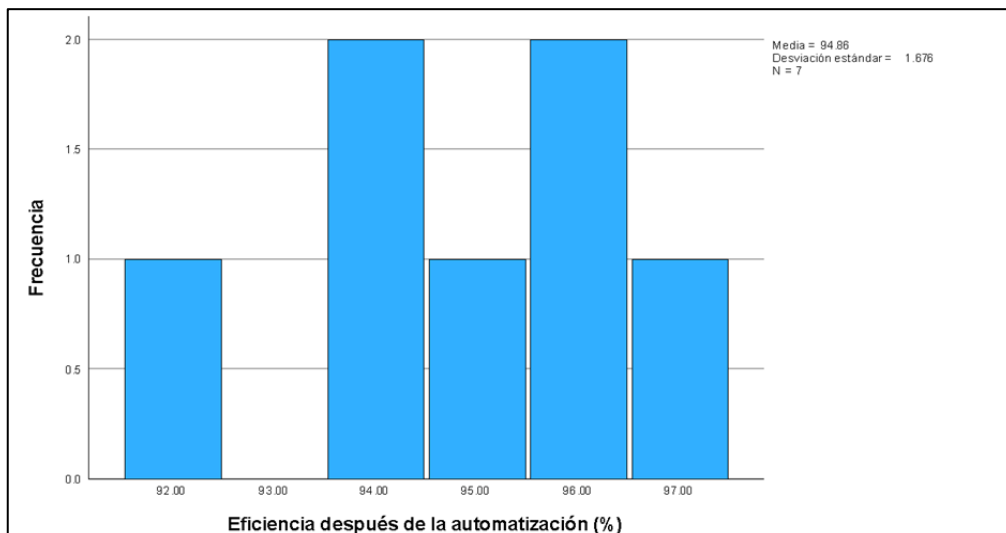
CAUDAL EFECTIVO (KCFM)	Variable	Media	N	Desv. estándar	Error estándar
	Caudal antes	139.2143	7	35.16847	13.29243
	Caudal después	137.4286	7	65.24022	24.65848

Interpretación: El caudal efectivo promedio antes de la automatización fue de **139.21 KCFM**, mientras que después fue de **137.43 KCFM**. Si bien la media presenta una ligera disminución, hay en la desviación estándar posterior, lo cual sugiere una redistribución del caudal acorde con las necesidades operativas del sistema. Este comportamiento puede estar asociado a una regulación más precisa del flujo de aire mediante el sistema automatizado, priorizando eficiencia y estabilidad del sistema.

Gráficos descriptivos (SPSS)

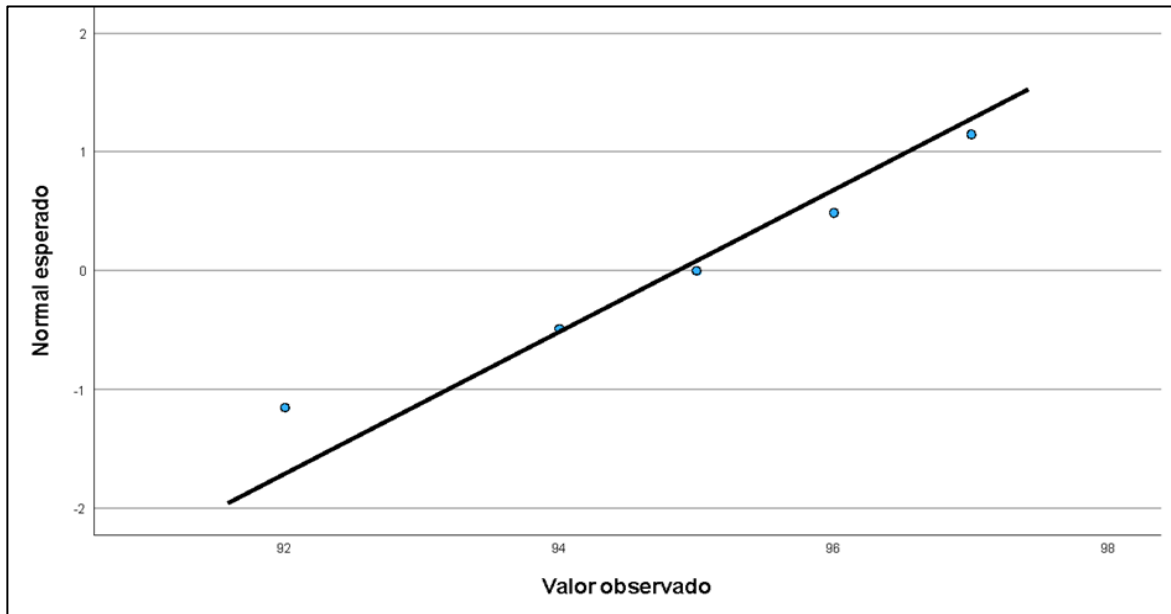
a. Eficiencia después de la automatización (%)

Gráfico 1. Histograma



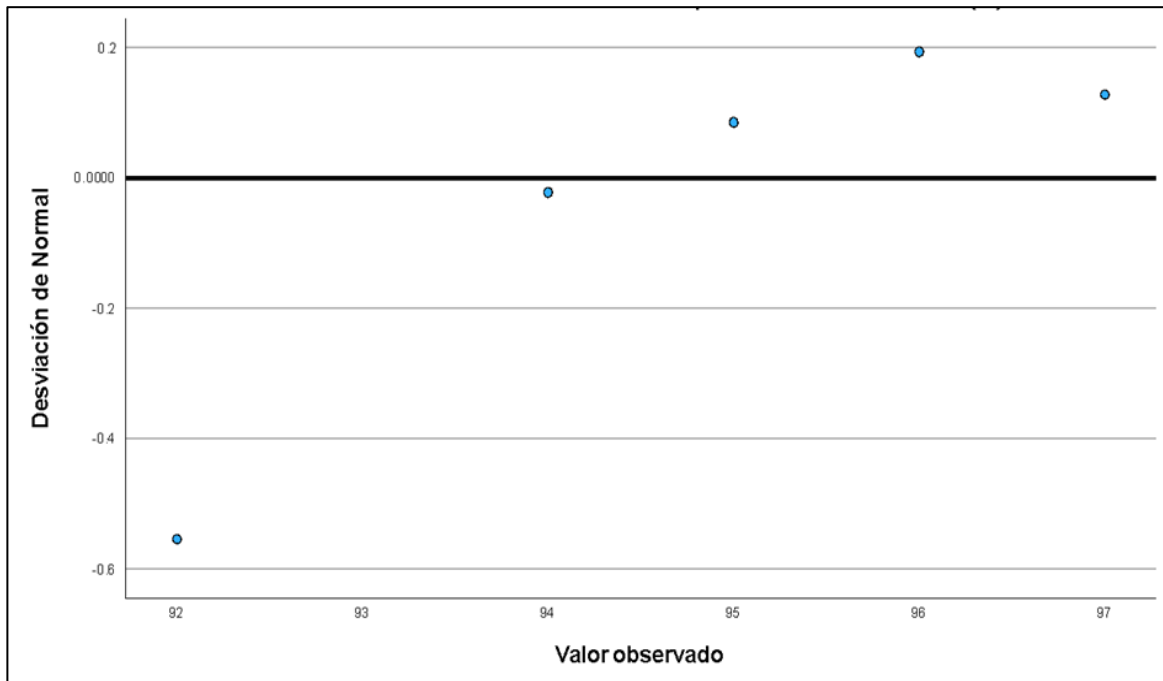
Fuente: (IBM Corp., 2022)

Gráfico 2. Gráfico Q-Q normal de eficiencia después de la automatización (%)



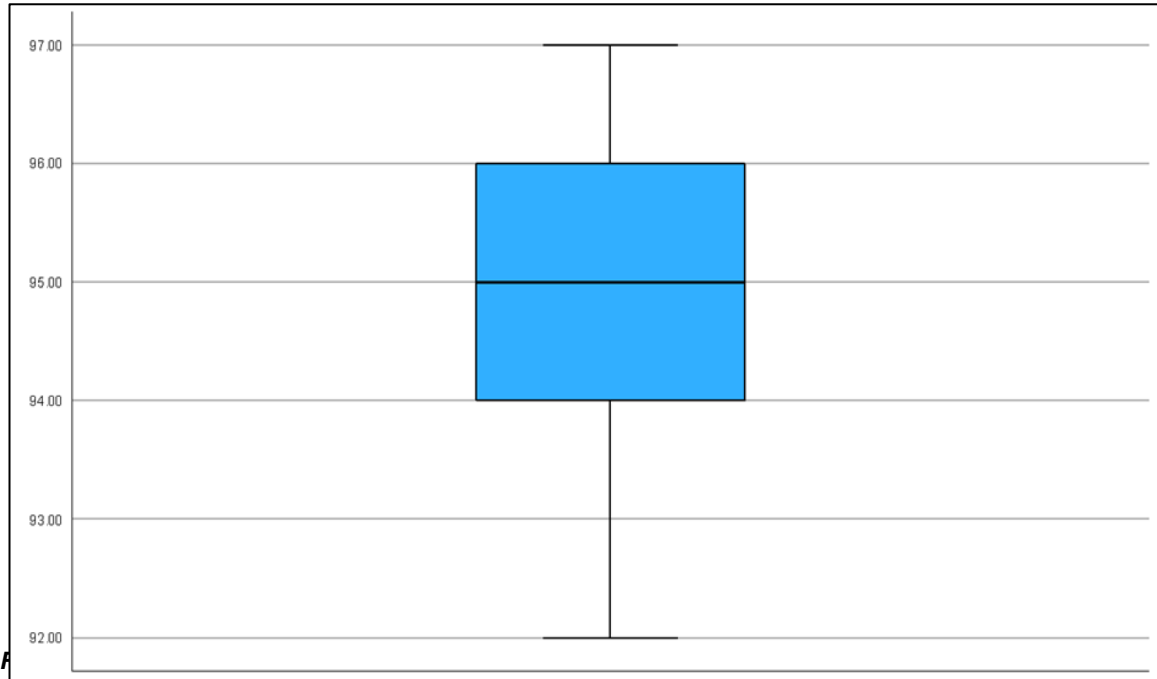
Fuente: (IBM Corp., 2022)

Gráfico 3. Gráfico Q-Q normal sin tendencia de eficiencia después de la automatización (%)



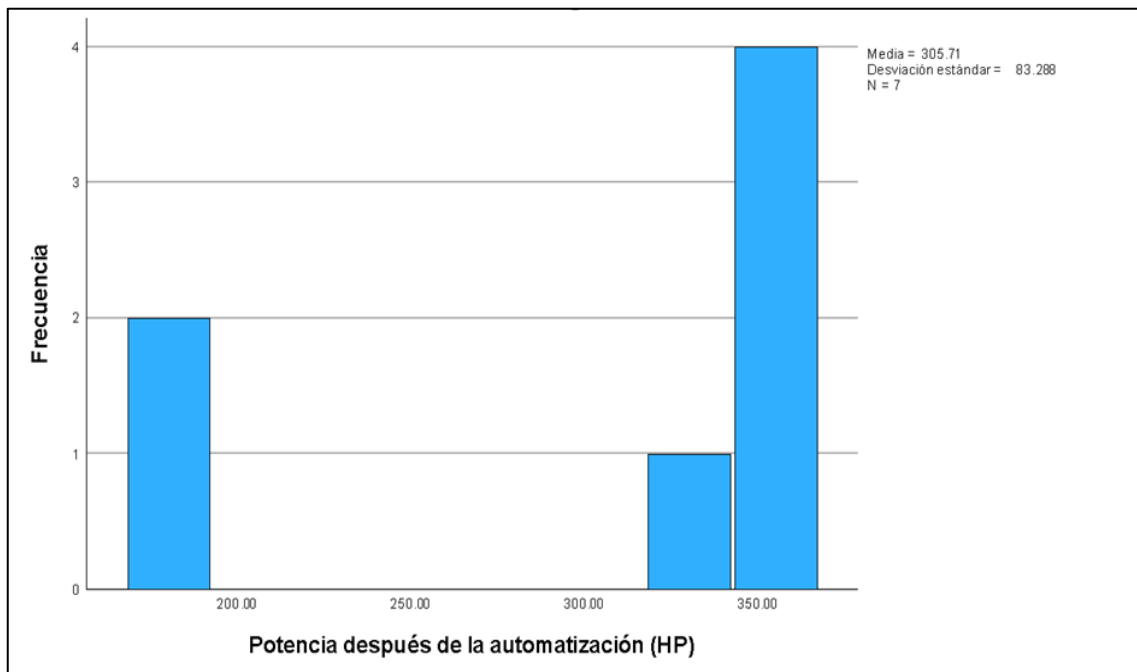
Fuente: (IBM Corp., 2022)

Gráfico 4. Eficiencia después de la automatización (%)



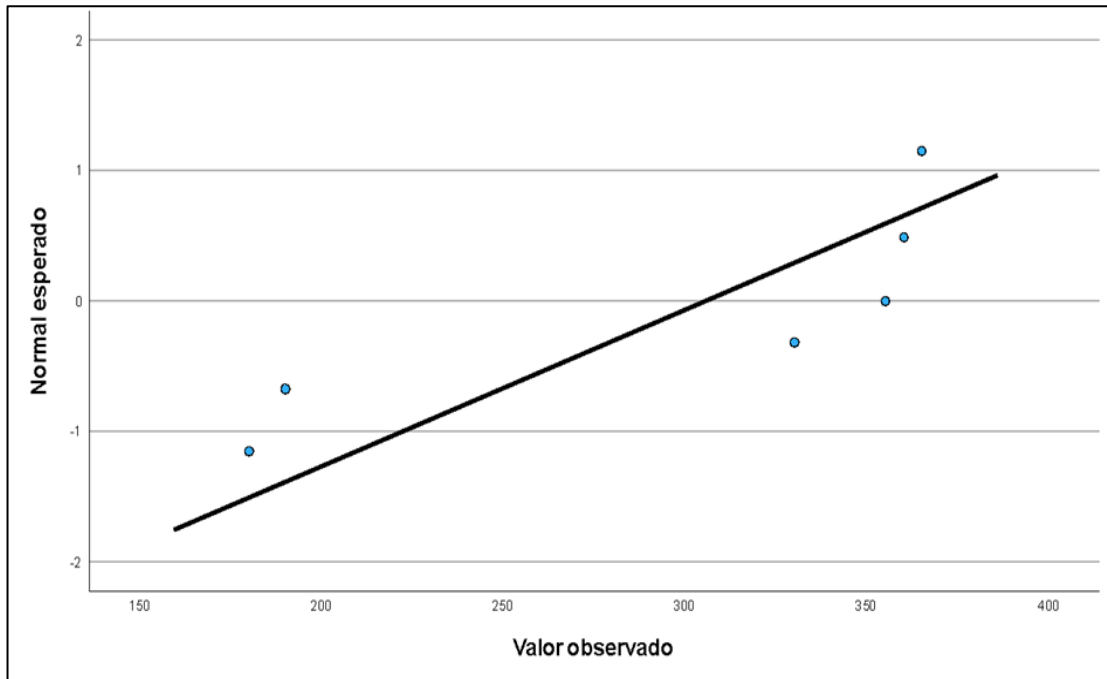
b. Potencia después de la automatización (HP)

