



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Optimización del sistema de ventilación en minas
hipertermales para potenciar la productividad de los
trabajadores: estudio de caso en la mina El Limón - 2,
Nicaragua, 2023**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

AUTOR

Jorge Miguel ALEJOS MENDOZA

ASESOR

Ernesto Sabino LOPEZ POMAREDA

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Alejos, J. (2025). *Optimización del sistema de ventilación en minas hipertermales para potenciar la productividad de los trabajadores: estudio de caso en la mina El Limón - 2, Nicaragua, 2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Jorge Miguel Alejos Mendoza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	71839238
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0004-0086-6389
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Ernesto Sabino Lopez Pomareda
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09152241
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0006-0500-1696
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Wiliam Gilberto Escudero Simon
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	04051131
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Edgar Wiliam Alayo Leon
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01710165
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Victor Hugo Ramirez Ponce
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06163701

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.6.4. Ingeniería de Ventilación de Minas
Grupo de investigación	Seguridad, Salud y Sociedad - SSS
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Nicaragua Departamento: León Provincia: León Distrito: Malpaisillo Latitud: 12.6757233 Longitud: -86.571617
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Diciembre 2022 - Diciembre 2023 2022 - 2023
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

En el auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el jueves 31, de Julio del 2025 siendo las 10:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. WILLIAM GILBERTO ESCUDERO SIMON
Mg. EDGAR WILLIAM ALAYO LEON
Ing. VICTOR HUGO RAMIREZ PONCE

(PRESIDENTE)
(SECRETARIO)
(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: "**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN MINAS HIPERTERMALES PARA POTENCIAR LA PRODUCTIVIDAD DE LOS TRABAJADORES: ESTUDIO DE CASO EN LA MINA EL LIMÓN - 2, NICARAGUA, 2023**" presentado por Don: **JORGE MIGUEL ALEJOS MENDOZA**, Bachiller en Ingeniería Minas, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero de Minas.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

CONFORMIDAD Y SATISFACCIÓN

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de: **15 (QUINCE)**.

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**, a Don: **JORGE MIGUEL ALEJOS MENDOZA**.

Siendo las **10:50** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 31 de julio del 2025


Dr. WILLIAM GILBERTO ESCUDERO SIMON
Presidente


Mg. EDGAR WILLIAM ALAYO LEON
Secretario


Ing. VICTOR HUGO RAMIREZ PONCE
Miembro


Mg. ERNESTO SABINO LOPEZ POMAREDA
Asesor de Tesis



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE

SAN MARCOS

Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, ERNESTO SABINO LOPEZ POMAREDA en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N° 000001-2025-EPIMI-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es "Optimización del sistema de ventilación en minas hipertermales para potenciar la productividad de los trabajadores: estudio de caso en la mina El Limón - 2, Nicaragua, 2023" presentado por el bachiller JORGE MIGUEL ALEJOS MENDOZA para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 11% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniero de Minas.

Lima, 26 de junio de 2025

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Ernesto Sabino Lopez Pomareda

DNI: 09152241

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

*A Dios por permitirme crecer
junto a mis tres principales pilares:
Mamá Elva, Mamá Dora y mi familia.*

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	15
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. INTRODUCCIÓN	15
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	16
1.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.4. IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	18
CAPÍTULO II	19
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	19
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	19
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES	20
2.2. BASES TEÓRICAS	22
2.2.1. DEFINICIÓN Y OBJETIVOS DE LA VENTILACIÓN DE MINAS	22
2.2.2. NATURALEZA Y FACTORES MODIFICANTES DEL AIRE	26
2.2.3. ELEMENTOS DE VENTILACIÓN	28
2.2.4. CIRCUITOS DE VENTILACIÓN	39
2.2.5. IMPACTO DE LA VENTILACIÓN DE MINAS EN LA SALUD	45
2.2.6. MINAS HIPERTERMALES: PRINCIPALES DESAFÍOS	50
2.2.7. IMPACTO DEL CALOR EN MINAS EN LA PRODUCTIVIDAD	53
2.3. GLOSARIO	55
CAPÍTULO III	57
3. HIPÓTESIS Y VARIABLES	57
3.1. LAS HIPÓTESIS	57
3.1.1. HIPÓTESIS GENERAL	57
3.1.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	57
3.2. LAS VARIABLES	57
3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	58
CAPÍTULO IV	59
4. MATERIALES Y MÉTODOS	59
4.1. ÁREA DE ESTUDIO	59

4.1.1.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	59
4.2.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	59
4.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	59
4.3.1.	POBLACIÓN	59
4.3.2.	MUESTRA.....	59
4.4.	PROCEDIMIENTO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	60
4.4.1.	PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	60
4.4.2.	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	60
4.4.3.	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	60
4.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	64
CAPÍTULO V		65
5.	RESULTADOS.....	65
5.1.	RESUMEN DE INSPECCIÓN DE CAMPO.....	65
5.1.1.	CONDICIONES TERMO-AMBIENTALES DEL LUGAR	65
5.1.2.	PUNTOS DE OPERACIÓN DE VENTILADORES.....	67
5.1.3.	CÁLCULO DE DEMANDA DE AIRE	72
5.1.4.	LEVANTAMIENTO DE CAUDALES	80
5.1.5.	LEVANTAMIENTO DE PRESIONES	82
5.1.6.	FACTORES DE FRICCIÓN	83
5.1.7.	GRADIENTE GEOTÉRMICO.....	88
5.1.8.	FILTRACIÓN DE AGUAS TERMALES.....	90
5.1.9.	SISTEMA DE BOMBEO	92
5.1.10.	CÁLCULO DE PRODUCTIVIDAD DE TRABAJADORES ACTUAL	94
5.2.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN ACTUAL.....	95
5.2.1.	DISTRIBUCIÓN ACTUAL DEL SISTEMA	95
5.2.2.	RIESGOS ASOCIADOS AL SISTEMA ACTUAL	99
5.2.3.	MEJORAMIENTO DEL SISTEMA A CORTO PLAZO.....	100
5.3.	PLANEAMIENTO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN	104
5.3.1.	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS CLAVE	104
5.3.2.	EVALUACIÓN DE LA DEMANDA DE AIRE	108
5.3.3.	TRADE OFF DE SISTEMA DE VENTILACIÓN	111
CAPÍTULO VI		123
6.	DISCUSIÓN	123
6.1.1.	EVALUACIÓN DE RIESGOS DEL SISTEMA PROPUESTO	124

6.1.2.	EVALUACIÓN ECONÓMICA – CAPEX Y OPEX DEL SISTEMA	134
6.1.3.	MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS TRABAJADORES.....	141
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	147
7.1.	CONCLUSIONES	147
7.2.	RECOMENDACIONES.....	148
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
9.	ANEXOS.....	153
	ANEXO 1: DETALLE DEL ANEXO 38 – CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE AIRE - D.S.N°024-2016 Y SU MODIFICATORIA D.S.N°023-2017.	153
	ANEXO 2: MATRIZ DE TRONCALES.....	159
	ANEXO 3: CÁLCULO DE FACTORES DE FRICCIÓN PARA LABORES HORIZONTALES.	160
	ANEXO 4: CÁLCULO DE DEMANDA DE AIRE – PLENA CARGA.....	161
	ANEXO 5: CÁLCULO DE DEMANDA DE AIRE – CARGA REDUCIDA.	162
	ANEXO 6: CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE AIRE EN UN FRENTE DE TRABAJO - VENTILACIÓN AUXILIAR.	163
	ANEXO 7: CÁLCULO DE TIEMPOS PARA LA PRODUCTIVIDAD DE LOS TRABAJADORES - ESCENARIO ACTUAL 2022.....	164
	ANEXO 8: CÁLCULO DE TIEMPOS PARA LA PRODUCTIVIDAD DE LOS TRABAJADORES - ESCENARIO OPTIMIZADO 2022	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Etapas del ciclo de minado subterráneo	25
Figura 2: Distribución ideal de flujo de aire en un ventilador centrífugo.	30
Figura 3: Principales componentes y estructura de un ventilador centrífugo.....	31
Figura 4: Distribución ideal de flujo de aire en un ventilador axial.....	32
Figura 5: Principales componentes y estructura de un ventilador axial.	33
Figura 6: Tapón de bloquetas sin costillas.....	36
Figura 7: Tapón de bloquetas con costillas.	36
Figura 8: Tapón de bloquetas sobre carga acumulada.	37
Figura 9: Regulador de flujo de aire.	38
Figura 10: Esquema general del circuito principal de ventilación.	41
Figura 11: Esquema general del circuito secundario de ventilación.....	42
Figura 12: Esquema general del circuito auxiliar de ventilación.	43
Figura 13: Representación de valores TLV según su rango de exposición de tiempo.	47
Figura 14: Influencia de la temperatura efectiva en la efectividad de los trabajadores.	54
Figura 15: Termo-Anemómetro Kestrel 5200.....	61
Figura 16: Termómetro digital PROSTER.....	62
Figura 17: Termómetro láser Fluke 62 MAX.	63
Figura 18: Tubo de Pitot Dwyer.....	64
Figura 19: Parámetros psicométricos medidos - Resumen integral.....	66
Figura 20: Ventilador extractor de aire viciado - RB_1.....	68
Figura 21: Medición de presión dinámica con tubo de Pitot – RB_1.....	69
Figura 22: Medición de presión estática con sonda de presión – RB_1.....	69
Figura 23: Medición de temperatura de flujo de aire en salida – RB_1.....	70
Figura 24: Ventilador extractor de aire viciado – RB_1.....	71
Figura 25: Medición de presión dinámica con tubo de Pitot – RB_2.....	71
Figura 26: Medición de presión estática con sonda de presión – RB_2.....	72
Figura 27: Medición de temperatura de flujo de aire en salida – RB_2.....	72
Figura 28: Análisis estadístico de requerimiento de aire por familia de equipo según D.S.N°023-2017.	80
Figura 29: Análisis referencial de factores de fricción.....	86
Figura 30: Referencia de medición de temperatura de macizo rocoso - Frente de	

exploración.....	89
Figura 31: Distribución de temperaturas del macizo rocoso.....	90
Figura 32: Referencia de volumen de filtración de agua termal.....	91
Figura 33: Medición de temperatura de aguas termales.	91
Figura 34: Presencia de vapor de agua.	92
Figura 35: Estación de acumulación de agua (bombeo).....	93
Figura 36: Emisión de vapor en poza de bombeo.....	93
Figura 37: Medición de temperatura de agua en poza de bombeo.....	94
Figura 38: Análisis comparativo de tiempos empleados por guardia de trabajo - Escenario actual.....	95
Figura 39: Distribución actual del sistema – Circuito de extracción.	96
Figura 40: Distribución actual del sistema – Circuito de inyección.....	98
Figura 41: Infraestructura civil antigua que regula el flujo de aire – RB_2.	101
Figura 42: Tapón con fugas de aire – RB_2.....	101
Figura 43: Tapón de acceso con fugas de aire - RB_1.	102
Figura 44: Desfase de troncal - RB_1.....	102
Figura 45: Ventilador inoperativo generando recirculación de aire caliente - Pozo_8.	103
Figura 46: Hermetizado de ventiladores con malla y manga - Pozo_8.....	104
Figura 47: Análisis de diámetro económico - 250 KCFM.	106
Figura 48: Análisis de costo según diámetro económico - 250 KCFM.....	106
Figura 49: Histórico de temperaturas en superficie - Managua 2022.	107
Figura 50: Demanda de aire según etapa de ciclo de minado.....	111
Figura 51: Distribución actual del sistema integral de ventilación.	112
Figura 52: Propuesta de circuito Santa Pancha.	113
Figura 53: Propuesta de circuito Panteón.....	113
Figura 54: Análisis de condiciones termo-ambientales sin uso de aire acondicionado. .	115
Figura 55: Análisis de temperatura en frente de mayor profundidad - Extractor de 350 KCFM – Sin uso de aire acondicionado.....	117
Figura 56: Análisis de temperatura en frente de mayor profundidad - Extractor de 440 KCFM – Sin uso de aire acondicionado.....	118
Figura 57: Análisis de condiciones termo-ambientales con uso de aire acondicionado. .	120
Figura 58: Análisis de temperatura en frente de mayor profundidad - Extractor de 350	

KCFM - Con uso de aire acondicionado.	122
Figura 59: Unidad de acondicionamiento de aire en el frente de trabajo - Vista de planta de su ubicación referencial.	129
Figura 60: Sistema Mixto - Alimentación y Acondicionamiento.	130
Figura 61: Cámara de recuperación con acondicionamiento de aire – Exterior.....	131
Figura 62: Cámara de recuperación con acondicionamiento de aire – Interior.....	131
Figura 63: Histórico de condiciones termo-ambientales en interior mina según variación de clima en superficie – 2,500 kW_R de refrigeración.....	132
Figura 64: Histórico de condiciones termo-ambientales en interior mina según variación de clima en superficie - 5,000 kW_R de refrigeración.....	133
Figura 65: Análisis comparativo de valores CAPEX por tipo de sistema propuesto.	140
Figura 66: Análisis comparativo de valores OPEX por tipo de sistema propuesto.....	140
Figura 67: Análisis comparativo de mejora de productividad respecto a circuito de ventilación con AC vs sin AC.	142
Figura 68: Análisis comparativo de tiempos empleados por guardia de trabajo - Escenario optimizado.	145
Figura 69: Metros de avance en las labores mineras 4 m x 4 m.	146
Figura 70: Producción minera en toneladas durante 2023.....	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Gases que componen el aire seco y sus valores proporcionales.....	27
Tabla 2: Cuadro comparativo de principales características según tipo de ventilador.	34
Tabla 3: Valores de resistencia según porcentaje de abertura de reguladores.	39
Tabla 4: Cuadro comparativo de principales características según tipo de circuito de ventilación.....	44
Tabla 5: Valores LMP's de gases contaminantes en el aire - D.S.N°023-2017 - ANEXO 15.	47
Tabla 6: Cuadro referencial de valores representativos de demanda de aire.	54
Tabla 7: Análisis de operacionalización de variables.	58
Tabla 8: Días y horarios de medición de condiciones termo-ambientales en superficie... 	66
Tabla 9: Parámetros psicométricos estimados.	67
Tabla 10: Distribución de personal por área de trabajo.	74
Tabla 11: Agrupación de equipos por familia de equipos y tipo de equipos.	76
Tabla 12: Valores de disponibilidad mecánica y factor de utilización por tipo de equipo. 	76
Tabla 13: Valores de demandad de aire por equipos diésel.	77
Tabla 14: Demanda de aire por familia de equipo según D.S.N°023-2017.....	79
Tabla 15: Demanda de aire por acápite particular según D.S.N°023-2017.	79
Tabla 16: Caudales de ingreso de aire fresco.	81
Tabla 17: Caudales de salida de aire viciado.	81
Tabla 18: Balance de caudales de aire - Sistema Integral.	81
Tabla 19: Cálculo de cobertura de aire en función de la demanda.	82
Tabla 20: Presión medida de ventiladores principales.....	82
Tabla 21: Anchos de sección medidos.	83
Tabla 22: Altos de sección medidos.....	84
Tabla 23: Rugosidades Absolutas para labores horizontales.	85
Tabla 24: Factores de fricción calculados para labores horizontales.	85
Tabla 25: Factores de fricción representativos para labores horizontales.....	87
Tabla 26: Altos de asperezas para labores verticales.....	87
Tabla 27: Factores de fricción calculados para labores verticales.	88
Tabla 28: Factores de fricción representativos para labores verticales.	88
Tabla 29: Cuadro resumen - Temperatura de roca medida.	89

Tabla 30: Balance de caudales de aire - RB_1.....	97
Tabla 31: Balance de caudales de aire - RB_2.....	97
Tabla 32: Balance de caudales de aire - Pozo_8.	99
Tabla 33: Valores calculados de demanda de aire - Plena carga.....	109
Tabla 34: Valores calculados de demanda de aire - Carga reducida.....	110
Tabla 35: CAPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector (Disponibles) sin Aire Acondicionado.....	135
Tabla 36: OPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector (Disponibles) sin Aire Acondicionado.....	135
Tabla 37: CAPEX - 440 KCFM Extractor / 355 KCFM Inyector (Nuevos) sin Aire Acondicionado.....	136
Tabla 38: OPEX - 440 KCFM Extractor / 355 KCFM Inyector (Nuevos) sin Aire Acondicionado.....	137
Tabla 39: CAPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector con Aire Acondicionado (5,000 KWR).	138
Tabla 40: CAPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector con Aire Acondicionado (10,000 KWR).	138
Tabla 41: OPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector (Nuevos) con Aire Acondicionado (5,000 KWR).	139
Tabla 42: Cuadro comparativo de CAPEX y OPEX de alternativas propuestas eb función del NSR proyectado.	141

RESUMEN

Nos referimos a una mina hipertermal con condiciones extremas en interior mina cuando al desarrollo típico de operaciones y las consideraciones de interacción junto a sus diversos factores modificantes se le suman condiciones naturales específicas como fuentes de aguas termales, elevado valor de gradiente geotérmico y valores considerables de temperatura de aire en superficie.

La presente memoria de tesis desarrolla de manera secuencial el caso de estudio realizado en la Mina Hipertermal El Limón - 2 ubicada en Nicaragua cuyo principal problema es el bajo índice de productividad de 2,000 onzas de oro, debido a tiempos prolongados de descanso para realizar trabajos en la operación en interior mina con temperaturas del aire en un rango de hasta 40 °C de bulbo seco, partiendo desde la caracterización del sistema con observaciones realizadas en la inspección de campo hasta un planeamiento integral a corto, mediano y largo plazo, interrelacionando la sinergia entre factores medio-ambientales, seguridad y ergonomía para los trabajadores así como también viabilidad económica para el desarrollo constante de operaciones.

Se diseñara de manera digital haciendo uso de software de ventilación para realizar cálculos de costo y efectividad donde se obtuvo que mediante la zonificación por subniveles los accesos de ventilación de la unidad minera e independizando circuitos de ventilación como alternativa a corto plazo logrando disminuir la temperatura hasta en 1 °C del aire, así mismo, también se consideró la construcción de una nueva troncal de ventilación (extracción de aire viciado) así como también el análisis de uso de aire acondicionado (aspersores de agua en el ingreso de aire fresco) para la disminución total de hasta 3 °C de temperatura del aire con lo que la productividad incrementará desde un valor de 2000 onzas hasta un valor 10,000 onzas mensuales Finalmente, se demostrará que es factible el procedimiento del

proceso actual de minado, así como su proyección según LOM con la mejora de las condiciones termo-ambientales en interior mina y su influencia directa con el incremento significativo de la productividad de los trabajadores bajo condiciones seguras de trabajo y ambientalmente favorables.

ABSTRACT

When the typical development of operations and the interaction considerations along with their various modifying factors are added to specific natural conditions such as hot springs, high geothermal gradient value, and considerable air temperature values on the surface, we refer then to a hyperthermal mine with extreme conditions inside the mine.

The present thesis develops sequentially the case study carried out in the Hyperthermal Mine El Limón - 2 located in Nicaragua whose main problem is the low productivity index of its workers due to prolonged rest times during the operations inside the mine with air temperatures in a range of up to 40 °C of dry bulb, starting from the characterization of the system with observations made in the field inspection to an integral planning in the short, medium and long term, interrelating the synergy between environmental, safety and ergonomics factors for the workers as well as economic viability for the constant development of operations.

Subsequently, the method proposed for sectionalizing the mining unit by zones and isolating ventilation circuits as a short-term alternative to reduce air temperature by up to 1°C will be presented. Additionally, a comparative analysis of alternatives is provided, first considering the construction of a new ventilation trunk (extraction of contaminated air), as well as an analysis of using air conditioning (water sprayers at the fresh air intake) to achieve a total air temperature reduction of up to 3°C. This improvement is expected to increase productivity from the value of 15% to the value of 75%.

Finally, it will be demonstrated that the procedure of the current mining process is feasible as well as its projection according to LOM with the improvement of the thermo-environmental conditions inside the mine and its direct influence with the significant increase

of the productivity of the workers under safe working conditions and environmentally favorable.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1.INTRODUCCIÓN

El sistema de ventilación es un factor importante de optimización dentro del proceso minero subterráneo, sin embargo, aun cuando existen factores modificantes típicos de operaciones diarias, existen también condiciones adicionales que desfavorecen las actividades del proceso minero en caso de no ser gestionadas correctamente desde el planeamiento integral de ventilación, así, la evaluación del sistema de ventilación significa un procedimiento holístico que evalúa la interrelación de cada uno de estos factores modificantes y su dinamismo frente a potenciales variaciones que afecten de manera principal a los circuitos de ventilación en sus tres niveles (principal, secundario y auxiliar).

En la presente memoria de tesis se especificará los aspectos más relevantes identificados y aplicados en el sistema de ventilación actualmente operativo en la mina hipertermal El Limón - 2 como resultado del trabajo de campo realizado, en el cual se recopilaron los factores intrínsecos que dominan la distribución de aire del sistema de ventilación en la mina con lo que se elaboró y calibró el correspondiente modelo de simulación con la finalidad de llevar a cabo las simulaciones correspondientes para determinar el impacto de las acciones de mejora recomendadas.

Se presenta en primera instancia el requerimiento correspondiente de flujo de aire fresco ingresante para su respectiva distribución en interior mina, así como el análisis del impacto de las infraestructuras asociadas y equipos de ventilación, buscándose la optimización del consumo de energía de estas. Con el establecimiento de correspondientes etapas de análisis enfocadas en el corto, mediano y largo plazo de la operación para las diversas zonas proyectadas considerando los hitos claves en el ritmo de producción

estimado, se analizó el planeamiento integral de alternativas propuestas para la mejora de las condiciones termo-ambientales en interior mina y lo que implicará el incremento de la productividad de los trabajadores en estas nuevas condiciones.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Para una mina con ubicación geográfica cerca al nivel del mar, temperatura media de 27.8 °C durante el año y 300 m de profundidad, a la cual se le suman las condiciones termo-ambientales de sitio adversas debido a fuentes de calor, tales como aguas termales en un rango de 50 °C a 60 °C, así como un gradiente geotérmico de 8 °C / 100 m debido a su proximidad a zonas volcánicas (**Figura 1**), identificamos que el nivel de productividad para esta mina hipertermal es de solo el 15%, generando incluso incidentes de alto potencial debido a la exposición a flujos de aire con más de 40°C de bulbo seco.

Al presentar la productividad un valor tan bajo implica también valores bajos de aproximación a los objetivos planteados dentro del proceso minero y que incluso ponen en peligro la continuidad del desarrollo de operaciones para esta mina, así, la complejidad intrínseca de esta investigación radica en controlar las condiciones naturalmente extremas para que no generen cambios significativos en la productividad y por ende no desfavorezcan la continuidad de operaciones en esta unidad.

1.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.2.1. Problema general

¿Cómo optimizar el sistema de ventilación en minas hipertermales para potenciar la productividad de los trabajadores y equipos mineros en la mina El Limón - 2, Nicaragua, 2023?.

1.2.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las condiciones estructurales subterráneas y térmicas, las características del aire y la distribución de la ventilación que inciden en la eficiencia del sistema en la mina el Limón - 2, Nicaragua, 2023?
- ¿Cuál es el caudal de aire requerido para garantizar un sistema de ventilación eficiente en la mina el Limón - 2, Nicaragua?
- ¿Cuáles son los factores determinantes en el diseño optima de sistema de ventilación, que aumente la productividad de los trabajadores en mina El Limón - 2, Nicaragua, 2023?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1.1. Objetivo general

Optimizar el sistema de ventilación en minas hipertermales para potenciar la productividad de los trabajadores y equipos mineros en mina el Limón - 2, Nicaragua - 2023

1.3.1.2. Objetivos específicos

- Identificar las condiciones estructurales subterráneas y térmicas, las características del aire y la distribución de la ventilación que inciden en la eficiencia del sistema en la mina el Limón - 2, Nicaragua, 2023.
- Calcular el caudal aire requerido en la mina el Limón - 2, Nicaragua, 2023.
- Analizar el sistema de ventilación aumente la productividad de los trabajadores más rentable en la mina el Limón - 2, Nicaragua, 2023.

1.4. IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia de esta investigación radica en la necesidad de incrementar la productividad de los trabajadores durante el desarrollo de sus operaciones en la mina hipertermal El Limón - 2, contando con un sistema integral de ventilación eficiente y favorable en términos de gemelo digital para mantener las condiciones ergonómicas de trabajo en interior mina a corto, mediano y largo plazo.

Dentro de esta investigación se considera el planeamiento integral de un sistema de ventilación, desde la inspección de campo, pasando por la calibración del Software simulación de ventilación, puesta en marcha de actividades de mejora, así como la planificación de escenarios de trabajo considerando los factores modificantes involucrados.

El alcance está dirigido principalmente al área de planeamiento de la mina hipertermal El Limón - 2, sin embargo, puede ser base de extrapolación para minas que presenten condiciones extremas de calor similares a la mina en estudio.

1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Las limitaciones de la investigación identificadas fueron resueltas durante el desarrollo de esta según el siguiente detalle:

- **Accesibilidad:** Una de las principales limitantes fue la accesibilidad a zonas remotas de trabajo debido a que, considerando las temperaturas elevadas del aire (superiores a 35 °C), la solución fue considerar inspecciones de 15 minutos con descansos de 30 minutos en la unidad móvil (camioneta) que contaba con aire acondicionado.
- **Traslado:** Otra de las principales limitaciones fue el traslado hacia la unidad minera desde Perú, esta limitante fue resuelta por el empleador del autor de la presente memoria de tesis quien cubrió con la totalidad del traslado.

- **Información de estudio:** Una de las principales limitaciones es la inexistencia de estudios de ventilación realizados en la unidad minera El Limón, siendo bibliografía inédita la empleada en el presente informe.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Xu, Y., et al, (2022) El artículo sugiere una solución económica para reducir el peligro de golpes de calor debido a las elevadas temperaturas, utilizando las distancias entre los túneles de ventilación. Se utilizó un método experimental durante un periodo de 10 años de recolección de datos, en el que se expusieron tres casos de estudio para determinar el efecto de la inyección de agua y la configuración de los canales de producción en las propiedades de transferencia de calor y masa en la capa de roca. Tras cuatro años de suministro de agua, la temperatura al término del túnel en el Caso 1 se redujo rápidamente a 30,9 °C; esta temperatura es 6,6 °C y 3,4 °C inferior a la de los Casos 2 y 3, respectivamente. Se determinó que las distancias más reducidas entre el canal de inyección y el túnel están vinculadas con disminuciones más veloces de la temperatura del túnel. Esta metodología incrementa notablemente el confort térmico en el interior del túnel y genera una considerable energía geotérmica.

Qiaoyun, H., et al. (2019) El estudio evalúa el sistema de refrigeración es frecuentemente empleado en las minas de carbón profundas de China para el aumento del riesgo de calor. La implementación de sistemas de refrigeración, en particular el sistema de Maquinaria de Intercambio de Alta Temperatura (HEMS), aún genera reclamos de los

empleados sobre las condiciones laborales. Se requirió un análisis del sistema de refrigeración en función del confort térmico. En este estudio, se llevó a cabo una prueba en el lugar y una simulación numérica, evaluando el impacto del enfriamiento en el sistema HEMS a través del índice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature, o temperatura de bulbo húmedo y globo). Los hallazgos señalaron que los parámetros actuales (temperatura de salida del aire, resistencia de fluido y velocidad respectivamente de 18 °C, 80% y 1,5 m/s) del refrigerador de aire no provocarían que los empleados en todos los túneles se sintieran a gusto; la HR en el túnel de entrada disminuyó al 75% y en el túnel de minería se redujo al 60%, satisfaciendo a todos los empleados en todo el túnel. Los hallazgos resultarían ventajosos para mejorar el enfriamiento en las minas de carbón profundas.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Castillo (2023) desarrolló su enfoque en la mejora del sistema de ventilación en el 2020 en la minera aurífera retamas. S.A. Marsa, la metodología planteada fue la toma de datos en campo para procesarlas en el software VentSim, en este trabajo de investigación se analizó las condiciones del sistema de ventilación en función a los métodos y conceptos con la finalidad de alcanzar a cubrir la necesidad de aire mina Huinac. En sus resultados obtenidos indica un caudal de ingreso total de aire fresco de 571.2 KCFM y un caudal total de salida de aire viciado de 693.8 KCFM, presentando un déficit del 17.66%, y la necesidad de aire con un valor de 1'084.9 KCFM. El trabajo de investigación concluyó que la alternativa de mejora era el reemplazo de 2 ventiladores siendo el nuevo ingreso de aire 500 KCFM para coberturar al 102%.

