

# **Diseño de un sistema de ventilación bajo demanda en una mina subterránea**

Jorge Enrique Castellanos Iscalá

Jesús David Martínez Luquez

Asesor

Carolina Zuluaga

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios ECACEN

Especialización en Gerencia de Proyectos

2025

## Resumen

Este proyecto propone el diseño de un sistema de ventilación bajo demanda (VOD, por sus siglas en inglés, Ventilation On Demand) en una mina subterránea con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y operativa, enfrentando los desafíos técnicos y logísticos actuales. El sistema se adaptará dinámicamente a las necesidades reales de ventilación, reduciendo el consumo de energía, mejorando la seguridad de los trabajadores y optimizando el rendimiento operativo de la mina.

***Palabras clave:*** Ventilación bajo demanda, Eficiencia energética, Minería subterránea, Automatización, Sostenibilidad.

### **Abstract**

This project proposes the design of a Ventilation on Demand (VOD) system in an underground mine with the goal of improving energy and operational efficiency while addressing current technical and logistical challenges. The system will dynamically adapt to the actual ventilation needs, reducing energy consumption, enhancing worker safety, and optimizing the mine's operational performance.

**Keywords:** Ventilation on Demand, Energy Efficiency, Underground Mining, Automation, Sustainability.

## Tabla de Contenido

Resumen .....	2
Abstract .....	3
Introducción .....	10
Justificación.....	11
Formulación Del Problema Técnico .....	13
Antecedentes Del Programa .....	13
Contexto Donde Se Presenta El Conflicto .....	13
Conflicto Que Da Lugar Al Desarrollo Del Proyecto.....	14
Descripción Del Problema .....	14
Comitente Del Proyecto .....	14
Stakeholders Del Proyecto .....	15
Modalidades De Solución Del Planteadas .....	15
Constricciones Y Restricciones Del Proyecto.....	15
Preguntas Sistematizadoras.....	16
Objetivos .....	17
Objetivo General .....	17
Objetivos Específicos.....	17
Desarrollo Del Proyecto Aplicado .....	18
Acta De Constitución Del Proyecto .....	18
Diagnóstico Inicial .....	18

Descripción General De La Mina .....	18
Sistema Actual De Ventilación Principal.....	19
Problemas Identificados .....	22
Inventario De Ventiladores Principales .....	23
Consumo Energético .....	23
Conclusión Del Diagnóstico .....	24
Diseño Del Sistema De Ventilación Bajo Demanda Vod.....	25
Objetivo Del Diseño.....	25
Principios Del Sistema Vod .....	25
Alcance Del Diseño.....	25
Componentes Del Sistema Vod .....	25
Hardware.....	25
Software.....	26
Comunicaciones.....	26
Arquitectura Del Sistema .....	26
Estrategia De Control Y Operación .....	26
Estimación Preliminar De Costos .....	27
Implementación Piloto Del Sistema Vod.....	29
Equipos Y Componentes Implementados .....	29
Proceso De Instalación E Integración .....	32
Pruebas Realizadas Y Resultados Obtenidos .....	32
Participantes Del Piloto.....	33
Conclusiones Preliminares .....	33

Monitoreo Y Evaluación Del Rendimiento.....	34
Variables Monitoreadas .....	34
Frecuencia Y Metodología De Evaluación .....	34
Evaluación Del Rendimiento Energético .....	35
Estabilidad Y Confiabilidad Del Sistema .....	36
Análisis De Resultados Y Lecciones Aprendidas .....	37
Reducción Efectiva Del Consumo Energético .....	37
Ahorro Energético Y Económico.....	38
Validación Operativa .....	38
Lecciones Aprendidas .....	38
Recomendaciones.....	39
Aspectos Administrativos .....	40
Cronograma De Actividades.....	40
Estimación De Costos Del Proyecto .....	40
Hoja De Recursos Del Proyecto.....	42
Análisis De Cuellos De Botella, Holguras E Hitos.....	45
Cuellos De Botella Identificados .....	45
Holguras Identificadas .....	45
Hitos Del Proyecto .....	46
Estructura De Descomposición Del Trabajo (Edt-Wbs).....	47
Evaluación De La Factibilidad Económica, Social Y Ambiental Del Proyecto .....	49
Factibilidad Económica.....	49
Factibilidad Social.....	50

Factibilidad Ambiental.....	51
Conclusiones .....	53
Recomendaciones.....	54
Referencias Bibliográficas .....	55

### Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> <i>Requisitos de operación actual del sistema de ventilación principal.</i> .....	19
<b>Tabla 2.</b> <i>Requisitos de operación en ausencia de ventilación máxima.</i> .....	21
<b>Tabla 3.</b> <i>Comparación entre potencia nominal y potencia estimada del sistema de ventilación.</i> .....	22
<b>Tabla 4.</b> <i>Inventario de los ventiladores principales.</i> .....	23
<b>Tabla 5.</b> <i>Consumo eléctrico de ventilación para la mina La Maruja.</i> .....	23
<b>Tabla 6.</b> <i>Estimación preliminar de costos asociados a la inversión.</i> .....	28
<b>Tabla 7.</b> <i>Ventiladores principales implementados en el piloto.</i> .....	29
<b>Tabla 8.</b> <i>Costos estimados para el proyecto.</i> .....	41
<b>Tabla 9.</b> <i>Hoja de recursos del proyecto.</i> .....	43
<b>Tabla 10.</b> <i>Hitos del proyecto.</i> .....	46
<b>Tabla 11.</b> <i>Resumen de niveles de la EDT del proyecto VOD.</i> .....	47
<b>Tabla 12.</b> <i>Desglose estructurado del proyecto VOD por niveles de la EDT.</i> .....	47

## Lista De Figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Ventilador axial, marca Zitron.</i> .....	30
<b>Figura 2.</b> <i>Caja de conexiones eléctricas.</i> .....	30
<b>Figura 3.</b> <i>Tablero de control eléctrico marca Zitron con interfaz HMI.</i> .....	31
<b>Figura 4.</b> <i>Gabinete de control con interfaz HMI para operación de ventiladores, marca airtec.</i> .....	31
<b>Figura 5.</b> <i>Sistema PLC.</i> .....	32
<b>Figura 6.</b> <i>Comportamiento de ventiladores, consumo eléctrico, caudal y temperatura ambiental subterránea.</i> .....	35
<b>Figura 7.</b> <i>Cronograma de actividades.</i> .....	40

## Introducción

La ventilación es una de las funciones más importantes en la operación de minas subterráneas, ya que permite garantizar condiciones seguras de trabajo, controlar gases nocivos y mantener temperaturas adecuadas en las zonas de operación. A pesar de esto, en muchas minas los sistemas de ventilación siguen operando de forma continua, sin considerar los cambios que se dan en el ambiente subterráneo o la ubicación real de los trabajadores. Esta forma de operar genera un consumo de energía bastante alto, aumenta los costos operativos y en muchos casos implica un uso ineficiente de los recursos disponibles.

Actualmente, con el enfoque que viene tomando la industria minera hacia la eficiencia energética, la automatización y la sostenibilidad, es necesario pensar en soluciones que optimicen los procesos sin afectar la seguridad. Una de esas soluciones es la ventilación bajo demanda (VOD), que permite ajustar el caudal de aire en función de las condiciones reales de la mina. Esto se logra mediante sensores, automatización y un control más preciso del sistema, lo que permite enviar aire solo a los lugares donde realmente se necesita.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema de ventilación bajo demanda adaptado a las condiciones específicas de una mina subterránea, con el fin de reducir el consumo de energía, optimizar los costos operativos y mejorar las condiciones de trabajo. Además de los beneficios técnicos, se espera que esta solución contribuya a la sostenibilidad del proceso minero, sin poner en riesgo la seguridad ni la continuidad de la operación.

## Justificación

La minería subterránea es una industria fundamental en el desarrollo económico de un país y una región; sin embargo, también es intensiva en el uso de recursos, particularmente en el consumo energético. Se estima que la ventilación representa cerca del 35 % del consumo total de energía eléctrica en una operación subterránea, lo que la convierte en uno de los sistemas más costosos y críticos para gestionar.

En este contexto, la implementación de un sistema de ventilación bajo demanda (VOD, por sus siglas en inglés) no solo tiene el potencial de reducir significativamente los costos energéticos, sino que también puede mejorar la seguridad al adaptar dinámicamente el suministro de aire a las condiciones reales y cambiantes de la mina. El aire se dirige únicamente a las zonas donde se requiere, reduciendo el desperdicio de energía, disminuyendo el desgaste de los equipos y mejorando la calidad del ambiente subterráneo para los trabajadores.