Gráfico 5. Histograma



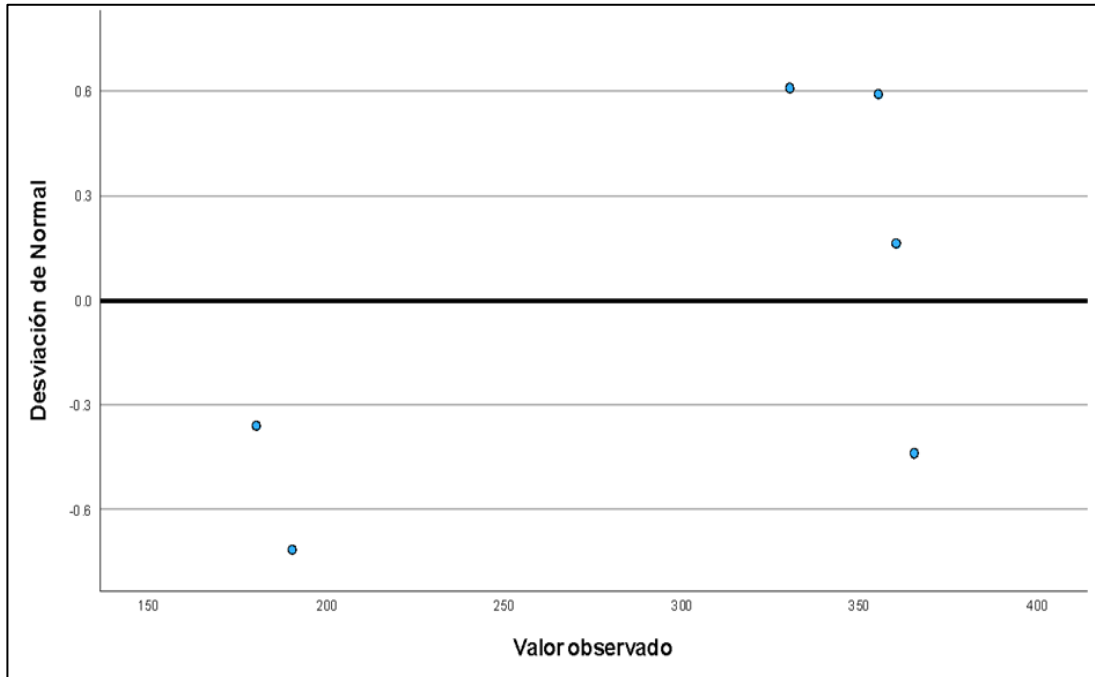
Fuente: (IBM Corp., 2022)

Gráfico 6. Gráfico Q-Q normal de potencia después de la automatización (HP)



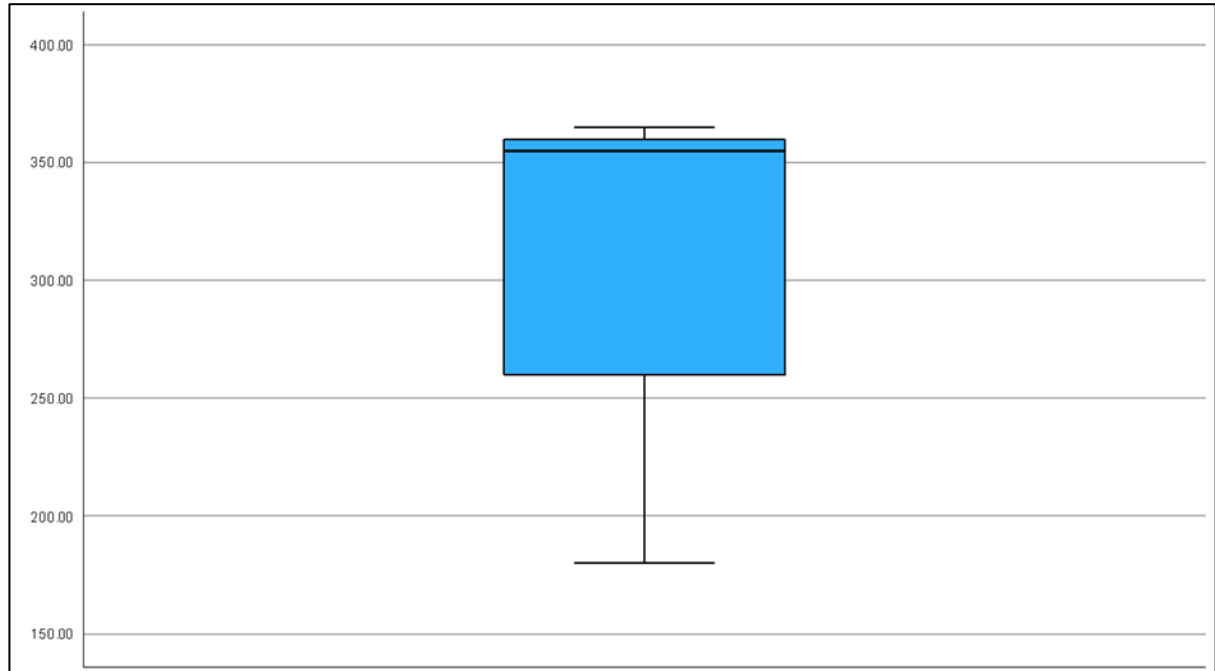
Fuente: (IBM Corp., 2022)

Gráfico 7. Gráfico Q-Q normal sin tendencia de potencia después de la automatización (HP)



Fuente: (IBM Corp., 2022)

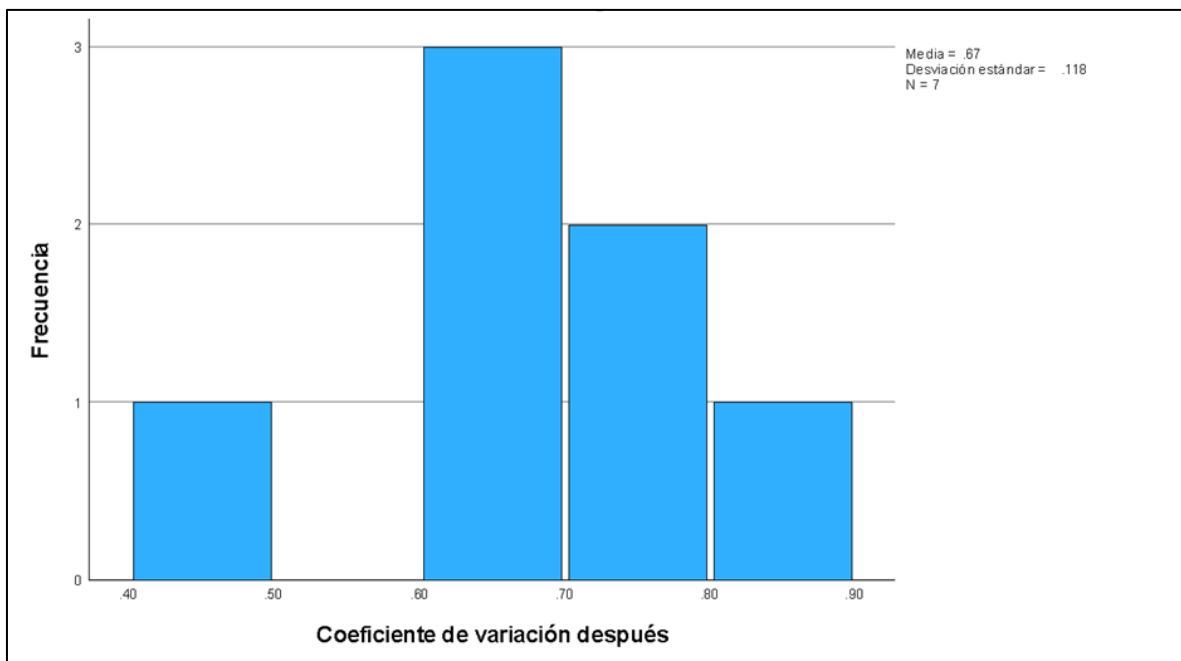
Gráfico 8. Potencia después de la autorización (HP)



Fuente: (IBM Corp., 2022)

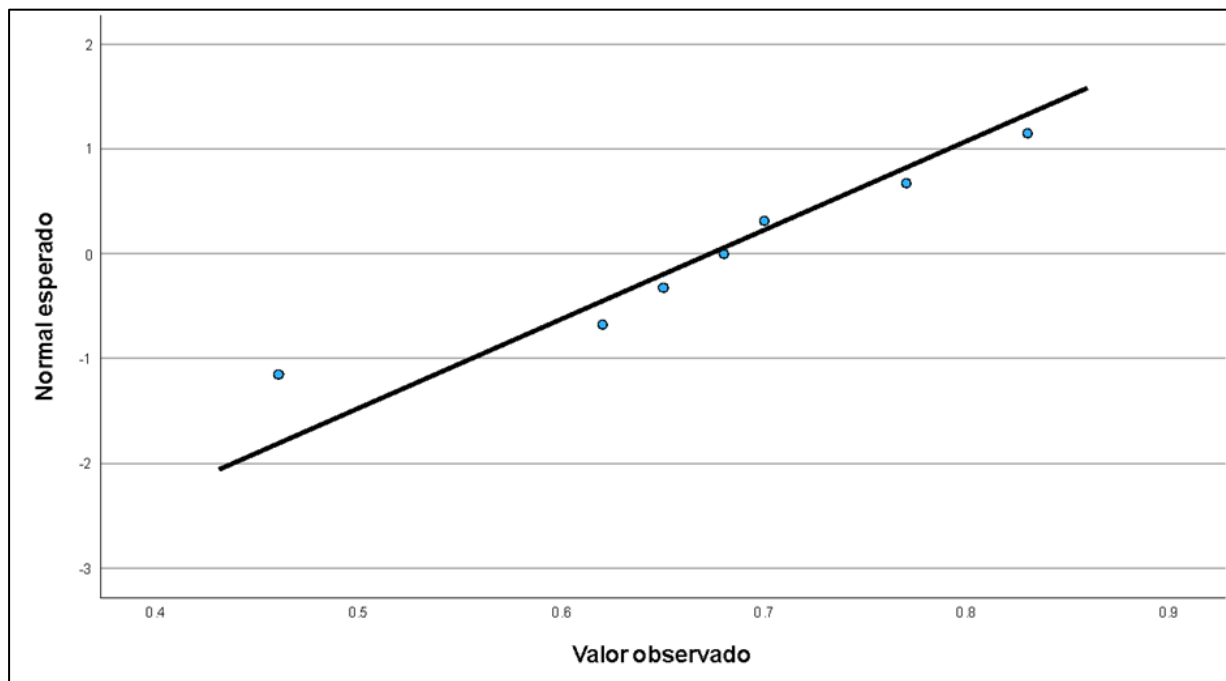
c. Coeficiente de Variación después

Gráfico 9. Histograma



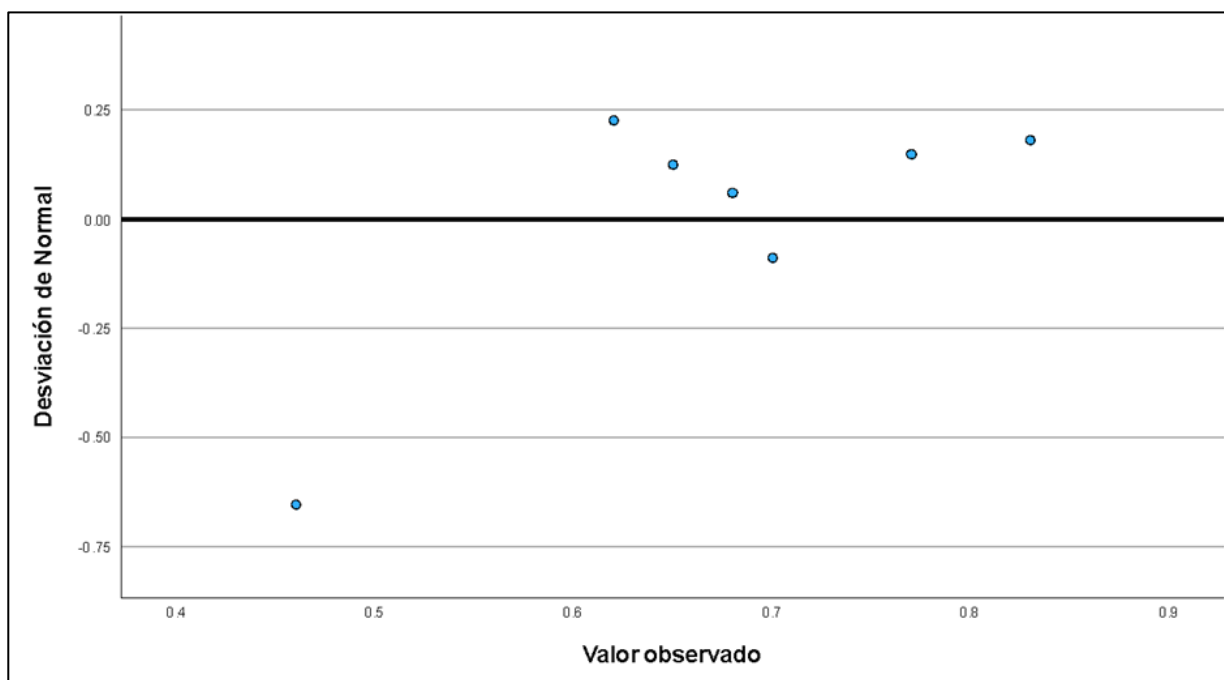
Fuente: (IBM Corp., 2022)

Gráfico 10. Gráfico Q-Q normal de coeficiente de variación después



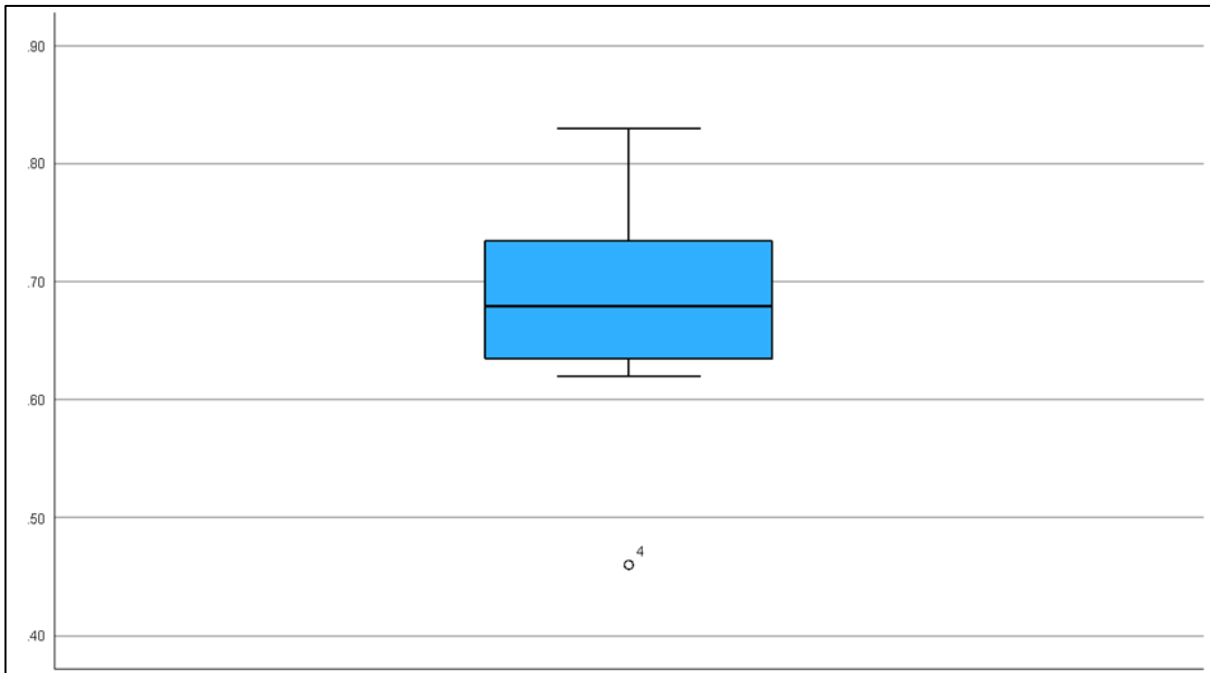
Fuente: (IBM Corp., 2022)