Zavaleta (2023) en su investigación tiene como objetivo el determinar el grado de mejora del sistema de ventilación al ser optimizado, con el fin de abordar la excesiva

acumulación de gases en la mina Sheridan , empleando la metodología experimental, descriptiva comparativa, los resultados obtenidos demuestran que el requerimiento total de aire según el personal, equipos y fugas, el cual era de 14531.3 cfm (411.5 m³/min) , se determinó que la ventilación natural sería la opción más económica con la conexión de una chimenea a superficie debido a los cambios de presiones (3930.0 USD), incrementando el requerimiento de aire de 69% a 88 % lo cual generaría flujos continuos dentro las labores. Asimismo, utilizar solo ventilación auxiliar para canalizar los flujos y evacuar los gases de voladura de 1:48 a 0:51 horas (46.9%) y regular los horarios de ingreso. Concluyendo que se observó una reducción significativa del 59.9% en la acumulación de gases en el sistema de ventilación de la Mina Sheridan al optimizar el sistema.

Almerco (2022) menciona que la investigación de los sistemas de ventilación se establece para suministrar un determinado caudal de aire fresco respirable, esto para controlar la temperatura y la humedad en el ambiente. El objetivo de su investigación fue determinar cómo la evaluación del sistema de ventilación influye en la mejora de la deficiencia de aire en el caso específico de la mina Antapite de Empresa Sierra Antapite S.A.C. La investigación se realizó con el método científico, del tipo aplicado, del nivel descriptivo y explicativo, y con el diseño descriptivo comparativo. Partiendo de que el requerimiento de aire por personal, equipos, consumo de madera y dilución de gases es de 172.1 KCFM y la salida de aire viciado es de 66.9 KCFM, la cobertura del sistema es únicamente del 39%. Los ventiladores auxiliares requeridos son 6 ventiladores de 20 KCFM y un ventilador de 30KCFM. Finalmente estableció las condiciones de la evacuación del aire viciado en la unidad minera pasando de un tiempo actual de 2 horas y 30 minutos hasta la aplicación del sistema propuesto con un tiempo de 1 hora y 40 minutos.

Ramos (2021) presentó la investigación que tuvo como finalidad incrementar la

productividad mediante el diseño del puesto de trabajo con mejores condiciones ergonómicas en el área comercial de la empresa Moncav CJE SAC, en esta investigación se enfocó en el cálculo de las condiciones ergonómicas que inciden en la salud de los colaboradores y el rendimiento laboral de la empresa. La investigación es de diseño experimental de tipo aplicada, longitudinal con enfoque cuantitativo basado en el estudio, en esta investigación obtuvo como resultado un nivel de cumplimiento antes de la aplicación de 32.86%, concluyendo la aplicación de los métodos ergonómicos logró el incremento en la productividad en un 29%.

Daniel Naupari (2014) presentó en el X Congreso Nacional de Minería el trabajo técnico titulado “Estudio Psicrométrico y Análisis Técnico de Aplicación de Aire Acondicionado en Mina Cobriza”, en este trabajo detalla las dificultades de trabajo debido al incremento de calor en interior mina según el avance de profundización lo que resultaba desfavorable para el desarrollo de operaciones, luego de las evaluaciones técnicas y mediciones propone el incremento de caudal de ingreso, y una modificación global en el circuito integral de ventilación como modificaciones puntuales en los circuitos auxiliares y concluye que es viable el desarrollo de operaciones en condiciones de calor con un correcto monitoreo de los parámetros psicrométricos y su regulación desde el sistema de ventilación.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. DEFINICIÓN Y OBJETIVOS DE LA VENTILACIÓN DE MINAS

2.2.1.1. Definición general

La ventilación de minas ha sido definida desde varias aristas según la importancia otorgada por los autores, partiendo desde aspectos ergonómicos, de seguridad y económicos, sin embargo, para detallar el objetivo principal de la ventilación de minas, así como también su influencia y aplicación, se considerarán

dos principales conceptos acuñados por autores que aportaron un sinnúmero de estudios sobre el tema y que, a criterio propio, son considerados dos referentes de ventilación de minas.

J. McPherson realiza la comparación entre la ventilación de minas y el sistema circulatorio del cuerpo humano, menciona que existen labores que inyectan aire fresco hacia los diversos frentes de trabajo que son comparados en funcionalidad con las arterias del cuerpo, por su lado, todo este aire que será viciado producto del desarrollo de operaciones tendrá que ser direccionado hacia superficie mediante conductos que cumplen funciones similares que las venas en el cuerpo humano, entonces, la definición general se enfoca en la importancia respecto al mantenimiento de la vitalidad de los trabajadores en interior mina desde el punto de vista de distribución de aire.

L. Hartman por su lado realiza la comparación general de procesos, esto es, nos habla de que un proceso similar al sector minero subterráneo es el trabajo que realizan los astronautas al explorar tierras no conocidas, en ambos casos, el desarrollo del proceso dependerá de una línea de soporte para el trabajador y/o el astronauta, finalmente, concluye que así como el astronauta dependerá de una línea de oxígeno conectada a una máquina generadora el trabajador minero dependerá del correcto desarrollo del área de ingeniería de ventilación encargada de facilitar las condiciones para el desarrollo de sus actividades.

Desde un punto de vista general y consolidando la definición de estos dos autores identificaremos que existe una vital importancia para el desarrollo de las operaciones en interior mina lo que responderá a objetivos de la ventilación de minas, principios de aplicación y su impacto, así como también su correspondiente regulación

según normativa vigente en el país en el que se encuentre ubicada la unidad minera, todo esto será detallado en los apartados posteriores.

2.2.1.2. Objetivos de la ventilación de minas

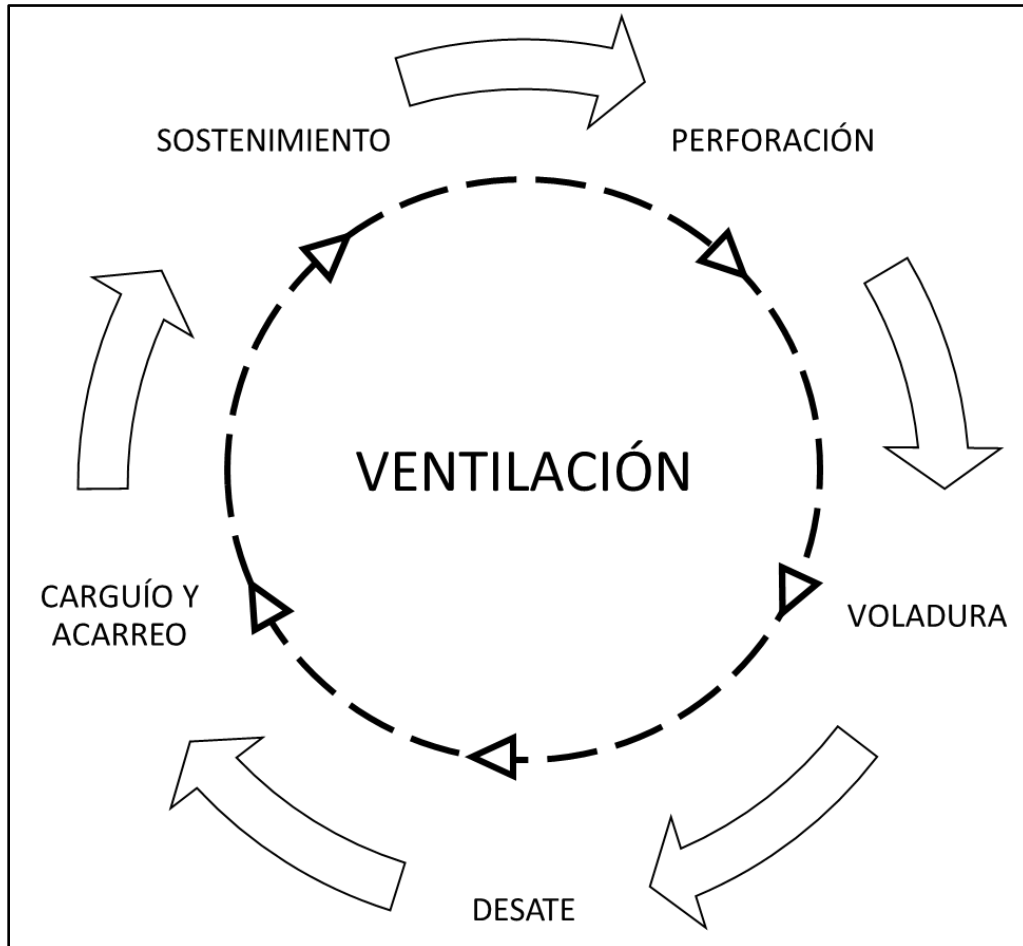
En términos generales la ventilación de minas debe de cumplir con el objetivo principal de habilitar el flujo de aire necesario tanto en calidad como en cantidad para el correcto desarrollo de operaciones en interior mina, este objetivo se encuentra estrechamente relacionado con el cumplimiento de estándares de seguridad para los trabajadores que muchos países contemplan dentro de su legislación correspondiente, se detalla a continuación los principales objetivos:

- **Administrar aire:** Abastecer de aire fresco según los parámetros establecidos por normativa a todas las zonas en las que se encuentren trabajadores realizando actividades, esto incluirá los requisitos mínimos según cálculo de demanda de aire (adjunto en **ANEXO 1**), ya sea por equipos diésel, personal y/o mínima velocidad por labor.

- **Asegurar el desarrollo de operaciones:** J. Herrera y J. Gómez detallan que las etapas que componen el ciclo de minado subterráneo son perforación, voladura, desate, carguío, acarreo y sostenimiento, sin embargo, dentro de este ciclo no se menciona como etapa a la ventilación de minas, lo que implica que, para el correcto desarrollo de cada una de las etapas que conforman este ciclo es necesaria la implementación de un eficiente sistema de ventilación, es decir, el correcto desarrollo de operaciones dependerá del acompañamiento del sistema de ventilación como actividad paralela al ciclo de minado (**Figura 1**) lo que significa que el principal objetivo de la ventilación de minas es asegurar el desarrollo de las

operaciones de minería subterránea.

Figura 1: Etapas del ciclo de minado subterráneo



Fuente: *Elaboración propia.*

- **Mantener condiciones adecuadas de trabajo:** Para definir este objetivo entenderemos en primer lugar a qué refiere con el término de “adecuadas”, para ello, es importante mencionar que el principal factor modificante será las condiciones termo-ambientales con las que el aire ingresará desde superficie y este factor a su vez será modificado por la ubicación geográfica, misma que influirá principalmente en el clima de trabajo de cada país, entonces, la variabilidad de este objetivo radicarán en términos de rangos mas no de principios, esto es, el

rango de calor aceptable para trabajadores que laboran en zonas tropicales será mucho mayores para trabajadores que laboran en zonas de permafrost y todos estos rangos serán completamente diferentes e intolerables para trabajadores que laboren en oficinas y/o industrias ajenas al proceso de minería subterránea, sin embargo, aun cuando los rangos serán variables, los principios de confort para los trabajadores, límites máximos permisibles y ergonomía de trabajo serán generalizados para los tres escenarios propuestos.

- **Cumplimiento de estándares de seguridad:** Este objetivo engloba los diversos parámetros considerados como estándares basados en estudios anteriores y/o previos en otras unidades mineras, así como también el cumplimiento de lo estipulado en la normativa vigente en el que se desarrolle las operaciones.

2.2.2. NATURALEZA Y FACTORES MODIFICANTES DEL AIRE

La ventilación en general depende de los tipos de conductos por los que circulará el flujo de aire, en el caso de minería subterránea estos conductos serán labores desarrolladas como producto de operaciones, chimeneas de ventilación y mangas asociadas a ventiladores, lo que implicará particularidades para cada sistema integral de ventilación según la mina en la que se realice el análisis, estas particularidades serán atribuidas a los diversos factores modificantes con estas labores a las que nos referiremos en adelante como conductos de aire.

Aun cuando no existan exactas similitudes entre alguna mina del mundo respecto a otra y por ende los conductos difieran, existirán ciertos atributos que serán lo suficientemente comunes como para generalizarse como conceptos básicos de ventilación de minas, partiendo desde los elementos directamente relacionados con las características del aire circulante hasta finalmente definir cada uno de los sistemas que

conforman el circuito integral de ventilación de una mina así como sus elementos asociados, esto es:

2.2.2.1. Naturaleza y composición del aire

L. Hartman menciona que el fluido con mayor presencia en minería subterránea es el aire, mismo que define como una mezcla presente en forma de vapor, así mismo, desde el punto de vista de la termodinámica enfatiza en que el aire estaría constituido por una mezcla entre aire seco y la presencia de vapor de agua; finalmente, en términos químicos, según lo especificado por Bolz y Tuve (1973), el aire se encuentra constituido en volumen como se detallará en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Gases que componen el aire seco y sus valores proporcionales.

GAS	% VOLUMEN	% PESO
Nitrógeno	78.09	75.55
Oxígeno	20.95	23.13
Dióxido de carbono	0.03	0.05
Otros gases	0.93	1.27

Fuente: Bolz and Tuve, 1973.

2.2.2.2. Propiedades psicrométricas del aire

Es sabida la influencia y estrecha relación existente entre los parámetros psicrométricos regidos en superficie con relación a las características del flujo de aire fresco que ingresa hacia interior mina, es así como, con el objetivo de estandarizar dichas características, es necesario identificar y evaluar tres parámetros psicrométricos en un determinado periodo de tiempo (McQuiston y Parker, 1982), mismos que serán interrelacionados entre si con influencias directas y/o indirectas según las condiciones de clima en superficie, estos son:

- **Presión Barométrica (Pb):** Es la presión atmosférica que se puede medir por un barómetro expresado en valores de Milímetros de Mercurio (mm Hg) o Pascales (Pa).
- **Temperatura de bulbo seco (Ts):** Indica el calor sensible del aire que se puede medir por un termómetro convencional expresado en valores de Grados Centígrados (°C) o Grados Fahrenheit (°F).
- **Porcentaje de humedad (Rh):** Es el contenido de humedad (kg/kg de aire seco) que existiría si el espacio estuviera saturado **a la misma temperatura de bulbo seco**, el porcentaje de humedad es aproximadamente igual a la humedad relativa en el rango atmosférico normal.

2.2.3. ELEMENTOS DE VENTILACIÓN

Los elementos de ventilación en términos generales son aquellos que afectan y/o modifican directamente las características del sistema de ventilación en los tres niveles de ventilación, tanto principal, secundario como auxiliar, así tenemos:

2.2.3.1. Ventiladores

J. Herrera (2019) define a un ventilador como un equipo mecánico por donde fluye el aire a través de un circuito y que genera un determinado valor de resistencia sopesará esta pérdida mediante el incremento de presión desde el ingreso hacia el ventilador hasta la salida en el mismo, en términos de energía, un ventilador transforma la energía mecánica que acciona al mismo en energía potencial por el incremento total de presión final y en energía cinética por la velocidad del aire que fluye a través del mismo.

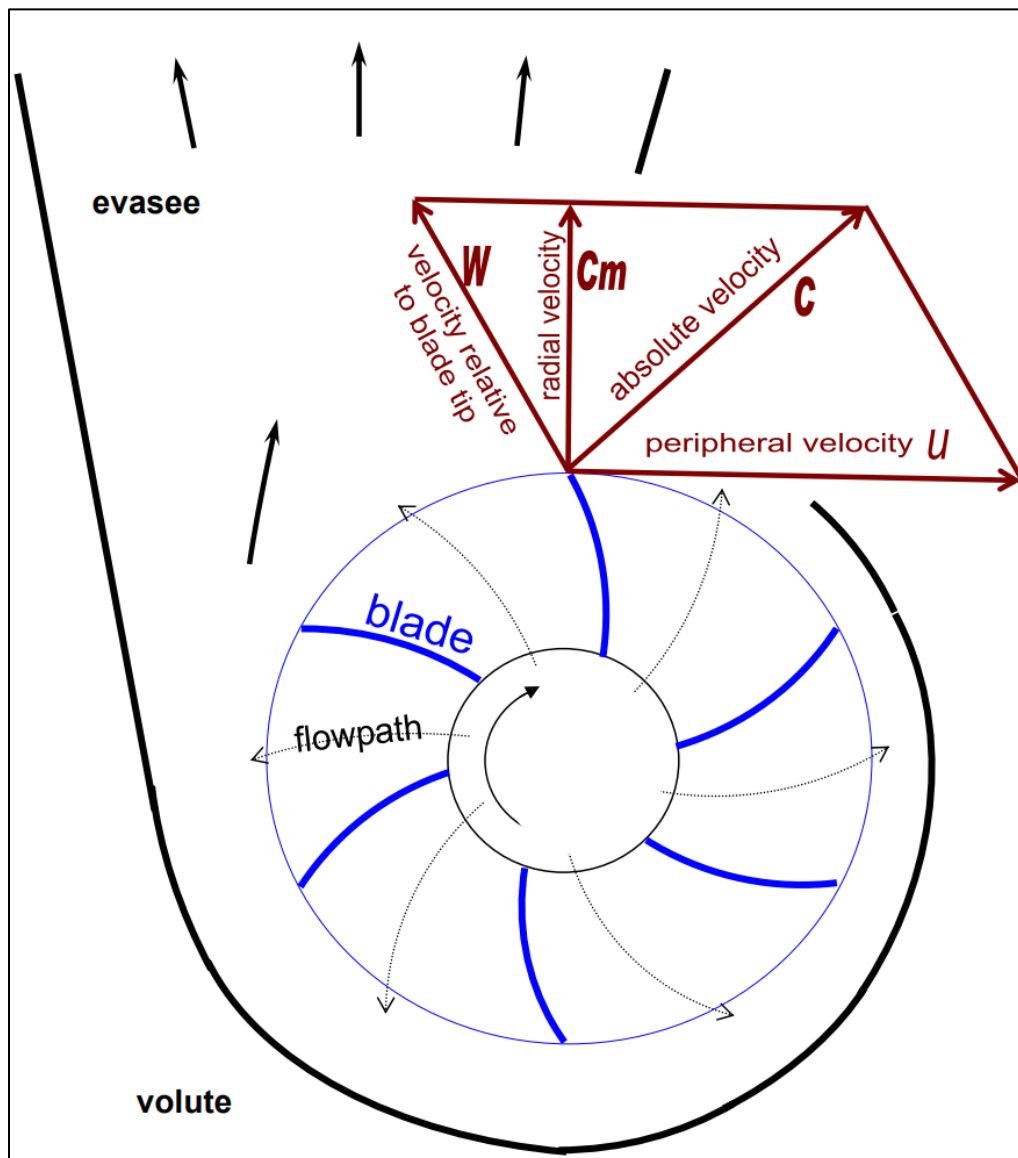
En su mayoría los ventiladores utilizados en minería utilizan motores eléctricos como principal fuente de energía, sin embargo, existen también alternativas como

motores de combustión interna y turbinas de aire comprimido o agua principalmente para el accionamiento de ventiladores pequeños.

Desde el punto de vista de diseño mecánico los ventiladores se clasifican en tres diferentes tipos, esto es:

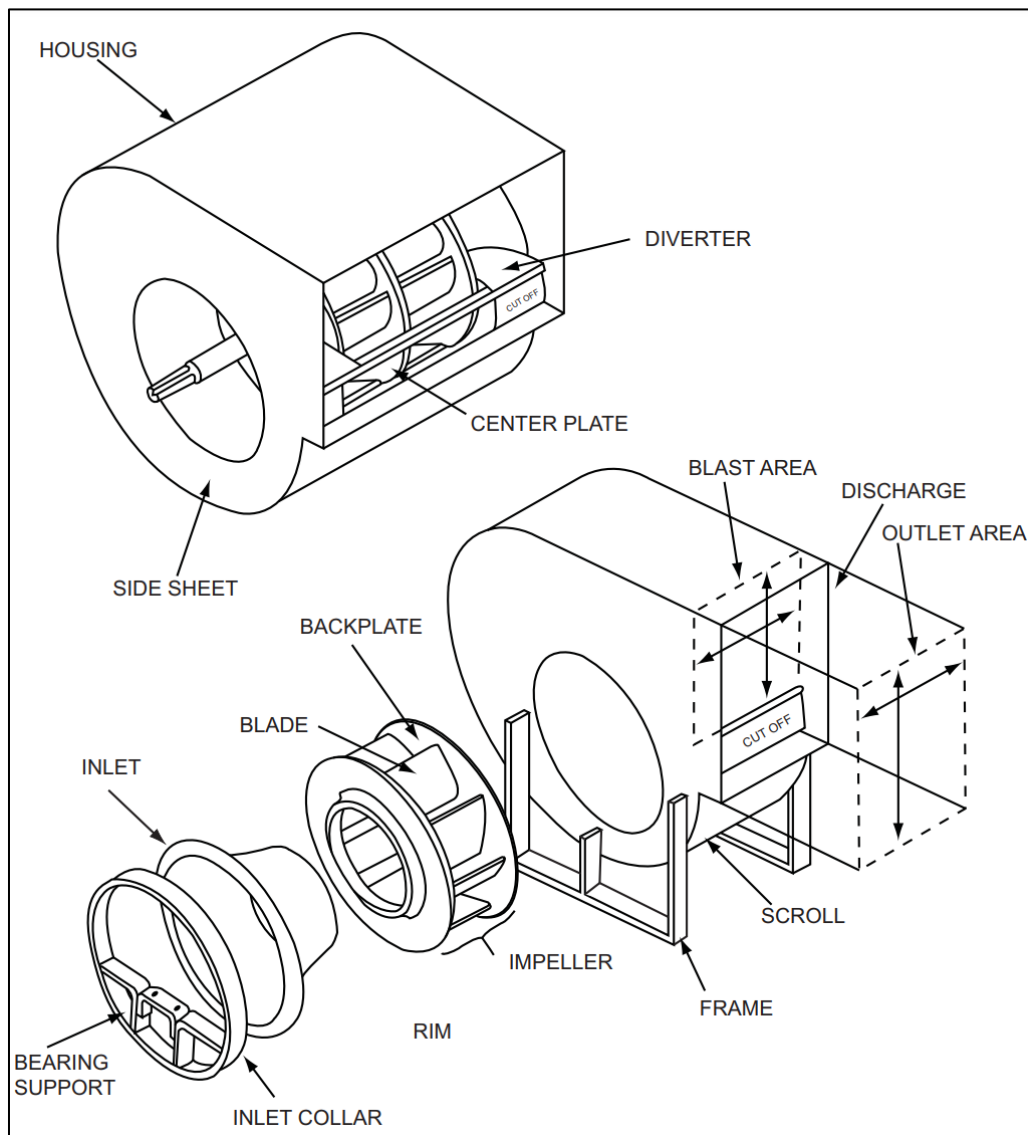
- **Ventiladores centrífugos:** En este tipo de ventiladores el aire circula de manera radial al eje (**Figura 2**), se encarga de mover menores volúmenes de aire con valores relativamente altos de presión y que en menores rangos ejercerán mayores valores de eficiencia; la estructura general se presenta en la **Figura 3**.

Figura 2: Distribución ideal de flujo de aire en un ventilador centrífugo.



Fuente: J. McPherson – Fans.

Figura 3: Principales componentes y estructura de un ventilador centrífugo.



Fuente: AMCA 201-02 (R2011) - Fans and Systems.

- **Ventiladores axiales:** En los ventiladores axiales el aire circula de manera paralela al eje (**Figura 4**), se encarga de mover mayores volúmenes de aire con valores relativamente bajos de presión y que en mayores rangos ejercerán mayores valores de eficiencia, la estructura general se presenta en la **Figura 5**.

The diagram illustrates the velocity triangles and forces on a centrifugal pump impeller. The impeller has four curved blades. The inlet is at the center, and the outlet is at the periphery. The angular velocity is denoted by ω . The vane angle at the inlet is β_1 and at the outlet is β_2 . The velocity triangles at the inlet and outlet show the relationship between the absolute fluid velocity (C), the fluid velocity relative to the vane (W), and the peripheral speed of the blade tip (u). The radial component of the fluid velocity is C_m , and the peripheral component is C_u . The forces acting on the vane are the pressure (p) and shear resistance (F) on both the front and back surfaces. The points a, b, c, d, e, f, g, h are labeled on the vane and the flow path.

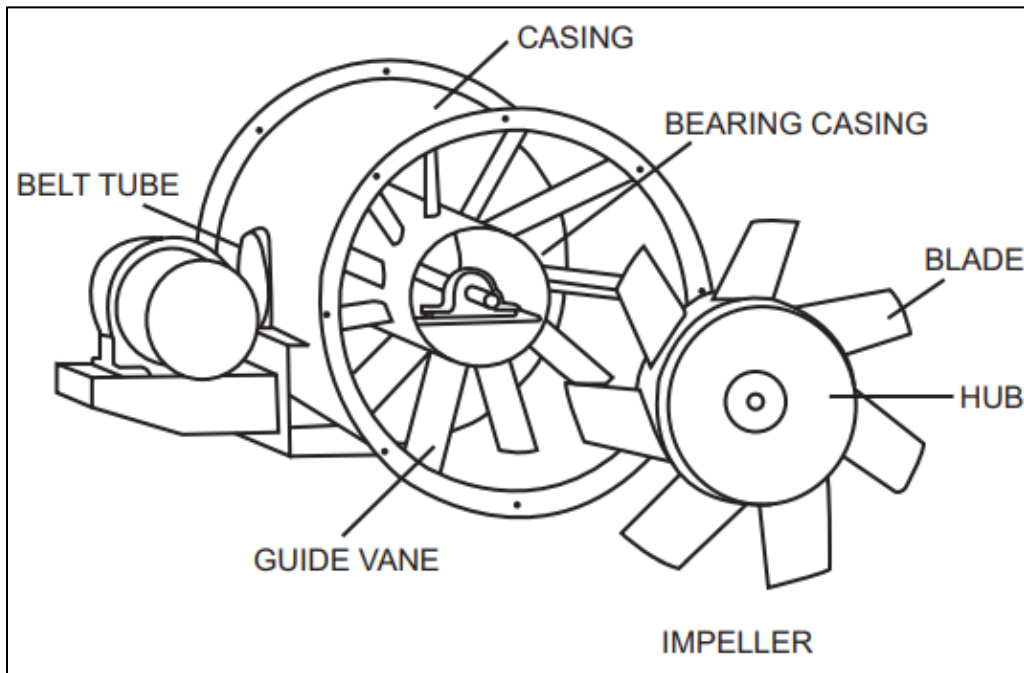
Subscript 1: Inlet

Subscript 2: Outlet

ω :	Angular velocity (radians/s)	C :	Absolute fluid velocity (m/s)
u :	Peripheral speed of blade tip (m/s)	W :	Fluid velocity relative to vane (m/s)
C_m :	Radial component of fluid velocity (m/s)	C_u :	Peripheral component of fluid velocity (m/s)
β :	Vane angle	p_b :	Pressure on back of vane (Pa)
p_f :	Pressure on front of vane (Pa)	F_b :	Shear resistance on back of vane (N/m ²)
F_f :	Shear resistance on front of vane (N/m ²)		

32 | P á g i n a

Figura 5: Principales componentes y estructura de un ventilador axial.



Fuente: AMCA 201-02 (R2011) - Fans and Systems.

- **Flujo mixto:** Como su propio nombre lo dice trabaja de manera mixta, el aire ingresa de manera paralela al eje, los álabes del ventilador oscilan entre 30° y 90° y el incremento de presión se debe parcialmente por la acción de los álabes y por la acción de la fuerza centrífuga.

Finalmente, se presentará a continuación la **Tabla 2**, la cual muestra una comparación entre los tres tipos de ventiladores detallados, considerando los aspectos más relevantes de cada uno.

Tabla 2: Cuadro comparativo de principales características según tipo de ventilador.