Este proyecto cobra especial relevancia porque aborda una necesidad urgente del sector minero: reducir el impacto ambiental y los costos operativos mientras se mejora la seguridad y la eficiencia en la operación. La situación actual en muchas minas colombianas, donde los sistemas de ventilación operan de forma continua sin ningún tipo de modulación o automatización, evidencia una oportunidad concreta para introducir soluciones innovadoras que integren tecnología, sostenibilidad y productividad.

Además, la adopción de un sistema VOD representa un paso importante hacia la transformación digital del sector minero en Colombia. Permite el uso de sensores, sistemas de control y plataformas de gestión que no solo optimizan el funcionamiento del sistema de ventilación, sino que también generan datos útiles para la toma de decisiones, el mantenimiento predictivo y la mejora continua.

Desde una perspectiva organizacional y técnica, este proyecto puede convertirse en un caso de referencia para otras operaciones subterráneas en el país, promoviendo una minería más eficiente, moderna y responsable. En suma, la justificación de esta propuesta se sustenta en cuatro pilares: técnica, económica, ambiental y social, todos alineados con los objetivos estratégicos del sector minero actual.

## **Formulación Del Problema Técnico**

### **Antecedentes Del Programa**

La ventilación en minería subterránea es un componente fundamental para garantizar condiciones seguras y eficientes de trabajo. Tradicionalmente, los sistemas de ventilación han operado de manera constante, sin tener en cuenta la dinámica de la actividad minera ni la presencia real de trabajadores o equipos en determinadas zonas. Esta práctica, aunque garantiza un suministro continuo de aire fresco, también representa un alto consumo energético, costos operativos elevados y una distribución poco eficiente del flujo de aire.

En los últimos años, el sector minero ha comenzado a explorar alternativas tecnológicas que permitan mejorar la eficiencia de los sistemas de ventilación sin comprometer la seguridad. En este contexto surge el concepto de ventilación bajo demanda (VOD, por sus siglas en inglés, Ventilation On Demand), un enfoque que busca adaptar el flujo de aire a las condiciones reales y variables dentro de la mina, utilizando sensores, automatización y análisis de datos para dirigir el aire solo a las áreas que lo requieren.

Este proyecto se enmarca en esa tendencia de innovación y sostenibilidad, proponiendo el diseño de un sistema VOD aplicado a una mina subterránea colombiana. La iniciativa responde a la necesidad de modernizar los procesos de ventilación, reducir el consumo energético, optimizar los recursos técnicos disponibles y, sobre todo, garantizar condiciones laborales más seguras y adaptadas a la realidad operativa del país.

### **Contexto Donde Se Presenta El Conflicto**

La mina donde se pretende implementar el sistema VOD presenta un sistema de ventilación convencional de operación continua, sin mecanismos de control automático que permitan ajustar el flujo de aire según la demanda real. Esto genera un uso excesivo de energía

eléctrica, un desgaste prematuro de los ventiladores y una distribución ineficiente del aire, especialmente en zonas inactivas o de baja circulación.

Además, las condiciones geográficas y estructurales de la mina, con varias bocaminas, frentes de trabajo dispersos y cambios frecuentes en la localización de las labores, dificultan aún más la gestión eficiente de la ventilación. Este contexto genera un conflicto entre la necesidad de garantizar seguridad operativa y el objetivo de controlar los costos energéticos y operativos.

### **Conflicto Que Da Lugar Al Desarrollo Del Proyecto**

El conflicto técnico radica en la ineficiencia del sistema de ventilación actual, el cual no responde a la variabilidad de las operaciones mineras subterráneas. El funcionamiento continuo de los ventiladores, independientemente de la demanda real, implica un gasto energético elevado, una baja sostenibilidad operativa y un desaprovechamiento de recursos técnicos y económicos.

### **Descripción Del Problema**

El problema se puede describir como la falta de adaptabilidad del sistema de ventilación de la mina, que no considera variables operacionales en tiempo real como la presencia de personal, la actividad de maquinaria o la ubicación de los frentes de trabajo.

Variables clave: demanda de ventilación por sección, consumo eléctrico, presión y caudal de aire, ubicación de personal y equipos. Variables estratégicas: seguridad laboral, eficiencia energética, sostenibilidad operativa. Variables de apoyo: infraestructura existente, disponibilidad de sensores, capacidad del sistema eléctrico y de automatización.

### **Comitente Del Proyecto**

El comitente del proyecto es el área de ingeniería de ventilación de la empresa minera, que busca optimizar los recursos energéticos y mejorar las condiciones de seguridad de los trabajadores mediante soluciones técnicas modernas y sostenibles.

### **Stakeholders Del Proyecto**

- Operadores y trabajadores subterráneos.
- Supervisores de seguridad e higiene minera.
- Departamento de mantenimiento eléctrico y mecánico.
- Gerencia de operaciones.
- Proveedores de tecnología.
- Autoridades ambientales y de seguridad minera.

### **Modalidades De Solución Del Planteadas**

Se consideran las siguientes opciones:

- Mantener el sistema actual con mejoras manuales (baja eficiencia).
- Implementar un sistema VOD semiautomatizado (intermedio).
- Implementar un sistema VOD automatizado con sensores y control remoto (alta eficiencia).

Se concluye que la mejor alternativa es la implementación de un sistema VOD automatizado, dado que permite cumplir con los requerimientos de seguridad, reducir el consumo energético y operar dentro de las restricciones presupuestales establecidas.

### **Constricciones Y Restricciones Del Proyecto**

- Presupuesto limitado para adquisición de equipos y sensores.
- Tiempo acotado para implementación sin afectar la producción minera.
- Infraestructura existente que debe ser aprovechada.
- Capacidades técnicas del personal actual.
- Cumplimiento de normativas ambientales y de seguridad.

**Preguntas Sistematizadoras**

¿Cómo puede optimizarse el sistema de ventilación de una mina subterránea para garantizar condiciones seguras de trabajo, reduciendo el consumo energético y adaptándose a la variabilidad operativa de los frentes de trabajo?

¿Qué variables deben ser consideradas prioritarias para implementar un sistema de ventilación bajo demanda eficaz, dentro de las limitaciones presupuestales y técnicas de una operación minera en Colombia?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Desarrollar e implementar un sistema de ventilación bajo demanda en una mina subterránea, con el fin de mejorar la eficiencia energética y operativa, superando los desafíos técnicos y logísticos presentes en la operación minera.

### **Objetivos Específicos**

- Evaluar el consumo energético actual y la eficiencia operativa del sistema de ventilación existente.
- Diseñar un sistema VOD que responda a los requerimientos de la mina.
- Implementar una prueba piloto que permita ver la operación del sistema VOD.
- Monitorear y analizar el rendimiento del sistema implementado.

## **Desarrollo Del Proyecto Aplicado**

### **Acta De Constitución Del Proyecto**

*Nombre del proyecto:* Diseño de un sistema de ventilación bajo demanda en una mina subterránea.

*Responsable del proyecto:* Jorge Castellanos, Jesús Martínez.

*Comitente:* Área de Ingeniería de Ventilación – Mina La Maruja.

*Fecha de inicio:* 01 de mayo de 2025.

*Fecha estimada de finalización:* 31 de julio de 2025.

*Propósito del proyecto:* Optimizar el sistema de ventilación de una mina subterránea mediante la implementación de una solución de ventilación bajo demanda, que permita reducir el consumo energético, mejorar la eficiencia operativa y mantener condiciones seguras de trabajo.

*Alcance general:* El proyecto incluye el diagnóstico del sistema actual, diseño del sistema VOD, implementación de una prueba piloto y análisis del rendimiento técnico y económico. No contempla la implementación a gran escala del sistema.

*Restricciones clave:* Presupuesto limitado, infraestructura existente, tiempo de ejecución ajustado, capacidades técnicas internas y cumplimiento normativo.

### **Diagnóstico Inicial**

#### ***Descripción General De La Mina***

Mina La Maruja es una operación subterránea ubicada en el municipio de Marmato, Caldas, dedicada a la extracción de mineral de oro y plata, con una red de galerías distribuidas en varios niveles y frentes de trabajo. Su sistema de ventilación depende de ventiladores principales ubicados en bocaminas estratégicas, los cuales garantizan el flujo general de aire fresco hacia el interior y la extracción de contaminantes hacia el exterior.

### ***Sistema Actual De Ventilación Principal***

El sistema de ventilación principal está compuesto por ventiladores axiales de alta capacidad, entre los 75 kW y los 130 kW de potencia, instalados en tres bocaminas de extracción de aire viciado.

Estos equipos operan de forma continua durante las 24 horas del día, independientemente de la actividad real en el interior de la mina. La supervisión del sistema se realiza de manera presencial, inspeccionando cada una de estas bocaminas.

El sistema actual cuenta con el siguiente requerimiento de aire: basado en cantidad de personal y cantidad de equipos a combustión interna.