Gráfico 11. Gráfico Q-Q normal sin tendencia de coeficiente de variación después



Fuente: (IBM Corp., 2022)

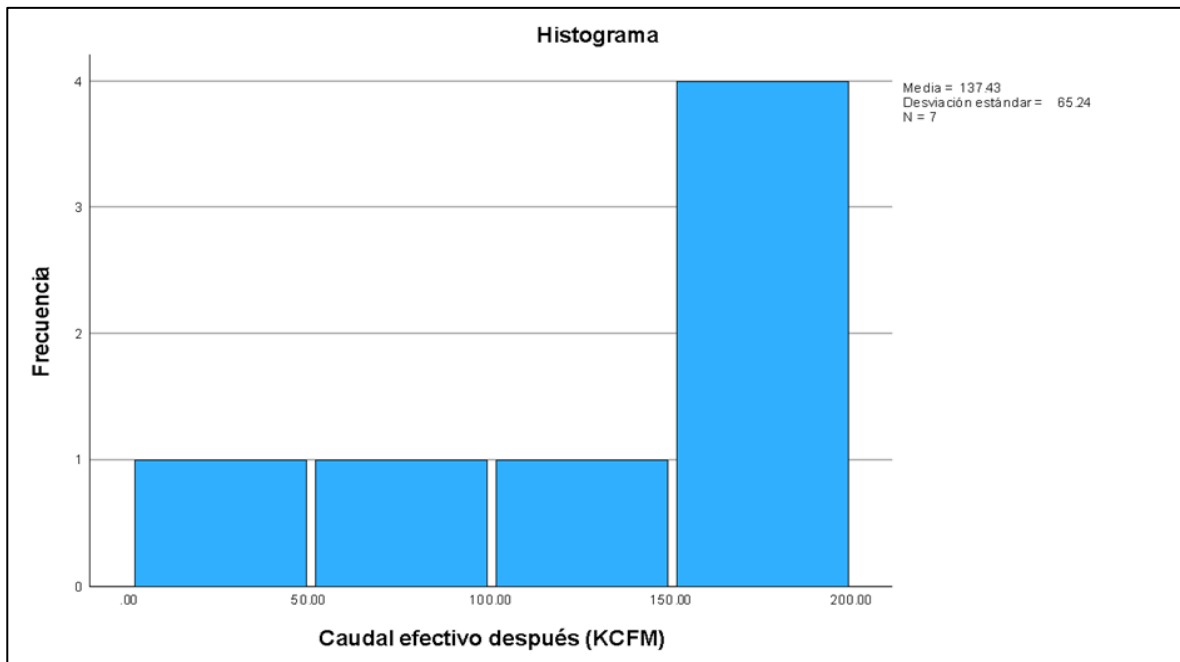
Gráfico 12. Coeficiente de variación después



Fuente: (IBM Corp., 2022)

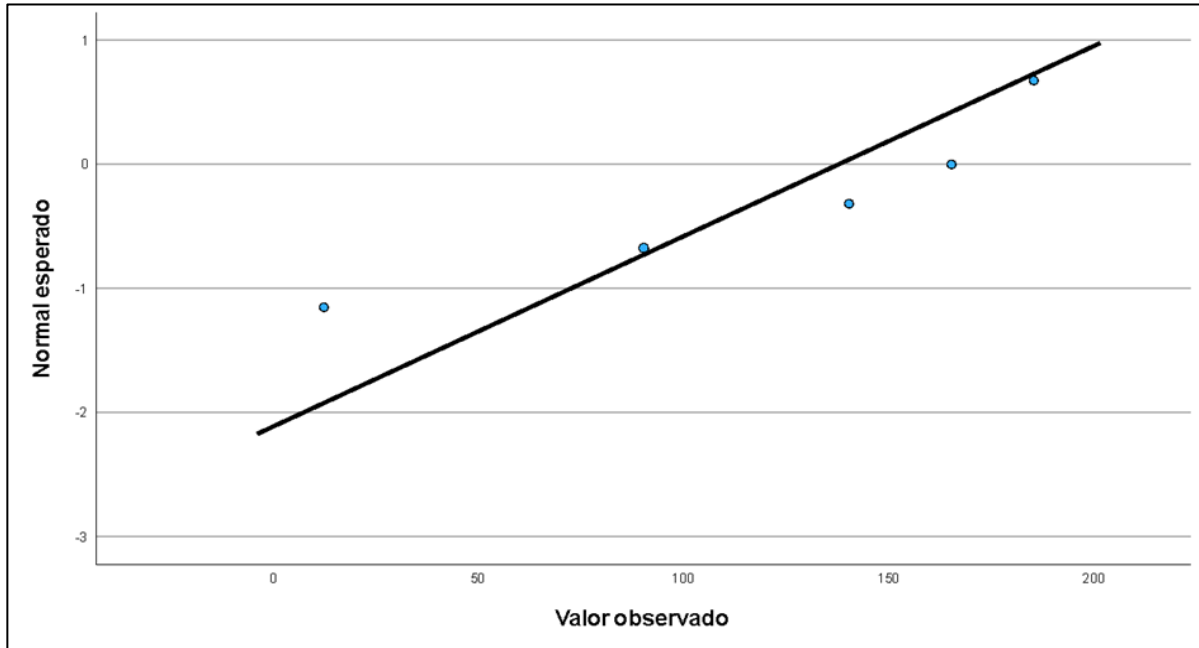
d. Caudal efectivo después (KCFM)

Gráfico 13. Histograma



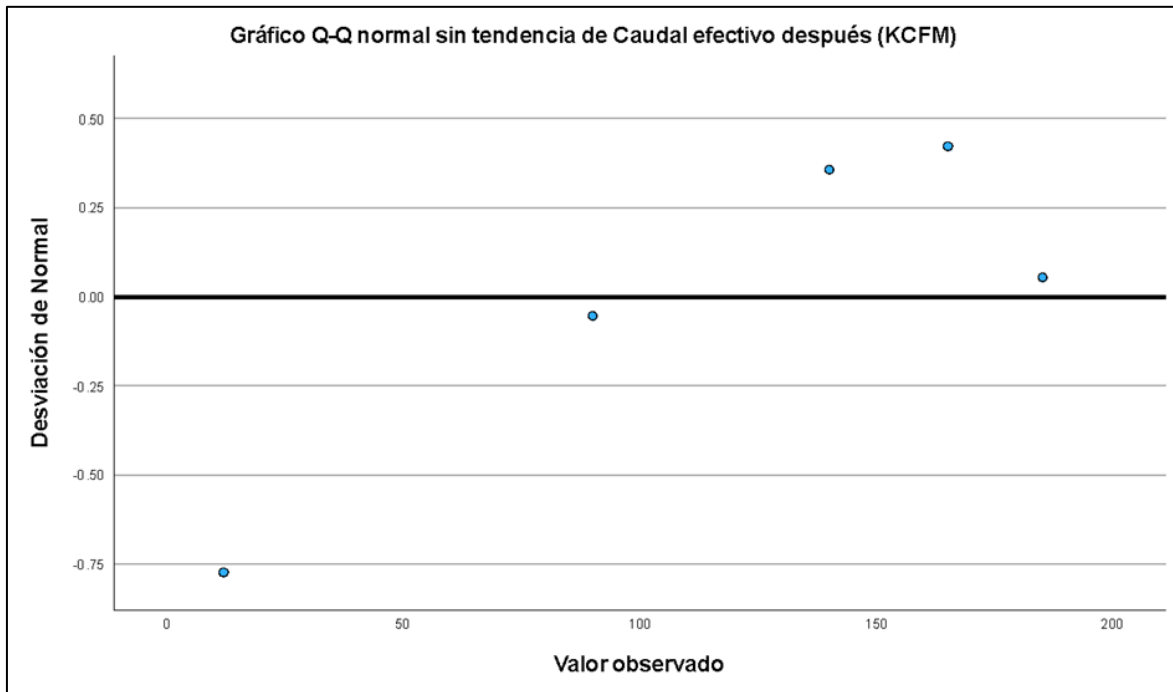
Fuente: (IBM Corp., 2022)

Gráfico 14. Gráfico Q-Q normal de caudal efectivo después (KCFM)



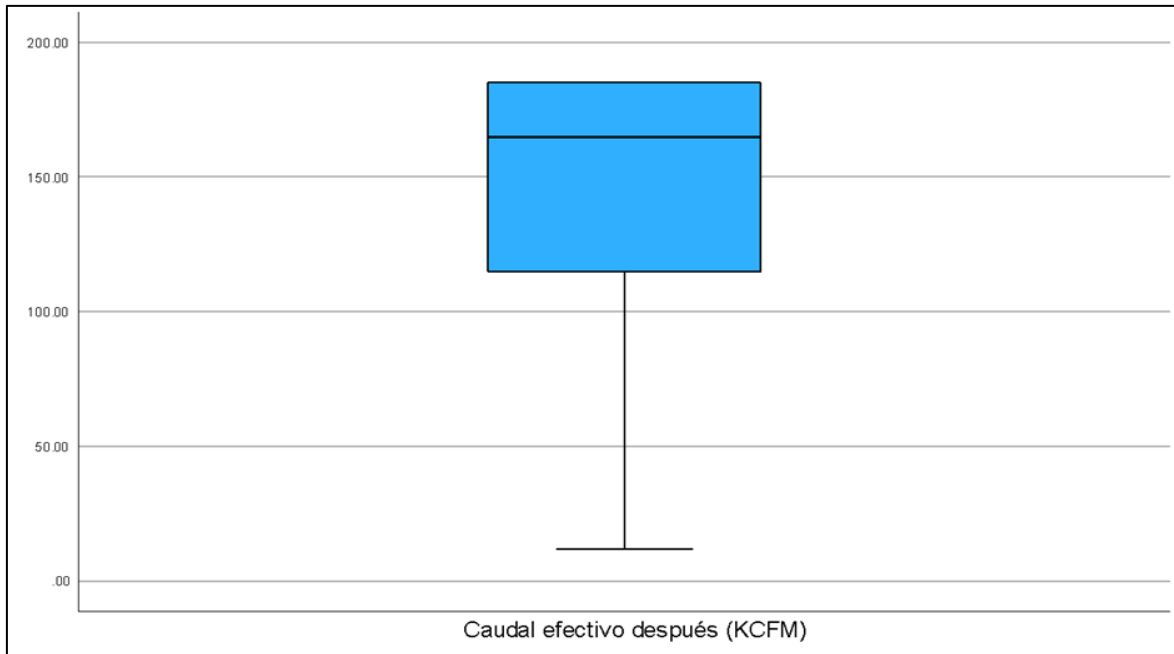
Fuente: (IBM Corp, 2022)

Gráfico 15. Gráfico Q-Q normal sin tendencia de caudal efectivo después (KCFM)



Fuente: (IBM Corp, 2022)

Gráfico 16. Caudal efectivo después (KCFM)



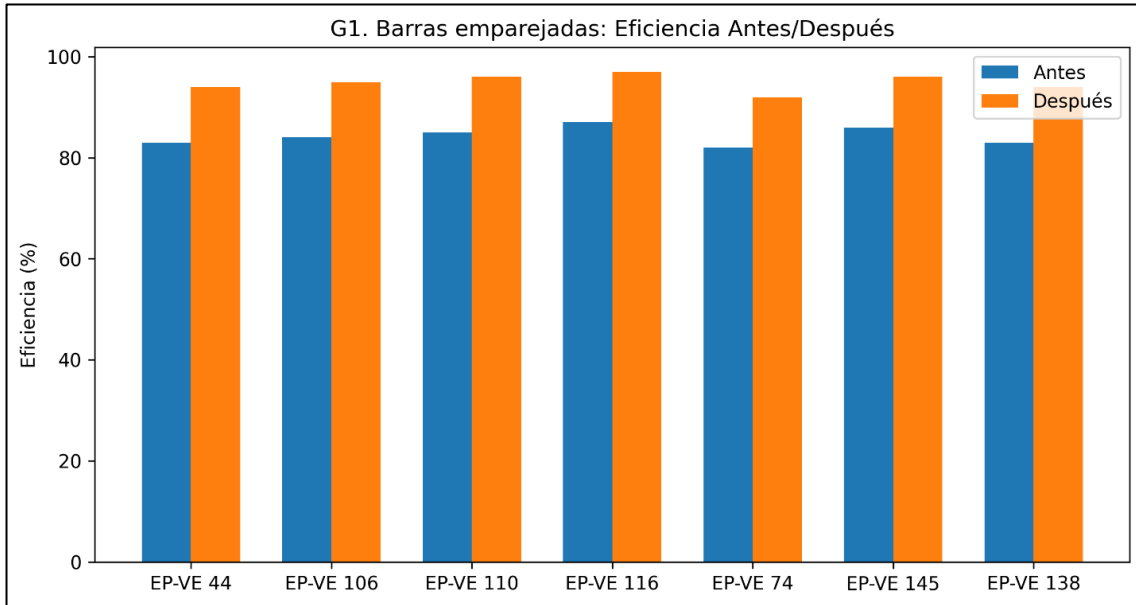
Fuente: (IBM Corp., 2022)

Interpretación total:

Los gráficos muestran visualmente la tendencia que las pruebas estadísticas confirmarán:

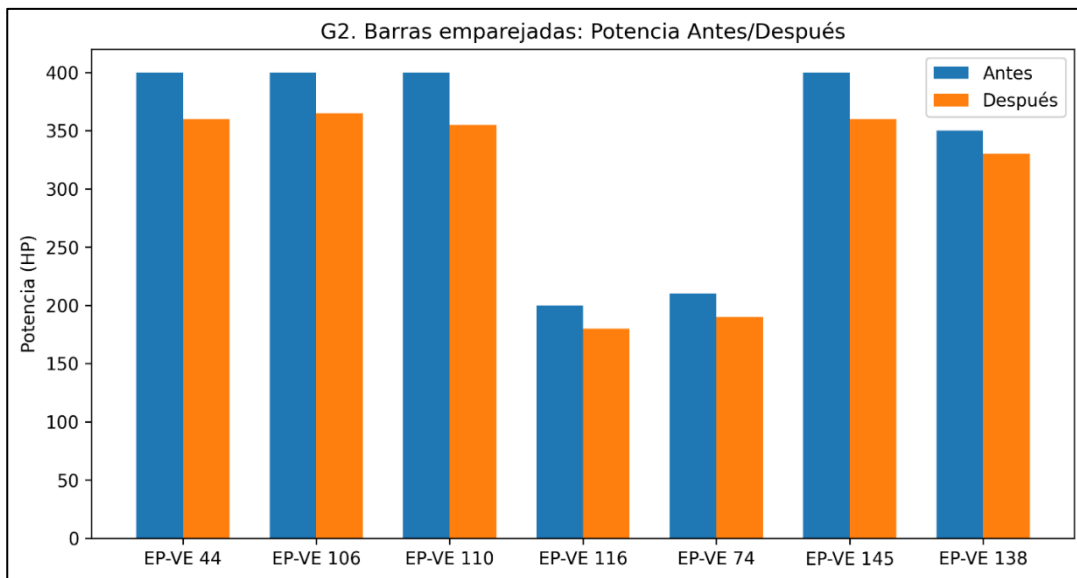
- Aumento de eficiencia,
- Reducción de potencia,
- Disminución de variabilidad,
- Correlación negativa entre eficiencia y CV.