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE VENTILADOR		
	AXIAL	CENTRÍFUGO	FLUJO MIXTO
RENDIMIENTO	Flujo de aire alto con baja presión.	Flujo de aire menor con alta presión.	Flujo de aire alto con alta presión.
EFICIENCIA	Alta eficiencia en mover grandes volúmenes de aire.	Alta eficiencia en aplicaciones de alta resistencia.	Eficiencia intermedia, combina características de ambos.
TAMAÑO Y DISEÑO	Diseño más compacto y ligero.	Diseño más grandes y pesados.	Tamaño y peso intermedios.
RUIDO	Mayor ruido a alta velocidad.	Menor ruido a baja velocidad, pero pueden ser ruidosos a alta presión.	Menos ruidosos que los axiales en general.
COSTE	Generalmente más económicos.	Más costosos debido a la complejidad del diseño.	Coste intermedio.
MANTENIMIENTO	Sencillo, menor coste de mantenimiento.	Más complejo y costoso de mantener.	Mantenimiento intermedio.
INSTALACIÓN	Fácil de instalar en diversos entornos.	Instalación más complicada debido al tamaño y peso.	Instalación relativamente sencilla.
VENTAJAS	- Eficientes en mover grandes volúmenes de aire. - Coste inicial bajo. - Fáciles de mantener.	- Ideales para aplicaciones de alta presión. - Menor ruido a bajas velocidades.	- Buen balance entre flujo y presión. - Menos ruido que axiales.
DESVENTAJAS	- Ineficientes en aplicaciones de alta presión. - Pueden ser ruidosos.	- Más caros y complicados de mantener. - Menor flujo de aire.	- Coste y mantenimiento intermedios. - No son los mejores en aplicaciones extremas.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3.2. Tapones

Un aspecto clave en la gestión de todo sistema de ventilación es la

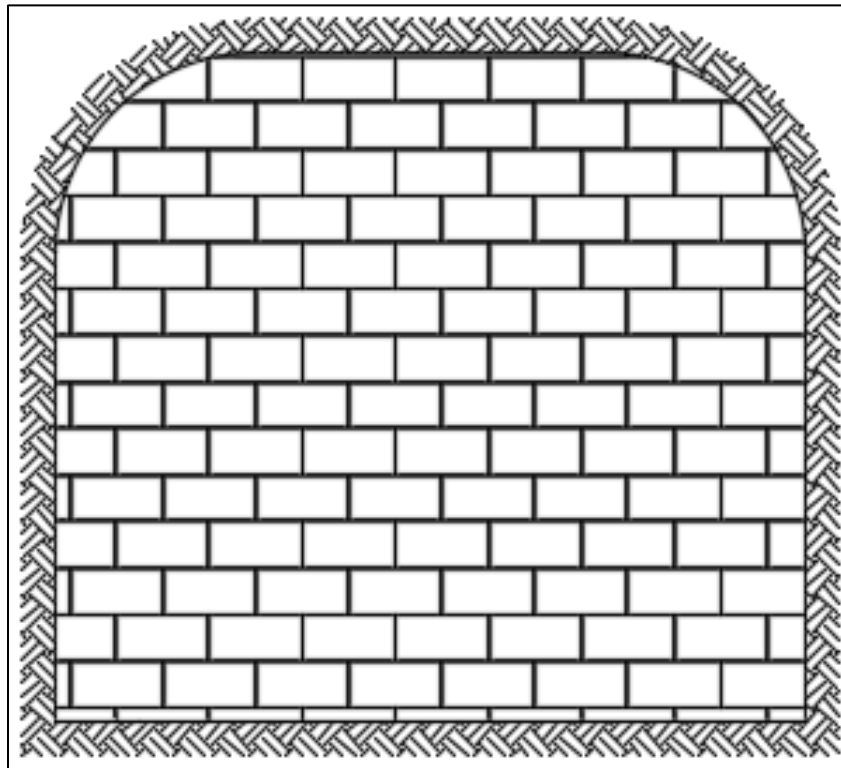
implementación de elementos de control que permitan llevar a cabo una adecuada distribución del aire, ya sea de inyección o extracción, para ello resulta necesaria la construcción de tapones que contarán con las características siguientes:

- Soporte ante condiciones de humedad.
- Resistencia a los cambios de presión generados por la operación (voladura).
- Administrará el flujo de aire.
- Permitirá el cierre progresivo o total del sistema de ventilación para una zona en específico.

En tal sentido, los dos tipos de tapones a considerar serán:

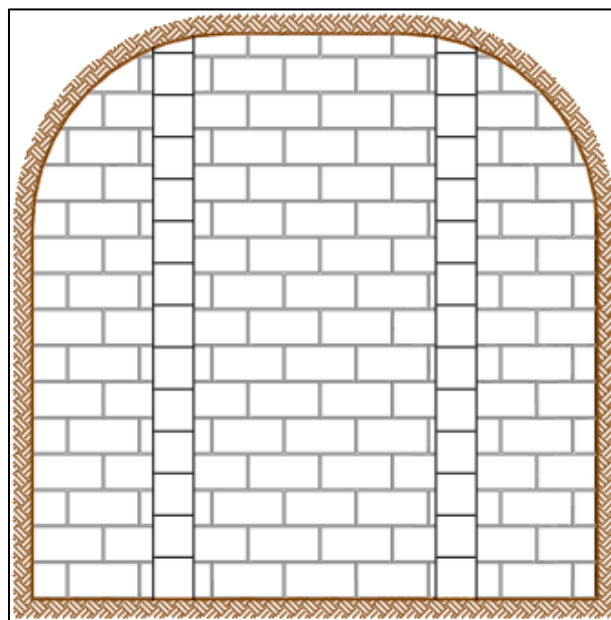
- **Tapón de bloquetas:** Elemento de control para el cierre total de comunicaciones, generalmente están conformados por bloquetas apiladas y acopladas a la forma de la labor (**Figura 6**) y en algunos casos con presencia de columnas verticales para brindar la resistencia ante los cambios de presiones a las que se denominan “costillas” (**Figura 7**).

Figura 6: Tapón de bloquetas sin costillas.



Fuente: *Mine & Flows – Elementos de control de aire.*

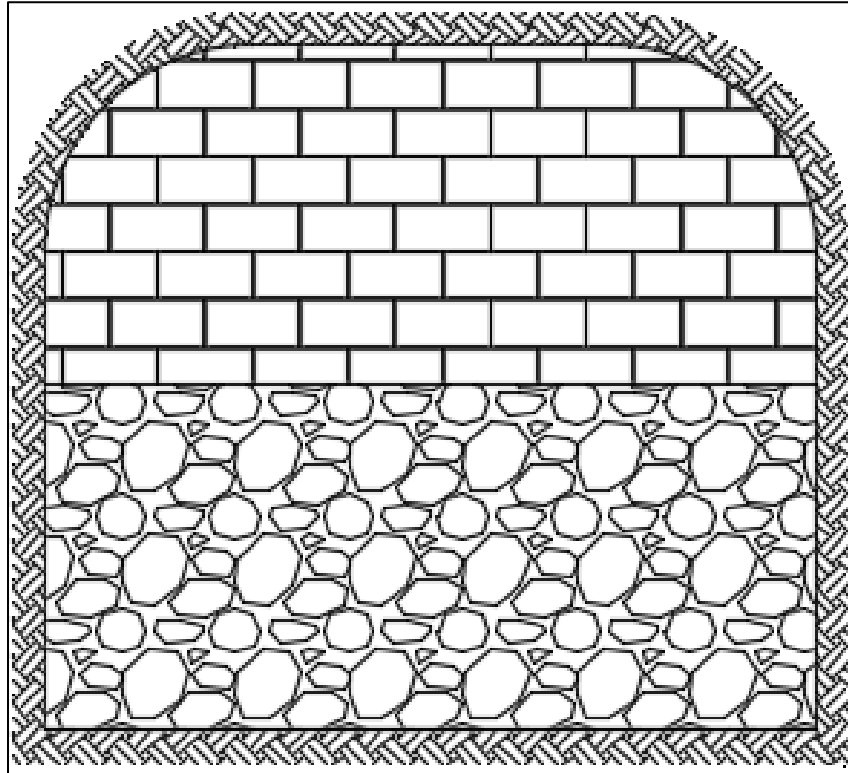
Figura 7: Tapón de bloquetas con costillas.



Fuente: *Mine & Flows – Elementos de control de aire.*

- **Tapón de bloquetas sobre carga:** Elementos de control para el cierre total de comunicaciones, se emplea esta estructura (**Figura 8**) cuando se encuentra directamente expuesta a voladuras, menor a 100 m, ya que la carga permitirá reducir la superficie de presión de este.

Figura 8: Tapón de bloquetas sobre carga acumulada.



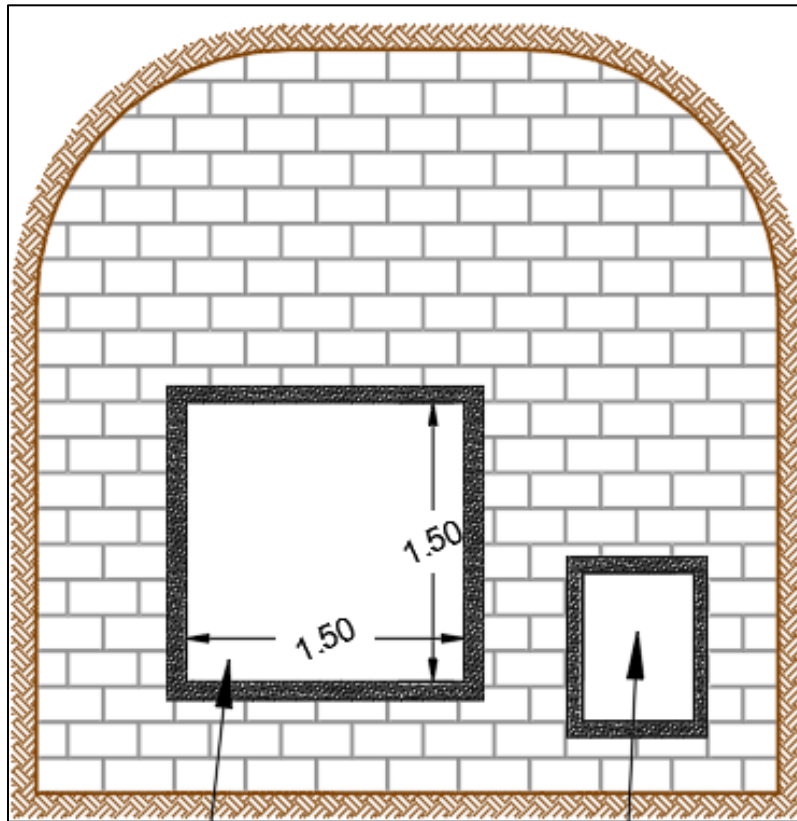
Fuente: Mine & Flows – Elementos de control de aire.

2.2.3.3. Reguladores

En concordancia con lo detallado en el punto anterior, en este caso aplicado hacia los reguladores, se definirá a estos como una infraestructura que presenta uno o más orificios que podrán ser ajustados según el requerimiento de aire (**Figura 9**), entonces, se podrá modificar la cantidad de aire que fluirá por esta infraestructura según la cantidad de aire que se considere necesaria y/o en su defecto en caso de

desear cerrar una la labor bastará con cerrar todos los orificios regulables y convertir el regulador en tapón.

Figura 9: Regulador de flujo de aire.



Fuente: *Mine & Flows – Elementos de control de aire.*

Finalmente, se presenta de manera referencial el cálculo de resistencia que afectará al flujo de aire circulante según el porcentaje de abertura en los respectivos reguladores, como se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Valores de resistencia según porcentaje de abertura de reguladores.

NV_1105		NV_1130		NV_1195		NV_1220	
%	R AVG	%	R AVG	%	R AVG	%	R AVG
Abertura	(Ns2/m8)	Abertura	(Ns2/m8)	Abertura	(Ns2/m8)	Abertura	(Ns2/m8)
5.20	23.44	15.60	16.00	8.90	10.23	4.80	62.07
17.60	9.90	35.30	2.89	15.20	5.85	34.60	2.66
37.10	2.06	49.40	1.31	20.70	3.67	49.30	1.01
50.40	1.20	60.70	0.61	30.60	2.01	65.90	0.27
80.50	0.16	75.00	0.19	49.20	0.43	80.50	0.07
100.00	0.02	100.00	0.02	74.70	0.05	100.00	0.02
				100.00	0.01		

Fuente: Datos medidos en campo como fuente propia.

2.2.3.4. Conductos de aire

Se definirá como conducto de aire aquella sección por la cual circulará el flujo de aire, entonces, los tipos que se encontrarán en ventilación de minas serán:

- **Laboreo:** Los conductos de aire considerados como laboreo serán todas aquellas labores que formarán parte de algún circuito de ventilación, en este caso podrían ser labores verticales como chimeneas o labores horizontales como cruceros, galerías, ventanas, rampas, etc.
- **Mangas:** Las mangas acopladas a un ventilador también son un tipo de aire que en este caso aislará el mismo flujo del aire que exista circulando dentro de la labor en la que se encuentre instalada, esto es, coexistirán dos tipos de conductos.

2.2.4. CIRCUITOS DE VENTILACIÓN

El sistema integral de ventilación de una mina está compuesto por tres circuitos complementarios entre sí, estos circuitos dependen el uno del otro de manera descendente, es decir, el circuito auxiliar dependerá del circuito secundario que a su vez dependerá del circuito principal, con la finalidad de desarrollar a detalle esta relación existente entre ellos y sus principales características se presentará en este apartado cada

uno de los circuitos por separado.

2.2.4.1. Ventilación principal

El circuito de ventilación principal en términos generales comprende desde el ingreso de aire fresco en superficie hasta la salida de aire viciado hacia superficie, entonces, en su recorrido en interior mina pasará por conductos considerados como laboreo de ventilación en interior mina, el ingreso podrá ser por una bocamina y/o una chimenea conectada directamente hacia superficie, para esto se emplearán ventiladores de inyección y/o de succión según estándares de la mina, el aire circula a lo largo de las labores principales hacia las diversas áreas de trabajo o lugares donde sea requerido para diluir la gran concentración de los gases contaminantes, estos incluyen polvo y una combinación de muchos otros peligros potenciales.

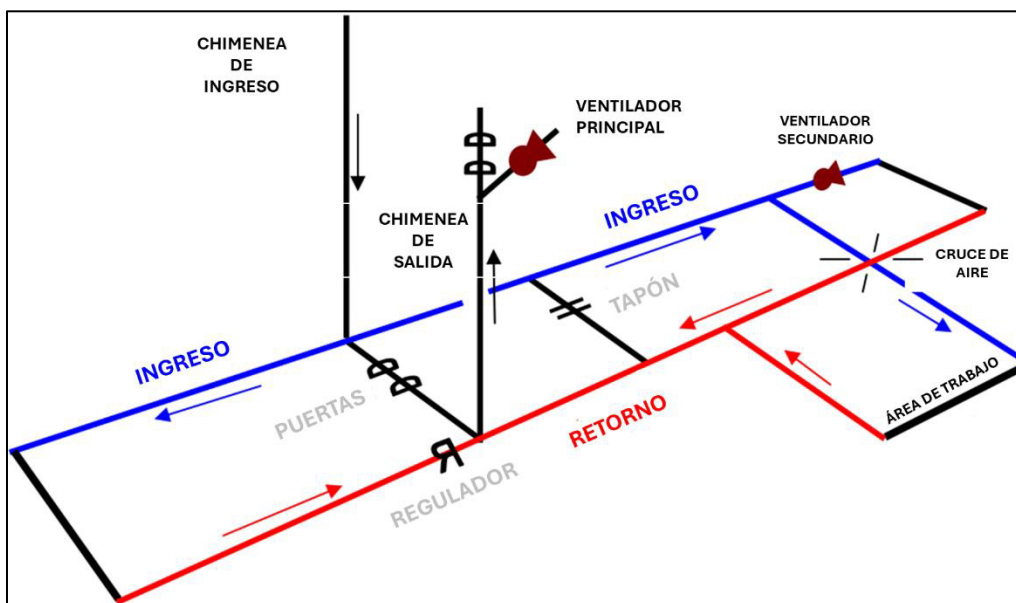
El aire contaminado regresa hacia el mismo circuito principal a lo largo del laboreo de retorno y será direccionado hacia superficie por los circuitos similares a los de ingreso, esto es, chimeneas y/o bocaminas. Todo el laboreo por donde circula aire fresco se denomina “Labores de Ingreso” y todo el laboreo por donde circula aire viciado se denomina “Labores de Salida”.

Así mismo, este circuito incorpora a lo largo de su distribución diversos elementos de ventilación como se detalló en el apartado anterior que serán compuertas, tapones y/o reguladores según la necesidad operativa, finalmente, es importante resaltar que el control de velocidades dentro de los rangos permisibles establecidos por norma tendrá que ser considerados en todo el circuito principal de ventilación.

Finalmente, para una mejor representación gráfica de lo previamente

expuesto, se presenta en la **Figura 10** un esquema general del circuito principal de ventilación.

Figura 10: Esquema general del circuito principal de ventilación.



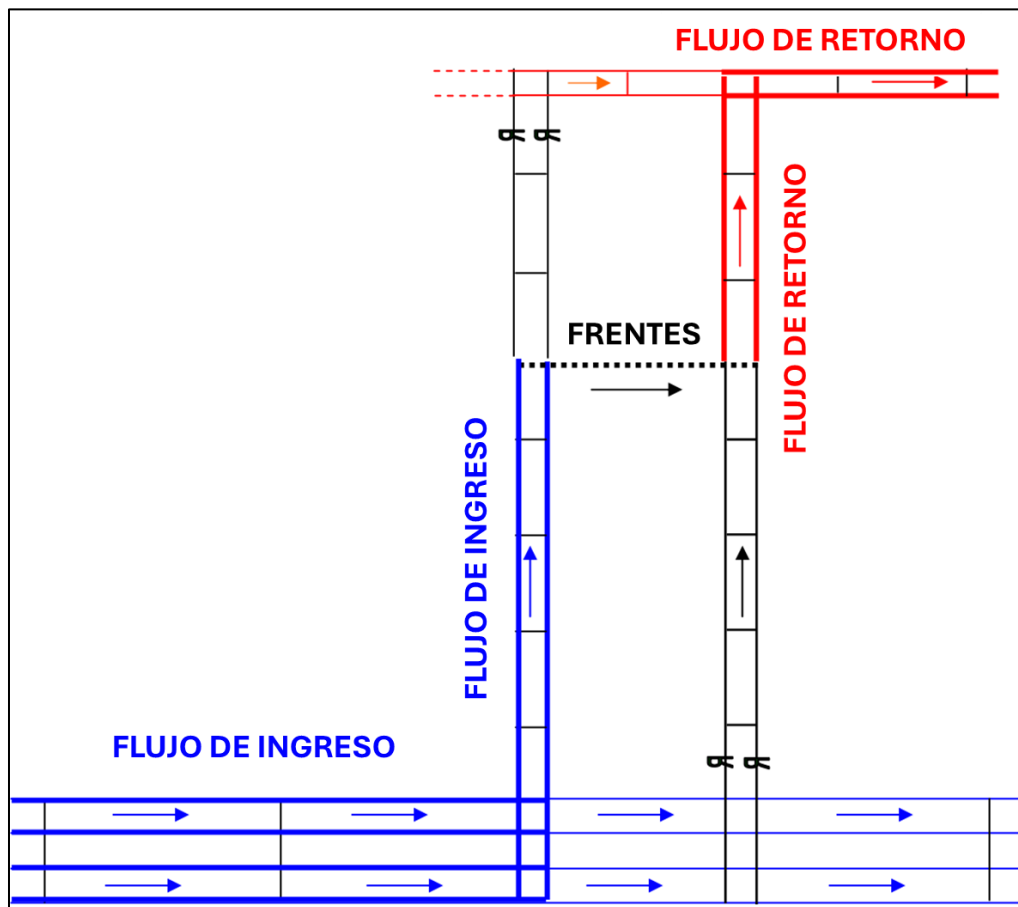
Fuente: J. McPherson – Subsurface Ventilation Systems (traducido por el autor de la presente memoria de tesis).

2.2.4.2. Ventilación secundaria

La ventilación secundaria se encarga de generar flujo de aire hacia todas aquellas zonas de trabajo a las que el circuito de ventilación principal no accede y/o no integra en su circuito integral, este circuito capta ingreso de aire desde el circuito principal y direcciona el aire viciado hacia este mismo sistema para finalmente ser direccionado hacia superficie, lo que se conoce como “circuito en U”, esto gracias a la instalación de ventiladores secundarios inyectores y/o extractores según criterios operativos o estándares de la mina.

Para un mejor detalle gráfico de lo previamente expuesto se presenta en la **Figura 11** un esquema general del circuito secundario de ventilación.

Figura 11: Esquema general del circuito secundario de ventilación.



***Fuente:** J. McPherson – Subsurface Ventilation Systems (traducido por el autor de la presente memoria de tesis).*

2.2.4.3. Ventilación auxiliar

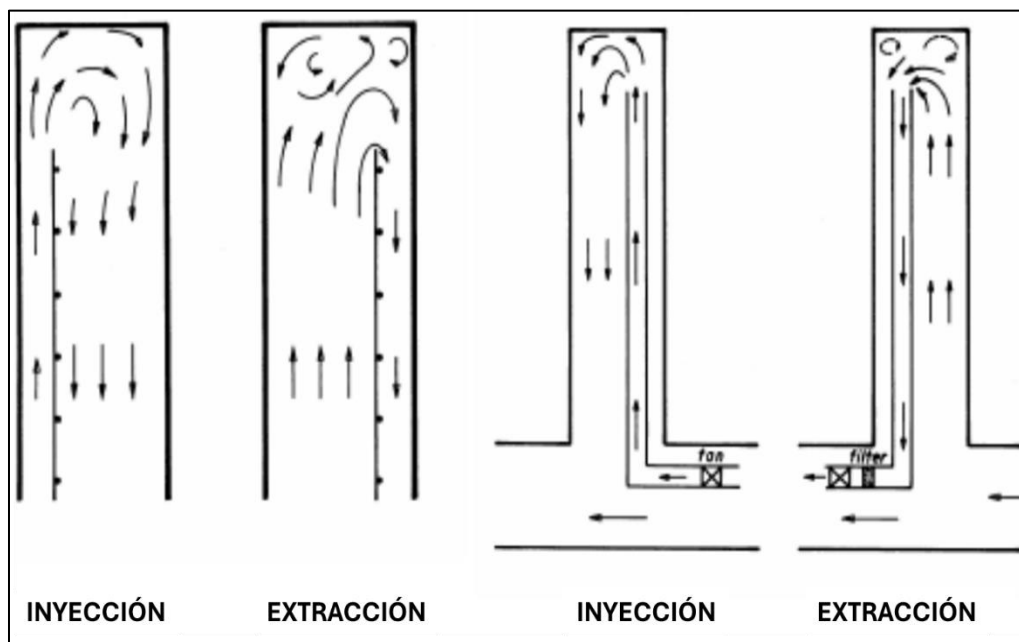
El circuito de ventilación auxiliar facilita el flujo de aire hacia los frentes de trabajo en ciego, es decir, los desarrollos de labores que no cuentan con una conexión de salida si no que termina en contacto con el macizo rocoso, para eso se utiliza un ventilador auxiliar que forzará el flujo de aire el cual estará asociado a un conducto de ventilación que en este caso será una manga de ventilación, entonces, según la ubicación del ventilador se puede clasificar en dos tipos de ventilación auxiliar:

- **Soplante:** En este caso el ventilador impulsa el flujo de aire a través de la manga

de ventilación hacia la cara de tope del frente de trabajo y a partir de la cual el flujo de aire retornará por la labor, el detalle gráfico se presenta en la **Figura 12** definido como “Inyección”.

- **Aspirante:** En este caso el ventilador extrae el flujo de aire desde la cara del tope de frente de trabajo a partir del cual el flujo de aire termina su recorrido desde el acceso por la labor, el detalle gráfico se presenta en la **Figura 12** definido como “Extracción”.

Figura 12: Esquema general del circuito auxiliar de ventilación.



Fuente: J. McPherson – *Subsurface Ventilation Systems* (traducido por el autor de la presente memoria de tesis).

Finalmente, a modo de resumen, se desarrolla un cuadro comparativo entre los tres tipos de sistema considerando sus características más resaltantes, así como también el tipo de demanda de aire que involucran (**Tabla 4**).

Tabla 4: Cuadro comparativo de principales características según tipo de circuito de ventilación.

CARACTERÍSTICA	TIPO DE SISTEMA DE VENTILACIÓN		
	PRINCIPAL	SECUNDARIA	AUXILIAR
DEFINICIÓN	Sistema que proporciona el flujo de aire fresco a toda la mina.	Sistema que distribuye el aire fresco desde el sistema principal a secciones específicas de la mina.	Sistema que proporciona aire fresco a áreas específicas dentro de la mina, usualmente para trabajos temporales.
COMPONENTES	Ventiladores principales, chimeneas de ingreso y salida, reguladores, puertas.	Ventiladores secundarios, conductos, reguladores.	Ventiladores auxiliares, conductos flexibles.
OBJETIVO	Mantener un suministro continuo de aire fresco en toda la mina.	Distribuir el aire de manera más específica dentro de la mina.	Ventilar áreas localizadas donde se realizan trabajos específicos.
CONTROL DE FLUJO	Controlado centralmente, con capacidad de monitoreo y ajuste remoto.	Controlado localmente, ajustado según necesidades de secciones específicas.	Controlado manualmente, ajustado para operaciones temporales.
POTENCIA Y CONSUMO DE ENERGÍA	Alta potencia, alto consumo de energía.	Media potencia, consumo de energía moderado.	Baja potencia, bajo consumo de energía.
FLEXIBILIDAD	Menor flexibilidad, sistema fijo.	Moderada flexibilidad, ajustes en función de la distribución de trabajos.	Alta flexibilidad, fácil de mover y ajustar según necesidades.
COSTO	Alto costo de instalación y operación.	Costo moderado, menor que el sistema principal.	Bajo costo, principalmente costos operativos.
DEMANDA DE AIRE	Sumatoria de demanda de todos los sistemas secundarios.	Sumatoria de todos los frentes de trabajo en un solo sistema secundario.	Frente de trabajo ciego.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.5. IMPACTO DE LA VENTILACIÓN DE MINAS EN LA SALUD

Como se presentó en los objetivos de la ventilación de minas, el principal objetivo era mantener las condiciones termo-ambientales en interior mina en rangos tales que sea viable el desarrollo de operaciones, este objetivo se encuentra estrechamente relacionado a la salud de los trabajadores y su estado de confort, en consecuencia, la ventilación de minas impactará de manera directa en la salud de los trabajadores desde la calidad del aire en términos de mantener los gases contaminantes por debajo del Límite Máximo Permisible (LMP) hasta las condiciones ergonómicas con valores aceptables de temperatura de trabajo.

A continuación, se presentarán las definiciones de estos elementos que impactan en las condiciones de trabajo y que al ser objetivos de mejora desde el concepto de ventilación de minas significarán finalmente el impacto que esta aplicación tenga sobre la salud de los trabajadores.