En la Tabla 1 se presentan los requisitos de operación actual del sistema de ventilación principal, considerando la cantidad de equipos, la potencia nominal, el factor de uso y el caudal estimado.

**Tabla 1**

*Requisitos de operación actual del sistema de ventilación principal.*

Ítem	Equipo	Cantidad	Potencia		Potencia			
			nominal (HP)	Factor de uso	total (HP)	m3/min	kefm	
1	Camioneta	3	150	70%	315	1.260	44	
2	Scoop 203	2	95	75%	143	570	20	
3	Camión lubricador	1	150	60%	90	360	13	
4	Telehandler	2	98	75%	147	589	21	
5	Scoop ST1030	1	250	75%	188	750	26	
6	Scoop 307	2	214	75%	321	1.284	45	
7	TH320	2	315	60%	378	1.512	53	
8	TH315	1	248	60%	149	595	21	
9	Dumper JOY T7	2	96	60%	115	461	16	
11	Jumbo Raptor	1	110	35%	39	154	5	
12	Boolter	1	75	35%	26	105	4	
13	Jumbo EPIROC	1	75	35%	26	105	4	
14	Personal	250	-	-	-	750	26	
							<b>300</b>	

*Nota.* Se muestra el cálculo del caudal requerido para cada equipo de combustión interna en función de su potencia. Fuente. *Elaboración propia.*

Para el escenario en el que no se requiere que los ventiladores operen a máxima capacidad, se determinó un requerimiento específico de aire en función de las condiciones de operación. En la Tabla 2 se presentan los valores correspondientes.

**Tabla 2**

*Requisitos de operación en ausencia de ventilación máxima.*

Ítem	Equipo	Cantidad	Potencia nominal (HP)	Factor de uso	Potencia		
					total (HP)	m3/min	kcfm
1	Camioneta	3	150	80%	360	1.440	51
2	Scoop 203	2	95	0%	0	0	0
3	Camión Lubricador	1	150	80%	120	480	17
4	Telehandler	2	98	0%	0	0	0
5	Scoop St1030	1	250	0%	0	0	0
6	Scoop 307	2	214	0%	0	0	0
7	TH320	2	315	0%	0	0	0
8	TH315	1	248	0%	0	0	0
9	Dumper JOY T7	2	96	0%	0	0	0
11	Jumbo Raptor	1	110	0%	0	0	0
12	Boofter	1	75	0%	0	0	0
13	Jumbo EPIROC	1	75	0%	0	0	0
14	Personal	250	-	-	-	750	26

94

*Nota.* Esta tabla muestra los parámetros operativos necesarios para la operación del sistema de ventilación sin trabajar a máxima capacidad. *Fuente.* Autores.

Esta disminución representa un 68% en caudal, lo cual puede extrapolarse a un ahorro energético. En la tabla 3 se puede apreciar la disminución de la potencia consumida con base en el requerimiento de aire para el escenario planteado:

**Tabla 3**

*Comparación entre potencia nominal y potencia estimada del sistema de ventilación.*

	Potencia	Caudal	Velocidad	Caudal	Velocidad	Potencia	
Ventilador	nominal	nominal	nominal	requerido	requerida	estimada	Diferencia
	kW	kcfm	rpm	kcfm	rpm	kW	
Zitrón	130	140	1800	44	564	7,8	94%
Airtec	75	80	1800	25	564	4,2	94%
Airtec	75	80	1800	25	564	4,2	94%

*Nota.* La tabla presenta la comparación entre los parámetros nominales y los estimados, así como el ahorro obtenido. *Fuente.* Autores.

### ***Problemas Identificados***

Durante el levantamiento técnico y las inspecciones se identificaron los siguientes aspectos relevantes:

- Operación continua sin discriminación de carga, lo que genera consumo energético elevado.
- Limitada supervisión remota, con baja capacidad de respuesta frente a cambios operativos en la operación de la mina
- Sobreventilación en horas de baja actividad (horas de almuerzo, cena, voladuras, entre otros).
- Dependencia de la intervención manual para encendido, apagado o regulación de equipos.

### ***Inventario De Ventiladores Principales***

En la tabla 4 se presenta el inventario de los ventiladores principales considerados para la intervención con tecnología VOD.

**Tabla 4**

*Inventario de los ventiladores principales.*

Ítem	Ubicación	Marca	Potencia (kW)	Capacidad kcfm
1	Nivel 1	Zitrón	130	140
2	Nivel 1	Airtec	75	80
3	Nivel 0	Airtec	75	80

*Nota.* Esta tabla presenta el inventario de ventiladores principales y sus características generales.

*Fuente.* Autores.

### ***Consumo Energético***

En una operación minera, el sistema de ventilación principal suele representar hasta un 20% del consumo eléctrico total de la operación. Para el caso de mina La Maruja, el consumo por ventilación principal alcanza un 18% del consumo eléctrico de la operación de la mina, estos datos se pueden ver reflejados en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Consumo eléctrico de ventilación para la mina La Maruja.*

Ítem	Ubicación	Marca	Potencia	Tiempo	Consumo eléctrico		
			kW	horas/día	kW/día	kW/mes	kW/año
1	Nivel 1	Zitrón	130	24	3.120	93.600	1.123.200
2	Nivel 1	Zitrón	75	24	1.800	54.000	648.000
3	Nivel 0	Zitrón	75	24	1.800	54.000	648.000
							<b>2.419.200</b>

*Nota.* La tabla muestra el consumo eléctrico de los ventiladores inventariados en la Tabla 4, expresado en kW por día, mes y año. *Fuente.* Autores.

Para determinar el costo total por año asociado a la ventilación principal de la mina La Maruja por concepto de energía eléctrica, multiplicamos el consumo total de los tres ventiladores por el costo unitario de kW/hora en Colombia, el cual es, según la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), para usuarios no regulados, es de 0.2 usd/kW.

$$\text{Costo anual} = \text{Consumo (kw/año)} \times \text{costo unitario (usd/kw)}$$

$$\text{Costo anual} = 2.419.200 \text{ (kw/año)} \times 0.2 \text{ (usd/kw)}$$

$$\text{Costo anual} = 483.840 \text{ usd/año}$$

### ***Conclusión Del Diagnóstico***

La ventilación principal en la mina presenta un diseño robusto en cuanto a capacidad instalada, pero opera bajo un esquema estático, con potencial de mejora significativa. La incorporación de un sistema VOD en esta infraestructura permitiría modular el funcionamiento de los ventiladores en función de la actividad minera y el requerimiento de aire, lo cual tendría un impacto positivo en el consumo energético, la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental de la operación.

## **Diseño Del Sistema De Ventilación Bajo Demanda VOD**

### ***Objetivo Del Diseño***

Definir la arquitectura, componentes y lógica operativa del sistema VOD, con base en la ventilación principal de la mina, para garantizar un control eficiente y seguro del flujo de aire según la demanda real de operación.

### ***Principios Del Sistema VOD***

El diseño se fundamenta en los siguientes principios:

- Modulación del flujo de aire en tiempo real, según: Requerimiento de aire por personal, equipos a combustión y uso de explosivos.
- Automatización
- Integración progresiva con la infraestructura existente

### ***Alcance Del Diseño***

El diseño se aplicará inicialmente sobre los ventiladores principales identificados en el diagnóstico (Inventario del punto 4.2), con posibilidad de escalabilidad futura a la ventilación secundaria y auxiliar.

### ***Componentes Del Sistema VOD***

Hardware.

- Sensores de gases (CO, NO<sub>2</sub>).
- Sensores de presión en los ventiladores
- Controladores lógicos programables (PLC) para regulación automática.
- Variadores de frecuencia (VFD) instalados en ventiladores principales para modulación de velocidad.
- Tableros eléctricos adaptados para integración con VFD.

Software.

- Plataforma SCADA para monitoreo centralizado.
- Algoritmos de control basados en el requerimiento de aire fresco

Comunicaciones.

- Red Ethernet industrial
- Protocolos Modbus/TCP para comunicación PLC-SCADA.

### ***Arquitectura Del Sistema***

El sistema operará bajo el siguiente esquema:

- Ventiladores principales → VFD → PLC → SCADA.
- Entradas: Sensores de gases, presión, presencia.
- Salidas: Ajuste de velocidad, alarmas, reportes.

### ***Estrategia De Control Y Operación***

- Modos de operación:
  - Automático: El sistema ajusta de manera dinámica la velocidad de los ventiladores principales en función de los parámetros de configuración y con base en las señales detectadas por los sensores de gases.
  - Manual: Configuración desde el tablero y variador en el ventilador
- Lógica de control:
  - Se garantiza un umbral mínimo de caudal de aire en todo momento. Este caudal está relacionado con el requerimiento de aire.
  - El sistema incrementa el caudal de acuerdo con la configuración y con el requerimiento de aire definido.