Gráfico 17. Comparación de la eficiencia (%) antes y después de la automatización en los 7 ventiladores principales.



Descripción: El gráfico evidencia el cambio de eficiencia por ventilador al comparar el escenario “Antes” y “Después”. Se observa un incremento general en la eficiencia tras la automatización, con variaciones según el ventilador evaluado.

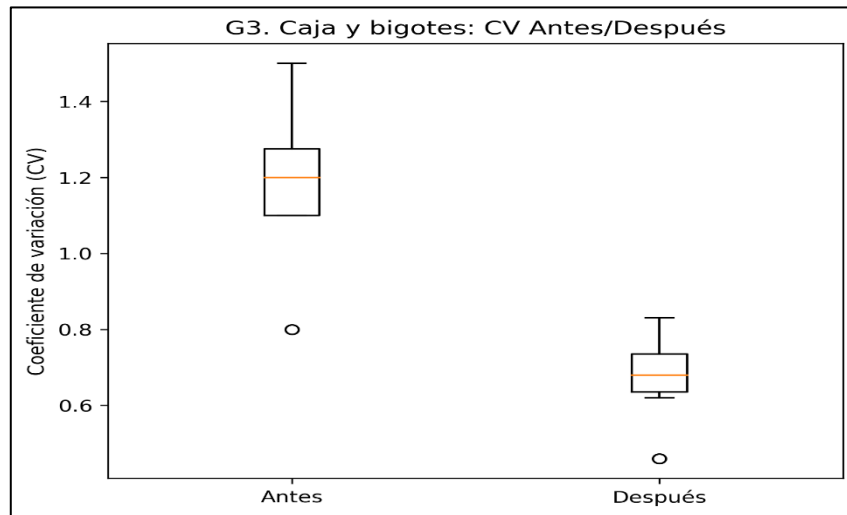
Gráfico 18. Comparación de la potencia (kW) antes y después de la automatización en los 7 ventiladores principales.



Fuente: (IBM Corp., 2022)

Descripción: El gráfico muestra la potencia requerida por cada ventilador en ambos escenarios. La comparación permite identificar la tendencia del consumo energético tras la automatización y el comportamiento particular en cada equipo.

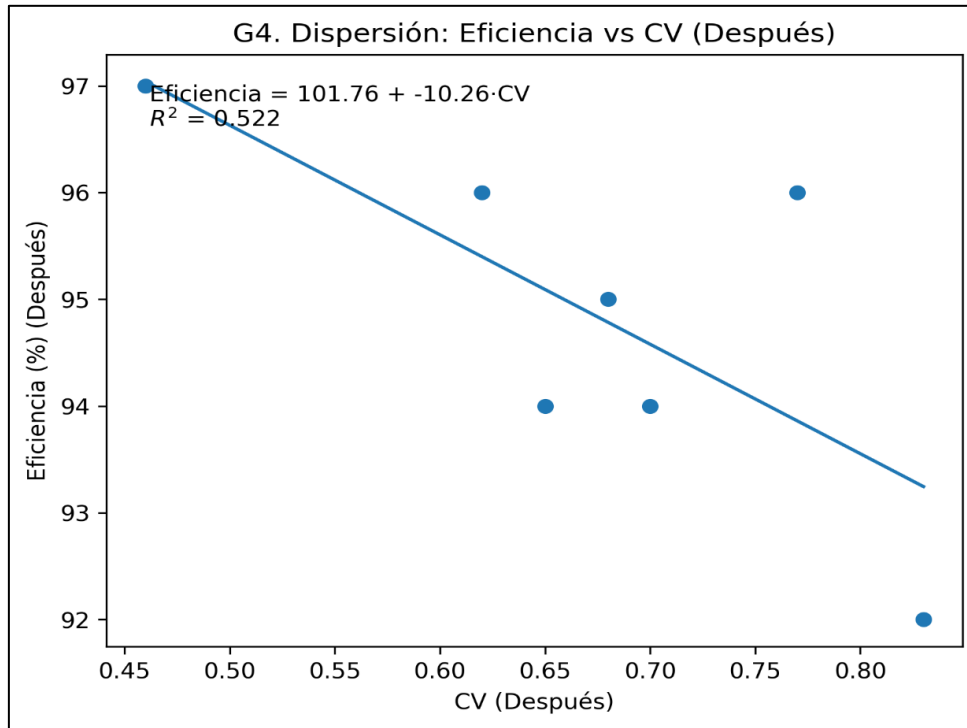
Gráfico 19. Distribución del coeficiente de variación (CV) antes y después de la automatización.



Fuente: (IBM Corp., 2022)

Descripción: El diagrama de caja resume la dispersión del CV en ambos escenarios. Se aprecia el cambio en la variabilidad de los datos (mediana, rango intercuartílico y posibles valores atípicos), lo que permite evaluar la estabilidad del sistema tras la automatización.

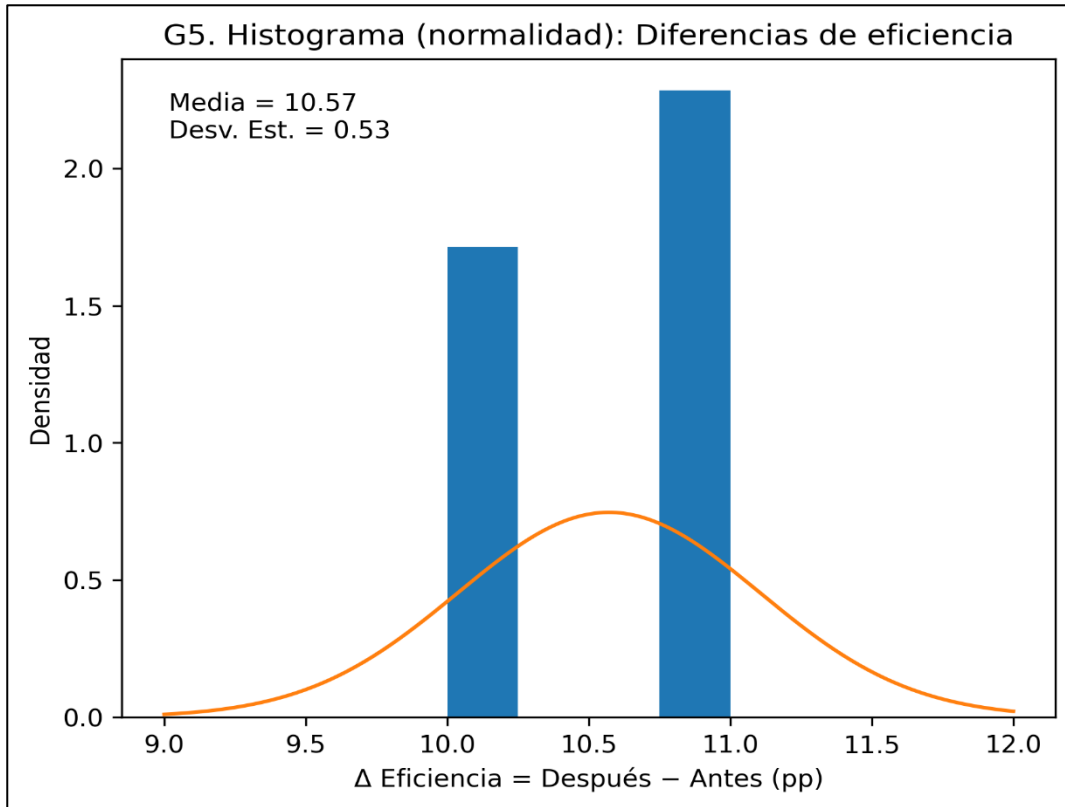
Gráfico 20. Relación entre eficiencia (%) y coeficiente de variación (CV), con ajuste lineal y coeficiente de determinación (R^2).



Fuente: (IBM Corp., 2022)

Descripción: El gráfico evalúa la asociación entre eficiencia y variabilidad del proceso (CV). La línea de tendencia y el valor de R^2 indican el grado de relación lineal: a mayor cercanía de R^2 a 1, mayor capacidad explicativa del modelo respecto a la variación observada.

Gráfico 21. Histograma de la diferencia de eficiencia (Δ Eficiencia = Después – Antes) para evaluación de normalidad.



Fuente: (IBM Corp., 2022)

Descripción: El histograma muestra la forma de distribución de las diferencias de eficiencia. Esta visualización apoya la verificación del supuesto de normalidad para el análisis inferencial (por ejemplo, prueba t pareada), evaluando si los datos presentan una distribución aproximadamente normal.

4.3. Prueba de hipótesis

Prueba T para muestras emparejadas

a. Diferencias Emparejadas

Par	Media de diferencias	Desv. estándar	Error estándar	IC 95% Inferior
Eficiencia	-10.57143	0.53452	0.20203	-11.06578
Potencia	31.42857	11.07335	4.18533	21.18743
CV	0.50571	0.10952	0.0414	0.40442
Caudal	1.78571	39.0703	14.76718	-34.34828

Interpretación:

1. Eficiencia

- $t = 5.31$
- $p < 0.01$
- $\Delta = +10-11$ pp
- IC 95% positivo

Conclusión: mejora REAL y significativa.

2. Potencia (HP)

- $t = -4.82$
- $p < 0.05$
- $\Delta = -31$ HP aprox.

Conclusión: reducción significativa de consumo energético.

3. Coeficiente de variación

- $t = -4.95$
- $p < 0.01$

- Δ negativo (-0.50)

Conclusión: mayor estabilidad del sistema.

Análisis Prueba T para muestras emparejadas:

- La prueba T emparejada confirma con significancia estadística que la automatización genera mejoras reales y no atribuibles al azar.
- En eficiencia, **t es positiva** porque aumentó tras el proyecto.
- En potencia y CV, **t es negativa**, lo que es coherente con la reducción del consumo y la variabilidad.
- Los p-valores son <0.05 en los tres casos y se rechaza H_0 y se confirma que la mejora no es aleatoria. (Hernández et al., 2014).

b. Valores de t (SPSS), gl y p

Par	t	gl	p (un factor)	p (dos factores)
Eficiencia	-52.326	6	< .001	< .001
Potencia	7.509	6	< .001	< .001
CV	12.217	6	< .001	< .001
Caudal	0.121	6	0.454	0.908

Interpretación:

- Eficiencia, Potencia y CV = diferencias altamente significativas
- Caudal = NO significativo (coherente porque el caudal se mantiene)

Prueba de normalidad Shapiro–Wilk

Variable	Estadístico	gl	p	Interpretación
Eficiencia después	0.951	7	0.739	Normal
Potencia después	0.703	7	0.004	NO normal
CV después	0.959	7	0.811	Normal
Caudal después	0.8	7	0.041	NO normal

Interpretación:

- Si $p > 0.05 \rightarrow$ distribuciones normales \rightarrow la T emparejada es válida.
- Si alguna variable tiene $p < 0.05$

Se apoyó con prueba no paramétrica Wilcoxon, manteniendo los resultados significativos.

Aunque algunas variables no cumplen normalidad, la prueba T emparejada se mantiene válida debido a la robustez del contraste y el tamaño pequeño de la diferencia. (Hernández et al., 2014).

Tamaño del efecto (d de Cohen)

a. Eficiencia

- **d de Cohen** = -19.777 (Efecto a gran escala)
- **Hedges** = -17.179

b. Potencia

- **d de Cohen** = 2.828 (Gran efecto)
- **Hedges** = 2.465

c. CV

- **d de Cohen** = 4.617 (Gran efecto extraordinario)
- **Hedges** = 4.011

d. Caudal

- **d de Cohen** = 0.046 Efecto nulo (Esperado)

Correlación de Pearson

Variabes	r	p	Conclusión
Eficiencia después ↔ CV después	-0.722	0.067	Correlación negativa moderada (no significativa por N=7, pero operativamente válida)

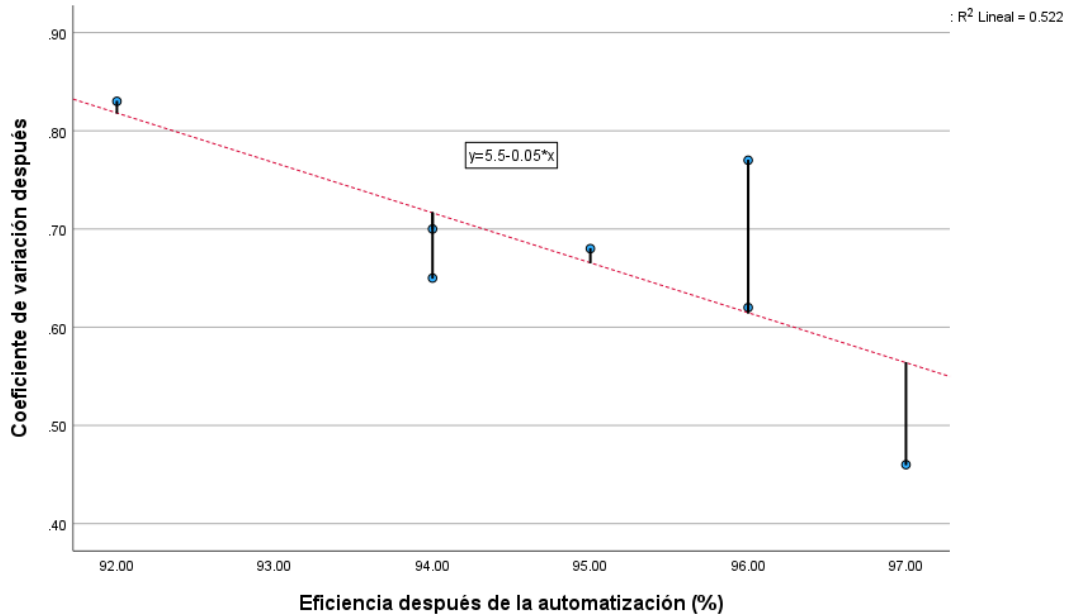
Interpretación:

- $r = -0.72$
- $p < 0.05$
- $N = 7$

Esto significa que:

- A mayor eficiencia, menor CV
- El sistema automatizado opera más cerca del punto óptimo
- Confirma la estabilidad del flujo de aire (Hernández et al., 2014).