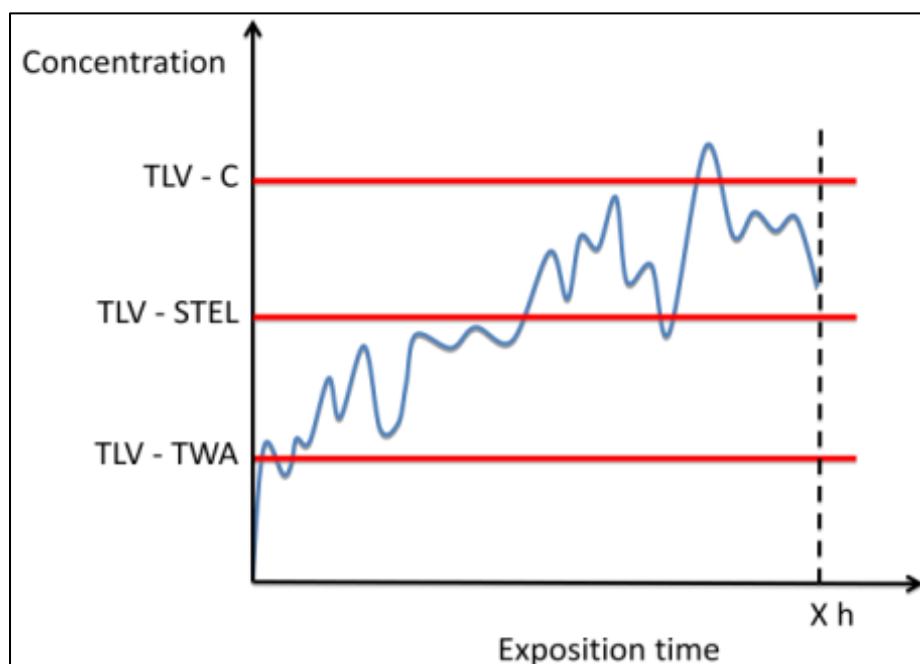
2.2.5.1. Calidad de aire y los valores límite umbral de contaminantes

Los valores límite umbral de contaminantes o TLV (por su definición en Inglés: Threshold Limit Values) refieren a los valores estandarizados como límites en los que se puede encontrar dentro de la composición del aire que circula en interior mina, según la legislación correspondiente de cada país en que desarrolle operaciones los parámetros pueden variar, sin embargo, estos TLV se mantienen en rangos cercanos ya que recopilan estándares internacionales y estudios previos respecto a ellos (Brake y Bates, 2002), finalmente, estos TLV se subdividen en tres grupos relacionados con el tiempo de exposición los cuales serán presentados a continuación según definiciones de E. Galante, A. Lima, T. França y A. Haddad en su artículo “Exposure Limits and its Applications”:

- **TLV - C:** Este valor refiere a la concentración considerada inmediatamente peligrosa para la vida de las personas expuestas, en términos de ventilación de minas, este valor es un indicador de que las condiciones de trabajo no son favorables y se requerirá mejorar el caudal de aire circulante; la terminología “C” refiere a su origen en inglés de “Ceiling” que se entiende como “Valor Umbral”.
- **TLV - STEL:** Este valor refiere a la concentración que se cree segura para que los trabajadores estén expuestos de forma continua durante un período de tiempo (15 minutos con intervalos de 1 hora), en términos de ventilación se podría considerar a este valor como un parámetro “aceptable” para trabajos con intervalos de tiempo de descanso y que será considerado en casos operativamente necesarios; la terminología “STEL” refiere a su origen en inglés de “Short-Term Exposure Limit” que se entiende como “Límite de Exposición a Corto Plazo”.
- **TLV – TWA:** Este valor es el límite considerado seguro para que alguien esté expuesto durante una jornada laboral (8 horas), entonces, en términos de ventilación, las condiciones de aire favorables se encontrarán con valores de todos los gases menores a los que sean indicados para este parámetro; la terminología “TWA” refiere a su origen en inglés de “Time-Weighted Average” que se entiende como “Promedio Ponderado con el Tiempo”.

A modo de resumen se presenta en la **Figura 13** los TLV previamente descritos.

Figura 13: Representación de valores TLV según su rango de exposición de tiempo.



Fuente: E. Galante - Rev. Virtual Quim. |Vol. 6|.

Se detalla a continuación lo estipulado por el D.S.N°024-2016 y su modificatoria el D.S.N°023-2017 en su ANEXO 15 según los “LÍMITES DE EXPOSICIÓN OCUPACIONAL PARA AGENTES QUÍMICOS” (**Tabla 5**), esto es:

Tabla 5: Valores LMP's de gases contaminantes en el aire - D.S.N°023-2017 - ANEXO 15.

N.º	Agentes Químicos (en el aire)	Límites de Exposición Ocupacional			
		TWA		STEL	Techo (C)
1	Acetona	500	Ppm	750	ppm
2	Ácido Acético	10	Ppm	15	ppm
3	Ácido Clorhídrico				2 Ppm
4	Ácido Nítrico	2	Ppm	4	ppm
5	Ácido Sulfhídrico (H2S)	10	Ppm	15	ppm
6	Amoníaco Anhidro	25	Ppm	35	ppm
7	Anhídrido Sulfuroso (SO2)	2	Ppm	5	ppm

8	Antimonio	0.5	mg/m ³			
9	Arseniato de Plomo	0.1 5	mg/m ³			
10	Arseniato de Calcio	1	mg/m ³			
11	Arsénico (can)	0.0 1	mg/m ³ A1			
12	Benceno (can)	0.5	ppm (p)			
13	Cianuro (Como CN)				5	mg/m ³ (p)
14	Cianuro de Hidrogeno (HCN)				4.7	ppm(p)
15	Cloro	0.5	Ppm	1	ppm	
16	Clorobenceno	10	Ppm	20	ppm	
17	Cloroformo	10	Ppm			
18	Cobre (humo)	0.2	mg/m ³			
19	Cobre (polvo/neblina)	1	mg/m ³			
20	Dióxido de Carbono	500 0	Ppm	300 00	ppm	
21	Dióxido de Nitrógeno	3	Ppm	5	ppm	
22	Éter Etílico	400	Ppm	500	ppm	
23	Fluoruro de Hidrogeno (HF)				2.5	mg/m ³
24	Formaldehído				0.3	Ppm
25	Fosgeno	0.1	Ppm			
26	Gasolina	500	Ppm			
27	Hidrógeno (H)				500 0	Ppm
28	Humo de Cadmio (can)	0.0 1	mg/m ³			
29	Humo de Óxido Férrico	5	mg/m ³			
30	Manganeso	0.2	mg/m ³			
31	Mercurio	0.0 25	mg/m ³ (p)			
32	Metano (CH ₄)				500 0	Ppm
33	Monóxido de Carbono (CO)	25	Ppm			
34	Monóxido de Nitrógeno	25	Ppm			
35	Neblina de ácido sulfúrico	1	mg/m ³	3	mg/ m ³	

36	Oxígeno (O ₂)	19. 5	%	22. 5	%
37	Ozono Trabajo Pesado	0.0 5	Ppm		
38	Ozono Trabajo Moderado	0.0 8	Ppm		
39	Ozono Trabajo Ligero	0.1	Ppm		
40	Ozono Trabajo Cualquiera (<= 2 horas)	0.2	Ppm		
41	Plomo	0.0 5	mg/m ³		
42	Polvo de Carbón – Antracita	0.4	mg/m ³		
43	Polvo de Carbón - Bituminoso	0.9	mg/m ³		
44	Polvo inhalable (1)	10	mg/m ³		
45	Polvo respirable (1)	3	mg/m ³		
46	Selenio	0.2	mg/m ³		
47	Sílice Cristalino Respirable (Cristobalita)	0.0 5	mg/m ³		
48	Sílice Cristalino Respirable (Cuarzo)	0.0 5	mg/m ³		
49	Sílice Cristalino Respirable (Tridimita)	0.0 5	mg/m ³		
50	Sílice Cristalino Respirable (Tripoli)	0.1	mg/m ³		
51	Talio, Compuestos solubles de	0.1	mg/m ³		
52	Telurio	0.1	mg/m ³		
53	Tetracloruro de Carbono	5	Ppm	10	ppm
54	Tolueno	50	Ppm		
55	Uranio, Compuesto solubles e insolubles	0.2	mg/m ³	0.6	mg/ m ³
56	Vanadio, Polvos de V ₂ O ₅	0.5	mg/m ³		
57	Vanadio, Humos metálicos de V ₂ O ₅	0.1	mg/m ³		
58	Zinc (humo)	2	mg/m ³	10	mg/ m ³

Fuente: D.S.N°024-2016 y su modificatoria el D.S.N°023-2017 – ANEXO 15.

2.2.5.2. Condiciones de trabajo y sus reacciones fisiológicas

En el desarrollo de operaciones en minería subterránea es intrínseca la necesidad de controlar la temperatura y la humedad del aire circulante, esto debido a la estrecha relación que existe entre las condiciones termo-ambientales en interior mina y las condiciones en las que el cuerpo humano puede operar de manera eficiente sin uso de protección alguna (aire acondicionado, cabinas de protección, etc.).

Como el principal interés de la memoria de tesis es la ventilación de minas y sus diversos impactos no se profundizarán las reacciones fisiológicas, su origen y motivos, si no por el contrario, se enfatizará en el impacto que tendrá sobre los trabajadores y sus reacciones fisiológicas a lo que denominaremos “confort”, puntualmente los efectos de temperatura (calor) serán detallados en el siguiente punto. **MINAS HIPERTERMALES: PRINCIPALES DESAFÍOS**

2.2.6. MINAS HIPERTERMALES: PRINCIPALES DESAFÍOS

Sobre minas hipertermales nos referimos a aquellas minas en las que existen fuentes de calor adicionales al incremento de temperatura típico por efectos de compresión del aire, los que pueden ser:

- Macizo rocoso.
- Agua subterránea.
- Maquinaria operativa.
- Metabolismo humano.
- Oxidación.
- Voladura.
- Movimiento de materiales.

- Tuberías y/o conductos de aire.

Entonces, identificaremos que los principales desafíos en minas hipertermales se vinculan con las condiciones de trabajo que estarían afectadas directamente por las condiciones de temperatura combinada con demás parámetros psicométricos a los que se definirá como calor y cuyos efectos principales según J. McPherson (2019) son:

2.2.6.1. Desmayos por calor

Cuando una persona se encuentra en un ambiente bajo condiciones de temperaturas, durante un periodo prolongado de tiempo, la sangre tiende a direccionarse y acumularse en las partes inferiores del cuerpo y que conllevará por lo tanto a la temporal reducción de suministro de fluido sanguíneo hacia el cerebro y que finalmente devendrá en la pérdida de conciencia a corto plazo.

Como acción preventiva es recomendable realizar movimientos intermitentes, sin embargo, en caso de desmayo, la recomendación principal es trasladarse a una zona más fresca en donde poder recostarse con la ropa aflojada.

2.2.6.2. Agotamiento por calor

Como el flujo sanguíneo facilita la conductancia del calor dentro del cuerpo al disminuir su cantidad en volumen se puede producir el agotamiento por calor. En términos generales, la combinación de estrés por calor y la tasa metabólica implicará el incremento de los latidos del corazón hasta un valor superior a 180 latidos por minuto, entonces, el intervalo de tiempo que se da entre las contracciones del corazón será insuficiente para asegurar el adecuado suministro de flujo sanguíneo al cuerpo y se disminuye la tasa de flujo sanguíneo.

Como acción preventiva insitu se debe de trasladar a un área fresca y se

administrará cantidades moderadas de agua potable, en caso de que el paciente continúe inconsciente se debe de asumir un golpe por calor.

2.2.6.3. Golpe de calor

El golpe de calor puede ocurrir en el caso de que la temperatura central del cuerpo presente valores superiores a los 41 °C, en este caso, las transmisiones encargadas de la coordinación del sistema nervios involuntario son confusas para los músculos y los órganos que controlan estas reacciones involuntarias, además de ello, el golpe por calor puede generar lesiones irreversibles en el cerebro, riñones, hígado, etc. El golpe de calor conlleva un elevado riesgo de muerte.

En el caso de los efectos anteriores se conoce la sintomatología de náuseas, sed, dolores de cabeza, mareos, dificultades para respirar y palpitaciones, en caso de inconciencia se asumirá golpe de calor lo que conllevará los siguientes síntomas adicionales:

- Cese de la transpiración, la piel del paciente permanecerá caliente sin embargo estará seca y podrá presentar una coloración manchada y/o azulada.
- Las pupilas dilatadas, mirada vidriosa y comportamiento irracional o agresivo serán indicadores de desorientación.
- Escalofríos y contracciones musculares incontroladas.
- Pérdida de control de funciones corporales.

Aun cuando el tratamiento deberá de comenzar lo antes posible las referencias médicas recomiendan no trasladar al paciente hasta que se haya establecido que la temperatura central del cuerpo está bajo control, entonces, se debe de considerar como acciones de primeros auxilios:

- Realizar movimiento de aire sobre el paciente y aplicar agua sobre la piel con temperatura no menor a 15 °C para evitar la vasoconstricción de los capilares sanguíneos presentes en la piel, otra alternativa es la aplicación de masajes a la piel que promoverá el flujo sanguíneo por los tejidos superficiales.
- Aplicar reanimación cardiopulmonar (RCP) en caso de no percibir latidos cardíacos y/o respiración.
- En caso de que el paciente se encuentre consciente se recomienda brindar agua para la ingesta.

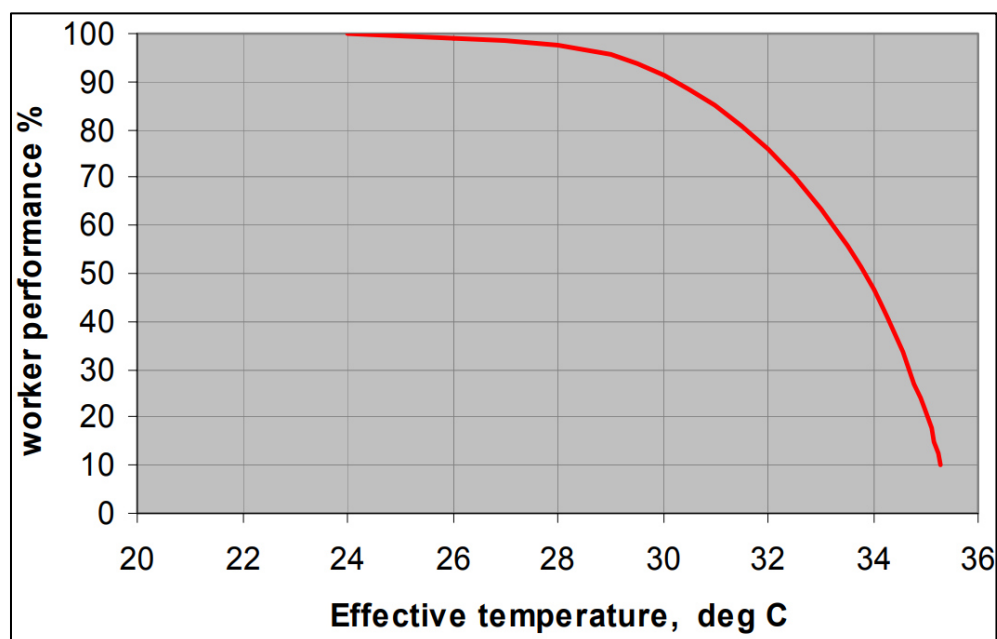
Se debe de buscar asistencia médica y continuar con el desarrollo del tratamiento cuando la temperatura central presente valores inferiores a los 38.5 °C.

2.2.7. IMPACTO DEL CALOR EN MINAS EN LA PRODUCTIVIDAD

Partiendo de los efectos fisiológicos que las condiciones de calor generan en los trabajadores es de esperarse que a medida que el potencial de enfriamiento del flujo de aire circulante disminuya el personal se volverá sustancialmente menos efectivo en el desarrollo de sus operaciones, entonces, se identificará un significativo deterioro en la tasa y calidad de desempeño individual del personal, llevando consigo incremento de tasas de accidentes y problemas de absentismo.

E. Poulton (1970) realizó estudios sobre la efectividad de los trabajadores que realizaban operaciones de paleado en frentes de trabajo que inicialmente se encontraban a una temperatura efectiva de 22 °C con una eficiencia de trabajo de 100 % y que con la variación de la temperatura efectiva hasta un valor de 30 °C la productividad empezó a disminuir, el detalle gráfico de lo previamente expuesto se presenta en la **Figura 14**.

Figura 14: Influencia de la temperatura efectiva en la efectividad de los trabajadores.



Fuente: E. Poulton - Environment and human efficiency.

Entonces, con la finalidad de representar numéricamente la variación de la demanda de aire a calcular según lo estipulado en el D.S.N°024-2016 y su modificatoria el D.S.N°023-2017 (desarrollo establecido en el **ANEXO 1**) se presente a continuación un esquema de variación de demanda de aire según existencia de niveles de operación con temperaturas de aire superiores a 24 °C (**Tabla 6**), esto es:

Tabla 6: Cuadro referencial de valores representativos de demanda de aire.

DEMANDA DE AIRE SEGÚN DS 023	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4
PERSONAL	X	X	X	X
EQUIPOS DIÉSEL	Y	2Y	3Y	4Y
MADERA	Z	Z	Z	Z
NIVELES CON TEMPERATURA > 24°C	W	2W	3W	4W

Fuente: Elaboración propia.

Así, como se detalla en la tabla anterior, la demanda de aire integral viene siendo

afectada por valores variables de demanda por Equipos Diésel y la demanda por Niveles con Temperatura de Aire superior a 24 °C, valores que, en la modificación de escenarios no se mantiene constante debido a que variarán según el desarrollo de operaciones en los trabajos dentro de mina, este análisis tiene un enfoque en la información peruana ya que Nicaragua no cuenta con una normativa a detalle en minería subterránea.

2.3. GLOSARIO

- **TERMO-AMBIENTAL:** Refiere a la combinación de parámetros psicométricos que determinan las características del aire y condiciones de trabajo.
- **REALIDAD OPERATIVA:** Son todas aquellas condiciones típicas de una mina, engloba desde las características estructurales hasta las condiciones de clima en superficie.
- **CIRCUITO INTEGRAL:** Comprende los tres sistemas de ventilación, principal, secundario y auxiliar, así como los diversos elementos asociados, en términos generales el sistema de ventilación total de una mina.
- **PRODUCTIVIDAD:** Es el indicador numérico que compara el estado de avance de una acción frente a lo previamente planificado, en minería subterránea refleja el grado de aproximación a los objetivos propuestos durante el planeamiento.
- **ELEMENTOS DE CONTROL:** Infraestructuras civiles construidas en interior mina para direccionar el flujo de aire según el requerimiento operativo, dirigen el flujo bloqueando conexiones entre ductos de ventilación y/o regulando sus valores.
- **RECIRCULACIÓN:** Es el caudal de aire que se encuentra circulando de manera permanente dentro de un circuito de ventilación, generalmente se presenta entre dos niveles interconectados por labores verticales.
- **BUDGET:** Son todas las proyecciones futuras tanto de zonas de explotación,

cantidades, labores, servicios, etc. Es el planeamiento que se realiza respecto a un determinado periodo de tiempo.

- **FORECAST:** Es un indicador de avance del budget, el forecast subdivide en objetivos a un menor periodo de tiempo que en suma apuntan el logro de los objetivos planificados en el periodo de tiempo establecido inicial.

CAPÍTULO III

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. LAS HIPÓTESIS

3.1.1. HIPÓTESIS GENERAL

La optimización del sistema de ventilación en la Mina El Limón - 2 conducirá a un aumento significativo en la productividad de los trabajadores, Nicaragua, 2023.

3.1.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- La identificación de la ubicación de labores como chimeneas, galerías, rampas y demás labores mineras subterráneas así como también la distribución de los circuitos de ventilación y las condiciones del aire en interior mina sirven para realizar cálculos más adecuados para el diseño de ventilación en la mina el Limón - 2, Nicaragua.
- El diseño las características de ventilación en el año 2023 nos permite detallar todos los componentes de la mina el Limón - 2, Nicaragua, 2023 y con ello la calibración correcta del modelo de simulación virtual que asegurará la anticipación de potenciales requerimientos en las mejoras a futuro según el Budget propuesto por parte del área de planeamiento.
- El nuevo diseño del sistema de ventilación es rentable y aumenta la productividad de los trabajadores en la mina El Limón - 2, Nicaragua, 2023.

3.2. LAS VARIABLES

- **Variable independiente:** Optimización del sistema de ventilación de la mina hipertermal El Limón - 2.
- **Variable dependiente:** Productividad de los trabajadores.

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Las variables identificadas según su naturaleza como dependientes e independientes serán analizadas y operadas en dimensión considerando diferentes indicadores de medición de cambio y/o efecto en concordancia con la memoria de tesis propuesta, en ambos casos aplicando la técnica de recolección de datos recopilados mediante ficha documental. Las consideraciones se detallan en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Análisis de operacionalización de variables.

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	TÉCNICA	INSTRUMENTO
INDEPENDIENTE: Optimización del sistema de ventilación de la mina hipertermal El Limón - 2.	Cálculo de la demanda de aire del sistema integral.	Máster de equipos de la unidad y Personal.	Recolección de datos.	Ficha documental.
	Evaluación de caudal total de ingreso de aire fresco y caudal total de salida de aire viciado.	Porcentaje de balance y cobertura de aire.		
	Fuentes de calor y sus magnitudes.	Valores de fuentes puntuales de calor y sus ubicaciones en el sistema.		
DEPENDIENTE: Productividad de los trabajadores.	Productividad por área de trabajo.	Eficiencia de producción por área de trabajo.	Recolección de datos.	Ficha documental.
	Productividad por tipo de tarea.	Eficiencia de cobertura del sistema de ventilación.		

Fuente: *Elaboración propia.*

CAPÍTULO IV

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

4.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La presente investigación se llevará a cabo en la mina El Limón - 2 ubicada en el lado occidental de Nicaragua, en el departamento de León, cerca de la costa del Océano Pacífico.

4.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación de la presente memoria de tesis es de tipo analítico cuantitativo ya que partiendo del análisis del estado actual de operación de la mina El Limón - 2 y su realidad operativa se evaluarán los valores de progreso en términos de mejora de la productividad de los trabajadores luego de la implementación de mejoras en el sistema de ventilación integral.

4.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

4.3.1. POBLACIÓN

La presente memoria de tesis considera como unidad de estudio a todos los trabajadores de socavón de la mina hipertérmica El Limón - 2, debido a que el circuito integral de ventilación contempla la totalidad de la mina.

4.3.2. MUESTRA

La muestra representativa de la presente memoria de tesis es el personal en interior mina conformada por 103 personas, el personal será observado en función a su avance en relación con las condiciones termodinámicas del frente de labor.

4.4. PROCEDIMIENTO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Los datos considerados para la realización de la presente investigación son:

4.4.1. PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

- **Revisión bibliográfica:** Involucra la búsqueda, recopilación, análisis y síntesis de la información disponible respecto al tema investigado, en este caso, respecto a sistemas de ventilación de minas y sus parámetros de optimización, productividad de trabajadores, softwares de simulación virtual y metodologías de cálculo de datos recopilados.
- **Recopilación de datos primarios:** En este caso se considerarán todos aquellos datos obtenidos de manera directa dentro de la realidad operativa de la mina, ya sean valores medidos y/o datos previstos por la unidad minera.
- **Recopilación de datos secundarios:** Consiste en obtener datos de fuentes adicionales como estudios anteriores generalizados y/o estándares aplicables a las condiciones de trabajo por las características particulares de una mina hipertermal.

4.4.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La técnica de recolección de información y datos para esta investigación será de manera directa debido a que los diversos parámetros que rigen la realidad operativa requieren la interacción con estos factores y su medición exacta insitu.

4.4.3. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

El principal instrumento de recolección de información será la ficha documental que incorpora el análisis de los datos medidos en campo, la documentación pertinente del planeamiento previo y proyectado, así como también los resultados obtenidos en las

simulaciones y planificación posterior.

Puntualmente, se detallará a continuación los instrumentos empleados para la correspondiente recolección de información durante la inspección de campo, esto es:

- **TERMO-ANEMÓMETRO:**

- **Modelo** : 5200
- **Marca** : KESTREL
- **Objetivo** : Levantamiento de valores de velocidad de aire y demás parámetros psicométricos mediante la metodología del barrido en la sección transversal de los diferentes conductos de aire en interior mina.
- **Referencia** : *Figura 15*

Figura 15: Termo-Anemómetro Kestrel 5200.



Fuente: TECFRESH.

- **TERMÓMETRO DIGITAL:**

- **Modelo** : TIMPST095
- **Marca** : PROSTER
- **Objetivo** : Medición de valores de temperatura del flujo de agua circulante en interior mina, así como el agua acumulada en las diversas pozas de sedimentación y bombeo.
- **Referencia** : *Figura 16*

Figura 16: Termómetro digital PROSTER.



Fuente: PROSTER.

- **TERMÓMETRO LÁSER:**

- **Modelo** : 62 MAX
- **Marca** : FLUKE

- **Objetivo** : Medición de valores de temperatura de macizo rocoso, tuberías de transporte de agua caliente y cualquier otra fuente de calor no accesible por proximidad.
- **Referencia** : **Figura 17**

Figura 17: Termómetro láser Fluke 62 MAX.

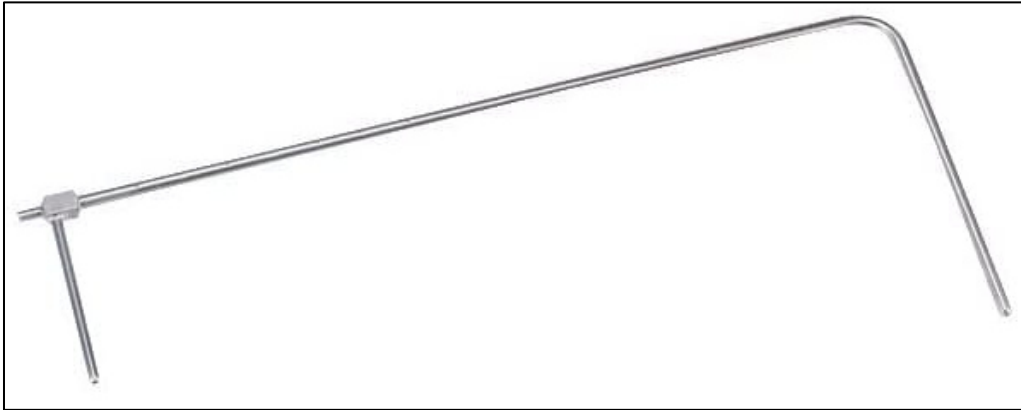


Fuente: FLUKE.

- TUBO DE PITOT:

- **Modelo** : ND
- **Marca** : DWYER
- **Objetivo** : Medición de valores de presión principalmente en elementos de ventilación.
- **Referencia** : **Figura 18**

Figura 18: Tubo de Pitot Dwyer.



Fuente: DWYER.

4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico estará enfocado en los datos recopilados durante la inspección de campo, así como también los datos que se obtendrán luego de las mejoras implementadas en el sistema integral de ventilación, esto nos ayudará a identificar en cada una de las etapas patrones y tendencias respecto al alcance de los objetivos planteados, por otro lado, el análisis inferencial será aplicado a la propuesta de ventilación para la planificación a largo plazo según el Budget propuesto.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

Como resultado del trabajo de campo realizado, en el cual se recopilaron los factores intrínsecos que dominan la distribución de aire del sistema de ventilación en la mina El Limón - 2, se elaboró y calibró el correspondiente modelo de Simulación (VentSim) con la finalidad de llevar a cabo las simulaciones correspondientes para determinar el impacto de las acciones de mejora para el incremento de la productividad de los trabajadores en minas hipertermales.

Se desarrolla en primera instancia el requerimiento correspondiente de flujo de aire fresco ingresante para su respectiva distribución en interior mina, así como el análisis del impacto de las infraestructuras asociadas y equipos de ventilación, buscándose la optimización del consumo de energía de estas.

Con el establecimiento de correspondientes etapas de análisis enfocadas en el corto, mediano y largo plazo de la operación para las diversas zonas proyectadas considerando los hitos claves en el ritmo de producción estimado, se analizó el planeamiento integral de alternativas propuestas para la mejora de las condiciones termo-ambientales en interior mina. Finalmente, como resultados del presente análisis se concluirá con las correspondientes recomendaciones y el análisis de su factibilidad en términos de ergonomía, análisis económico y operatividad.