- El sistema realiza un ajuste adicional en función de la concentración de gases (CO, NO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>)
- Escenarios previstos: Calculado para un turno de doce horas. Este mismo esquema se repite en el turno de noche.
  - Inicio de turno (máximo caudal) de 7:00 am a 12:00 pm
  - Hora para la toma de alimentos (reducción del caudal) de 12:00 pm a 2:00 pm)
  - Salida del personal (reducción de caudal) de 5:30 pm a 7:00 pm

### ***Estimación Preliminar De Costos***

En la Tabla 6 se presentan los costos asociados a los equipos, ventiladores, software e instrumentación. Cabe señalar que la empresa ya dispone de estos recursos; sin embargo, la información se incluye con el fin de determinar el punto de equilibrio de la inversión.

**Tabla 6***Estimación preliminar de costos asociados a la inversión.*

Ítem	Cantidad	Descripción	Costo unitario (COP)	Subtotal (COP)
Ventiladores axiales 75 kW	2	Eje libre, alta eficiencia, con silenciador	\$ 65.000.000	\$ 130.000.000
Ventilador axial 130 kW	1	Eje libre, con difusor y silenciador	\$ 90.000.000	\$ 90.000.000
Variadores de frecuencia (VFD)	3	IP55, marca ABB/Schneider/Siemens	\$ 22.000.000	\$ 66.000.000
Tableros de control con protecciones	3	Incluye térmicos, contactores, seccionadores, bornes	\$ 18.000.000	\$ 54.000.000
PLC de control	1	CPU modular, entradas analógicas/digitales, expansible	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000
Licencias SCADA, Ventsim, AutoCAD	1	Licencia básica (10 tags) + HMI industrial	\$ 68.000.000	\$ 68.000.000
Sensores (gases, presión, temperatura, etc.)	1	Multigas, presión diferencial, presencia	\$ 3.500.000	\$ 3.500.000
Instrumentación y cableado	1	Incluye mangueras, canaletas, sensores, cables de control	\$ 20.000.000	\$ 20.000.000
Instalación eléctrica y configuración	1	Mano de obra certificada, puesta en marcha	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000
Contingencias (10%)	1	Repuestos, ajustes, logística	\$ 46.300.000	\$ 48.150.000
<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$ 529.650.000</b>
IVA				\$ 100.633.500
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 630.283.500</b>

*Nota.* La tabla muestra el desglose de los costos preliminares asociados a los equipos e instrumentación requeridos como inversión para la implementación del sistema. *Fuente.* Autores.

## Implementación Piloto Del Sistema VOD

La implementación piloto del sistema de Ventilación Bajo Demanda (VOD) se llevó a cabo en los niveles 0 y 1 de la mina La Maruja, en un entorno subterráneo controlado, bajo estrictas condiciones de seguridad industrial y con la participación de personal altamente calificado y experimentado en sus respectivas áreas. El objetivo principal de esta fase fue validar la viabilidad técnica y económica del proyecto mediante pruebas en campo, así como verificar la capacidad del sistema para reducir el consumo eléctrico sin afectar las condiciones de ventilación requeridas para la operación minera.

### *Equipos Y Componentes Implementados*

En el piloto se utilizaron tres ventiladores principales previamente instalados en la mina, cuyos detalles se encuentran en el inventario descrito en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Ventiladores principales implementados en el piloto*

Ítem	Ubicación	Marca	Potencia (kW)
1	Nivel 1	Zitrón	130
2	Nivel 1	Airtec	75
3	Nivel 0	Airtec	75

*Nota.* La tabla presenta el inventario de los ventiladores principales utilizados en el piloto, detallando zona de ubicación dentro de la mina y su potencia. *Fuente.* Autores.

Estos ventiladores fueron integrados al sistema VOD a través de los siguientes elementos adicionales:

- Variadores de frecuencia marca Danfoss.
- Sensores de presión para el monitoreo del comportamiento del flujo.
- Un tablero de control e instrumentación con PLC integrado.
- Conexión al sistema SCADA, desde el cual se realiza la supervisión y el control centralizado del sistema.

### **Figura 1**

*Ventilador axial, marca Zitron.*



*Nota.* Ventilador axial principal utilizado en el sistema de ventilación de la mina La Maruja.

Elaboración propia (2025). Fuente. Elaboración Propia (2025).

### **Figura 2**

*Caja de conexiones eléctricas.*



*Nota.* Caja de conexiones eléctricas utilizada en la instalación del sistema VOD. Elaboración propia (2025).

### **Figura 3**

*Tablero de control eléctrico, marca Zitrón con interfaz HMI.*



*Nota.* Tablero de control con interfaz HMI instalado para la operación del sistema VOD. Elaboración propia (2025).

### **Figura 4**

*Gabinete de control con interfaz HMI para operación de ventiladores, marca Airtec.*



*Nota.* Gabinete de control con HMI para supervisión de ventiladores principales. Fuente: Airtec (s.f.).

## Figura 5

### *Sistema PLC.*



*Nota.* Controlador lógico programable (PLC) utilizado para la automatización del sistema VOD.

Fuente: PLCpartsSolution (s.f.).

### ***Proceso De Instalación E Integración***

La instalación del sistema fue relativamente sencilla, ya que los ventiladores ya se encontraban en operación. El trabajo se centró en la adecuación del sistema de control, específicamente:

- Montaje de los variadores de frecuencia y del tablero de control con PLC.
- Desconexión de los arrancadores suaves existentes.
- Conexión de los variadores a los motores y al sistema de automatización.
- Programación de la lógica de control basada en escenarios preestablecidos, con ajuste dinámico de la velocidad según el tiempo de funcionamiento, los requerimientos de ventilación y la presencia de personal.

Una vez finalizadas las adecuaciones, se realizaron pruebas de funcionamiento para validar el sistema. El PLC envió señales de control al variador, el cual ajustó la velocidad del motor de acuerdo con la demanda de ventilación previamente calculada.

### ***Pruebas Realizadas Y Resultados Obtenidos***

Durante el piloto se llevaron a cabo pruebas funcionales de:

- Regulación de caudal mediante variación de velocidad.

- Comportamiento de presión en los distintos niveles.
- Capacidad de respuesta del sistema ante condiciones programadas.
- Estabilidad térmica y condiciones ambientales subterráneas.

Inicialmente se planteó evaluar el ahorro energético con base en la reducción del tiempo de operación de los ventiladores. Sin embargo, se evidenció que el verdadero ahorro no se encuentra en la cantidad de horas, sino en la reducción de la velocidad de giro, la cual tiene una relación cúbica con la potencia consumida. Esto implica que, al disminuir la velocidad de rotación, la potencia requerida disminuye de forma exponencial. Se identificaron factores de reducción del consumo energético del orden de 8 a 1, lo cual representa un resultado altamente favorable en términos de eficiencia energética.

### ***Participantes Del Piloto***

La implementación fue liderada por el área de Ingeniería y Servicios Técnicos, bajo la coordinación del jefe del área. Participaron activamente:

- Un ingeniero mecánico
- Un ingeniero de minas
- Un ingeniero de automatización
- Tres auxiliares de mina (uno de ellos técnico electricista)

### ***Conclusiones Preliminares***

El piloto fue exitoso en todos los aspectos evaluados. La instalación se realizó sin contratiempos significativos y la operación del sistema VOD demostró ser técnicamente viable y eficaz. A pesar de la reducción del caudal total, la ventilación suministrada fue suficiente para mantener condiciones seguras de operación, sin acumulación de gases ni aumento de temperatura. La experiencia obtenida en esta fase permitió validar el sistema para su futura

expansión a otras zonas de la mina, evidenciando además un alto potencial de ahorro energético sin comprometer la seguridad ni la productividad.

### **Monitoreo Y Evaluación Del Rendimiento**

Una vez implementado el sistema de Ventilación Bajo Demanda (VOD) en los niveles 0 y 1 de la mina La Maruja, se estableció un esquema de monitoreo técnico para evaluar su rendimiento en condiciones reales de operación. El objetivo de esta fase fue verificar en campo el comportamiento del sistema frente a variables clave como caudal, consumo energético, temperatura y condiciones ambientales, así como validar la estabilidad del sistema de automatización.