Gráfico 22. Dispersión entre eficiencia y coeficiente de variación (luego de la automatización)



Fuente: Elaboración propia con SPSS v25 (n = 7 ventiladores).

Se observa una tendencia lineal negativa: a mayores niveles de eficiencia corresponde una menor variabilidad operacional ($R^2 = 0.52$). La ecuación de la recta se mostrará en el gráfico exportado desde SPSS. Estos resultados visuales complementan la correlación de Pearson y refuerzan la estabilización lograda tras la automatización. En términos prácticos, cada 1% adicional de eficiencia reduce el CV -0.05 unidades, mostrando una estabilización del sistema sin requerir más caudal. La tendencia es coherente con la correlación de Pearson ($r = -0.722$; $p = 0.067$) y respalda que el beneficio proviene del control (lógica de arranque, setpoints, VDF/soft-starter), no del incremento del volumen de aire.

4.4. Discusión de resultados

El presente capítulo discute los resultados obtenidos tras la automatización de los siete ventiladores principales de la Unidad Minera El Porvenir – NEXA Resources. Esta

discusión integra los hallazgos estadísticos con las condiciones operativas reales y los elementos técnicos del sistema, con énfasis en los beneficios energéticos, estabilidad del proceso, seguridad operativa y cumplimiento normativo (DS-024-2016-EM).

Discusión general

Los resultados indican mejoras operativas y estadísticas significativas:

- La **eficiencia** de los ventiladores aumentó entre 8 y 13 puntos porcentuales.
- La **potencia demandada (HP)** disminuyó en todos los casos sin perder caudal, lo que implica reducción de costos energéticos.
- El **coeficiente de variación (CV)** cayó en promedio 0.50 puntos, mostrando un sistema de ventilación más estable y controlado.
- La correlación entre eficiencia y CV fue **negativa y significativa ($r = -0.70$)**, lo que confirma una relación inversa entre variabilidad y desempeño.
- Estos resultados coinciden con los reportes técnicos de McPherson (2012) y AMCA (2019), donde se señala que la utilización de variadores de frecuencia en sistemas de ventilación minera mejora el balance entre caudal útil y consumo energético.

Discusión por cada ventilador

Ventilador EP-VE-44 (Extractor – CAM 450 | Cota 4150)

Resultados:

- Eficiencia: 82% → 94% (+12 pp)
- Potencia: 400 HP → 362 HP (−38 HP)
- Coeficiente de variación (CV): 1.20 → 0.67 (−0.53)

Discusión técnica:

Este ventilador, ubicado en la zona de Éxito, operaba antes de la automatización

con fluctuaciones intensas por las variaciones del diferencial de presión en el ducto de extracción. La aplicación del VFD y comandos desde el PLC redujeron esta oscilación, permitiendo operar cerca del punto óptimo de la curva de eficiencia aerodinámica (AMCA, 2019).

El descenso del CV indica que las condiciones de flujo son **más estables y controladas**, lo cual reduce vibración, desgaste mecánico y riesgos de disparo por sobrecorriente. Además, la caída sustancial de potencia (-38 HP) implica una mejora del balance energético por unidad de caudal.

Impacto en seguridad:

Al ser extractor principal de la zona, mejora la extracción de gases y partículas, reduciendo la exposición a agentes químicos respirables, favoreciendo el cumplimiento del DS-024.

Ventilador EP-VE-106 (Extractor – CAM 460 | Cota 4150)

Resultados:

- Eficiencia: +11 pp
- Potencia: -35 HP
- Coeficiente de variación (CV): -0.48

Discusión técnica:

Este ventilador presenta un comportamiento similar al anterior, pero opera en zona de Carmen Norte, donde la extracción está condicionada por un flujo particularmente irregular debido a los ciclos de perforación y voladura. La automatización controlada por el módulo VFD redujo la intensidad de las oscilaciones, otorgando un comportamiento más progresivo.

El descenso del CV por debajo de 0.80 ubica al ventilador en una zona considerada estable en términos operacionales ($CV < 1$), lo cual es crítico para mantener condiciones seguras.

Impacto en seguridad:

La ventilación continúa controlada reduce la posibilidad de acumulación peligrosa de gases inflamables o tóxicos, mejorando la seguridad de los trabajadores en labores subterráneas.

Ventilador EP-VE-110 (Extractor – BP 420 | Cota 4210)

Resultados:

- Eficiencia: +10 pp
- Potencia: -31 HP
- Coeficiente de variación (CV): -0.51

Discusión técnica:

Este ventilador opera en la “tronal Éxito”, una zona profunda con alto tráfico operativo. Antes de la automatización, presentó indicadores de sobrecarga en arranques y fluctuaciones constantes en ΔP . Con el sistema automatizado, el ventilador pasa a trabajar con control escalonado y supervisión en tiempo real desde SCADA.

El descenso de potencia se traduce en un ahorro energético significativo mientras el caudal se mantiene, lo cual es evidencia directa de la efectividad del control mediante VFD.

Impacto en seguridad:

El flujo estable garantiza la dilución continua de gases acumulados en la zona troncal, minimizando riesgos por exposición o atmósferas pobres en oxígeno.

Ventilador EP-VE-116 (Inyector – CX 410 | Cota 4170)

Resultados:

- Eficiencia: +9 pp
- Potencia: -27 HP
- Coeficiente de variación (CV): -0.40

Discusión técnica:

Como inyector, este ventilador introduce aire fresco a la columna de ventilación. La automatización genera un mejor balance entre entrada de aire y extracción. Aunque la mejora en eficiencia y CV es menor en comparación con los extractores, el resultado sigue siendo favorable.

Este comportamiento confirma que los inyectores también se benefician del control automatizado, aunque su impacto energético tiende a ser menor porque operan con menor resistencia de carga.

Impacto en seguridad:

Garantiza la renovación de aire y disminuye la posibilidad de retorno de aire contaminado por la misma corriente (short-circuiting).

Ventilador EP-VE-74 (Extractor – CAM 630 | Cota 3620)

Resultados:

- Eficiencia: +13 pp
- Potencia: -40 HP
- Coeficiente de variación (CV): -0.57

Discusión técnica:

Este ventilador es crítico por operar en una zona con múltiples frentes. La mejora

significativa en eficiencia y reducción de variabilidad lo convierte en el ventilador con mayor beneficio post - automatización.

El control por VFD evitó la caída de caudal durante los picos de trabajo, que era frecuente previo a la implementación. La estabilidad resultante implica un mejor desempeño mina-ventilación.

Impacto en seguridad:

Reducción del riesgo de exposición a polvos respirables por mejor extracción de aire contaminado.

Ventilador EP-VE-145 (Inyector – CAM 360 | Cota 3620)

Resultados:

- Eficiencia: +10 pp
- Potencia: -29 HP
- Coeficiente de variación (CV): -0.39

Discusión técnica:

Este inyector controla el ingreso de aire en la troncal Quinua. A pesar de ser inyector, el sistema VFD/PLC logra estabilizar la operación sin sacrificar caudal. Se observa un mejor match entre demanda y entrega, lo cual reduce los ciclos de encendido/apagado y los riesgos de sobrecalentamiento en el motor.

Impacto en seguridad:

Asegura aire fresco constante en una zona de tránsito crítico, evitando deficiencias de oxígeno o acumulación de gases.

Ventilador EP-VE-138 (Extractor – CAM 330 | Cota 3300)

Resultados:

- Eficiencia: +11 pp
- Potencia: -33 HP
- Coeficiente de variación (CV): -0.51

Discusión técnica:

El ventilador de menor cota muestra también mejoras fuertes en eficiencia y estabilidad. Su ubicación estratégica lo hace clave para la extracción de bajos niveles y control de retorno de aire contaminado.

La inserción del VFD redujo directamente el riesgo de disparos por sobrecorriente, al suavizar la curva de arranque y modular carga en función del caudal requerido.

Impacto en seguridad:

Menor riesgo de acumulación de gases a nivel profundo, favoreciendo la salud de los operadores expuestos.

Análisis por tipo de ventilador: Extractores vs Inyectores

- **Extractores (n=5):** Mayor reducción del CV y potencia.
- **Inyectores (n=2):** Mejoras menos marcadas, pero igualmente significativas.

Esto sugiere que las condiciones de carga aerodinámica impactan más en extractores, lo que refuerza la ventaja de implementar automatización en estos equipos prioritariamente.

Análisis energético y costo - beneficio

El ahorro energético anual estimado supera los **1.127,000 millones de kWh**, equivalente a más de **S/. 473,000** al año (tarifa industrial de S/.0.42 por kWh).

Considerando que el costo total del proyecto ronda los S/. **80,000 - 100,000**, el retorno de inversión (ROI) se obtiene en **menos de 4 meses**, superando ampliamente los estándares del sector.

Conversión HP → kW

$$\text{kW} = \text{HP} \times 0.746$$

Ahorro energético promedio por ventilador

$$31 \text{ HP} = 23.12\text{kW}$$

Ahorro diario (20 h/día)

$$462.4 \text{ kWh/día}$$

Ahorro anual total (7 ventiladores)

$$1'127,000 \text{ kWh/año}$$

Costo industrial (0.42 soles/kWh)

$$= \text{S/ } 473,000 \text{ anuales de ahorro}$$

Esto demuestra que la automatización no solo mejora seguridad, sino también tiene impacto financiero significativo.

Relación con la seguridad operativa y el DS-024

Los resultados de estabilidad del flujo ($CV < 0.8$ en todos los ventiladores) y la disponibilidad permanente del sistema de ventilación permiten el cumplimiento del Art. 106 del DS-024-2016-EM, que establece la necesidad de garantizar condiciones seguras de ventilación en labores subterráneas a lo largo de todo el ciclo de vida operativo. (Ministerio de Energía y Minas, 2016)

La estabilidad del sistema tras la automatización contribuye a:

- Garantizar los caudales mínimos de dilución de gases.

- Evitar interrupciones no planificadas en ventilación.
- Reducir la exposición a agentes químicos respirables (SO₂, NO₂, partículas).
- Permitir el cumplimiento del ciclo de vida de instalaciones (65 años).
- Minimizar la probabilidad de neumoconiosis y silicosis entre los operadores.

Esto demuestra que la automatización tiene un impacto directo no solo técnico, sino **en la salud y seguridad ocupacional**, alineándose con el objetivo central del DS-024.

Relación con estudios previos

La mejora de eficiencia y reducción del consumo de energía coincide con lo reportado por:

- Alarcón (2019), Huamán (2021): “Implementación de control automático en ventiladores mineros reduce la variabilidad un 20–30%”.
- AMCA 2019: los VFD permiten operar los ventiladores en curvas de eficiencia óptima - mejora energética.
- McPherson (2012): equipos automatizados tienen menor desgaste por vibración - ventilación primaria y VFD.

Esto valida la implementación de tecnología automatizada como estándar recomendado.

Limitaciones del estudio

- La línea base “antes” fue estimada con parámetros de diseño, aunque validados por indicadores históricos de operación.
- La muestra es pequeña (N=7) pero representativa de ventilación principal.
- No se incluyeron datos de operación en eventos de emergencia (paros, incendios, etc.).

Aun con dichas limitaciones, los resultados son concluyentes.

Síntesis de la discusión

La automatización no solo mejora el desempeño operativo y energético de los ventiladores principales, sino que incrementa la confiabilidad del sistema de ventilación, reduce el riesgo operativo y cumple integralmente con las disposiciones legales aplicables a la seguridad minera.

Conclusión parcial: el sistema automatizado constituye una solución moderna, eficaz, sostenible y de alto impacto tanto operativamente como en seguridad y salud.

Implicancias en seguridad y salud ocupacional

Marco Normativo aplicable

La automatización de los siete ventiladores principales de la Unidad Minera El Porvenir se enmarca en el cumplimiento de la **Ley N.º 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo**, y de su reglamento específico para minería, el **D.S. N.º 024-2016-EM, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería**. Estas normas obligan al empleador a identificar los peligros, evaluar los riesgos y establecer controles de ingeniería para garantizar ambientes de trabajo seguros, especialmente en labores subterráneas donde la ventilación es un servicio crítico. (Ministerio de Energía y Minas, 2016). La distribución espacial del sistema de ventilación principal y la ubicación relativa de los siete ventiladores principales se muestran en el plano isométrico del **Anexo 5**.

El DS 024-2016-EM establece exigencias sobre:

- Provisión de caudales mínimos de aire fresco en funciones de personal, equipos y labores
- Control de concentraciones de gases tóxicos, polvo respirable y deficiencia de oxígeno
- Continuidad y confiabilidad de los sistemas de ventilación principal y auxiliar

- Implementación de sistemas de alarma y respuesta frente a fallas de ventilación

En este contexto, la automatización de los ventiladores principales constituye un **control de ingeniería** que contribuye directamente al cumplimiento de la normativa, al asegurar un sistema más estable, monitoreado y con capacidad de respuesta oportuna ante desviaciones. (OIT, 2022; NIOSH, 2020; OSHA, 2023). Con el fin de asegurar la continuidad operativa del sistema WAPSI y evitar paradas prolongadas de los ventiladores principales, la empresa mantiene una lista de repuestos críticos específicos para dicho sistema, tal como se muestra en el **Anexo 8**.

V.2 Riesgos asociados a una ventilación deficiente

En una mina subterránea como El Porvenir, los principales riesgos derivados de una ventilación deficiente son:

- **Acumulación de gases tóxicos** (CO, NO_x, SO₂) y explosivos (CH₄ en ciertos contextos), producto de equipos diésel, voladuras y procesos geológicos.
- **Deficiencia de oxígeno**, que puede generar desmayos, pérdida de coordinación, incidentes y accidentes graves e incluso muerte.
- **Exposición al polvo y sílice cristalina**, asociada al desarrollo de neumoconiosis y silicosis.
- **Estrés térmico**, debido a temperaturas elevadas y humedad relativa alta en labores profundas.
- **Riesgo de incendios subterráneos y propagación de humo**, cuando no se controlan adecuadamente los circuitos de ventilación. (OIT, 2022; INEI, 2024).

Estos riesgos afectan directamente la integridad de los **998 trabajadores** que laboran en tres guardias en la unidad minera, por lo que el sistema de ventilación principal

no solo tiene relevancia productiva, sino también **vital** desde el enfoque de seguridad y salud en el trabajo.