5.1. RESUMEN DE INSPECCIÓN DE CAMPO

5.1.1. CONDICIONES TERMO-AMBIENTALES DEL LUGAR

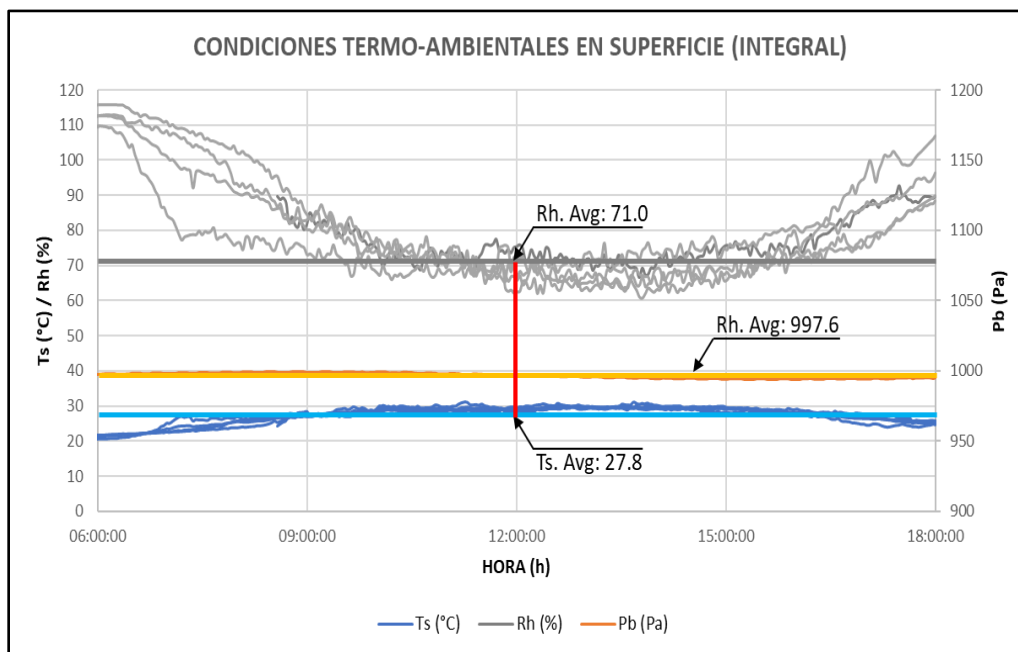
Para un mejor entendimiento de los resultados obtenidos, se presentará un análisis detallado de cinco días continuos (**Tabla 8**) conformados por un rango de horario de medición, esto es, de 06:00 horas a 18:00 horas.

Tabla 8: Días y horarios de medición de condiciones termo-ambientales en superficie.

DÍA	HORARIO
25/10/2022	06:00 - 18:00
26/10/2022	06:00 - 18:00
27/10/2022	06:00 - 18:00
28/10/2022	06:00 - 18:00
31/10/2022	06:00 - 18:00

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19: Parámetros psicométricos medidos - Resumen integral.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la **Figura 19**, existe una clara tendencia de los parámetros psicométricos medidos en cuanto a sus valores reflejados, así tenemos que:

- **Presión Barométrica (Pa):** Se identifica una tendencia leve al alza en sus niveles durante la primera mitad de la guardia (06:00 horas – 12:00 horas) y una tendencia leve a la baja en sus niveles durante la segunda mitad de la guardia (12:00 horas

– 18:00 horas); la diferencia en valores es no mayor a 6.71 Pa, es decir, se infiere que la presión barométrica se mantiene relativamente constante.

- **Temperatura ambiente (°C):** Se evidencia un incremento marcado en sus valores desde el inicio de la guardia hacia las 15:00 horas que es donde empieza a disminuir hasta el fin de la guardia; se identificó también su relación inversa con los valores monitoreados respecto a la humedad relativa.
- **Humedad Relativa (%):** Respecto a los valores de humedad relativa, como se mencionó en el punto anterior, su relación inversa respecto a la temperatura implica la disminución en sus valores hacia las 15:00 horas que es donde incrementa hasta el fin de la guardia.

Finalmente, mediante el análisis de los valores medidos, se estimó a partir del valor medio de Presión Barométrica (Pa) los valores correspondientes de Temperatura Ambiente (°C) y Humedad Relativa (%) (**Figura 19** – Línea roja), que serán configurados posteriormente para el modelo de simulación virtual (**Tabla 9**), esto es:

Tabla 9: Parámetros psicométricos estimados.

MINA	PARÁMETRO	VALOR
El Limón – 2	Ts (°C)	27.8
	Rh (%)	84.1
	Pb (Pa)	997.6

Fuente: *Elaboración propia.*

5.1.2. PUNTOS DE OPERACIÓN DE VENTILADORES

Durante la inspección de campo, se realizó el monitoreo a dos estaciones de ventiladores, siendo estas dos estaciones de extracción de aire viciado:

5.1.2.1. RB_1

En esta estación se identificó un ventilador extractor de 300 KCFM de capacidad nominal que opera a 12.3 "H₂O (FTP), 40.0 °C de temperatura seca y 40.0 °C de temperatura húmeda (como promedio dentro de un rango de 38.0 °C y 43 °C), todo esto a una presión atmosférica de 1,008.1 Pa, mediante las mediciones con tubo de Pitot se estableció que el caudal efectivo es de 266.3 KCFM. De acuerdo con el monitoreo de parámetros eléctricos, el ventilador presenta un consumo de 592.9 HP, es decir, el ventilador opera a un 87% de eficiencia estimada, a una frecuencia de 60 Hz.

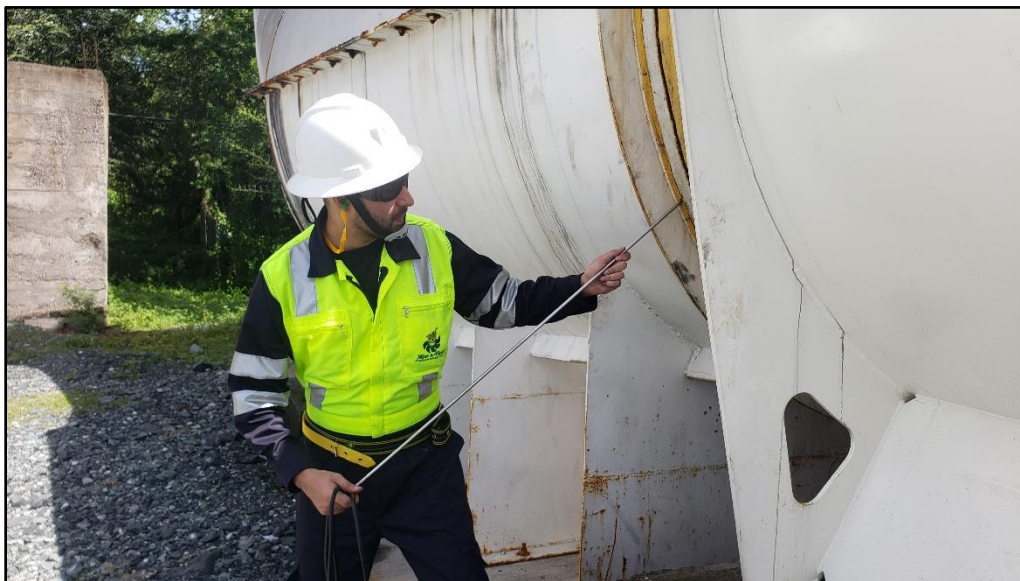
Dichos aspectos se evidencian en la **Figura 20**, correspondiente al ventilador extractor; así como en las **Figura 21**, **Figura 22**, **Figura 23**, donde se muestran las mediciones de presión dinámica, presión estática y temperatura del flujo de aire en la salida, respectivamente.

Figura 20: Ventilador extractor de aire viciado - RB_1.



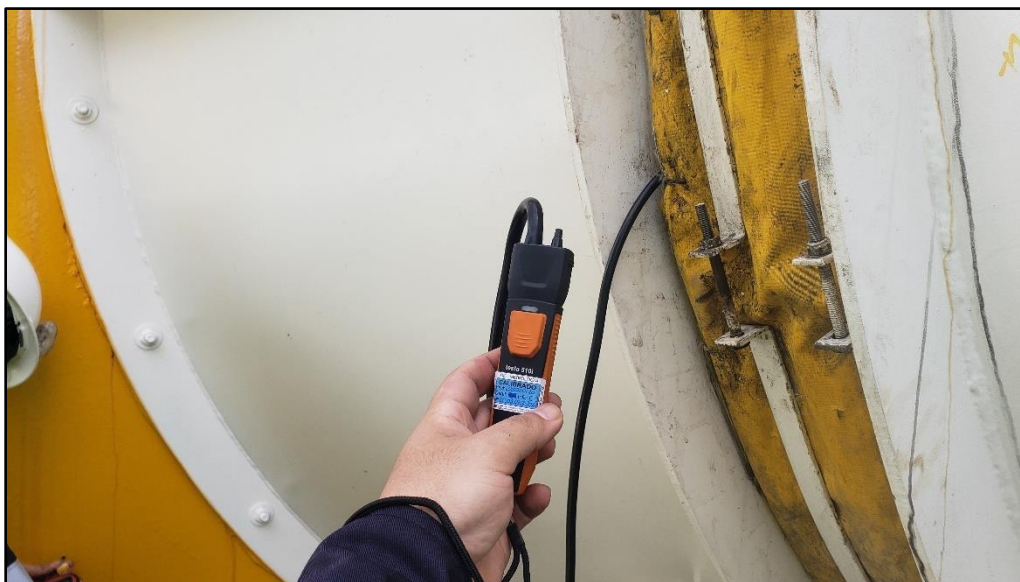
Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 21: Medición de presión dinámica con tubo de Pitot – RB_1.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 22: Medición de presión estática con sonda de presión – RB_1.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 23: Medición de temperatura de flujo de aire en salida – RB_1.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

5.1.2.2. RB_2

En esta estación se identificó un ventilador extractor de 300 KCFM de capacidad nominal, que opera a 9.42"H₂O (FTP), 42.5 °C de temperatura seca y 42.5 °C de temperatura húmeda (como promedio dentro de un rango de 42 °C y 44 °C), todo esto a una presión atmosférica de 1,007.7 Pa y un caudal efectivo de 218.8 KCFM, medido con tubo de Pitot. De acuerdo con el monitoreo de parámetros eléctricos, el ventilador presenta un consumo de 584.4 HP, es decir, el ventilador opera a un 57% de eficiencia estimada, a una frecuencia de 55 Hz.

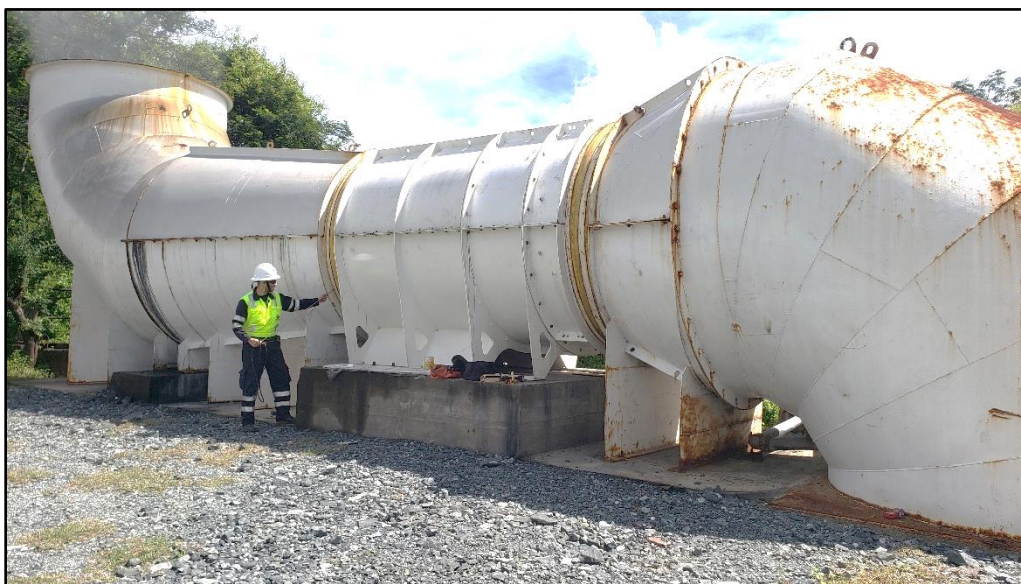
Estos parámetros se ilustran en la **Figura 24**, correspondiente al ventilador extractor, así como en las **Figura 25**, **Figura 26**, **Figura 27**, donde se muestran las mediciones de presión dinámica, presión estática y temperatura del flujo de aire en la salida, respectivamente.

Figura 24: Ventilador extractor de aire viciado – RB_1.



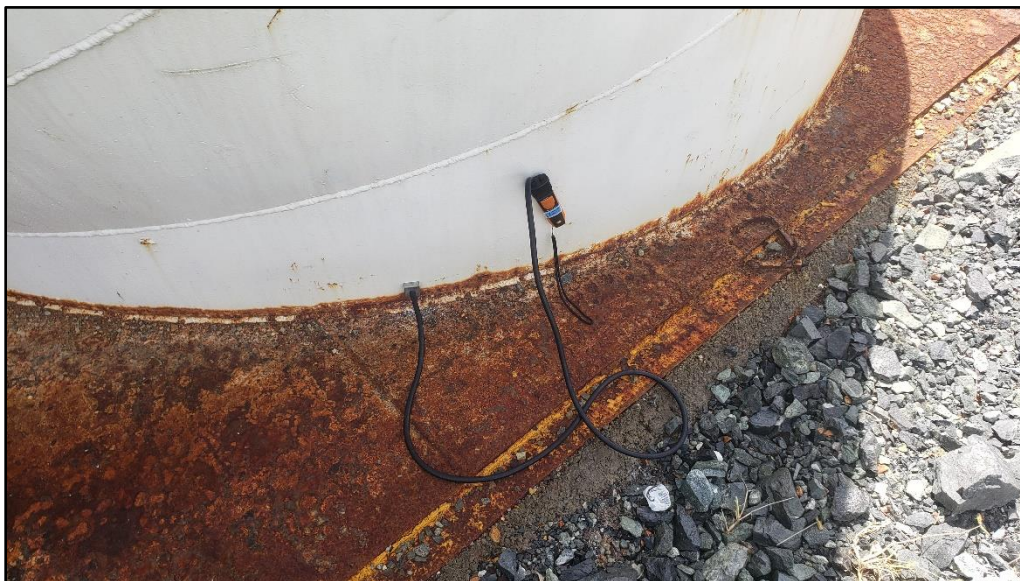
Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 25: Medición de presión dinámica con tubo de Pitot – RB_2.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 26: Medición de presión estática con sonda de presión – RB_2.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 27: Medición de temperatura de flujo de aire en salida – RB_2.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

5.1.3. CÁLCULO DE DEMANDA DE AIRE

Para el cálculo de requerimiento de aire para coberturar el desarrollo de operaciones dentro de la unidad minera se empleó lo estipulado en la normativa

correspondiente D.S.N°023-2017, esto es:

Art. 52: ...“La demanda de aire de la mina debe ser la cantidad de aire requerida por los trabajadores, para mantener una temperatura de confort del lugar de trabajo y para la operación de los equipos petroleros. Cuando en la operación no se usen equipos con motor petrolero debe considerarse el aire requerido para diluir los gases de las voladuras de acuerdo con el ANEXO 38...

... Para mantener la temperatura de confort en el lugar de trabajo, se debe considerar en el cálculo del requerimiento de aire una velocidad mínima de 30 m/min, cuando la temperatura se encuentre en el rango de 24°C hasta 29°C como máximo...

... El requerimiento de aire para los equipos que operan con motores petroleros no debe ser menor de tres (3) m³/min, por la capacidad efectiva de potencia (HPs) y en función a su disponibilidad mecánica y utilización de acuerdo con la evaluación realizada por la titular de actividad minera que considere también la altitud, el calor de los motores y las emisiones de gases y partículas en suspensión.

Entonces, según lo descrito como referencia a la normativa respectiva, se procedió con el respectivo cálculo de requerimiento de aire:

La demanda de aire al interior de la mina debe ser calculada de acuerdo con el literal d) del artículo 252 del reglamento, considerando la fórmula siguiente:

$$Q_{T0} = Q_{T1} + Q_{Fu}$$

Donde:

Q_{T0} = Caudal total para la operación

Q_{T1} = La sumatoria de caudal requerido por:

a) el número de trabajadores (Q_{Tr}),

- b) el consumo de madera (Q_{Ma}),
- c) temperatura en labores de trabajo (Q_{Te}) y
- d) equipos con motor petrolero (Q_{Eq})

$Q_{Fu} = 15\%$ del Q_{T1}

Así, para el cálculo detallado del requerimiento de aire, se determinó:

- **Caudal requerido por el número de trabajadores (Q_{Tr}):**

La información detallada según la **Tabla 10** presenta un total de 103 colaboradores operando en simultáneo durante una guardia de trabajo, así mismo, según su ubicación altitudinal y en concordancia con lo estipulado según normativa, el requerimiento de aire mínimo por colaborador será de 3 m³/min; agenciándonos de la **Ecuación 1** se calculó el caudal correspondiente:

Tabla 10: Distribución de personal por área de trabajo.

ÁREA	TRABAJADORES	m3/min POR PERSONA	m3/min TOTAL	CFM TOTAL
Mina	70	3	210	7416
Geología	4	3	12	424
SIMA	2	3	6	212
Geomecánica	1	3	3	106
Mantto	6	3	18	636
Topografía	3	3	9	318
Sub- Total	86	3	258	9111
Flotantes	17	3	52	1822
Total	103	3	310	10,934

Fuente: Elaboración propia.

$$Q_{Tr} = FxN_t (m^3/min)$$

Ecuación 1

$$Q_{Tr} = (3) \times (103) \text{ (m}^3/\text{min)}$$

$$Q_{Tr} = 310 \text{ (m}^3/\text{min)}$$

- **Caudal requerido por el consumo de madera (Q_{Ma}):**

Respecto al consumo de madera como base para el requerimiento de aire en interior mina, según lo identificado en las inspecciones de campo, no existe consumo como tal, en tal sentido, no se consideró el caudal correspondiente.

- **Caudal requerido por temperatura en las labores de trabajo (Q_{Te}):**

En este apartado, en concordancia con lo identificado en las respectivas inspecciones de campo, se monitoreó niveles con sección típica de 18.30 m² de los cuales cinco niveles presentan temperaturas superiores a los 24 °C hasta los 29 °C para los cuales, según la normativa correspondiente, se consideró una velocidad mínima de 30 m/min; agenciándonos de la **Ecuación 2** se calculó el caudal correspondiente:

$$Q_{Te} = V_m \times A \times N_{T^\circ} \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Ecuación 2

$$Q_{Te} = (30 \text{ m/min}) \times (18.83 \text{ m}^2) \times (05) \text{ (m}^3/\text{min)}$$

$$Q_{Te} = 2,750 \text{ (m}^3/\text{min)}$$

- **Caudal requerido por equipos con motor petrolero (Q_{Eq}):**

Para el cálculo de requerimiento de aire para ventilar los gases y/o calor emitido por equipos que operan con motor petrolero, se consideró el máster de equipos al mes de abril del 2023, mismos que, como se detallan en las

Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13, suman un total de 38 equipos en estado operativo; entonces, agenciándonos de la **Ecuación 3**, y en concordancia con la agrupación en “Familia de Equipos” se calculó el caudal correspondiente:

Tabla 11: Agrupación de equipos por familia de equipos y tipo de equipos.

FAMILIA DE EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	CANTIDAD
SCOOP	Scoop Atlas 1030 4.59 m3	2
SCOOP	Scoop Toro 400 3 m3	0
SCOOP	Scoop CAT R1700 6.6 m3	2
JUMBO	Jumbos Horizontal	2
JUMBO	Jumbos Vertical (Simba)	1
JUMBO	Jumbos Vertical (Raptor)	1
JUMBO	Jumbos Vertical (Cubex)	0
JUMBO	Jumbos Empernador	1
JUMBO	Scissors	0
VOLQUETE	Cat Articulados	4
SCOOP	Bajo Perfil Semi Nuevos	3
VOLQUETE	Camiones Bajo Perfil TMSA	1
AUXILIARES	Telehandler CAT	3
AUXILIARES	Tractor D5G CAT	0
AUXILIARES	Motoniveladora CAT	1
AUXILIARES	Vibrocompactadora CAT	0
SOSTENIMIENTO	Mini Robot Shotcretero	1
SOSTENIMIENTO	Mixer	1
AUXILIARES	Back Hoe	1
CAMIONETA	Camionetas	10
CAMION	Camión Hino	1
AUXILIARES	Tractores	3
TOTAL		38

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Valores de disponibilidad mecánica y factor de utilización por tipo de equipo.

FAMILIA DE EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	DM	FU
SCOOP	Scoop Atlas 1030 4.59 m3	0.85	0.7
SCOOP	Scoop Toro 400 3 m3	0.85	0.5
SCOOP	Scoop CAT R1700 6.6 m3	0.85	0.7
JUMBO	Jumbos Horizontal	0.85	0.15
JUMBO	Jumbos Vertical (Simba)	0.85	0.15
JUMBO	Jumbos Vertical (Raptor)	0.85	0.15
JUMBO	Jumbos Vertical (Cubex)	0.85	0.15

FAMILIA DE EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	DM	FU
JUMBO	Jumbos Empernador	0.85	0.15
JUMBO	Scissors	0.85	0.5
VOLQUETE	Cat Articulados	0.85	0.6
SCOOP	Bajo Perfil Semi Nuevos	0.85	0.6
VOLQUETE	Camiones Bajo Perfil TMSA	0.85	0.6
AUXILIARES	Telehandler CAT	0.85	0.7
AUXILIARES	Tractor D5G CAT	0.85	0.5
AUXILIARES	Motoniveladora CAT	0.85	0.7
AUXILIARES	Vibrocompactadora CAT	0.85	0.5
SOSTENIMIENTO	Mini Robot Shotcretero	0.85	0.4
SOSTENIMIENTO	Mixer	0.85	0.4
AUXILIARES	Back Hoe	0.85	0.3
CAMIONETA	Camionetas	0.85	0.5
CAMION	Camión Hino	0.85	0.6
AUXILIARES	Tractores	0.85	0.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: Valores de demandad de aire por equipos diésel.

FAMILIA DE EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	REQ. AIRE (m3/min)	REQ. AIRE (CFM)
SCOOP	Scoop Atlas 1030 4.59 m3	524	18,502
SCOOP	Scoop Toro 400 3 m3	-	-
SCOOP	Scoop CAT R1700 6.6 m3	723	25,533
JUMBO	Jumbos Horizontal	35	1,234
JUMBO	Jumbos Vertical (Simba)	24	850
JUMBO	Jumbos Vertical (Raptor)	32	1,127
JUMBO	Jumbos Vertical (Cubex)	-	-
JUMBO	Jumbos Empernador	22	770
JUMBO	Scissors	-	-
VOLQUETE	Cat Articulados	1,055	37,250
SCOOP	Bajo Perfil Semi Nuevos	674	23,789
VOLQUETE	Camiones Bajo Perfil TMSA	227	8,003
AUXILIARES	Telehandler CAT	232	8,193
AUXILIARES	Tractor D5G CAT	-	-
AUXILIARES	Motoniveladora CAT	122	4,293
AUXILIARES	Vibrocompactadora CAT	-	-
SOSTENIMIENTO	Mini Robot Shotcretero	60	2,102
SOSTENIMIENTO	Mixer	135	4,758
AUXILIARES	Back Hoe	45	1,586
CAMIONETA	Camionetas	745	26,326
CAMION	Camión Hino	93	3,286
AUXILIARES	Tractores	123	4,361

FAMILIA DE EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	REQ. AIRE (m ³ /min)	REQ. AIRE (CFM)
TOTAL		4,869	171,962

Fuente: Elaboración propia.

$$Q_{Eq} = 3 \times HP \times D_m \times F_u \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Ecuación 3

$$Q_{Eq} = 4,869 \text{ (m}^3/\text{min)}$$

- **Caudal requerido por fugas (Q_{Fu}):**

Finalmente, considerando los requerimientos previamente detallados de manera integral, resulta necesaria la consideración de un factor de seguridad por fugas potenciales en el flujo de aire circulante en interior mina, entonces, según lo estipulado en el D.S.N°023-2017 y agenciándonos de la

Ecuación 4 se calculó el caudal correspondiente:

$$Q_{Fu} = 15\% \times Q_{T1} \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Ecuación 4

$$Q_{Fu} = 15\% \times (Q_{Tr} + Q_{Ma} + Q_{Te} + Q_{Eq}) \text{ (m}^3/\text{min)}$$

$$Q_{Fu} = 15\% \times (310 + 0 + 2,750 + 4,869) \text{ (m}^3/\text{min)}$$

$$Q_{Fu} = 1,189 \text{ (m}^3/\text{min)}$$

A modo de resumen, según lo especificado en el

ANEXO 4, se calculó un caudal total de 9,118 m³/min (322,002 CFM) como resultado de sumar los subtotales por equipos (**Tabla 14**) y subtotales fijos (**Tabla 15**); se detalla a continuación el requerimiento correspondiente:

Tabla 14: Demanda de aire por familia de equipo según D.S.N°023-2017.

FAMILIA DE EQUIPO	CAUDAL (m³/min)	CAUDAL (CFM)
SCOOP	1,921	67,824
VOLQUETE	1,281	45,253
CAMIONETA	745	26,326
AUXILIARES	522	18,433
SOSTENIMIENTO	194	6,860
JUMBO	113	3,981
CAMION	93	3,286
Total general	4,869	171,962

Fuente: Elaboración propia.

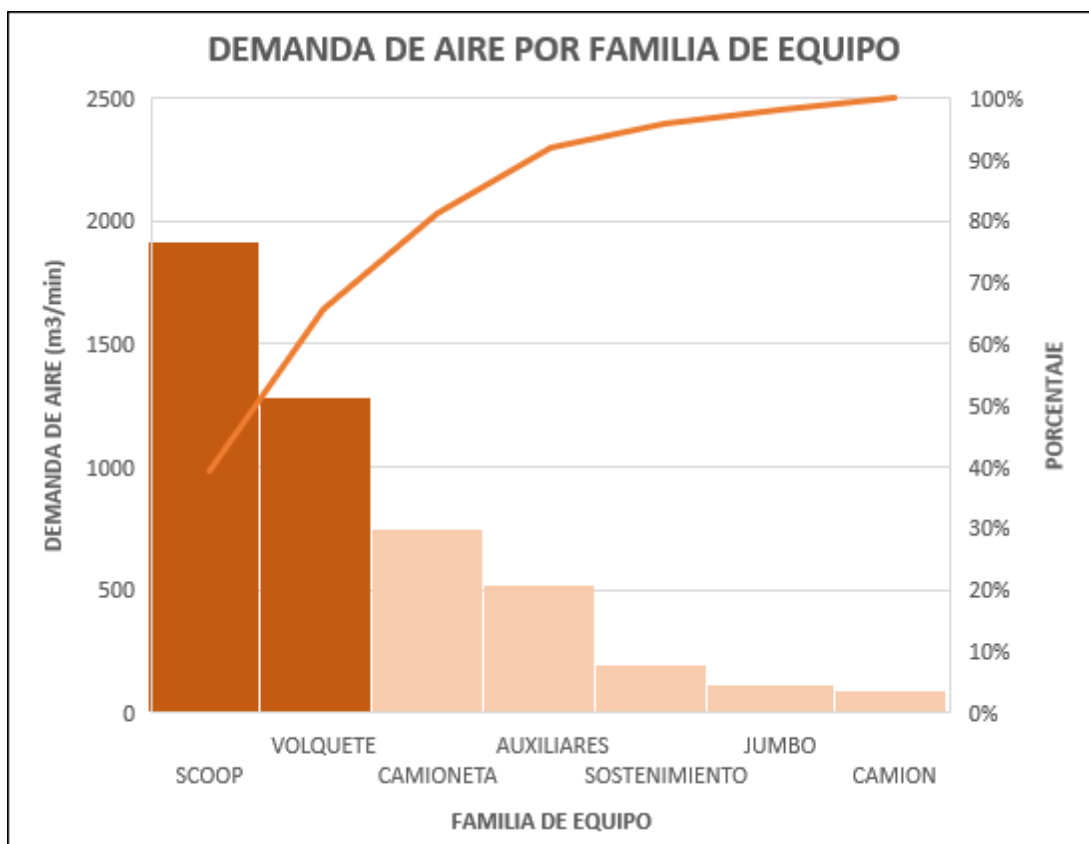
Tabla 15: Demanda de aire por acápite particular según D.S.N°023-2017.

DEMANDA DE AIRE	CAUDAL (m³/min)	CAUDAL (CFM)
Colaboradores	310	10,933
Temperatura (24°C - 29°C)	2,750	97,115
Fugas (15%)	1,189	42,002
Subtotal fijas	4,249	150,050

Fuente: Elaboración propia.

Según la normativa, el requerimiento de aire por familia de equipos se muestra en la **Figura 28**.

Figura 28: Análisis estadístico de requerimiento de aire por familia de equipo según D.S.N°023-2017.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.4. LEVANTAMIENTO DE CAUDALES

Para medir los caudales actuales de las troncales, tanto para ingreso de aire fresco como para salida de aire viciado, se utilizó un Anemómetro Kestrel 5200 y la metodología del “Barrido” en las zonas de ingreso y/o salida de aire.