#### ***Variables Monitoreadas***

A través del sistema SCADA y de sensores instalados en sitio, se realizó un seguimiento en tiempo real de las siguientes variables:

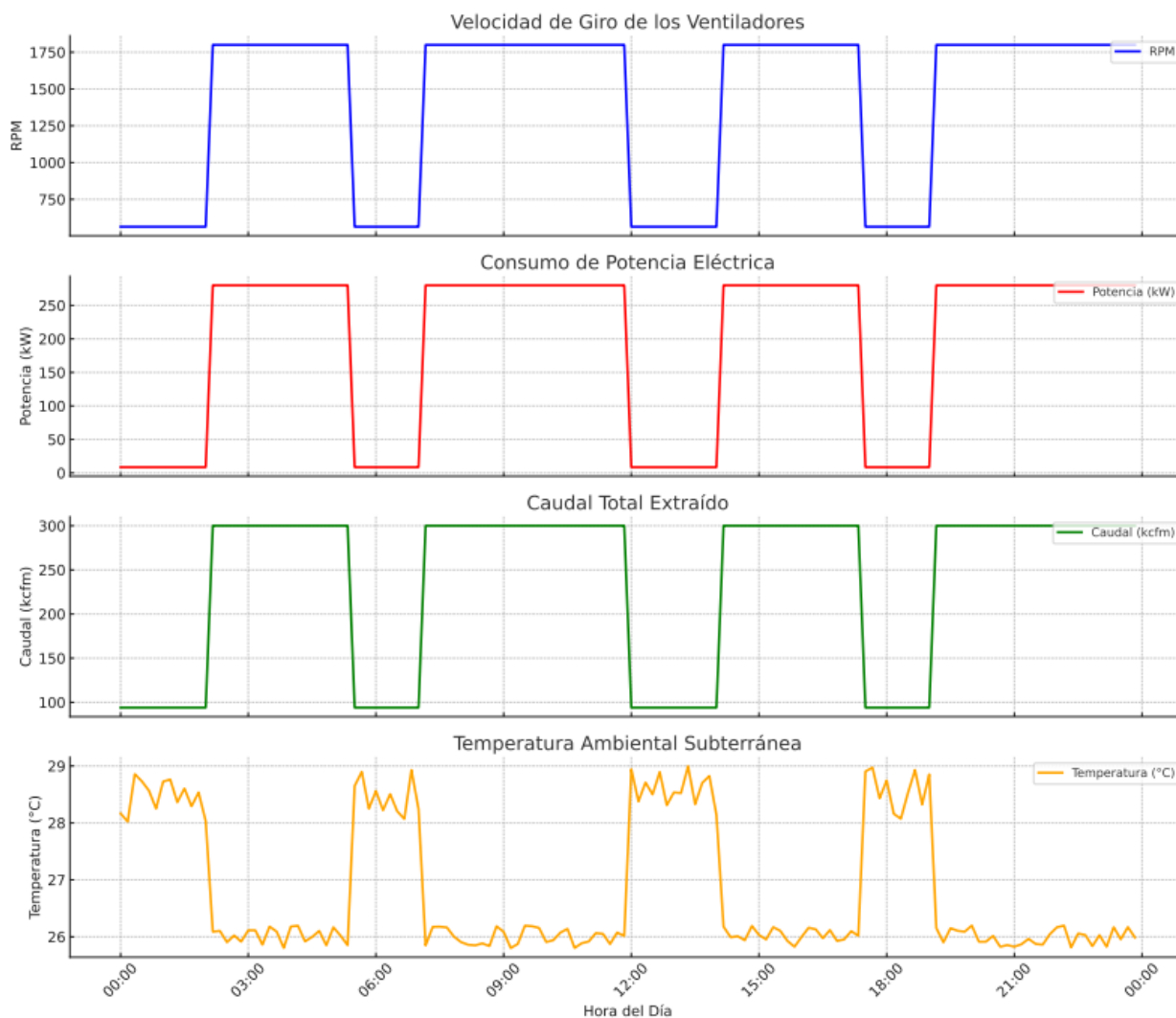
- Velocidad de giro de los ventiladores (medida en RPM).
- Consumo de potencia eléctrica (kW por ventilador).
- Caudal total extraído por cada ventilador (kcfm)
- Temperatura ambiental y niveles de gases nocivos (CO, CO<sub>2</sub>).
- Estado del sistema de control (automatismo, fallas, respuestas de PLC).

#### ***Frecuencia Y Metodología De Evaluación***

El monitoreo se realizó de manera continua, con datos registrados automáticamente cada 5 minutos a través del sistema SCADA. Adicionalmente, se realizaron inspecciones diarias por parte del personal técnico durante la primera semana del piloto, y luego cada 48 horas durante las dos semanas siguientes. Los datos fueron consolidados y analizados por el equipo de Ingeniería y Servicios Técnicos, con apoyo del área eléctrica y el personal operativo.

**Figura 6**

*Comportamiento de ventiladores, consumo eléctrico, caudal y temperatura ambiental subterránea.*



*Nota.* Registro del comportamiento de los ventiladores y variables ambientales durante el piloto del sistema VOD. Elaboración propia (2025).

### ***Evaluación Del Rendimiento Energético***

Los resultados evidenciaron una reducción significativa en el consumo energético de los ventiladores. Según los cálculos obtenidos por las leyes de afinidad y validados con las lecturas de los analizadores de red, se observó que:

- La velocidad promedio de operación fue de aproximadamente 564 RPM, equivalente al 31% de la velocidad nominal.
- La potencia eléctrica total consumida en operación reducida fue de aproximadamente 8.62 kW, frente a los 280 kW nominales que consumirían los tres ventiladores en funcionamiento continuo a plena carga.
- Esto representa una reducción teórica del 96.9% en el consumo de potencia, aunque en la práctica, considerando pérdidas y eficiencia, el ahorro real se estimó en un rango del 85% al 90%.

### ***Estabilidad Y Confiabilidad Del Sistema***

Durante el periodo de prueba:

- No se presentaron fallos eléctricos ni lógicos en el sistema de control.
- El PLC y los variadores de frecuencia respondieron de forma precisa ante los escenarios programados.
- Se garantizó la calidad del aire en todo momento, sin reportes de acumulación de gases o afectaciones térmicas.
- El sistema mostró una excelente capacidad de adaptación a las variaciones de carga de trabajo y presencia de personal.
- Se identificó la necesidad de mejorar el filtrado de datos en el SCADA para evitar ruido en las gráficas de tendencia.
- Se recomendó incorporar sensores de presencia por zona para automatizar aún más el control de caudal.

## **Análisis De Resultados Y Lecciones Aprendidas**

Tras la implementación del sistema de Ventilación Bajo Demanda (VOD) en los niveles 0 y 1 de la mina La Maruja, se realizó un análisis detallado de los resultados operacionales, energéticos y económicos. Esta etapa permitió cuantificar el impacto de la estrategia en la eficiencia del sistema de ventilación, así como extraer aprendizajes clave para su escalamiento.

### ***Reducción Efectiva Del Consumo Energético***

Antes de la implementación del sistema VOD, los tres ventiladores principales de la mina operaban a plena carga durante 24 horas al día, los 360 días del año, con un consumo conjunto de aproximadamente 280 kW (130 kW + 75 kW + 75 kW). Esto representaba un consumo energético anual estimado de:

$$280 \text{ kw} \times 24 \text{ h/día} \times 360 \text{ días} = 2.419.200 \text{ kW/año}$$

Con el nuevo esquema VOD, los ventiladores continúan operando 24 horas diarias, pero ajustan su velocidad según las condiciones operacionales y el horario. En particular, se definieron cuatro bloques de reducción programada que suman un total de 7 horas al día en las que los ventiladores operan a velocidad reducida (aproximadamente 564 RPM):

- 12:00 a 14:00
- 17:30 a 19:00
- 00:00 a 02:00
- 05:30 a 07:00

Durante este periodo, el consumo estimado se reduce de 280 kW a aproximadamente 8.62 kW gracias a la relación cúbica entre la velocidad y la potencia. Las 17 horas restantes del día los ventiladores siguen operando a plena carga.

Esto permite calcular el nuevo consumo energético promedio diario:

$$(17h \times 280 \text{ kw}) + (7h \times 8.62\text{kw}) = 4.820,34 \text{ kW/día}$$

Y el nuevo consumo energético anual:

$$4.820.34 \text{ kW/día} \times 360 \text{ días} = 1.735.322 \text{ kW/año}$$

### ***Ahorro Energético Y Económico***

La implementación del sistema VOD permitió una reducción aproximada de:

$$2.419.200 \text{ kw/año} - 1.735.322 \text{ kw/año} = 683.766 \text{ kW/año}$$

Con un costo energético promedio de 0.20 USD/kWh, esto se traduce en un ahorro anual de:

$$683.766 \text{ kW/año} \times 0.20 \text{ usd/kw} = 136.755 \text{ usd/año}$$

### ***Validación Operativa***

A lo largo del monitoreo, no se presentaron incidentes relacionados con deficiencias en la ventilación. A pesar de la reducción de caudal durante las franjas de menor actividad, se logró mantener:

- Niveles de gases dentro de los límites normativos.
- Condiciones térmicas adecuadas.
- Cubrimiento de los requerimientos normativos de aire fresco

Esto demuestra que el sistema tiene la capacidad de adaptarse a la dinámica operacional de la mina, manteniendo la seguridad y el confort del personal sin comprometer la producción.