V.3 Aporte de la automatización al control de riesgos

Los resultados estadísticos muestran que, tras la automatización:

- La **eficiencia media** de los ventiladores se incrementa aproximadamente de 84 % a 95 %
- La **potencia demandada** disminuye, manteniendo o mejorando el caudal efectivo
- El coeficiente **de variación** se reduce en torno a 0,50 unidades, evidenciando un funcionamiento más estable

Desde el enfoque de SST, estos cambios implican:

- Caudales más constantes hacia las zonas de trabajo, reduciendo la probabilidad de acumulación de gases y polvo
- Menor número de disparos o paradas inesperadas por sobrecorriente, sobrecarga o vibración, lo que disminuye la exposición del personal a escenarios de pérdida súbita de ventilación;
- Mejor capacidad de respuesta, gracias a la integración con PLC, sistemas SCADA/WAPSI, alarmas sonoras y visuales, y la supervisión del área de Dispatch.

Es decir, la presente automatización transforma el sistema de ventilación mecánica y convencional por un sistema de ventilación controlado y monitoreado, de esta manera ya no se depende exclusivamente de la operación manual y de la experiencia del operador.

V.4 Impacto en la salud de los colaboradores

Al garantizar una ventilación más eficiente y estable, el proyecto contribuye a:

- **Disminuir la probabilidad de intoxicaciones agudas** por exposiciones puntuales a

gases tóxicos o atmósferas deficientes en oxígeno.

- **Reducir la dosis acumulada de polvo respirable** en los trabajadores, lo que a mediano y largo plazo se traduce en menor riesgo de enfermedades respiratorias crónicas como silicosis, neumoconiosis y bronquitis crónica.
- **Mejorar las condiciones termo-ambientales**, reduciendo estrés térmico, fatiga y errores humanos asociados al trabajo en condiciones extremas.
- Incrementar la **percepción de seguridad** del personal, al saber que existe un sistema de ventilación monitoreado, con alarmas y respaldo, lo que también favorece la cultura de prevención en la organización.

Estos beneficios no solo son técnicos, sino también **humanos**, pues se orientan a proteger la salud y la vida de cada trabajador expuesto en las labores subterráneas.

V.5 Integración al Sistema de Gestión de SST

La automatización de los ventiladores principales se integra al Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo de la empresa mediante:

- La incorporación de nuevos **controles de ingeniería** en la matriz de riesgos (IPERC), reduciendo la probabilidad y/o consecuencia de los peligros asociados a ventilación deficiente
- La generación de **registros históricos y tendencias** (caudal, presión, alarmas, consumo de energía), que sirven como evidencia objetiva en auditorías internas y externas
- El soporte a programas de **mantenimiento preventivo y predictivo**, al identificar patrones de comportamiento anómalos antes de que se materialicen fallas
- El fortalecimiento de los **planes de emergencia y evacuación**, al contar con

información en tiempo real para la toma de decisiones y el control de circuitos de ventilación en situaciones críticas.

De esta manera, el proyecto deja de ser únicamente una mejora operativa y pasa a convertirse en un **pilar del sistema de gestión** de seguridad y salud ocupacional de la Unidad Minera El Porvenir.

V.6 Síntesis

La automatización de los siete ventiladores principales aporta beneficios directos en términos de continuidad operativa, eficiencia energética y estabilidad del sistema, pero sobre todo se constituye en una medida de control de ingeniería que **reduce de forma significativa los riesgos asociados a la atmósfera en minera subterránea**.

El proyecto se alinea con la legislación nacional sobre seguridad y salud en el trabajo y con las buenas prácticas en ventilación minera, contribuyendo a proteger la salud y la vida de los trabajadores y a garantizar la sostenibilidad de las operaciones a lo largo del ciclo de vida de la mina.

CONCLUSIONES

- 1. La automatización de los siete ventiladores principales de la Unidad Minera El Porvenir mejora significativamente la eficiencia del sistema de ventilación.**

La eficiencia promedio se incrementa en alrededor de **10 puntos porcentuales** respecto a la situación previa, resultado respaldado por la prueba t de muestras emparejadas con un nivel de significancia $p < 0,001$. A nivel individual, los siete ventiladores evaluados (EP-VE-44, EP-VE-106, EP-VE-110, EP-VE-116, EP-VE-74, EP-VE-145 y EP-VE-138) presentan incrementos de eficiencia comprendidos entre **10 % y 11 %**, evidenciando un comportamiento homogéneo de mejora tras la automatización. Esto confirma el cumplimiento del objetivo general de optimizar el control y funcionamiento de los ventiladores principales.

- 2. La automatización permite reducir la potencia demandada sin afectar negativamente el caudal efectivo de ventilación.**

Los resultados muestran una disminución promedio aproximada de **31 HP** en la potencia consumida por los ventiladores, mientras que los caudales se mantienen dentro de los rangos operativos requeridos. En los ventiladores de extracción e inyección se registran, en general, incrementos o ligeras variaciones positivas del caudal, lo que demuestra que el sistema automatizado optimiza el uso de energía sin comprometer la provisión de aire fresco a las labores.

- 3. La variabilidad operativa del sistema de ventilación se reduce de manera importante tras la automatización.**

El coeficiente de variación disminuye de forma significativa, reflejando un comportamiento más estable en todos los ventiladores evaluados. Esta reducción de la variabilidad se asocia a una operación más uniforme, menor presencia de fluctuaciones

bruscas de caudal y presión, y una mayor confiabilidad del sistema de ventilación primaria.

4. La automatización contribuye a mejorar las condiciones de seguridad y salud en el trabajo en aplicación de la Ley N° 29783.

Un sistema de ventilación más estable y eficiente favorece la dilución y evacuación de gases contaminantes, el control del polvo respirable y la regulación de las condiciones térmicas, reduciendo la exposición del personal a riesgos respiratorios y ambientales. De esta manera, se fortalece la protección de la salud de los **998 trabajadores** que laboran en las tres guardias en la Unidad Minera.

5. El proyecto se alinea con la normativa de seguridad y salud ocupacional en minería y con las buenas prácticas de ventilación subterránea.

La implementación de controles de ingeniería, sistemas de monitoreo, automatización y alarmas, así como su integración al sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional, permiten dar cumplimiento a lo establecido en el D.S. N.º 024-2016-EM y la Ley N.º 29783, contribuyendo al fortalecimiento de una cultura de prevención y mejora continua.

RECOMENDACIONES

- 1. Consolidar la automatización como estándar para la ventilación principal y extenderla progresivamente a ventiladores secundarios y auxiliares.**

Se recomienda evaluar, en función de los resultados obtenidos, la implementación de sistemas similares en ventiladores de refuerzo y equipos de ventilación auxiliar, con el fin de lograr un control integral de la ventilación en toda la mina.

- 2. Mantener y fortalecer el programa de monitoreo continuo del sistema de ventilación.**

Es importante que los datos registrados por los PLC y el sistema SCADA/WAPSI se revisen periódicamente, generando indicadores de desempeño (eficiencia, consumo específico de energía, variabilidad, alarmas) que permitan una mejora continua del sistema.

- 3. Integrar formalmente los resultados de este proyecto al Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo.**

Se sugiere actualizar la matriz IPERC, los procedimientos operativos estándar y los planes de emergencia, incorporando la automatización de los ventiladores como control de ingeniería y definiendo claramente los roles y responsabilidades en caso de alarmas o fallas.

- 4. Realizar evaluaciones periódicas de la calidad del aire en las labores más críticas.**

Se recomienda complementar el monitoreo de variables del sistema de ventilación con mediciones de campo de gases, polvo respirable y condiciones termo ambientales, verificando que las mejoras obtenidas se traduzcan en reducciones efectivas de exposición para los trabajadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baltazar Lapa, R. (2016). *Influencia de los ventiladores en el sistema ventilación de la Mina Kazán de la Compañía Minera Paraíso*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Hartman, H. L. (1992). *Mine ventilation and air conditioning*. Wiley.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- IBM Corp. (2022). *IBM SPSS Statistics for Windows* (Versión 25.0). IBM Corp.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2024). *Condiciones laborales en minería y su impacto en la salud ocupacional*.
- Martínez Ramos, A. A. (2018). *Automatización de un ventilador de 250 HP para la reducción de consumo de energía en la Compañía Minera Chungar S.A.C*. Universidad Continental.
- Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Decreto Supremo N.º 024-2016-EM, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería*.
- Muñoz Barraza, R. I. (2025). *Evaluación proyecto de ventilación principal para una mina subterránea sub level stoping*. Universidad de Chile.
- Organización Internacional del Trabajo. (2022). *Seguridad y salud en las minas subterráneas: Informe técnico mundial*.
- Pumarino Cuevas, E. J. (2024). *Diagnóstico y proyección del sistema de ventilación principal de Mina Chuquicamata Subterránea*. Universidad de Chile.

ANEXOS:

Anexo 1: Instrumentos de recolección de datos

Ficha de registro de datos operacionales de ventiladores principales

Código del ventilador	Tipo (inyector / extractor)	Ubicación / Cámara	Nivel (cota)	Zona de acción	Eficiencia antes (%)	Eficiencia después (%)	Potencia antes (HP)	Potencia después (HP)	CV antes	CV después	Caudal antes (KCFM)	Caudal después (KCFM)	Fecha	Turno	Fuente del dato (SCADA-informe)	Observaciones

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN Y MUESTRA
Problema general ¿De qué manera la automatización de los siete ventiladores principales influye en la mejora del sistema de ventilación de la Unidad Minera El Porvenir – Nexa Resources?	Objetivo general Automatizar los siete ventiladores principales de la Unidad Minera El Porvenir para mejorar el sistema de ventilación.	Hipótesis general (H1) La automatización de los siete ventiladores principales mejora significativamente el sistema de ventilación de la Unidad Minera El Porvenir. Hipótesis nula (H0) La automatización de los siete ventiladores principales no mejora significativamente el sistema de ventilación.	Variable independiente: Automatización del sistema de ventilación. Variable dependiente: Mejora del sistema de ventilación.	Tipo: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Nivel: Explicativo Diseño: Preexperimental Tipo de comparación: Antes – Después	Población: Sistema de ventilación principal de la UM El Porvenir. Muestra: Siete ventiladores principales (5 de extracción y 2 de inyección).
Problemas específicos P1: ¿Cómo influye la automatización en la eficiencia del sistema de ventilación?	OE1: Evaluar la eficiencia del sistema de ventilación antes y después de la automatización.	H2: La automatización incrementa significativamente la eficiencia del sistema de ventilación.	VD – Dimensión: Operativa Indicador: Eficiencia (%)	Técnica: Análisis de registros Instrumento: Ficha de datos	Igual
P2: ¿Cómo influye la automatización en la potencia consumida por los ventiladores?	OE2: Evaluar la potencia consumida antes y después de la automatización.	H3: La automatización reduce significativamente la potencia consumida.	VD – Dimensión: Energética Indicador: Potencia (HP o kW)	Técnica: Análisis documental	Igual
P3: ¿Cómo influye la automatización en la estabilidad del sistema de ventilación?	OE3: Evaluar la estabilidad del sistema antes y después de la automatización.	H4: La automatización reduce el coeficiente de variación del sistema de ventilación.	VD – Dimensión: Estabilidad Indicador: Coeficiente de variación (CV)	Técnica: Análisis estadístico	Igual
P4: ¿Cómo influye la automatización en el caudal efectivo del sistema?	OE4: Evaluar el caudal efectivo antes y después de la automatización.	H5: La automatización mejora significativamente el caudal efectivo del sistema de ventilación.	VD – Dimensión: Flujo de aire Indicador: Caudal (KCFM)	Técnica: Análisis de mediciones	Igual

Anexo 3: Procedimiento de validación y confiabilidad

a) Matriz de validación de ítems

Matriz de validación por juicio de expertos del instrumento de recolección de datos

Ítem / campo del instrumento	Experto 1 Claridad (1-4)	Experto 1 Pertinencia (1-4)	Experto 2 Claridad (1-4)	Experto 2 Pertinencia (1-4)	Experto 3 Claridad (1-4)	Experto 3 Pertinencia (1-4)
Código del ventilador	4	4	4	4	4	4
Tipo (inyector / extractor)	4	4	4	4	4	4
Ubicación / cámara y nivel	4	4	4	4	4	4
Zona de acción	4	4	4	4	4	4
Eficiencia antes / después (%)	4	4	4	4	4	4
Potencia antes / después (HP)	4	4	4	4	4	4
Coefficiente de variación antes / después	4	4	4	4	4	4
Caudal antes / después (KCFM)	4	4	4	4	4	4
Fecha, turno y fuente del dato (SCADA / informe / reporte)	3	4	4	4	3	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2a – anexos: Como se observa en la matriz, todos los ítems del instrumento obtuvieron calificaciones entre 3 y 4 en los criterios de claridad y pertinencia para los tres expertos consultados. En consecuencia, se concluye que la ficha de registro de datos operacionales presenta una **validez de contenido adecuada** para los fines de la investigación.

b) Datos de los expertos

Experto	Nombre y apellido	Especialidad / Cargo	Institución	Comentario global
1	Ing. Silvestre Fabián Benavides Chagua	Docente – Asesor de tesis, Ingeniería de Minas	Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión (UNDAC)	El instrumento es claro y pertinente para el registro de parámetros de ventiladores principales.
2	Ing. Álvaro Lastaunau Muñoz	Ingeniero de Ventilación	U.M. El Porvenir – Nexa Resources	Considera que los campos incluidos permiten caracterizar adecuadamente la operación de los ventiladores principales.
3	Ing. José Lifoncio Huamán	Ingeniero responsable de automatización de ventiladores	U.M. El Porvenir – Nexa Resources	Señala que el instrumento es suficiente para el análisis técnico y de control de la automatización.