El sistema integral de ventilación para la mina El Limón - 2 contempla cuatro

estaciones de ingreso de aire fresco que significan un caudal total ingresante de 444.7 KCFM de flujo volumétrico y 234.7 kg/s de flujo másico (**Tabla 16**), por su lado, en términos de salida de aire viciado, el sistema integra dos estaciones de salida hacia superficie que significan un caudal total de extracción de 485.0 KCFM de flujo volumétrico y 248.5 kg/s de flujo másico (**Tabla 17**).

Tabla 16: Caudales de ingreso de aire fresco.

ESTACIÓN TOTAL	CAUDAL (KCFM)	FLUJO MÁSIKO (kg/s)
POZO_8	223.3	118.1
CH_POZO_8	43.1	22.8
POZO_1	23.0	12.2
TR_760	54.1	28.3
BOCAMINA	101.2	53.3
TOTAL	444.7	234.7

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Tabla 17: Caudales de salida de aire viciado.

ESTACIÓN TOTAL	CAUDAL (KCFM)	FLUJO MÁSIKO (kg/s)
RB_580	266.2	137.0
POZO_2	218.8	111.5
TOTAL	485.0	248.5

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Tabla 18: Balance de caudales de aire - Sistema Integral.

ESTACIÓN TOTAL	CAUDAL (KCFM)	FLUJO MÁSIKO (kg/s)
INGRESO DE AIRE	444.7	234.7
EXTRACCIÓN DE AIRE	485.0	248.5
BALANCE	9%	6%

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Entonces, como conclusión preliminar sobre lo resumido en la **Tabla 18** se identifica que, en términos de flujo volumétrico, el balance de caudales significa un valor de 9% con una diferencia de 40.3 KCFM de flujo de aire, en términos de flujo másico, se midió un balance de 6% de flujo con una diferencia de 13.8 kg/s.

Así mismo, en un análisis comparativo respecto al cálculo correspondiente de demanda de aire, el total de cobertura significa un valor de 138% con lo que el sistema debería de trabajar de manera efectiva (**Tabla 19**).

Tabla 19: Cálculo de cobertura de aire en función de la demanda.

ESTACIÓN TOTAL	CAUDAL (m³/min)	CAUDAL (CFM)
INGRESO DE AIRE	12,592	444,700
DEMANDA DE AIRE	9,118	322,002
COBERTURA	138%	138%

Fuente: Elaboración propia.

5.1.5. LEVANTAMIENTO DE PRESIONES

Las presiones tanto estáticas como dinámicas determinarán un cambio de presión en el sistema, en tal sentido, se midieron los siguientes valores de presión de los ventiladores principales en operación, los cuales se muestran en la **Tabla 20**.

Tabla 20: Presión medida de ventiladores principales.

TRONCAL	PS ("H2O)	PD ("H2O)	FTP ("H2O)	%RPM	T (°C)
RB_580	7.71	1.93	9.64	100.0	42.5
POZO_2	9.42	2.88	12.3	91.0	40

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Los valores previamente detallados serán configurados en el modelo de

simulación virtual respectivo con relación a los puntos de operación de los ventiladores correspondientes.

5.1.6. FACTORES DE FRICCIÓN

5.1.6.1. Factores de fricción para labores horizontales

Con el objetivo de estimar valores más certeros y próximos a la realidad operativa de la mina El Limón - 2 y que ayudarán a configurar las correspondientes características de los ductos en el modelo tridimensional de simulación, se realizó el levantamiento de factores de fricción según labores representativas, en tal sentido, se tomó en consideración la distribución de las dimensiones de los conductos de ventilación para lo cual se midieron tres longitudes del ancho de las secciones (**Tabla 21**), así como también cinco medidas de alto de la sección (**Tabla 22**), con un espaciamiento uniforme, así tenemos:

Tabla 21: Anchos de sección medidos.

LABOR	ANCHO DE SECCIÓN (m)			
	A1	A2	A3	AVG
RP_Principal - Nv. -185	4.91	4.69	4.69	4.76
RP_Principal - Nv -135	5.38	5.26	5.17	5.27
RP_Principal - Nv -75	5.02	4.95	4.82	4.93
RP_Sur - Nv -80	4.78	5.10	5.03	4.97
RP_Norte - Nv. -80	4.94	4.84	4.88	4.89
RP_Sur - Nv -15	4.97	4.56	4.66	4.73
RP_Sur - Nv -10	4.59	4.44	4.52	4.52
RP_Sur - Nv 0	5.46	5.28	5.11	5.28
Nv -120 - Pozo 2	5.18	5.08	4.84	5.03
Nv -120 - Panteón Sur	4.94	4.81	4.68	4.81
Nv -95 – Crucero	4.08	3.99	3.92	3.99
PROMEDIO TOTAL				4.83

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Tabla 22: Altos de sección medidos.

LABOR	ALTO DE SECCIÓN (m)					AVG
	H1	H2	H3	H4	H5	
RP_Principal - Nv. -185	3.55	4.75	4.83	5.00	4.11	4.45
RP_Principal - Nv -135	4.09	4.50	4.70	4.43	3.91	4.33
RP_Principal - Nv -75	4.16	4.29	4.40	4.56	2.42	3.97
RP_Sur - Nv -80	4.39	4.94	4.62	4.49	2.91	4.27
RP_Norte - Nv. -80	3.74	4.33	4.33	3.99	3.70	4.02
RP_Sur - Nv -15	2.44	3.83	3.96	3.76	3.54	3.51
RP_Sur - Nv -10	2.98	5.30	5.17	4.27	4.33	4.41
RP_Sur - Nv 0	3.70	4.72	4.83	4.78	3.16	4.24
Nv -120 - Pozo 2	3.97	4.89	4.93	4.65	4.21	4.53
Nv -120 - Panteón Sur	3.35	4.25	4.59	4.55	3.49	4.05
Nv -95 – Crucero	2.80	3.52	3.92	3.88	3.40	3.50
PROMEDIO TOTAL						4.11

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Entonces, como se detalla en los cuadros anteriores, se identificó que la sección típica representativa para la mina El Limón - 2 es de 4.8 m x 4.6 m.

Por su lado, se midió in situ las asperezas (**Tabla 23**) que las diferentes labores presentaban para configurar y calibrar posteriormente el modelo tridimensional de simulación VentSim mediante factores correspondientes de fricción (**Tabla 24**) que modifican el flujo circulante de aire, esto es:

Tabla 23: Rugosidades Absolutas para labores horizontales.

LABOR	ALTURA DE ASPEREZAS (cm)							
	e1	e2	e3	e4	e5	MIN	MAX	AVG
RP_Principal - Nv. -185	30	25	15	10	22	10	30	20.40
RP_Principal - Nv -135	40	35	20	25	10	10	40	26.00
RP_Principal - Nv -75	30	5	25	10	10	5	30	16.00
RP_Sur - Nv -80	50	40	35	30	37	30	50	38.40
RP_Norte - Nv. -80	30	35	25	40	32	25	40	32.40
RP_Sur - Nv -15	35	40	10	12	15	10	40	22.40
RP_Sur - Nv -10	60	50	35	37	25	25	60	41.40
RP_Sur - Nv 0	30	25	22	15	12	12	30	20.80
Nv -120 - Pozo 2	30	32	25	21	10	10	32	23.60
Nv -120 - Panteón Sur	20	25	15	10	22	10	25	18.40
Nv -95 – Crucero	15	12	10	15	10	10	15	12.40
PROMEDIO TOTAL								24.75

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Tabla 24: Factores de fricción calculados para labores horizontales.

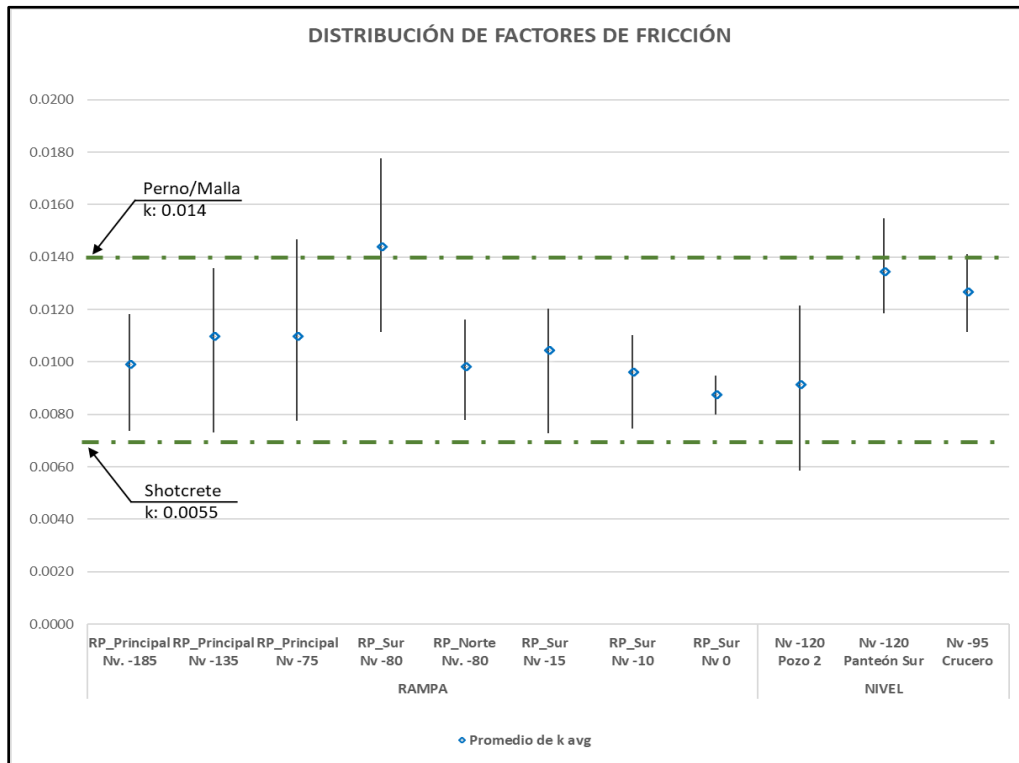
LABOR	FACTORES DE FRICCIÓN		
	k min	k prom	k máx
RP_Principal - Nv. -185	0.0074	0.0099	0.0118
RP_Principal - Nv -135	0.0073	0.0110	0.0136
RP_Principal - Nv -75	0.0058	0.0091	0.0122
RP_Sur - Nv -80	0.0119	0.0134	0.0155
RP_Norte - Nv. -80	0.0112	0.0127	0.0141
RP_Sur - Nv -15	0.0077	0.0110	0.0147
RP_Sur - Nv -10	0.0112	0.0144	0.0178
RP_Sur - Nv 0	0.0078	0.0098	0.0116
Nv -120 - Pozo 2	0.0073	0.0104	0.0120
Nv -120 - Panteón Sur	0.0075	0.0096	0.0110
Nv -95 – Crucero	0.0080	0.0087	0.0095
PROMEDIO TOTAL	0.0084	0.0109	0.0131

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Finalmente, con la finalidad de asociar los valores obtenidos respecto a las consideraciones correspondientes para la caracterización respectiva, se realizó el

análisis comparativo con base en los valores teóricos obtenidos en diversas mediciones de campo según bibliografía correspondiente (J. McPherson), esto es, valores teóricos de factores de fricción para labores con sostenimiento Perno/Malla y sostenimiento con Shotcrete (**Figura 29**).

Figura 29: Análisis referencial de factores de fricción.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Entonces, como conclusión preliminar de lo referido líneas arriba, se considerarán los valores representativos de la **Tabla 25**.

Tabla 25: Factores de fricción representativos para labores horizontales.

TIPO DE CONDUCTO	FACTOR DE FRICCIÓN
MF_RP_Alto	0.014
MF_RP_Medio	0.011
MF_RP_Bajo	0.009
MF_Nivel_Alto	0.010
MF_Nivel_Medio	0.009
MF_Nivel_Bajo	0.008

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

El detalle gráfico se encuentra adjunto en el **ANEXO 3**.

5.1.6.2. Factores de fricción para labores verticales

En el caso de las consideraciones respecto a los factores de fricción para las labores verticales no se pudo medir de manera directa debido a la dificultad de poder acceder a las mismas labores, sin embargo, tomando como referencias las asperezas observadas (**Tabla 26**) en las interacciones de las chimeneas respectivas con los niveles en interior mina y el diámetro efectivo medido en superficie, se pudo estimar los factores de fricción presentados en la **Tabla 27**.

Tabla 26: Altos de asperezas para labores verticales.

LABOR	ALTURA DE ASPEREZAS ESTIMADAS (cm)							
	e1	e2	e3	e4	e5	MIN	MAX	AVG
SET 1	30	40	35	37	32	30	40	34.8
SET 2	13	10	15	12	10	10	15	12.0
SET 3	7	13	15	8	10	7	15	10.6
PROMEDIO TOTAL								19.1

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Tabla 27: Factores de fricción calculados para labores verticales.

LABOR	FACTORES DE FRICCIÓN		
	k min	k prom	k máx
SET 1	0.0157	0.0171	0.0186
SET 2	0.0086	0.0092	0.0102
SET 3	0.0074	0.0087	0.0101
PROMEDIO TOTAL	0.0106	0.0117	0.0130

***Fuente:** Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.*

Entonces, como conclusión preliminar de lo referido líneas arriba, se considerarán los valores de la **Tabla 28**.

Tabla 28: Factores de fricción representativos para labores verticales.

TIPO DE CONDUCTO	FACTOR DE FRICCIÓN
MF_CH_Ingreso	0.013
MF_CH_Salida	0.013

***Fuente:** Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.*

Resaltamos de los valores previamente detallados que, en un análisis comparativo con base en los valores teóricos obtenidos en diversas mediciones de campo según bibliografía correspondiente (J. McPherson), implican una aproximación de 92% respecto al valor base de $k = 0.0140$.

5.1.7. GRADIENTE GEOTÉRMICO

Uno de los principales factores determinantes que rigen la realidad operativa de la mina es la temperatura identificada según niveles de profundización en operaciones, entonces, con la finalidad de determinar un grado de relación entre el nivel de trabajo y su respectiva temperatura se midió la temperatura (°C) de la roca (**Figura 30**) en diferentes niveles de trabajo y/o zonas representativas (**Tabla 29**), esto es:

Figura 30: Referencia de medición de temperatura de macizo rocoso - Frente de exploración.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Tabla 29: Cuadro resumen - Temperatura de roca medida.

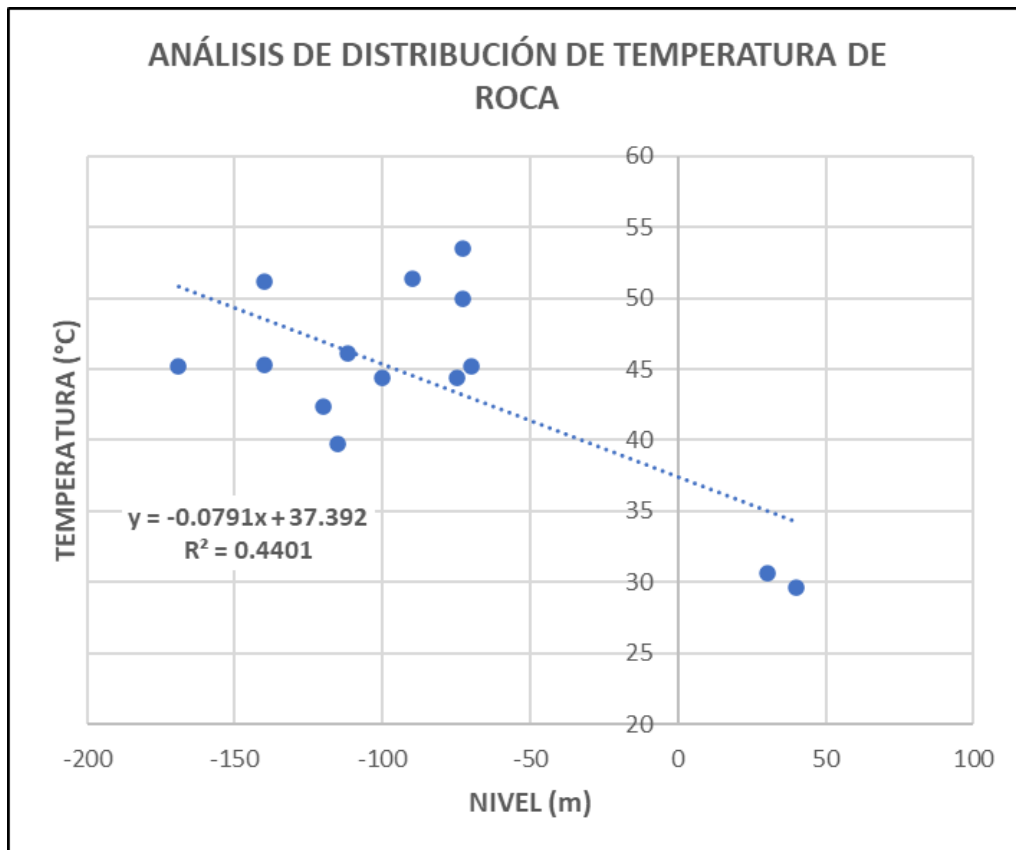
Nivel	Labor	Temperatura de Roca (°C)
40	Cerca de la bocamina.	29.6
30	Polvorín antiguo.	30.6
-70	RP Positiva con CH de transferencia de aire.	45.2
-73	Nivel superior Panteón.	53.5
-73	Nivel superior Panteón.	50.0
-75	Frente nuevo en RP positiva a zona de explotación.	44.4
-90	2do nivel superior panteón.	51.4
-100	Pie RB 760.	44.4
-112	Acceso estación de bombeo Panteón 120.	46.1
-115	RP Principal.	39.7
-120	BP Salida de Panteón sur.	42.4
-140	Frente exploración.	45.3
-140	Pie pozo 8.	51.2
-169	Pie de Troncal 580.	45.2

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Entonces, como se identifica en la tabla, los valores de temperatura de roca siguen una tendencia en relación con el nivel en el que se realizó la medición, entonces, como

se detalla en la (**Figura 31**), se determinó que para el desarrollo de operaciones en la mina El Limón - 2, el correspondiente gradiente geotérmico será de 8°C por cada 100 m de profundización, esto como una media que deberá ser compensada adicionalmente con el aporte generado por la filtración de aguas termales a la labores de interior mina para obtener así una representación adecuada de la realidad de la mina.

Figura 31: Distribución de temperaturas del macizo rocoso.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

5.1.8. FILTRACIÓN DE AGUAS TERMALES

En el caso de la presencia de aguas termales, como principal fuente de emisión de calor en interior mina y predominantemente en la mina El Limón - 2:

Figura 32: Referencia de volumen de filtración de agua termal.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Se realizó el correspondiente monitoreo en términos de temperatura y su implicancia en el sistema de ventilación integral, identificando así zonas de emisión de temperaturas en un rango de 50 °C a 60 °C (**Figura 33**) siendo también estas fuentes de emisión de humedad en forma de vapor de agua (**Figura 34**).

Figura 33: Medición de temperatura de aguas termales.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 34: Presencia de vapor de agua.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

5.1.9. SISTEMA DE BOMBEO

Finalmente, en concordancia con la presencia de aguas termales en interior mina, así como también como producto del desarrollo de operaciones, se identificó estaciones de bombeo con acumulación de agua (**Figura 35**) con elevadas temperaturas (en un rango de 40 °C y 60 °C) lo que significan fuentes puntuales de emisión de calor (**Figura 37**) y vapor de agua hacia los niveles (**Figura 36**).

Figura 35: Estación de acumulación de agua (bombeo).



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 36: Emisión de vapor en poza de bombeo.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 37: Medición de temperatura de agua en poza de bombeo.

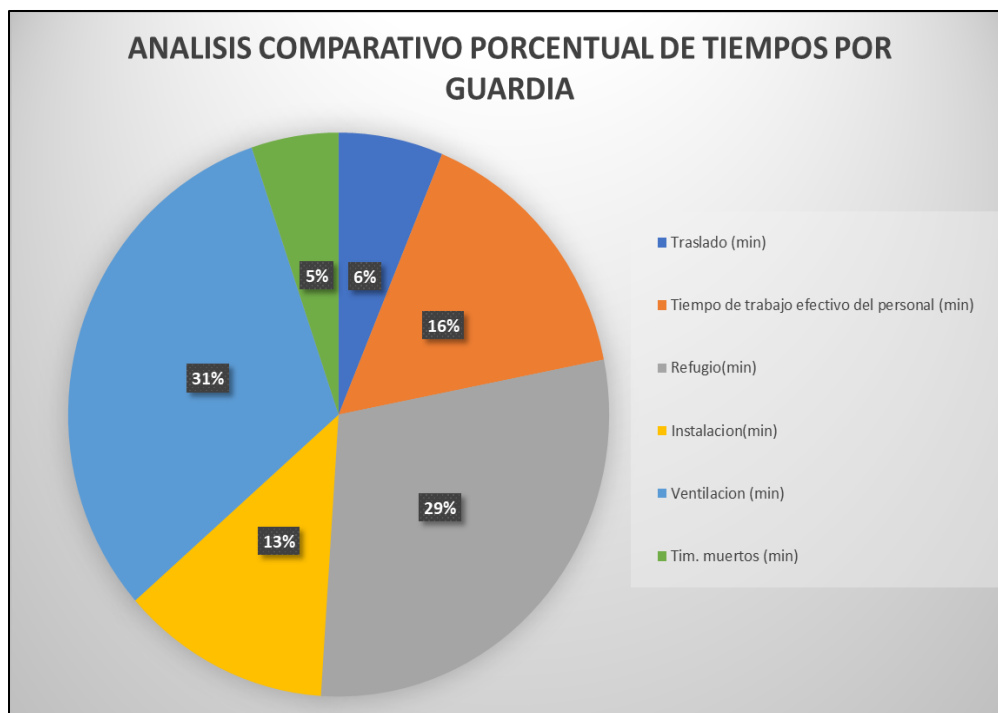


Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

5.1.10. CÁLCULO DE PRODUCTIVIDAD DE TRABAJADORES ACTUAL

Finalmente, de acuerdo con la base de datos compartida por el departamento de productividad en función del estudio de medición de tiempos de uso por proceso en el año 2022 para la MINA EL LIMÓN – 2, en concordancia con los ítems presentados en la **Figura 38**, donde nos muestra los tiempos promedios de los trabajadores en todo el ciclo de minado en una guardia de 8 horas, donde el tiempo de producción ronda en un rango de 15% al 16 % de tiempo efectivo, esto debido a una inadecuada ventilación que hace que el tiempo ventilación del frente post voladura implique un valor de 31%, el tiempo que se pasa en refugio por las altas temperaturas es de 29% y al sumar ambos ítems determinamos que por la falta de una adecuada ventilación se usa efectivamente el 60 % del tiempo por guardia en esperas de ventilación.

Figura 38: Análisis comparativo de tiempos empleados por guardia de trabajo - Escenario actual.



Fuente: Elaboración propia – Valores medidos en Mina El Limón – 2 – 2022.

Entonces, como conclusión preliminar, en concordancia con lo presentado en la figura anterior, se evidencia que se usa el 16% del tiempo efectivo de una guardia de trabajo en procesos de producción, los demás tiempos consideran procesos adicionales dependientes de la eficiencia del sistema de ventilación, el detalle de los valores medidos se presenta en el **ANEXO 7**.

5.2. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN ACTUAL

5.2.1. DISTRIBUCIÓN ACTUAL DEL SISTEMA

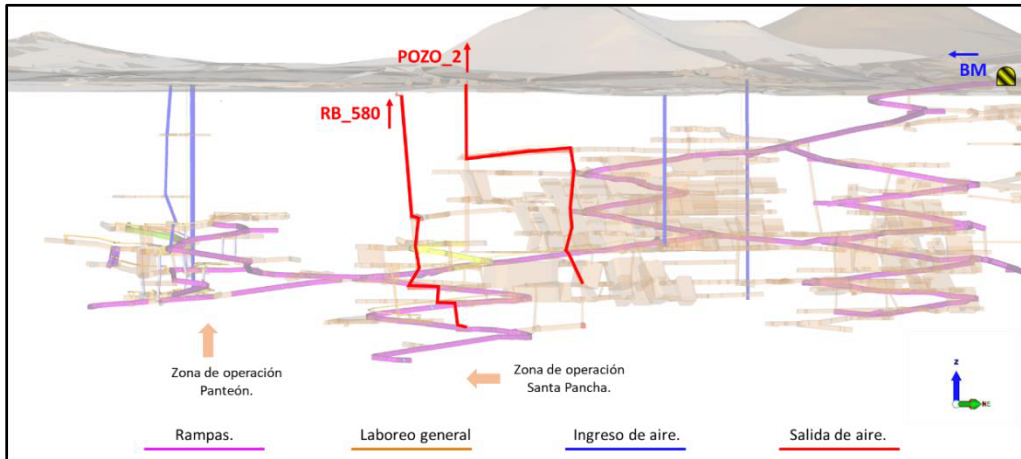
Con respecto a la distribución del sistema podemos observar que:

5.2.1.1. Circuito de extracción

Si bien la zona de mina El Limón - 2 cuenta con dos troncales de extracción

de aire viciado, RB_1 y RB_2, estas se encuentran relativamente alejadas de la zona de operación actual ubicada en Panteón favoreciendo así la dispersión del aire caliente proveniente de esta zona e incrementando el área de perjuicio generada por el aire caliente (**Figura 39**).

Figura 39: Distribución actual del sistema – Circuito de extracción.



Fuente: Modelo VentSim inicial – Mina El Limón - 2.

En términos de efectividad, se realizó el análisis comparativo de valores de caudal medidos en diferentes estaciones de monitoreo, se identificó que la troncal RB_1 significa un valor de 83.2 % (**Tabla 30**) respecto a una capacidad medida en superficie de 266.2 KCFM, esto es, presenta un total de fugas de 44.6 KCFM; la troncal RB_2 por su lado implica un valor de 57.4 % (**Tabla 31**) respecto a una capacidad medida en superficie de 218.8 KCFM con un total de fugas de 93.2 KCFM.

Tabla 30: Balance de caudales de aire - RB_1.

ESTACIÓN TOTAL	CAUDAL (KCFM)	FLUJO MÁSICO (kg/s)
1	266.2	137.0
2	12.1	8.9
3		
4	32.5	17.3
5	167.6	83.5
6	54.0	27.2
Capacidad medida	266.2 KCFM	
Fugas	44.6 KCFM	
Efectividad	83.2 %	

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Tabla 31: Balance de caudales de aire - RB_2.

ESTACIÓN TOTAL	CAUDAL (KCFM)	FLUJO MÁSICO (kg/s)
1	218.8	111.5
2	13.1	6.9
3	30.1	15.7
4	5.90	3.10
5	32.5	16.2
6	11.6	7.4
7	125.6	62.3
Capacidad medida	218.8 KCFM	
Fugas	93.2 KCFM	
Efectividad	57.4 %	

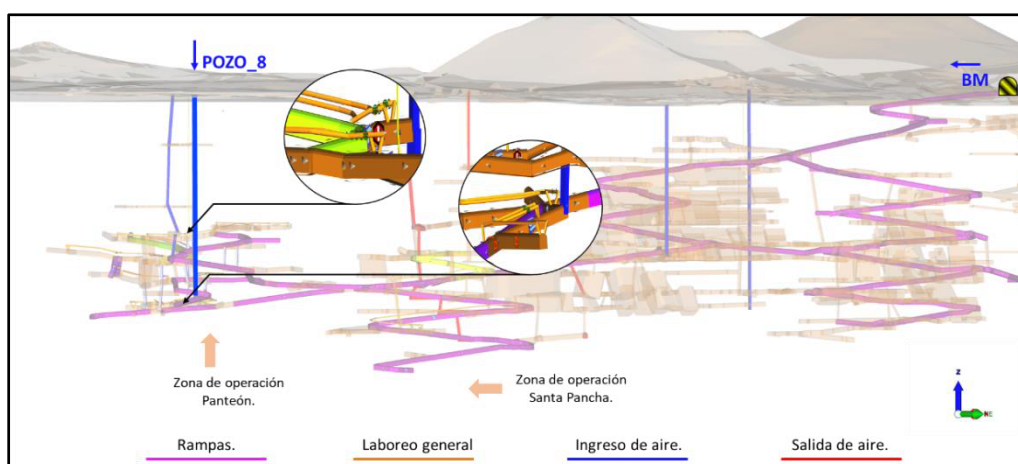
Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

5.2.1.2. Circuito de inyección

Desde el punto de vista de la inyección de aire, si bien se cuenta con diversas vías de ingreso de aire directamente comunicadas a la superficie (**Figura 40**), solo el Pozo 8 se encuentra asociado a la zona de operación actual, sin embargo, la inyección de aire se encuentra asociada a circuitos de ventilación auxiliar razón por

la cual dependerá del normal funcionamiento de estos sistemas, así como de la calidad de la instalación de estos comprometiendo el nivel de efectividad de dicha troncal.