### ***Lecciones Aprendidas***

1. El potencial de ahorro energético es significativo incluso con cambios relativamente simples en la lógica de operación, gracias al uso de variadores de frecuencia.

2. La reducción en la velocidad de los ventiladores no implica reducción proporcional del caudal o de la calidad del ambiente, lo cual valida el uso de la estrategia en escenarios productivos.
3. La automatización mediante PLCs y SCADA permite controlar, ajustar y monitorear el sistema en tiempo real, optimizando el desempeño sin intervención manual constante.
4. El éxito del piloto dependió del alineamiento entre las áreas de ingeniería, eléctrica y operativa, y de una planificación detallada con respaldo técnico.
5. Es importante considerar márgenes de seguridad térmica y de gases, especialmente en minas con actividad continua o frentes múltiples.

### ***Recomendaciones***

- Escalar el sistema VOD a otras zonas de la mina
- Incorporar un sistema de alarmas y control predictivo basado en IA o patrones históricos para anticiparse a variaciones de demanda.
- Realizar mantenimiento preventivo más enfocado en los variadores y sistemas de control, que ahora toman un rol protagónico.

## Aspectos Administrativos

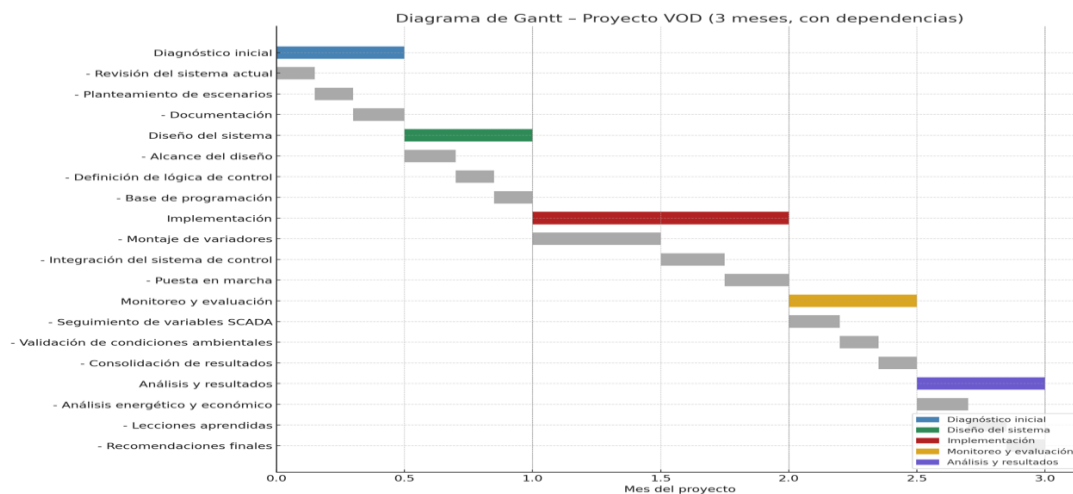
### Cronograma De Actividades

La ejecución del proyecto de implementación del sistema de Ventilación Bajo Demanda (VOD) se desarrolló en un periodo de tres meses, distribuidos en cinco fases principales. Cada fase tuvo un peso proporcional del 20% sobre el total del proyecto, permitiendo un avance equilibrado y organizado que facilitó la integración técnica, operativa y administrativa del sistema.

El cronograma fue diseñado para garantizar la coherencia entre etapas, con tiempos de entrega realistas y puntos de control bien definidos. A continuación, se presenta el detalle de las actividades realizadas:

### Figura 7

*Cronograma de actividades.*



*Nota.* Cronograma general de actividades planificadas para la implementación del sistema VOD.

Elaboración propia (2025).

### Estimación De Costos Del Proyecto

Para la implementación del sistema de Ventilación Bajo Demanda (VOD), se realizó una estimación de costos que incluye tanto los recursos humanos como los equipos y licencias

requeridas, además de los elementos de automatización, instrumentación y soporte técnico necesarios para su ejecución. Aunque varios de los equipos ya se encontraban disponibles en la mina, fueron considerados en el presupuesto como parte del análisis económico integral del proyecto, lo cual permite cuantificar el valor real de la solución, independientemente del origen de los recursos. En la Tabla 8 se detallan los costos estimados de la implementación.

**Tabla 8**

*Costos estimados para el proyecto.*

Ítem	Cantidad	Descripción	Costo unitario (COP)	Subtotal (COP)
Ventiladores axiales 75 kW	2	Eje libre, alta eficiencia, con silenciador	\$ 65.000.000	\$ 130.000.000
Ventilador axial 130 kW	1	Eje libre, con difusor y silenciador	\$ 90.000.000	\$ 90.000.000
Variadores de frecuencia (VFD)	3	IP55, marca ABB/Schneider/Siemens	\$ 22.000.000	\$ 66.000.000
Tableros de control con protecciones	3	Incluye térmicos, contactores, seccionadores, bornes	\$ 18.000.000	\$ 54.000.000
PLC de control	1	CPU modular, entradas analógicas/digitales, expansible	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000
Licencias SCADA, Ventsim, AutoCAD	1	Licencia básica (10 tags) + HMI industrial	\$ 68.000.000	\$ 68.000.000
Sensores (gases, presión, temperatura, etc.)	1	Multigas, presión diferencial, presencia	\$ 3.500.000	\$ 3.500.000
Instrumentación y cableado	1	Incluye mangueras, canaletas, sensores, cables de control	\$ 20.000.000	\$ 20.000.000
Instalación eléctrica y configuración	1	Mano de obra certificada, puesta en marcha	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000
Contingencias (10%)	1	Repuestos, ajustes, logística	\$ 46.300.000	\$ 48.150.000
<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$ 529.650.000</b>
IVA				\$ 100.633.500
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 630.283.500</b>
Equipo humano	1	Ingenieros de minas, electricistas, mecánicos	\$ 88.500.000	\$ 88.500.000
Equipos y software	0	Considerado en el punto anterior por 68 millones de pesos		
Materiales y suministros	0	No se incluye		
Viajes y salidas de campo	0	No se incluye		
Bibliografía	1	Libro de ventilación subterránea McPherson	\$ 2.500.000	\$ 2.500.000
<b>TOTAL ESTIMADO</b>				<b>\$ 721.283.500</b>

*Nota.* La tabla presenta los costos estimados del proyecto, detallando las cantidades y descripciones de los ítems. *Fuente.* Autores.

## Hoja De Recursos Del Proyecto

La correcta planificación de recursos es un componente esencial en la ejecución eficiente de proyectos técnicos complejos como la implementación de un sistema de Ventilación Bajo Demanda (VOD). En este apartado se presenta la hoja de recursos del proyecto, en la cual se identifican y agrupan todos los insumos requeridos para su desarrollo, segmentados por tipo, cantidad, descripción funcional y etapa de uso.

Se contemplaron cinco grandes categorías de recursos:

- Equipos instalados, como ventiladores axiales, variadores de frecuencia, tableros de control, PLCs y sensores de gases y presión.
- Software y herramientas tecnológicas, incluyendo licencias para Ventsim, AutoCAD y SCADA, además del hardware necesario para su operación (laptops para el personal técnico).
- Instrumentación y materiales eléctricos, tales como cableado, canaletas y elementos de interconexión.
- Documentación técnica, en este caso representada por bibliografía especializada utilizada como soporte teórico.
- Contingencias, previstas para cubrir ajustes, repuestos y otros elementos logísticos necesarios durante la implementación y evaluación.

Cada recurso fue vinculado a una o más etapas del proyecto (Diagnóstico, Diseño, Implementación, Evaluación), lo que permitió establecer su nivel de criticidad y prioridad en el cronograma. Para facilitar su visualización, se elaboraron dos versiones de matriz de recursos:

- Una versión básica, con agrupaciones generales por rol y equipo.

- Una versión detallada, que desglosa recursos por marca, función y función específica dentro del sistema VOD.

Esta planificación no solo permitió garantizar la disponibilidad de los insumos requeridos en cada fase, sino también optimizar el uso de los recursos existentes en la empresa. Es importante destacar que muchos de los equipos ya estaban disponibles en la mina, lo que redujo los tiempos de adquisición y costos directos del piloto.

La hoja de recursos sirvió también como insumo para la estimación de costos, la planificación de tareas y el análisis de riesgos técnicos, convirtiéndose en una herramienta transversal a lo largo de toda la ejecución del proyecto. En la Tabla 9 se presenta la hoja de recursos del proyecto, organizada por categorías, descripción y etapa de uso.