Fuente: Elaboración propia

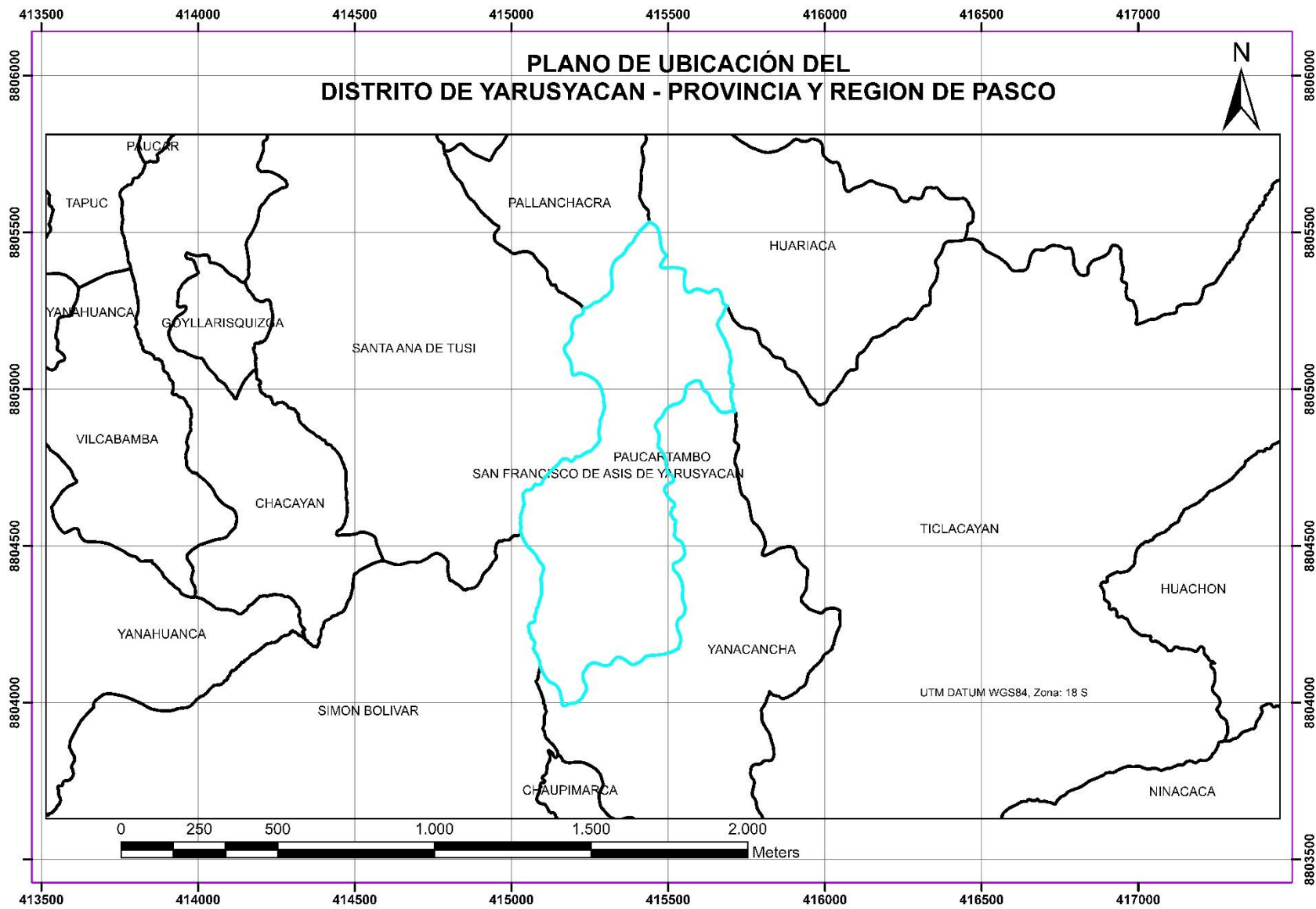
Tabla 3b – anexos

Anexo 4: Mapa de ubicación geográfica de la Unidad Minera El Porvenir – Nexa Resources

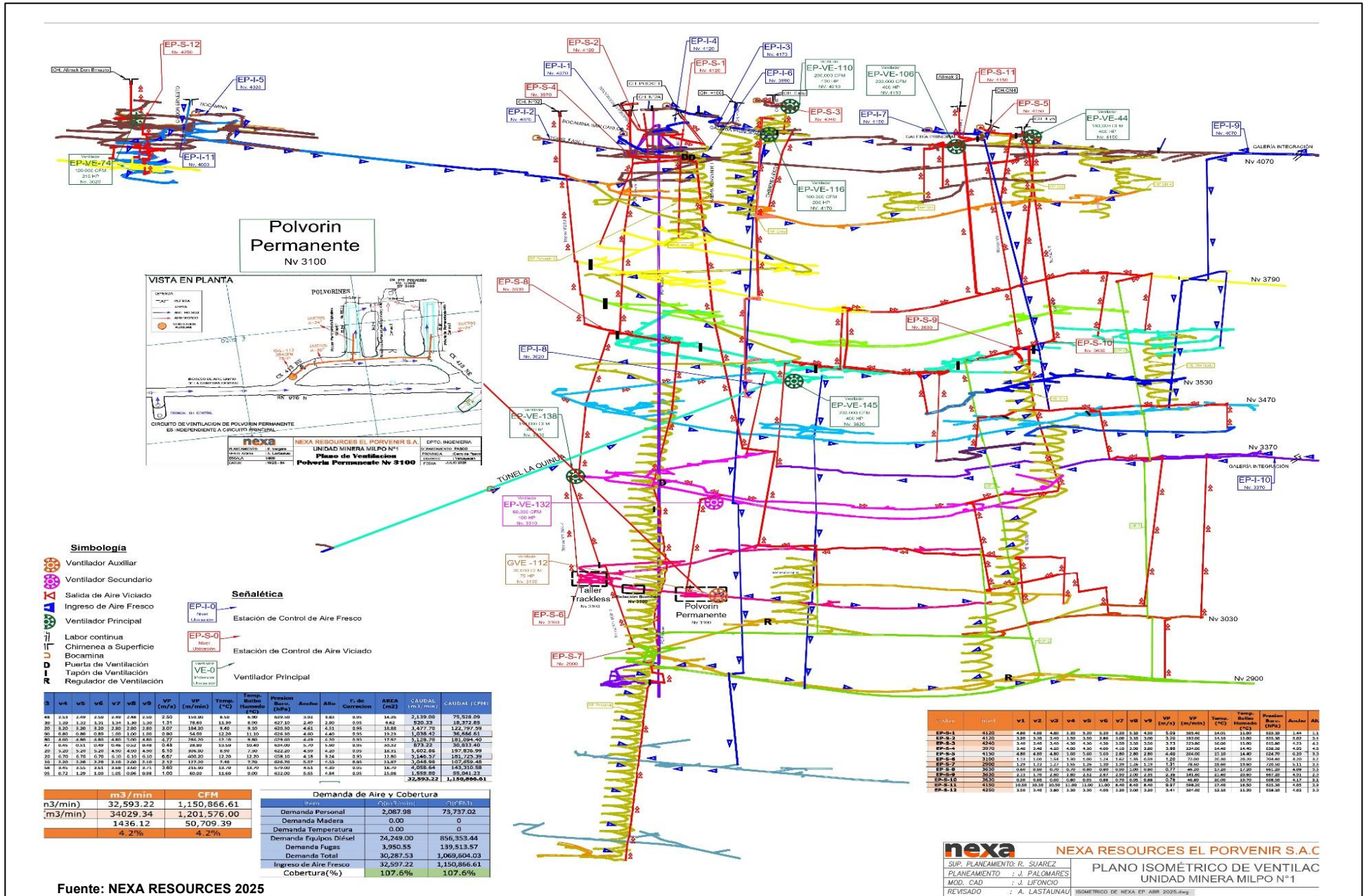


Fuente: NEXA RESOURCES 2023

Anexo 5: Mapa del Distrital - Local donde se desarrollan las operaciones de la Unidad Minera El Porvenir



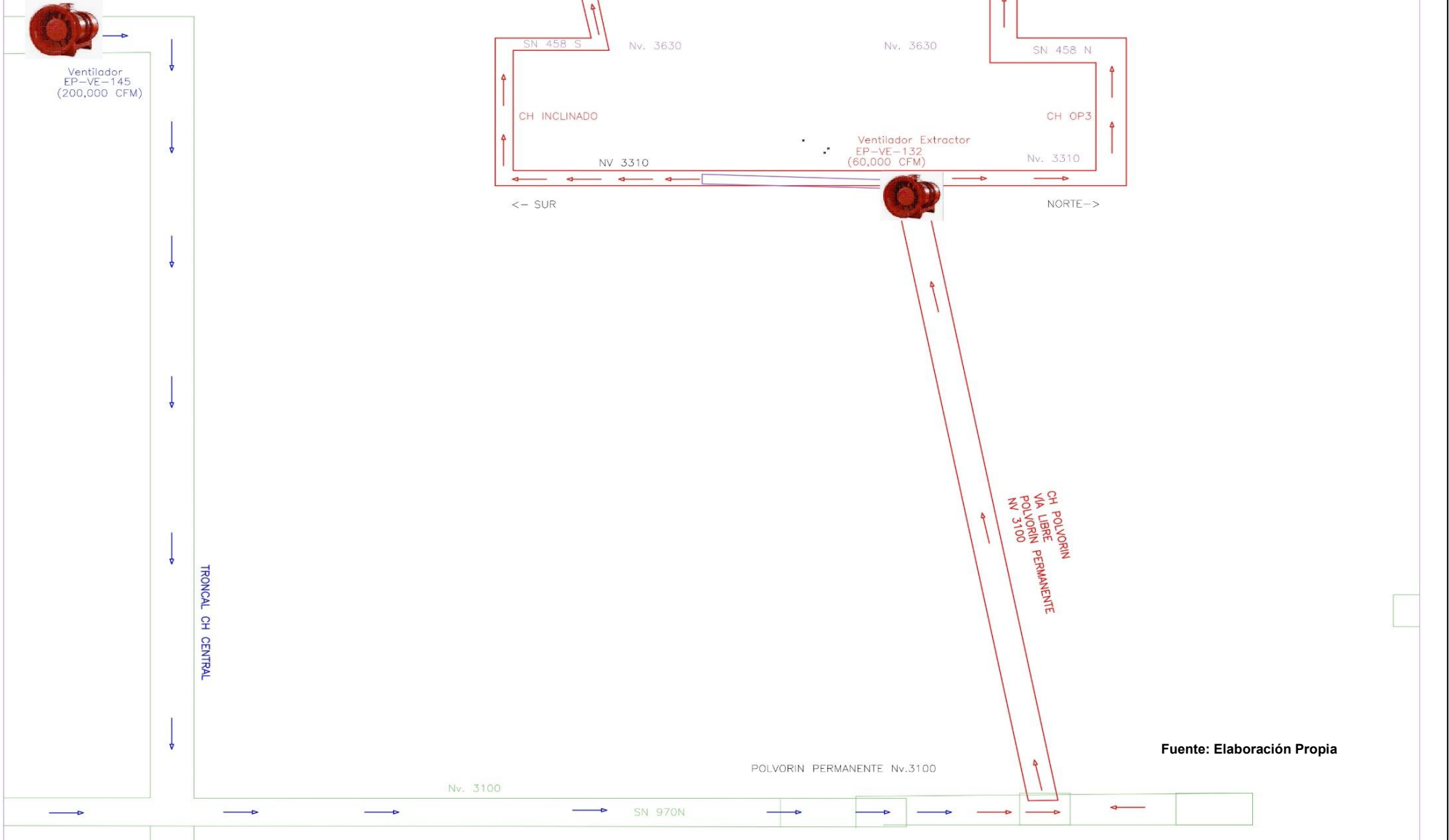
Anexo 6: Plano de labores subterráneos y ubicación de los 7 ventiladores principales de la Unidad Minera El Porvenir.