Figura 40: Distribución actual del sistema – Circuito de inyección.



Fuente: Modelo VentSim inicial – Mina El Limón - 2.

En términos de efectividad, se realizó el análisis comparativo de valores de caudal medidos en diferentes estaciones de monitoreo, se identificó que la troncal Pozo_8 significa un valor de 76.2 % (**Tabla 32**) respecto a una capacidad instalada de 300.0 KCFM, esto es, presenta un total de fugas de 23.5 KCFM; por su lado, se calculó un caudal recirculante total de 53.2 KCFM del total de caudal medido en interior mina respecto al caudal medido en superficie.

Tabla 32: Balance de caudales de aire - Pozo_8.

ESTACIÓN TOTAL	CAUDAL (KCFM)	FLUJO MÁSSICO (kg/s)
1	223.3	118.1
2	58.3	29.6
3	54.8	26.3
4	RECIRCULACIÓN	
5	61.3	30.8
6	59.0	29.8
7	43.1	22.8
Capacidad instalada		300.0 KCFM
Fugas		23.5 KCFM
Recirculación		53.2 KCFM
Efectividad		76.2 %

Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

5.2.2. RIESGOS ASOCIADOS AL SISTEMA ACTUAL

5.2.2.1. Recirculación

La actual configuración del Pozo 8 con ventiladores auxiliares repartidos en diferentes niveles genera que exista una permanente diferencia de presiones que fuerce el aire caliente de retorno de los frentes a través de los hermetizados de los ventiladores, riesgo que se ve incrementado en caso de mala práctica como en los siguientes casos:

- **Ventiladores Auxiliares fuera de operación:** En caso de falla y fuera de operación de un ventilador auxiliar este pierde la función de inyector pasando a convertir en una fuente de recirculación reduciendo la efectividad de la troncal.

- ***Puertas de Ventilación en Mal estado con bajo hermetismo:*** Una puerta en más estado presentará una baja resistencia que en contraste con la chimenea de ventilación favorecerá el arrastre de aire de interior mina.
- ***Sistemas de ventilación de alta resistencia:*** Un sistema de ventilación auxiliar de alta resistencia incrementará la presión que se ejerce sobre el hermetizado generando así que se incremente el volumen de aire que es forzado a través de este.

5.2.2.2. Gaseamiento

Si bien el nivel de operación actual genera que el volumen de gases aportados por los equipos diésel no sea de consideración, ante un incremento del nivel de operación y presencia de equipos diésel en conjunto con el potencial de recirculación que presenta la configuración actual genera que el riesgo de exposición a gases no sea descartado.

5.2.2.3. Estrés térmico

La presencia de fuentes de calor de relevancia, como son el gradiente geotérmico, la filtración de aguas termales y condiciones termo-ambientales de superficie, hacen que el potencial de estrés térmico sea un riesgo permanente para el personal que realiza trabajos de alta intensidad en los frentes de trabajo.

5.2.3. MEJORAMIENTO DEL SISTEMA A CORTO PLAZO

5.2.3.1. Ventilación principal

Respecto a la ventilación principal las mejoras planteadas fueron:

- **Troncal RB_2:** Es recomendable llevar a cabo la eliminación de resistencias innecesarias que incrementan la resistencia del sistema y deprimen la cantidad de aire que es extraída por el ventilador (**Figura 41**), así mismo es recomendable llevar a cabo el mantenimiento de los tapones correspondientes a fin de evitar fugas prematuras de aire (**Figura 42**).

Figura 41: Infraestructura civil antigua que regula el flujo de aire – RB_2.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 42: Tapón con fugas de aire – RB_2.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

- **Troncal RB_1:** De manera similar, es recomendable realizar el mantenimiento de tapones (**Figura 43**) y puertas en mal estado para evitar la fuga prematura de aire fresco, así mismo es recomendable habilitar el Nv. -120 con el objetivo de verificar y eliminar posibles fugas (**Figura 44**).

Figura 43: Tapón de acceso con fugas de aire - RB_1.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 44: Desfase de troncal - RB_1.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

- **Troncal Pozo_8:** Desde el punto de vista del corto plazo, el ingreso de aire fresco a través del Pozo 8 presenta diversas complicaciones, a nivel de infraestructura e instalación, que hacen que no sea la mejor alternativa para el traslado de aire hacia interior mina requiriendo por lo tanto una reingeniería (**Figura 45**).

Como alternativa se debe manejar protocolos adecuados de operación que permitan garantizar reducidos niveles de recirculación a la vez que se lleva a cabo un mantenimiento adecuado de los tapones y puertas a fin de incrementar la resistencia de los hermetizados y favorecer el ingreso de aire desde superficie (**Figura 46**).

Figura 45: Ventilador inoperativo generando recirculación de aire caliente - Pozo_8.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

Figura 46: Hermetizado de ventiladores con malla y manga - Pozo_8.



Fuente: Inspección de campo realizada – Mina El Limón - 2 – Nicaragua.

5.3. PLANEAMIENTO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

En función de los parámetros de relevancia y de la secuencia de explotación establecida por el área de planeamiento se ha desarrollado el siguiente planeamiento del sistema de ventilación.

5.3.1. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS CLAVE

Los parámetros claves considerados para la planificación del sistema de ventilación son:

5.3.1.1. Parámetros financieros

Desde el punto de vista de los parámetros financieros, tenemos que:

- Valor de la Energía : 0.17 USD/kW-Hr
- Tasa de Descuento : 5%
- Tiempo es Operación Proyectado : 10 años

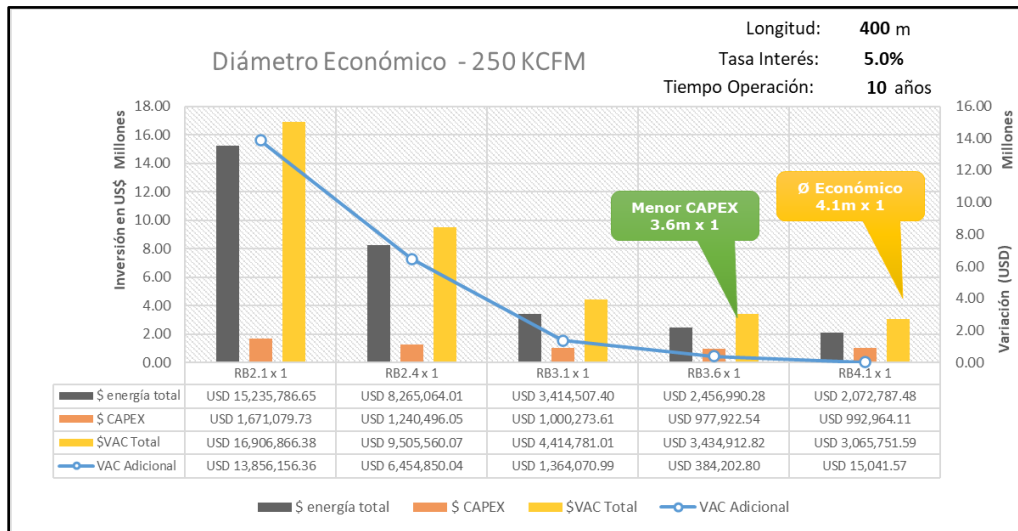
- Costo del Ventilador :
 - Costo Fijo : 75,000 USD
 - Costo Variable : 750 USD/kW
- Costo de Excavación :
 - Piloto : 618 USD/m
 - Rimado Ø3.1m : 1,173 USD/m

5.3.1.2. Diámetro económico

En función de los parámetros anteriormente indicados, se ha determinado que el diámetro económico es de Ø 4.1m, sin embargo, esta condición presenta riesgos asociados a las dimensiones y características de la roca en la cual se pudiese construir dicha infraestructura, pudiendo requerir sostenimiento especial que afectaría a la resistencia de la excavación o en su defecto comprometer la estabilidad de la excavación durante la construcción (**Figura 47**).

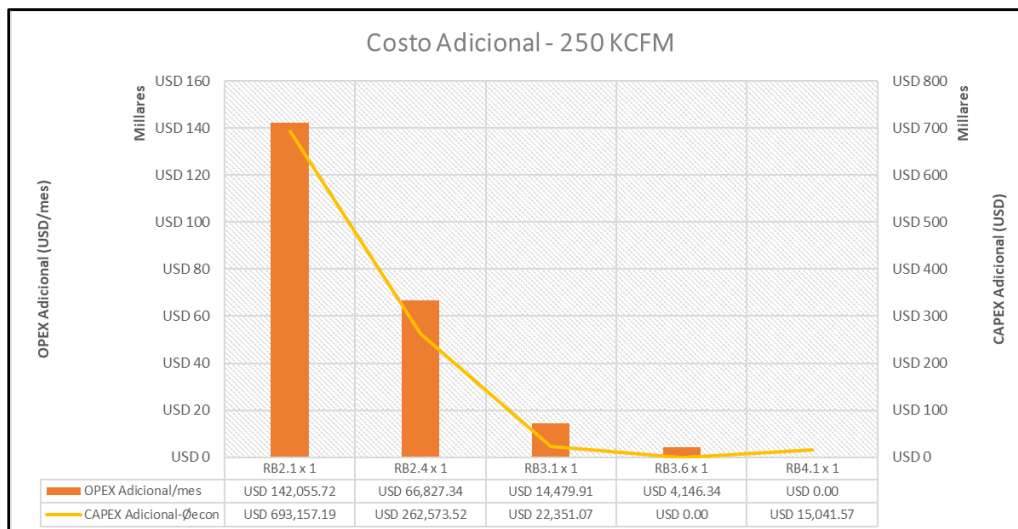
Debido a lo indicado anteriormente, es recomendable considerar un diámetro económico de Ø 3.1m ya que este diámetro presenta un mejor potencial de éxito a nivel de excavación y presenta un sobre costo aceptable que podría mitigarse empleando herramientas de control del consumo de potencia, variadores de frecuencia, lo cual permitiría minimizar la diferencia de costos frente a la opción de Ø4.1m (**Figura 48**).

Figura 47: Análisis de diámetro económico - 250 KCFM.



Fuente: Cálculo de gabinete – Mine & Flows.

Figura 48: Análisis de costo según diámetro económico - 250 KCFM.

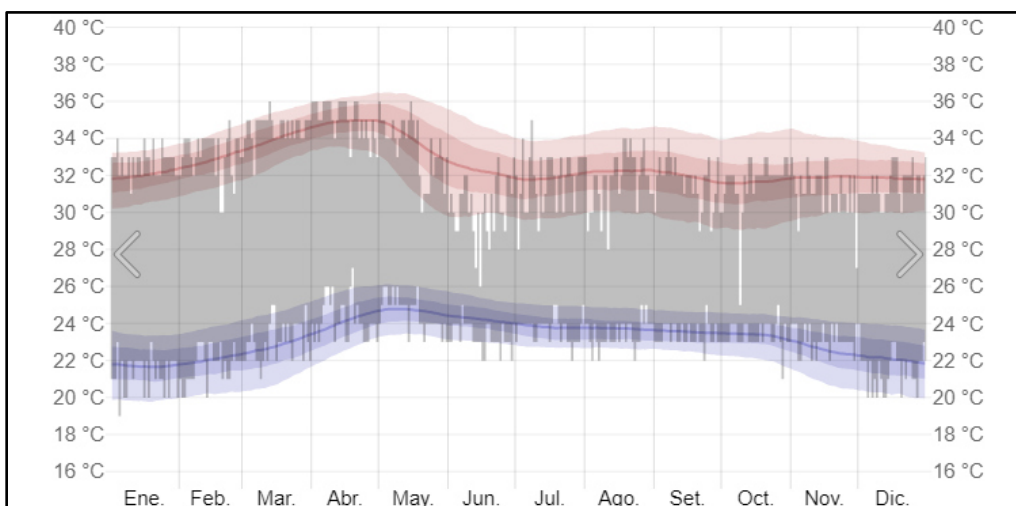


Fuente: Cálculo de gabinete – Mine & Flows.

5.3.1.3. Variación del clima en superficie

De acuerdo con los datos históricos del clima en la zona de Managua, se ha identificado el siguiente rango de temperaturas durante el año 2022 (**Figura 49**).

Figura 49: Histórico de temperaturas en superficie - Managua 2022.



Fuente: Weather Spark – Datos históricos meteorológicos de 2022 en Managua.

En el cual podemos observar que el rango de temperaturas se encuentra en un rango de entre 36°C, como temperatura máxima, y 20°C, como temperatura mínima, siendo el mes de abril el de mayor temperatura. Para fines de simulación, se considerará una condición promedio de:

- Temperatura de bulbo seco : 27.8 °C
- Temperatura de bulbo húmedo : 25.0 °C
- Humedad Relativa : 80 %

5.3.1.4. Fuentes de calor de relevancia

De acuerdo con lo identificado en campo y de acuerdo con las características de la operación se han de considerar las siguientes fuentes de calor de relevancia:

- **Gradiente Geotérmico:** El cual es característico de la zona geográfica en donde se encuentra emplazado el yacimiento, mismo que ha sido estimado en un gradiente de 8°C/100m de profundidad, un gradiente de consideración con

respecto al gradiente normal de 2.5°C/100m considerado para las condiciones de profundidad actual de la operación.

- **Filtración de Aguas Termales:** La presencia de aguas termales con una temperatura de entre 65°C – 70°C genera un importante aporte de calor sensible y latente a las condiciones termo-ambientales en interior mina. Se ha estimado que cada una de las labores con presencia de filtración de agua termal realiza un aporte de entre 900 y 1000 KW de calor.
- **Flota de Equipos Diésel:** La presencia de equipos diésel realiza también un aporte de consideración al sistema de ventilación, esto debido a la emisión de gases y vapor de alta temperatura generados por la combustión, entre otros efectos físicos asociados. Si bien la operación actual no hace un uso intensivo de equipos diésel, ante un incremento del ritmo de explotación el efecto de los equipos diésel en la operación generará condiciones adversas si no se tiene en consideración su impacto.

5.3.2. EVALUACIÓN DE LA DEMANDA DE AIRE

Debido a que la normativa vigente en Nicaragua no contempla algún ratio asociado a la demanda de aire, se tomará como referencia la normativa peruana la cual se encuentra alineada a normativas vigentes aplicables en diferentes países de referencia minera, para lo cual se aplicará el Anexo 38 del RSSO vigente (D.S. N°024-2016 y su modificatoria el D.S. N°023-2017).

De acuerdo con la normativa de referencia, la demanda de aire se encuentra establecida por los siguientes parámetros, en caso de uso de equipos diésel:

- Demanda por personal en la guardia más numerosa.
- Demanda por equipos diésel.

- Demanda por temperatura mayor a los 24°C.
- Demanda por uso de madera en producción.
- Demanda por fuga de aire (15%)

Siendo el parámetro de demanda por madera desestimado debido a que el método empleado no hace uso de dicho material.

Desde el punto de vista del personal y la temperatura mayor a los 24 °C podemos establecer que estos se mantendrán relativamente constantes debido a su menor impacto en la demanda y a las características del sitio.

Por otro lado, de los factores anteriormente indicados, es la demanda por equipos diésel la que presenta una correlación directa entre la demanda de aire por dilución de los gases generados por la combustión y la generación de calor que afecte a las condiciones termo-ambientales, por lo tanto, es recomendable establecer los límites de operación del sistema en base al comportamiento de la flota diésel.

5.3.2.1. Demanda de aire a plena carga

De acuerdo con la distribución de equipos establecida por el cliente, la demanda de aire se ha establecido según la **Tabla 33**.

Tabla 33: Valores calculados de demanda de aire - Plena carga.

ID	DEMANDA DE AIRE (m3/min)	DEMANDA DE AIRE (CFM)
EQUIPOS DIÉSEL	4,869.4	171,961.9
COLABORADORES	309.6	10,933.4
CALOR EN NIVELES	2,750.0	97,115.3
FUGAS	1,189.4	42,001.6
TOTAL	9,118.4	322,012.2

Fuente: Elaboración propia.

El detalle de dicha distribución puede observarse en el **ANEXO 4**.

5.3.2.2. Demanda de aire a carga reducida

Sin embargo, debido a que no todos los equipos se encuentran operando de manera permanente, se ha establecido una flota reducida con el objetivo de establecer un límite inferior tanto de caudal como de potencial diésel traducida a calor al sistema.

Esta flota reducida implica entonces en la demanda de aire, como se muestra en la **Tabla 34**.

Tabla 34: Valores calculados de demanda de aire - Carga reducida.

ID	DEMANDA DE AIRE (m3/min)	DEMANDA DE AIRE (CFM)
EQUIPOS DIÉSEL	2,779.0	98,141.2
COLABORADORES	309.6	10,933.4
CALOR EN NIVELES	2,750.0	97,115.3
FUGAS	5,838.6	206,190.0
TOTAL	6,714.4	237,118.5

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, el detalle de esta distribución puede observarse en el **ANEXO 5**.

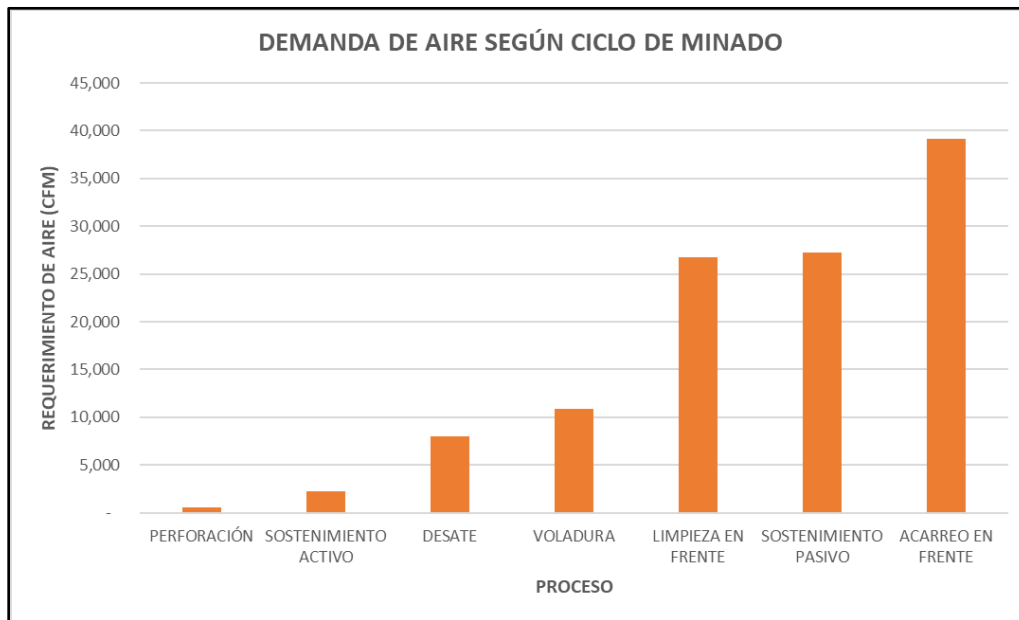
5.3.2.3. Demanda de aire por frente de trabajo

Por otro lado, es recomendable considerar también la demanda de los frentes de trabajo de manera individual, razón por la cual se ha aplicado un enfoque desde el punto de vista de actividades del ciclo de minado (**Figura 50**) con el objetivo de garantizar una cobertura individual de los mismos.

Entonces, desde el punto de vista unitario, considerando el requerimiento de aire en un frente de trabajo como demanda unitaria, se calculó el valor de 40 KCFM

como demanda representativa, el detalle de cálculo se encuentra adjunto en el **ANEXO 6**.

Figura 50: Demanda de aire según etapa de ciclo de minado.



Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. TRADE OFF DE SISTEMA DE VENTILACIÓN

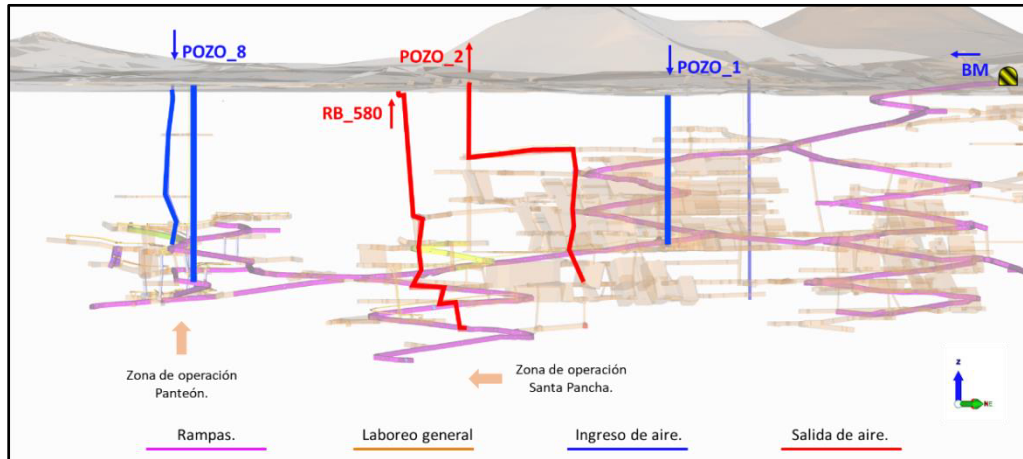
Debido a que las condiciones termo-ambientales se encuentran ligadas a las condiciones de sitio, no siendo estas las más favorables para la mejora de condiciones en interior mina, se considera conveniente explorar los límites de efectividad de las alternativas de ventilación y establecer los márgenes de capacidad para el uso de sistemas de acondicionamiento del aire:

5.3.3.1. Descripción general del circuito proyectado

Tal como se ha desarrollado en puntos anteriores, el sistema de ventilación actual (**Figura 51**) presenta una serie de deficiencias que deben ser abordadas mediante una reconfiguración del circuito de ventilación que permita:

- Evitar la sobre dispersión del aire caliente.
- Mejorar la efectividad en la entrega de aire fresco hacia los frentes de trabajo.

Figura 51: Distribución actual del sistema integral de ventilación.

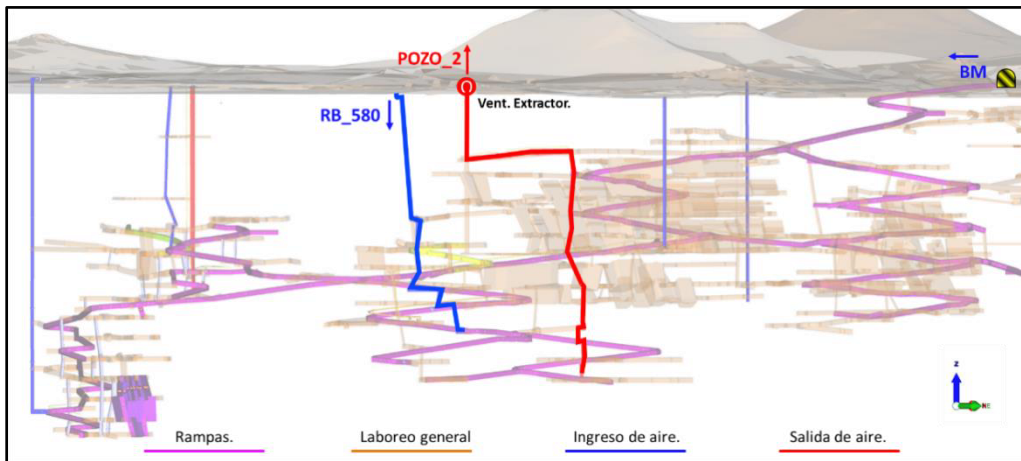


Fuente: Modelo VentSim inicial – Mina El Limón - 2.

Es por tal motivo que se plantea la siguiente distribución:

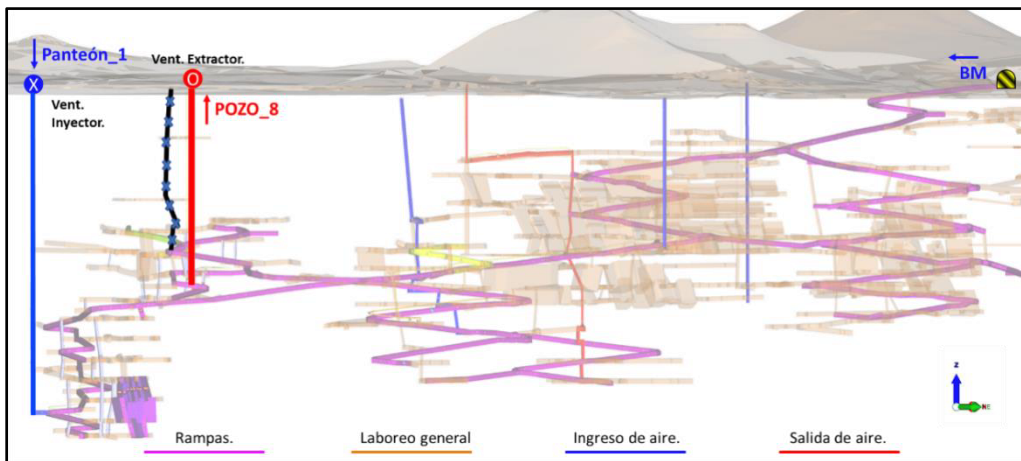
- **Independización de los circuitos de Panteón y Santa Pancha:**
 - **Circuito Santa Pancha:** Conformado por la troncal de extracción de aire, RB_2, e ingreso a través de la RB_1 y RP Principal (**Figura 52**).
 - **Circuito Panteón:** Conformado por la troncal de extracción de aire, Pozo 8, e ingreso de aire a través de la nueva troncal de ventilación RB Panteón 1, la cual con el objetivo de garantizar el ingreso efectivo de aire fresco hacia la zona de operación contará con un ventilador inyector (**Figura 53**).

Figura 52: Propuesta de circuito Santa Pancha.



Fuente: Modelo VentSim planteado – Mina El Limón - 2.

Figura 53: Propuesta de circuito Panteón.



Fuente: Modelo VentSim planteado – Mina El Limón - 2.

Lógica de Operación del Sistema Propuesto:

- **Operación del Circuito Santa Pancha:** El aire ingresará a través de la CH 580 y RP Principal y otras conexiones a superficie generando así una reducción de la temperatura de aire en la profundización de Santa Pancha gracias a la extracción de aire a través del Pozo 2, el cual continuará con el extractor actualmente en operación.

- **Operación del Circuito Panteón:** El aire ingresará a través de la RB Panteón 1, a través de un inyector principal de capacidad máxima de 285 KCFM, forzando el ingreso de aire hacia la zona de operación antes de que pueda ser calentado por los equipos diésel. Por otro lado, la extracción de aire será a través del Pozo 8 con un extractor de 350 KCFM, la capacidad del inyector más el factor de fugas, permitiendo que no exista una sobre dispersión del aire caliente generado por la filtración de aguas termales en la zona de Panteón hacia la zona de Santa Pancha.