**Tabla 9***Hoja de recursos del proyecto.*

Categoría	Recurso	Cantidad	Descripción breve	Etapa de uso
	Ingeniero de minas	1	Responsable técnico del diseño y evaluación del sistema VOD	Todas las etapas
Recurso humano	Ingeniero mecánico	1	Apoyo técnico en selección de ventiladores y montaje	Diagnóstico, diseño
	Ingeniero de automatización	1	Encargado de lógica de control, PLC y SCADA	Diseño, implementación
	Auxiliares de mina	3	Apoyo en instalación, pruebas y validación	Implementación, evaluación
	Ventiladores axiales 75 kW	2	Con silenciador, eje libre	Implementación
	Ventilador axial 130 kW	1	Con difusor y silenciador	Implementación
Equipos instalados	Variadores de frecuencia (VFD)	3	Control de velocidad por demanda	Implementación
	PLC de control	1	CPU modular para sistema automatizado	Diseño, implementación
	Tableros eléctricos	3	Con protecciones, seccionadores, contactores	Implementación
	SCADA	1	Monitoreo y control centralizado	Implementación, evaluación
Software y tecnología	Ventsim	1	Modelación y simulación del sistema de ventilación	Diagnóstico, diseño
	AutoCAD	1	Planos eléctricos, diseño técnico	Diseño
	Laptop	3	Uso por ingenieros de campo y control	Todas las etapas
	Sensores gases/presión	1	Multigas, presión diferencial, presencia	Evaluación, control
Instrumentación	Cableado e instalación eléctrica	—	Conectividad y montaje	Implementación
Otros recursos	Libro McPherson	1	Referencia técnica	Diagnóstico, diseño
	Contingencias	—	Repuestos, ajustes, logística	Todas las etapas

*Nota.* La tabla muestra los recursos necesarios para la implementación del proyecto, se clasifica por categorías y muestra de manera breve la etapa de uso de cada recurso. *Fuente.* Autores.

## **Análisis De Cuellos De Botella, Holguras E Hitos**

Durante la planificación y ejecución del proyecto de implementación del sistema de Ventilación Bajo Demanda (VOD), se identificaron posibles cuellos de botella, márgenes de holgura y puntos críticos (hitos) que podían afectar la ejecución del cronograma y la asignación eficiente de recursos. Este análisis fue clave para mitigar riesgos, anticipar retrasos y asegurar la continuidad del proceso en cada fase del proyecto.

### ***Cuellos De Botella Identificados***

Disponibilidad del ingeniero de automatización: Dado que la programación del PLC y la integración con el SCADA dependían directamente de este profesional, cualquier indisponibilidad podía retrasar tanto el diseño lógico como la implementación del sistema.

Programación del PLC y pruebas del SCADA: Estas tareas fueron críticas y altamente técnicas, con bajo margen de error. La depuración del código y la verificación de las señales de entrada/salida podrían haber consumido más tiempo del esperado en caso de imprevistos.

Entrega de licencias o fallos en software: Una posible demora en la activación de licencias (Ventsim, AutoCAD o SCADA) habría generado un cuello de botella en el diseño y modelado del sistema.

Montaje e instalación de variadores y tableros: Si bien fue una actividad programada para una sola fase, su ejecución dependía de condiciones de acceso, disponibilidad eléctrica y apoyo de auxiliares. Cualquier contratiempo en la mina habría afectado la implementación.

### ***Holguras Identificadas***

Uso de bibliografía técnica: La consulta del libro de ventilación subterránea fue una actividad no crítica con holgura total, ya que podía realizarse de forma paralela a otras tareas en la fase de diagnóstico y diseño.

Consolidación de resultados: Esta actividad, realizada al final del proyecto, tenía una holgura relativa que permitía extenderse sin afectar el cierre general del proyecto, siempre que no se comprometieran los entregables.

Contingencias técnicas menores: Se dejó un margen en el cronograma para ajustes de cableado, configuración eléctrica e instalación de sensores. Esta holgura ayudó a absorber pequeñas desviaciones sin alterar los hitos principales.

### ***Hitos Del Proyecto***

Los siguientes fueron considerados hitos clave en la ejecución del proyecto. En la Tabla 10 se presentan los hitos del proyecto, con su respectiva etapa asociada y el momento en que fueron alcanzados.

**Tabla 10**

*Hitos del proyecto.*

<b>Hito</b>	<b>Etapas asociada</b>	<b>Momento</b>
Aprobación del diseño del sistema	Diseño del sistema	Final del mes 1
Montaje de los variadores	Implementación	Inicio del mes 2
Primer arranque del sistema VOD	Implementación	Final del mes 2
Inicio de monitoreo de variables	Evaluación del rendimiento	Inicio del mes 3
Análisis final y consolidación	Análisis y resultados	Final del mes 3

*Nota.* La tabla muestra los principales hitos del proyecto, indicando la etapa a la que corresponden y el momento previsto para su cumplimiento. Fuente. Autores.

Estos hitos marcaron el avance progresivo del proyecto y fueron puntos de control clave para validar el cumplimiento de los objetivos, evaluar riesgos y liberar recursos para la siguiente fase.

## Estructura De Descomposición Del Trabajo (EDT-WBS)

La Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT o WBS, por sus siglas en inglés) es una herramienta de gestión de proyectos que permite dividir sistemáticamente las tareas y entregables de un proyecto en componentes jerárquicos. Esta descomposición facilita el seguimiento, asignación de responsabilidades, control de costos y evaluación de avances, especialmente en proyectos técnicos como el de implementación del sistema de Ventilación Bajo Demanda (VOD).

La EDT del proyecto VOD se estructuró en cuatro niveles, desde el objetivo general hasta las actividades específicas, agrupadas por fases del proyecto. Un resumen de estos niveles se presenta en la Tabla 11, mientras que la descripción detallada de cada fase y sus actividades se expone en la Tabla 12.

### Tabla 11

*Resumen de niveles de la EDT del proyecto VOD.*

Nivel	Descripción
1	Proyecto VOD – Implementación piloto
2	Fase o grupo de trabajo
3	Entregable principal
4	Tareas específicas

*Nota.* La tabla indica los niveles principales que componen la Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT) del proyecto VOD, organizados de manera jerárquica. *Fuente.* Autores.

**Tabla 12**

*Desglose estructurado del proyecto VOD por niveles de la EDT.*

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Proyecto VOD	1. Diagnóstico inicial	1.1 Revisión del sistema existente	Levantamiento de información técnica
		1.2 Escenarios de optimización	Identificación de necesidades de ventilación
		1.3 Documentación base	Consolidación de planos y manuales
	2. Diseño del sistema	2.1 Alcance del sistema VOD	Definición de equipos, zonas y parámetros
		2.2 Lógica de control	Programación preliminar en PLC/SCADA
		2.3 Base de programación	Configuración inicial de software
	3. Implementación	3.1 Montaje de equipos	Instalación de VFDs, tableros, sensores
		3.2 Integración de sistemas	Conexión eléctrico y pruebas funcionales
		3.3 Puesta en marcha	Primer arranque del sistema VOD
	4. Monitoreo y evaluación	4.1 Seguimiento SCADA	Registro de variables: RPM, caudal, presión
		4.2 Evaluación de condiciones ambientales	Verificación de temperatura y gases
		4.3 Consolidación de datos	Análisis de rendimiento energético
	5. Análisis y resultados	5.1 Evaluación económica y técnica	Cálculo de ahorros y retorno de inversión
		5.2 Lecciones aprendidas	Identificación de mejoras y recomendaciones
		5.3 Informe final	Elaboración del documento técnico final

*Nota.* La tabla muestra el desglose estructurado del proyecto VOD por niveles de la EDT, especificando fases, actividades y productos asociados. *Fuente.* Autores.

Cada paquete de trabajo incluye actividades secuenciales con responsables asignados y recursos definidos.

Esta estructura permitió planificar de manera clara los entregables por fase, lo que favoreció la eficiencia del cronograma y la trazabilidad del avance.

La EDT también fue clave para alimentar otros elementos del proyecto, como la hoja de recursos, el cronograma de actividades y la estimación de costos.

## **Evaluación De La Factibilidad Económica, Social Y Ambiental Del Proyecto**

El desarrollo de un proyecto tecnológico en el sector minero subterráneo requiere una evaluación integral que trascienda lo meramente técnico y operativo. Por ello, además del diseño e implementación del sistema de Ventilación Bajo Demanda (VOD), se analizó la viabilidad del proyecto desde tres dimensiones clave: económica, social y ambiental. Esta evaluación permite establecer la sostenibilidad del proyecto en el tiempo y su impacto real en el entorno organizacional y territorial.