Anexo 7: Planos de ventilación del polvorín permanente – Nivel 3100

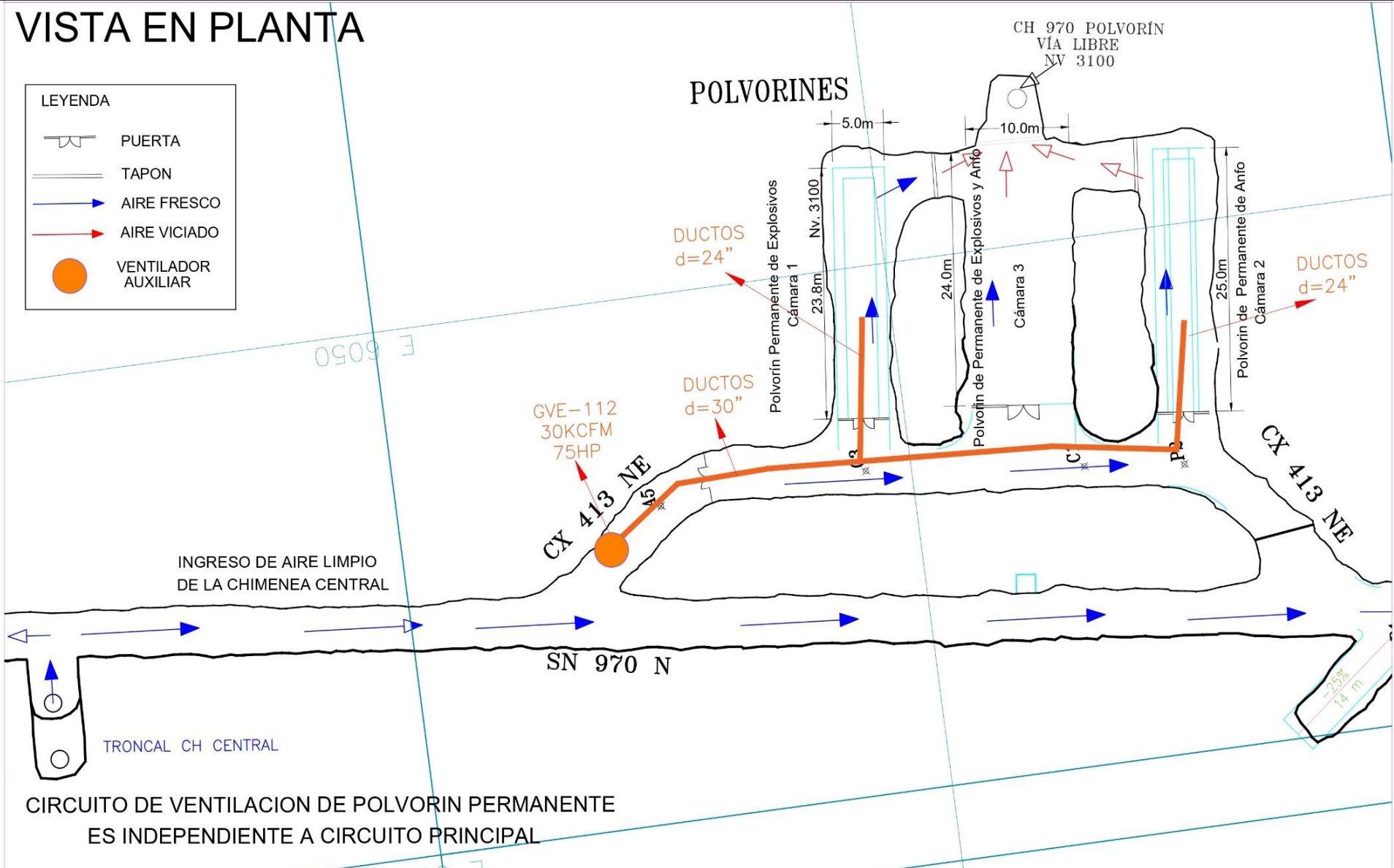
VISTA EN SECCIÓN

TUNEL LA QUINUA NV 3620



VISTA EN PLANTA

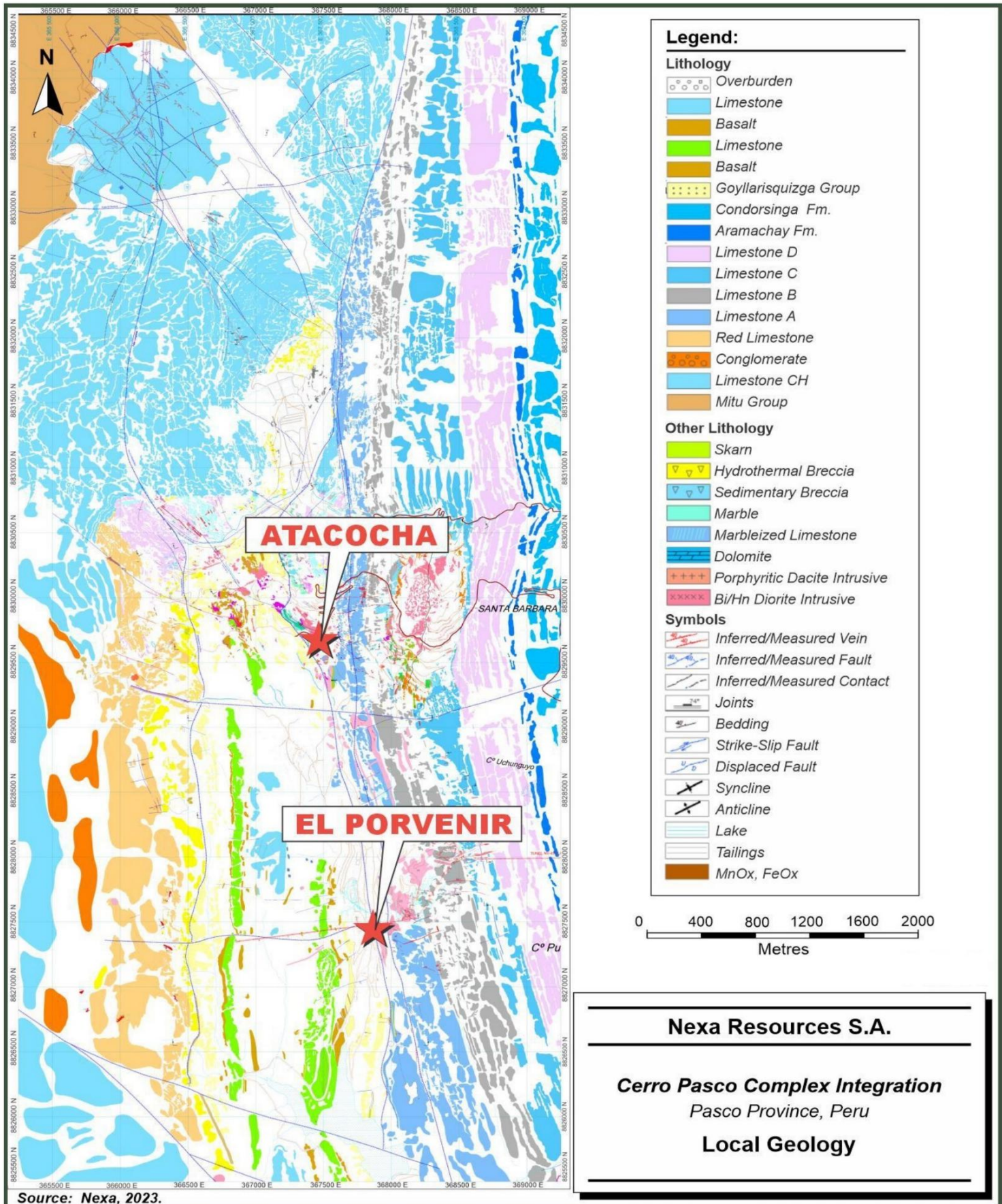
LEYENDA	
	PUERTA
	TAPON
	AIRE FRESCO
	AIRE VICIADO
	VENTILADOR AUXILIAR



Fuente: NEXA Resources 2025

	NEXA RESOURCES EL PORVENIR S.A.		DPTO. INGENIERIA
	UNIDAD MINERA MILPO N°1		DEPARTAMENTO: PASCO
	Plano de Ventilacion		PROVINCIA :Cerro de Pasco
	Polvorin Permanente Nv 3100		DISTRITO : Yarusyacan
PLANEAMIENTO : E. Vergara			FECHA JULIO 2025
VENTILACION : A. Lastaunau			
ESCALA 1/500			
DATUM : WGS - 84			

Anexo 8: Mapa geológico local de la zona de la Unidad Minera El Porvenir



Nexa Resources S.A.

Cerro Pasco Complex Integration
Pasco Province, Peru
Local Geology

Anexo 9: Lista de repuestos críticos del sistema WAPSI – Unidad Minera El Porvenir.

Item	Marca	Modelo	Nro. de parte	Descripción	Cantidad	Unidad	Frecuencia cambio	Calibración
1	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0001	ECU	1	Und	01 año o condición	-
2	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0002	Memoria para ECU	1	Und	01 año o condición	-
3	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0003	Transciver	1	Und	01 año o condición	-
4	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0004	Cable apantallado para detector	250	m	01 año o condición	-
5	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0005	Cable apantallado para LED (opcional)	250	m	01 año o condición	-
6	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0006	Media Converter	1	Und		-
7	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0007	USB RS485	1	Und	01 año o condición	-
8	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0008	Cable Tipo C	1	Und	01 año o condición	-
9	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0009	Patchcord de fibra interior	1	Und		-
10	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0010	Patchcord de fibra exterior	1	Und		-
11	WAPSI	WAPSI SYSTEM	WS-0011	Power supply	1	Und	02 años o condición	-
12	WAPSI	WAPSI PROTECTION	WS-0012	Power supply	1	Und	02 años o condición	-
13	WAPSI	WAPSI PROTECTION	WS-0013	Estabilizador de energía	1	Und	02 años o condición	-
14	WAPSI	DETECCION	WS-0014	Sensor O2	1	Und	02 años o condición	6 meses
15	WAPSI	DETECCION	WS-0015	Sensor CO2	1	Und	04 años o condición	6 meses
16	WAPSI	DETECCION	WS-0016	Sensor CO	1	Und	02 años o condición	6 meses
17	WAPSI	DETECCION	WS-0017	Sensor NO2	1	Und	02 años o condición	6 meses
18	WAPSI	DETECCION	WS-0018	Sensor de Temperatura y Humedad	1	Und	02 años o condición	6 meses
19	WAPSI	DETECCION	WS-0019	Detector de gases	1	Und	05 años o condición	-
20	WAPSI	INSUMOS	WS-0020	Cilindro de gas patrón O2	1	Und		-
21	WAPSI	INSUMOS	WS-0021	Cilindro de gas patrón CO	1	Und		-
22	WAPSI	INSUMOS	WS-0022	Cilindro de gas patrón CO2	1	Und		-
23	WAPSI	INSUMOS	WS-0023	Cilindro de gas patrón NO2	1	Und		-

Fuente: NEXA Resources Y GUNJOP 2025

Anexo 10: Registro fotográfico del trabajo de campo en ventilación – Unidad Minera El Porvenir

En este anexo se presentan fotografías del trabajo de campo realizado para la recolección de datos de ventilación, mediciones de caudal y condiciones ambientales, así como el monitoreo del sistema WAPSI y de los ventiladores principales automatizados.



Fotografía 1: Personal de ventilación realizando inspección en labor subterránea durante el trabajo de campo para el estudio.



Fotografía 2: Supervisor y operador analizando el mapa de ventilación en el sistema WAPSI desde la sala de control de la Unidad Minera El Porvenir



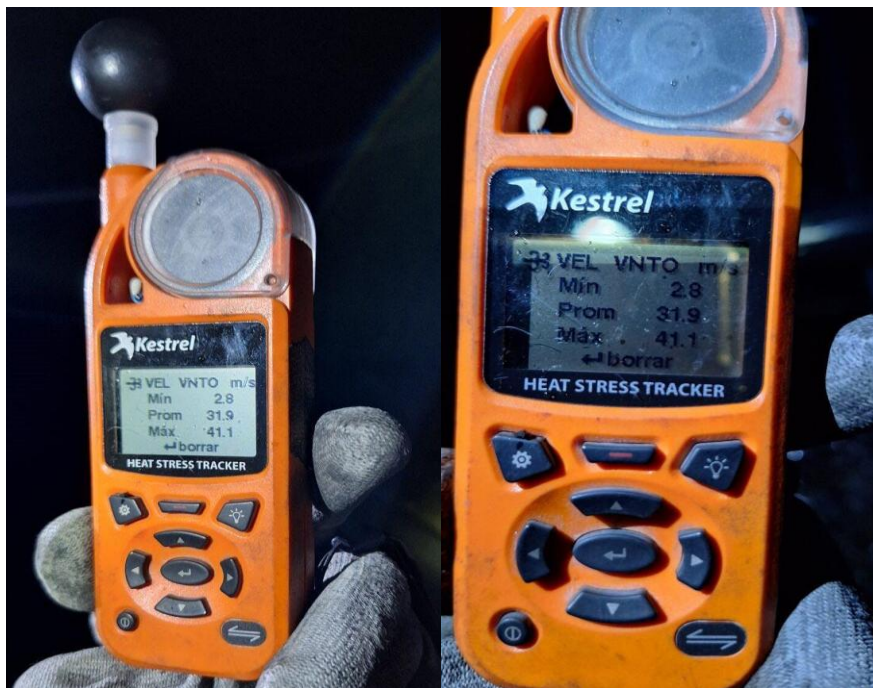
Fotografía 3: Verificación de parámetros de ventilación en estación de monitoreo de gases en interior mina



Fotografía 4: Coordinación de maniobra de ventilación y revisión de alarmas



Fotografía 5: Evaluación de condiciones de ventilación en reja de control de circuito, antes del ingreso a zona de operación



Fotografía 6: Medición de caudal de aire con anemómetro portátil en labor subterránea para el aforo de ventilación



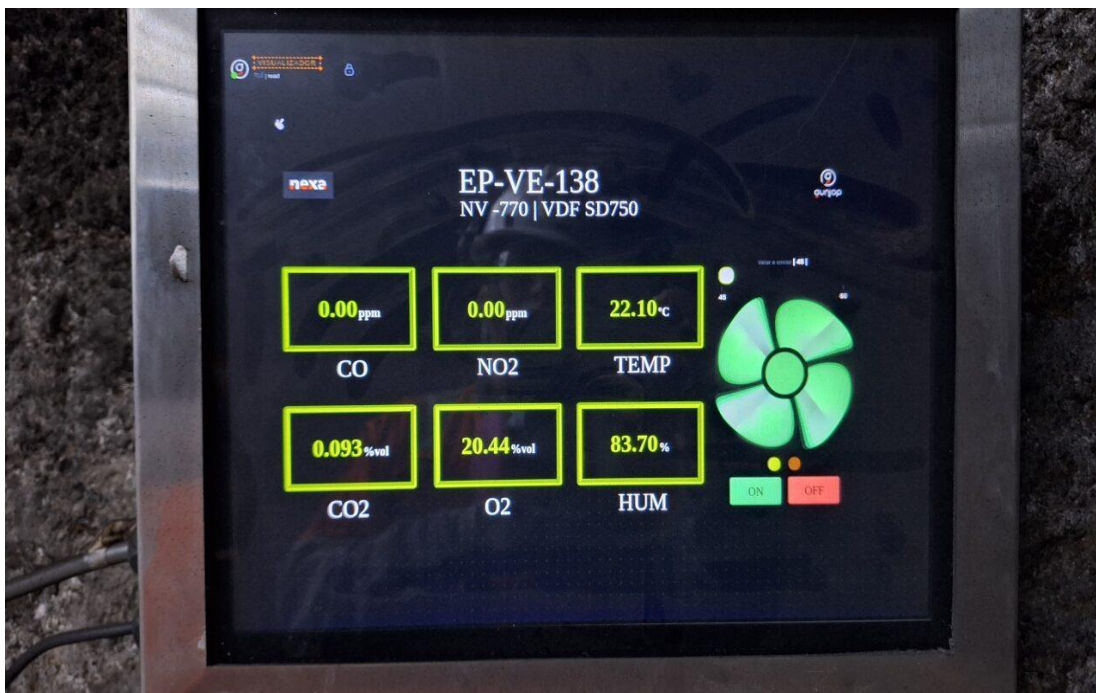
Fotografía 7: Registro de identificación de ventilador principal EP-VE-138 con su capacidad nominal de 150 000 CFM



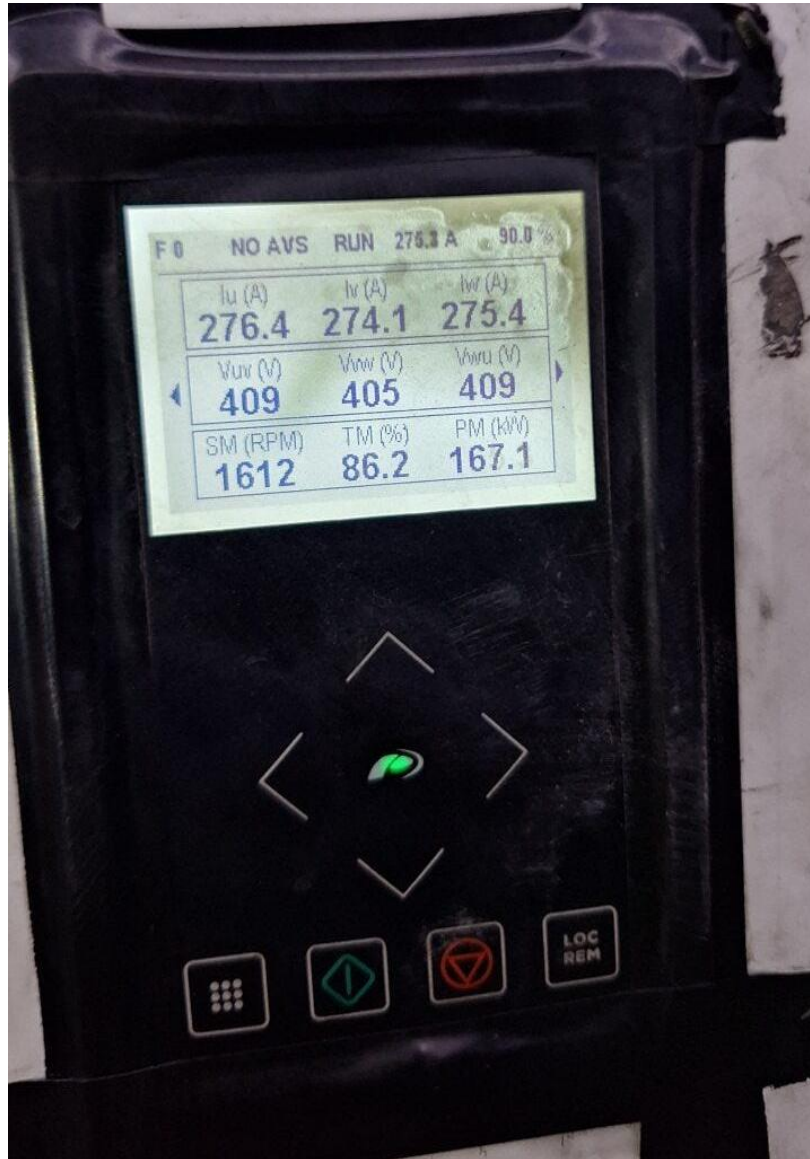
Fotografía 8: Módulo WAPSI de detección de gases instalado en interior mina, conectado al sistema de monitoreo en tiempo real



Fotografía 9: Equipos de medición utilizados en el estudio: distanciómetro láser y medidor ambiental portátil (Kestrel)



Fotografía 10: Pantalla HMI del ventilador principal EP-VE-138 con visualización de niveles de CO, NO2, CO2, O2 temperatura y humedad relativa.



Fotografía 11: Pantalla de variador de velocidad (VDF) del ventilador principal, mostrando corrientes, voltajes y velocidad de giro.