### ***Factibilidad Económica***

Desde la perspectiva económica, el proyecto demuestra una sólida viabilidad financiera tanto en su etapa piloto como en su proyección a largo plazo. La inversión inicial estimada asciende a \$721.283.500 COP, valor que contempla los costos directos asociados a la implementación: licencias, equipos, automatización, mano de obra especializada, instalación y contingencias.

Este costo incluye:

- Equipos de ventilación (3 ventiladores industriales de alta eficiencia).
- Componentes de automatización (PLC, variadores de frecuencia, sensores).
- Licencias de software (SCADA, Ventsim, AutoCAD).
- Instalación eléctrica, configuración y pruebas.
- Costos humanos y técnicos asociados a ingeniería y soporte de campo.

Una vez implementado, el sistema VOD demostró una reducción promedio de 683.877 kWh/año, gracias a su lógica de operación que reduce la velocidad de los ventiladores durante 7 horas del día, sin comprometer la ventilación de la mina. A un costo energético de \$0.2

USD/kW-h, esto equivale a un ahorro aproximado de \$136.775 USD anuales, o \$547.102.000 COP al año (a una TRM estimada de 4.000 COP/USD).

De esta manera, el tiempo de retorno de inversión (ROI) se estima en:

$$ROI = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{721283500}{547102000} = 1.32 \text{ años}$$

Este resultado es altamente favorable, especialmente en el sector minero, donde muchos proyectos tienen horizontes de recuperación de entre 3 y 5 años. La vida útil de los equipos supera los 8 años, lo que implica un flujo de ahorro sostenido, posterior al punto de equilibrio.

Además, al tratarse de un sistema modular y replicable, su implementación en otros niveles o minas de la misma empresa tendría un costo marginal mucho menor, ya que parte de la infraestructura y del conocimiento ya estaría consolidado.

### ***Factibilidad Social***

En el componente social, el proyecto tiene impactos positivos directos sobre el personal operativo, los equipos técnicos y la cultura organizacional. La ventilación es uno de los elementos críticos para la salud y seguridad en minas subterráneas, y este proyecto contribuye significativamente a mejorar las condiciones del ambiente laboral.

Principales beneficios sociales:

Reducción de exposición a ruidos industriales: Durante los periodos de operación en velocidad reducida, el nivel sonoro de los ventiladores disminuye considerablemente, contribuyendo a la prevención de enfermedades ocupacionales y al confort auditivo de los trabajadores.

Condiciones ambientales más estables: A pesar de la reducción de caudal durante ciertas horas, los parámetros de gases y temperatura se mantuvieron dentro de los límites permisibles. Esto permite asegurar un entorno laboral seguro y saludable.

Participación del personal técnico y operario: El proyecto involucró activamente a profesionales de distintas disciplinas, así como a auxiliares y operarios de mina. Esta inclusión favorece la transferencia de conocimiento, el sentido de pertenencia y la apropiación de soluciones tecnológicas por parte del equipo humano.

Posicionamiento institucional: La implementación de sistemas inteligentes y sostenibles mejora la imagen de la empresa ante sus trabajadores y stakeholders, mostrando una cultura organizacional orientada a la innovación y al bienestar del personal.

Este conjunto de factores demuestra que el proyecto no solo cumple con los requisitos técnicos, sino que también fortalece el tejido humano de la organización, alineándose con principios de responsabilidad social empresarial.

### ***Factibilidad Ambiental***

El componente ambiental del proyecto representa uno de los pilares más robustos y estratégicos del sistema VOD. La ventilación es uno de los principales consumidores de energía en minería subterránea, por lo que cualquier medida que optimice su uso tiene un impacto directo en la sostenibilidad energética de la operación.

Beneficios ambientales identificados:

Disminución del consumo eléctrico: Al reducir la velocidad de los ventiladores durante 7 horas diarias, se disminuye la potencia consumida en una proporción cúbica. Esto implica una reducción significativa en la huella de carbono asociada al sistema de ventilación.

Reducción indirecta de emisiones de CO<sub>2</sub>: Aunque la mina no genera energía directamente, al consumir menos electricidad de la red (que en Colombia aún proviene parcialmente de fuentes térmicas), se contribuye a disminuir las emisiones asociadas a la operación.

Uso eficiente de recursos tecnológicos existentes: El proyecto reutiliza infraestructura ya instalada (ventiladores, SCADA, PLCs), evitando la generación de residuos electrónicos y minimizando la necesidad de adquisición de nuevos activos.

Compatibilidad con estándares internacionales: El sistema puede ser alineado con prácticas de gestión energética como ISO 50001, reportes ESG o políticas de descarbonización de la industria extractiva.

Además, el proyecto no implica actividades que generen residuos sólidos, emisiones tóxicas ni alteración de ecosistemas, por lo cual su impacto ambiental directo es prácticamente nulo.

## Conclusiones

El sistema VOD es técnica y operativamente viable en minería subterránea: La implementación piloto permitió comprobar que la regulación de velocidad de los ventiladores, mediante lógica de control programada en PLC y SCADA, puede realizarse sin comprometer la ventilación mínima requerida para la operación, garantizando la seguridad del personal y la estabilidad de las condiciones ambientales subterráneas.

Se logró una reducción significativa del consumo energético: La operación de los ventiladores a velocidad reducida durante 7 horas al día, en función de la demanda de ventilación, permitió obtener una disminución del consumo eléctrico estimada en 683.877 kWh anuales, lo que representa un ahorro económico cercano a los \$547 millones COP al año.

El retorno de la inversión es corto y justifica económicamente el proyecto: Con una inversión total de \$721.283.500 COP y un ahorro anual proyectado superior a los \$547 millones, se obtiene un período de retorno inferior a 1.5 años, lo cual ratifica la alta rentabilidad del sistema VOD, especialmente si se proyecta a otras áreas de la mina.

El proyecto tiene un impacto social positivo: La mejora en la calidad del aire, la disminución del ruido industrial y la participación del personal técnico fortalecen la cultura de innovación y seguridad al interior de la mina, promoviendo un entorno de trabajo más saludable y colaborativo.

Desde el punto de vista ambiental, la solución es limpia, eficiente y sostenible: Al reducir el consumo energético, se disminuye indirectamente la huella de carbono de la operación minera, lo cual aporta a los compromisos ambientales de la empresa y al cumplimiento de estándares como ISO 50001 o indicadores de desempeño ESG.

## Recomendaciones

Escalar el sistema VOD a otros frentes de trabajo: Dado el éxito del piloto, se recomienda replicar la estrategia en zonas adicionales de la mina o en otras unidades operativas, considerando que ya existe una base instalada de equipos y un equipo técnico con experiencia en su implementación.

Incorporar sensores de presencia y automatización adaptativa: Para avanzar hacia un sistema completamente autónomo, se sugiere incluir sensores que detecten actividad real en las zonas de trabajo, lo cual permitiría que la ventilación se active y regule dinámicamente sin depender de horarios programados.

Integrar el sistema VOD en la política energética de la empresa: Esta solución puede ser considerada como parte de la estrategia corporativa de eficiencia energética, lo cual facilitaría su financiamiento, priorización y monitoreo en planes de sostenibilidad a mediano y largo plazo.

Monitorear el desempeño del sistema a largo plazo: Se recomienda mantener un sistema de auditoría energética continua que permita validar el comportamiento real del VOD, detectar desviaciones y actualizar los parámetros de control según cambios en la operación minera.

Documentar y socializar la experiencia como caso de éxito: Publicar o divulgar los resultados del piloto puede posicionar a la empresa como líder en innovación dentro del sector minero colombiano, además de abrir oportunidades de colaboración técnica con otras organizaciones o instituciones académicas.

### Referencias Bibliográficas

- Airtec. (s. f.). *Nuestros productos*. Airtec. <https://www.airtec.com.pe/productos/>
- McPherson, M. J. (2009). *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. Springer Science & Business Media.
- PLCpartsSolution. (s. f.). *Industrial automation parts for sale*. PLCpartsSolution. <https://plcpartssolution.com/es?srsltid=AfmBOopQyLwnMuQi8v5bCsKOcJ5Pullr0FHkQ4ZmwHaNhvZmkpgqcvlC>
- Schneider Electric. (2021). *EcoStruxure™ SCADA Operation – Technical Guide*. Schneider Electric. <https://www.se.com>
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. (2024). *Guía metodológica para la elaboración de proyectos académicos*. UNAD. <https://www.unad.edu.co>
- Ventsim. (2023). *Ventsim Visual – User Manual*. Howden Group. Ventsim. <https://www.ventsim.com>
- Zitrón. (2022). *Catálogo técnico de ventiladores axiales para minería subterránea*. Zitrón. <https://www.zitron.com>