5.3.3.2. Ventilación forzada sin aire acondicionado

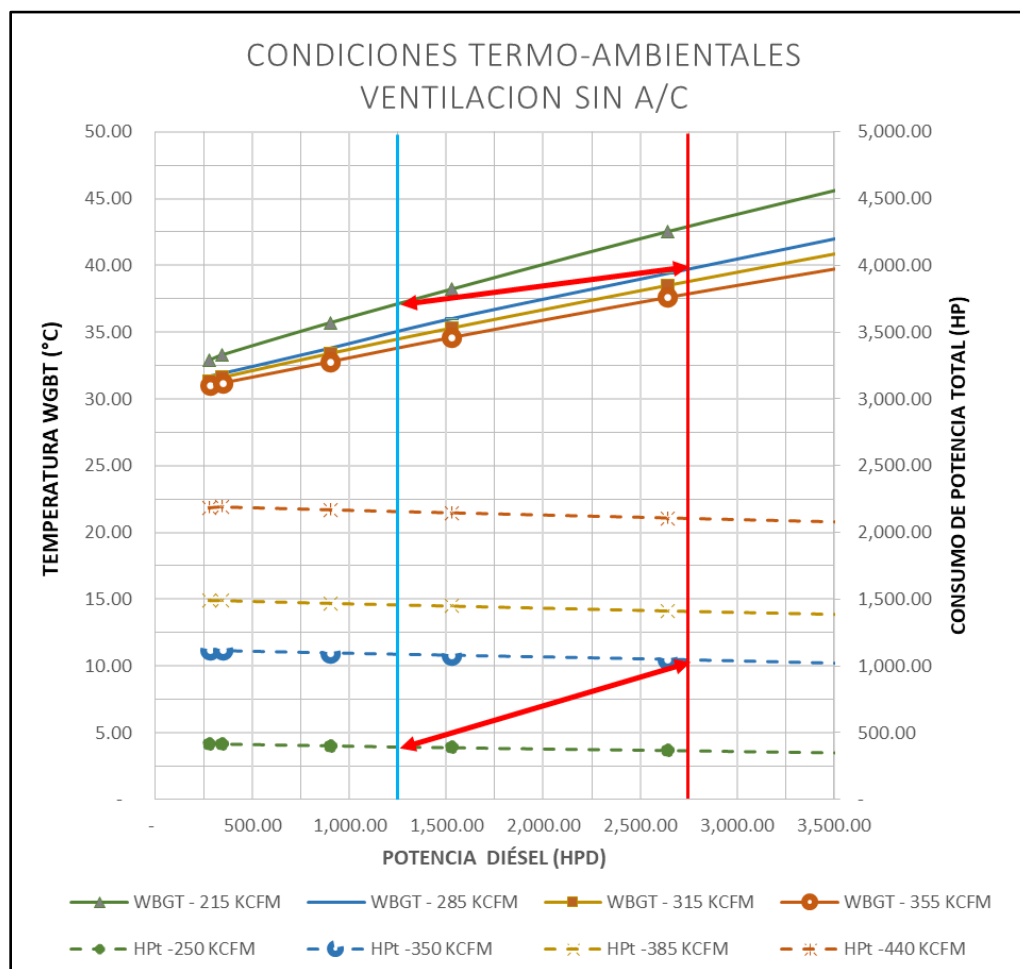
Con base en lo indicado anteriormente se procederá a evaluar la efectividad del sistema de ventilación para lo cual se considerarán los siguientes aspectos:

- Fuentes de Calor : Según inspección de campo.
- Condiciones de superficie :
 - Temperatura de Bulbo Seco : 27.8°C
 - Temperatura de Bulbo Húmedo : 25.0°C
- Rangos de Operación del Sistema :
 - Inyector / Extractor 1 : 215 KCFM / 250 KCFM.
 - Inyector / Extractor 2 : 285 KCFM / 350 KCFM.
 - Inyector / Extractor 3 : 315 KCFM / 385 KCFM.
 - Inyector / Extractor 4 : 355 KCFM / 440 KCFM.
- Etapa del Sistema : Sistema completo a máxima profundidad.

- Temperatura de Control : De acuerdo con Detalle de la Guía N° 2 – Medición de estrés térmico - D.S.N°024-2016 y su modificatoria D.S.N°023-2017.
- Puntos de Control : Aire de retorno del sistema.

Considerando los parámetros anteriormente indicados se procedió a realizar las simulaciones correspondientes, encontrándose el siguiente comportamiento de referencia del sistema de ventilación y condiciones termo-ambientales, el cual se muestra en la **Figura 54**.

Figura 54: Análisis de condiciones termo-ambientales sin uso de aire acondicionado.



Fuente: Cálculo de gabinete – Mine & Flows.

Del gráfico anterior podemos observar que:

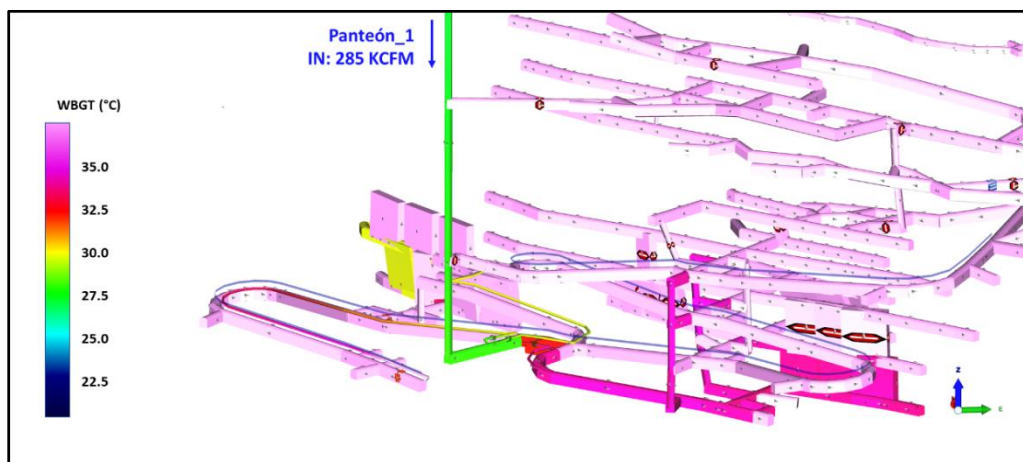
- El rango de operación del sistema se encuentra entre los 1,250 HP y 2,750 HP de potencia diésel, siendo esta la fuente variable de aporte de calor al sistema.
- Con la flota reducida, de 1,250HP, el sistema requiere una demanda de aire de 215 KCFM de inyección y 250 KCFM de extracción.
- Con la flota a plena cara, de 2750HP, el sistema requiere de una demanda de aire de 285 KCFM de inyección y 350 KCFM de extracción.
- La operación normal del sistema se encuentra representada por la flecha roja, es decir operaría de manera normal entre estos dos horizontes, con una temperatura efectiva de entre 37.1°C y 40.0°C.
- El rango de operación normal se encuentra con un consumo de potencia de entre 400HP y 1100HP, para los estadios de flota reducida y flota a plena carga respectivamente.
- En caso de incrementar el flujo de aire en un 10%, hasta los 385 KCFM de extracción, la temperatura efectiva se reduciría hasta los 39°C, es decir 1°C menos, pero con un incremento en el consumo de potencia del sistema de 1350 HP, es decir 250HP adicionales.
- En caso de incrementar el flujo de aire en un 25%, hasta los 440 KCFM de extracción, la temperatura efectiva se reduciría hasta los 38°C, es decir 2°C menos, pero con un incremento en el consumo de potencia del sistema de 2,150HP, es decir 1,050HP adicionales.

De lo anteriormente mencionado podemos concluir que:

- Un incremento en el caudal de aire no generará una reducción efectiva y significativa de la temperatura efectiva en interior mina, mientras que por otro lado si se traducirá en un incremento considerable del consumo de potencia del sistema.
- Es recomendable analizar opciones complementarias a fin de lograr condiciones termo-ambientales favorables para la explotación en interior mina.
- Si bien el presente análisis nos permite establecer los límites de operación del sistema, se analizará más a detalle los efectos del sistema planteado sobre las diferentes etapas del plan de ejecución.

Finalmente, se evalúa como punto de monitoreo las condiciones termo-ambientales en interior mina como referencia en el frente de trabajo de mayor profundidad (**Figura 55**).

Figura 55: Análisis de temperatura en frente de mayor profundidad - Extractor de 350 KCFM – Sin uso de aire acondicionado.

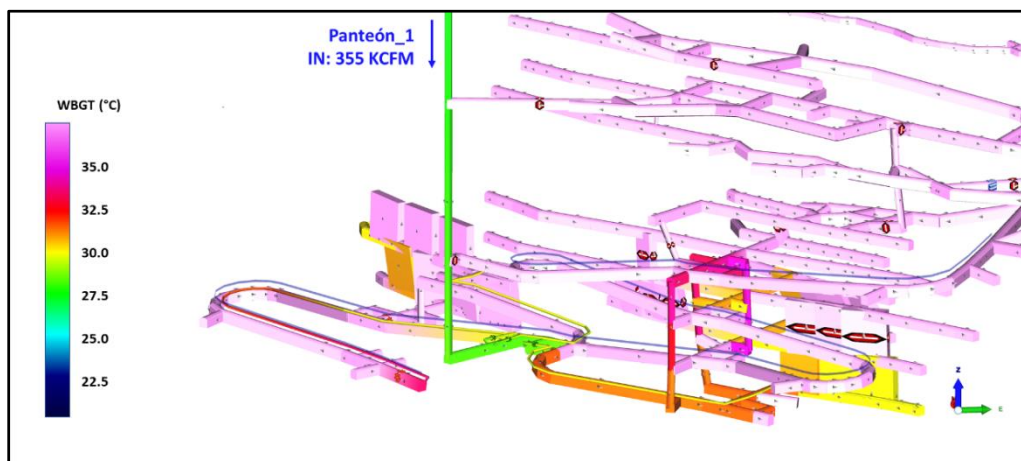


Fuente: Modelo VentSim planteado – Mina El Limón - 2.

Como se puede observar en el gráfico anterior, la temperatura efectiva se encuentra por encima de los 32°C máximos permisible para un trabajo en alta temperatura, incluso superando el límite de 40°C de alteración de la piel como temperatura de bulbo seco (Dry bulb), estas condiciones afectan a la productividad por lo que no se podría esperar una productividad aceptable en gran parte del periodo de explotación.

Por otro lado, si procedemos a forzar el sistema considerando un caudal 25% superior, es decir un extractor de 440 KCFM con un inyector de 355 KCFM, podemos observar la siguiente distribución de temperaturas efectivas favorable para el desarrollo de actividades en el frente de trabajo debido a encontrarse en un rango inferior a los 32°C (**Figura 56**).

Figura 56: Análisis de temperatura en frente de mayor profundidad - Extractor de 440 KCFM – Sin uso de aire acondicionado.



Fuente: Modelo VentSim planteado – Mina El Limón - 2.

5.3.3.3. Ventilación forzada con aire acondicionado

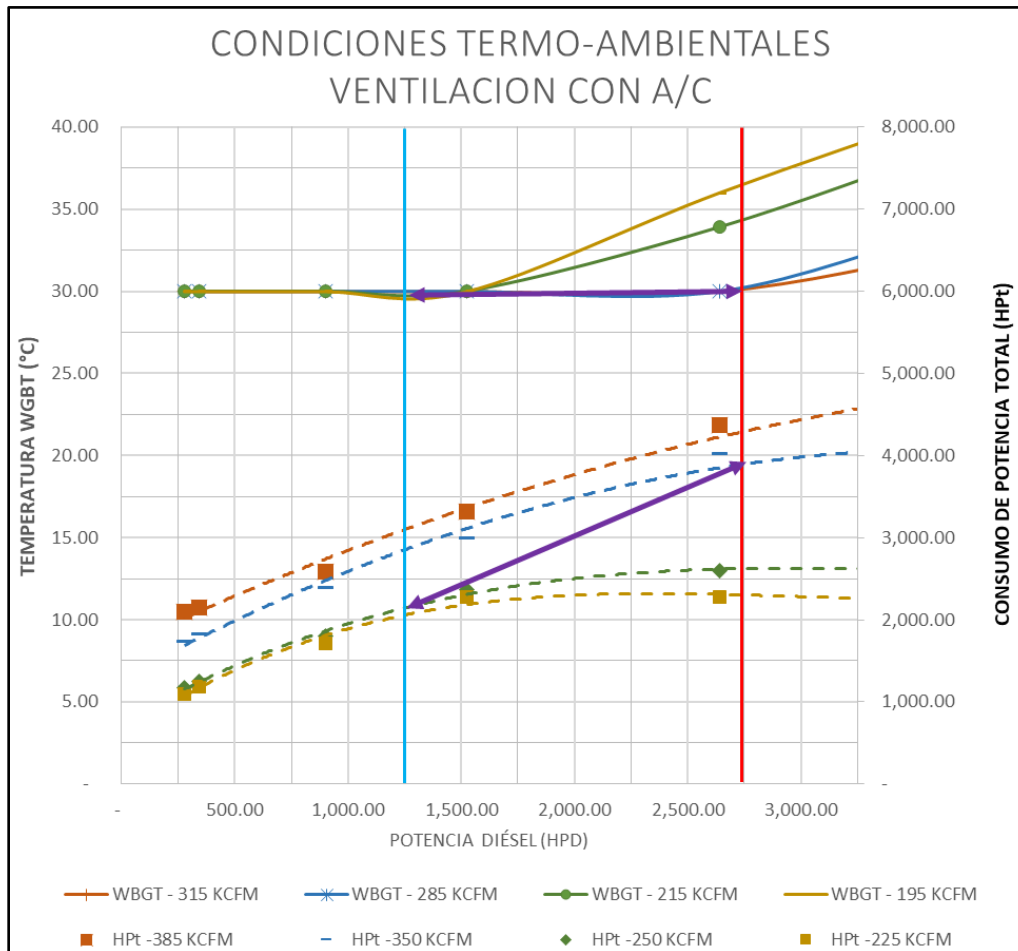
Como se ha podido observar en el punto anterior, la evaluación de medidas complementarias se hace necesaria con el objetivo de brindar condiciones termo-

ambientales adecuadas para un trabajo continuo y seguro. Debido a ello se ha considerado la aplicación de aire acondicionado en el sistema de ventilación bajo los siguientes parámetros:

- Fuentes de Calor : Según inspección de campo.
- Condiciones de superficie:
 - Temperatura de Bulbo Seco : 27.8°C
 - Temperatura de Bulbo Húmedo : 25.0°C
- Rangos de Operación del Sistema :
 - Inyector / Extractor 1 : 195 KCFM / 225 KCFM.
 - Inyector / Extractor 2 : 215 KCFM / 250 KCFM.
 - Inyector / Extractor 3 : 285 KCFM / 350 KCFM.
 - Inyector / Extractor 4 : 315 KCFM / 385 KCFM.
- Etapa del Sistema : Sistema completo a máxima profundidad.
- Temperatura de Control : De acuerdo con Detalle de la Guía N° 2 – Medición de estrés térmico - D.S.N°024-2016 y su modificatoria D.S.N°023-2017.
- Puntos de Control : Aire de retorno del sistema
- Coeficiente de Desempeño : 3.5 Kw Refrigeración / Kw Eléctrico

Considerando los parámetros anteriormente indicados se procedió a realizar las simulaciones correspondientes, encontrándose el siguiente comportamiento de referencia del sistema de ventilación y condiciones termo-ambientales, según como se muestra en la **Figura 57**.

Figura 57: Análisis de condiciones termo-ambientales con uso de aire acondicionado.



Fuente: Cálculo de gabinete – Mine & Flows.

Del gráfico anterior podemos observar que:

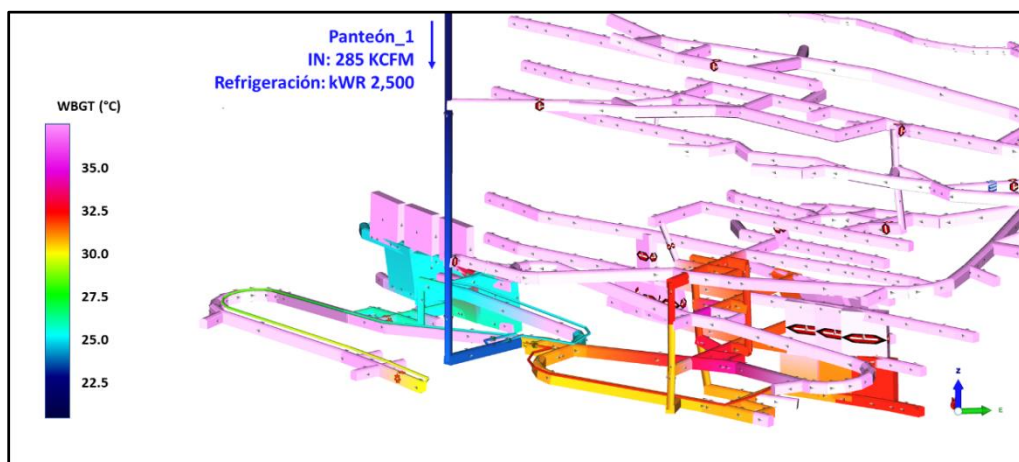
- El rango de operación del sistema se encuentra entre los 1,250 HP y 2,750 HP de potencia diésel, siendo esta la fuente variable de aporte de calor al sistema.
- Con un caudal de 250 KCFM de extracción y 215 KCFM de inyección se tendría un consumo de alrededor de 2500 HP, sin embargo, la temperatura efectiva variaría desde los 30°C hasta los 34°C en la salida del sistema por lo que es favorable para los frentes de operación.

- Con un caudal de 350 KCFM de extracción y 285 KCFM de inyección se tendría un consumo de alrededor de 3,500 HP, sin embargo, la temperatura efectiva permanecería prácticamente constante en 30°C en la salida del sistema, por lo que es favorable e incluso sobre dimensionado para el sistema.
- Un caudal inferior de 225 KCFM de extracción y 195 KCFM de inyección, generaría un consumo ligeramente menor pero las condiciones se verían rápidamente afectadas con la presencia de equipos diésel.
- Un caudal superior de 385 KFM de extracción y 315 KCFM de inyección, generaría un consumo de potencia superior en 400HP aproximadamente, pero con las mismas condiciones constante de 30°C por lo que no genera un beneficio significativo.
- Por lo que podemos concluir que amerita un análisis de detalle de la opción de 250 KCFM con acondicionamiento del aire para evaluar el impacto directo sobre los frentes de trabajo.

Finalmente, se evalúa como punto de monitoreo las condiciones termo-ambientales en interior mina como referencia en el frente de trabajo de mayor profundidad.

Entonces, en la **Figura 58** se evidencia una notable mejora en las condiciones termo-ambientales, evidenciándose que la temperatura efectiva se encuentra alrededor de los 31.3°C en promedio en el frente de mayor profundidad, mejora que se generaliza en el resto de las labores de profundización como se puede observar en las siguientes imágenes de referencia:

Figura 58: Análisis de temperatura en frente de mayor profundidad - Extractor de 350 KCFM - Con uso de aire acondicionado.



Fuente: Modelo VentSim planteado – Mina El Limón - 2.

CAPÍTULO VI

6. DISCUSIÓN

El análisis de los datos recolectados en la Mina El Limón - 2 ha permitido identificar varios aspectos críticos sobre el impacto de la optimización del sistema de ventilación en minas hipertermales sobre la productividad de los trabajadores. El principal hallazgo ha sido que la mejora de las condiciones termo-ambientales mediante la implementación de un nuevo sistema de ventilación reduce significativamente la temperatura del aire en hasta 3°C en los frentes de trabajo en producción, preparación y desarrollo (profundización), lo que resulta en un incremento potencial de la productividad de hasta el 75%.

Comparación con estudios previos

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Zavaleta (2023), quien encontró que la mejora en la ventilación de la Mina Sheridan redujo la acumulación de gases en un 59.9% y mejoró las condiciones de trabajo, incrementando la eficiencia operativa. Asimismo, Almerco (2022) documentó mejoras en la circulación del aire en la Mina Antapite, lo que redujo los tiempos de evacuación de aire viciado en un 33.33%, un efecto similar al observado en El Limón - 2, donde se proyecta una disminución de la temperatura del aire con la construcción de una nueva troncal de ventilación.

Relación entre la temperatura y la productividad

La correlación entre las condiciones térmicas y la productividad se sustenta en los estudios fisiológicos, que muestran que la eficiencia de los trabajadores disminuye considerablemente a temperaturas superiores a 30°C, como lo señaló Poulton (1970). En la Mina El Limón - 2, las temperaturas en algunas áreas superan los 40°C, lo que genera

fatiga, deshidratación y, en algunos casos, episodios de agotamiento por calor. Estas condiciones obligan a los trabajadores a tomar descansos prolongados, afectando negativamente la continuidad de las operaciones. El rediseño del sistema de ventilación, con la inclusión de aire acondicionado y circuitos de ventilación independientes, ha demostrado reducir estos tiempos de inactividad, lo que respalda el planteamiento de la hipótesis sobre la relación directa entre la mejora de las condiciones térmicas y el aumento de la productividad.

Consideraciones económicas

Es importante destacar que, aunque el costo inicial de la implementación de un sistema de ventilación con aire acondicionado es alto, los análisis de CAPEX y OPEX han demostrado que los beneficios a largo plazo, en términos de productividad y reducción de incidentes relacionados con la salud de los trabajadores, justifican la inversión. El estudio mostró que la opción con aire acondicionado a 5000 kW incrementaría la eficiencia energética del sistema, a pesar de los costos operativos más elevados.

Limitaciones

Una de las principales limitaciones del estudio fue la accesibilidad a algunas zonas de la mina, debido a las extremas condiciones de temperatura. Para mitigar esta limitación, se realizaron inspecciones cortas con descansos en unidades móviles climatizadas. Si bien los resultados preliminares son prometedores, la implementación total del nuevo sistema de ventilación aún está en fases de simulación digital, lo que podría afectar la generalización de los resultados.

6.1.1. EVALUACIÓN DE RIESGOS DEL SISTEMA PROPUESTO

En función de los sistemas anteriormente presentados se ha realizado la siguiente

identificación de riesgos potenciales y sus alternativas de control:

6.1.1.1. Sistema de inyección – RB_Panteón 1

En función de las características del sistema planteado se han identificado los siguientes riesgos:

- **Riesgo de Constructibilidad:** Debido a las condiciones termo-ambientales en interior mina, el riesgo de limitar o retrasar la construcción de la RB Panteón 1 es permanente ya que no se cuenta con condiciones para llevar a cabo una preparación dentro del cronograma establecido, razón por la cual es recomendable priorizar la preparación evitando derivar el aire hacia otras labores antes de completar los accesos al pie de la RB.
- **Riesgos de Operación – Sección de la Excavación:** Debido a que las condiciones del terreno donde se construirá la RB aún no han sido definidas existe un riesgo de que la capacidad portante del mismo no soporte una excavación de Ø3.1m por lo que esto podría afectar al punto de operación del inyector proyectado.
- **Riesgos de Operación – Variación del Clima:** La variación del clima es un aspecto de riesgo permanente ya que existen temporadas en las que la temperatura elevada de superficie afectará directamente a las condiciones de interior mina, razón por la cual es recomendable sobre dimensionar el sistema de refrigeración de tal manera que se pueda absorber dichos picos, lo cuales podrán ser compensados en las épocas de menor temperatura.

- **Riesgo de Operación – Paralización del Inyector:** La paralización del sistema de inyección de aire comprometerá la operación normal en interior mina ya que la extracción a través del Pozo 8 se regirá solo por la resistencia intrínseca del sistema dando relevancia a otros ingresos de aire, para evitar un efecto de relevancia se puede considerar la instalación de un ventilador en paralelo como Stand by o en su defecto contar con una unidad de respaldo.

- **Riesgo de Operación – Sistema de Evacuación de Emergencia:** debido a su ubicación con respecto a la proyección de zonas de operación es conveniente, y requerido por normativa, que el sistema de evacuación del personal sea reubicado del Pozo 8 hacia la RB Panteón 1 con el objetivo de asegurar una vía alternativa de evacuación del personal hacia la superficie en caso de interrupción del acceso a través de la RP Panteón, razón por la cual se presenta un riesgo de incremento de la resistencia al paso del aire el cual podría influir sobre el punto de operación y caudal entregado por el inyector así como en el consumo de potencia, para evitar dicho efecto es conveniente emplear sistemas que no generen una reducción significativa de la sección de la chimenea, e incluso cuenten con elementos que permitan la circulación del aire a través de los mismos minimizando así el coeficiente de arrastre de dichos elementos e incrementando la presión del sistema en un valor no mayor al 15%.

6.1.1.2. Sistema de extracción – Pozo_8

En función de las características del sistema planteado se han identificado los siguientes riesgos:

- **Riesgo de Operación – Sistema de Bombeo:** La operación del sistema de bombeo actualmente instalado a través del Pozo 8 es una fuente de riesgo permanente ya que ante una falla o mantenimiento del mismo requerirá la paralización del extractor propuesto sin embargo, esto no afectará al normal desarrollo de la operaciones de la zona Panteón ya que esta dependerá del inyector de RB Panteón 1 principalmente, por otro lado, para el ingreso de personal se podría realizar una inversión del circuito de tal manera que se fuerce el ingreso de aire fresco de superficie a través del Pozo 8 para dar condiciones mientras que la extracción se mantendría a través del Pozo 2, lo cual si afectaría a la profundización de la zona Santa Pancha de manera temporal.

- **Riesgo de Operación – Ruta de Evacuación:** El Pozo 8 cuenta actualmente con una vía de escape en caso de emergencia para el personal, sin embargo, esto no sería problema ya que, de manera similar que, para el mantenimiento de bombeo, se debe implementar un protocolo de inversión del sistema de tal manera que se brinde condiciones para la evacuación a través de esta ruta favoreciendo en escape en contra del flujo de aire fresco que ingresaría de superficie.

- **Riesgo de Operación – Paralización del Extractor:** En caso de paralización del extractor del Pozo 8, la operación en la zona Panteón no se vería comprometida ya que esta se soporta con el inyector de la RB Panteón 1, este aire se derivaría hacia la troncal de extracción Pozo 2, por lo tanto, se

incrementaría la dispersión del aire caliente afectando a la profundización de la zona Santa Pancha.

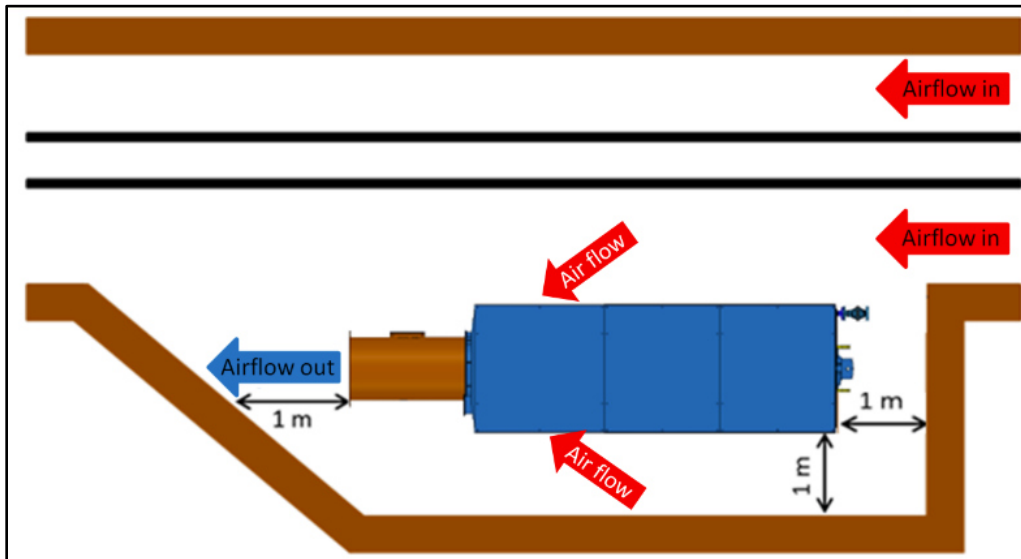
6.1.1.3. Sistema de ventilación auxiliar

En función de las características del sistema planteado se han identificado los siguientes riesgos:

En función de las características del sistema planteado se han identificado los siguientes riesgos:

- **Riesgo de Operación – Bombeo de Intercambio:** La utilización de sistemas de enfriamiento de aire puntuales, para los sistemas auxiliares, requieren de un sistema cerrado de recirculación de agua que permita no afectar a la capacidad del sistema de bombeo actual, ya que la utilización de un sistema abierto implicaría un flujo de agua constante desde la superficie de entre 6l/s y 10 l/s.
- **Riesgo de Operación – Espacio Disponible:** La comunicaciones disponibles hacia el Pozo 8 presentan un espacio relativamente limitado por lo que las opciones de implementación del sistema de enfriamiento puntual se podría ver limitado a zonas ubicaciones puntuales, siendo en su defecto recomendable contar con dos sistemas, un primer sistema de alimentación de aire que tome el aire desde el Pozo 8 y lo inyecte hacia la zona de trabajo y otro sistema, cercano al frente entre 50m y 100m de distancia, donde se ubicaría el sistema de enfriamiento puntual el cual permitiría generar un micro clima en la zona de trabajo (**Figura 59**).

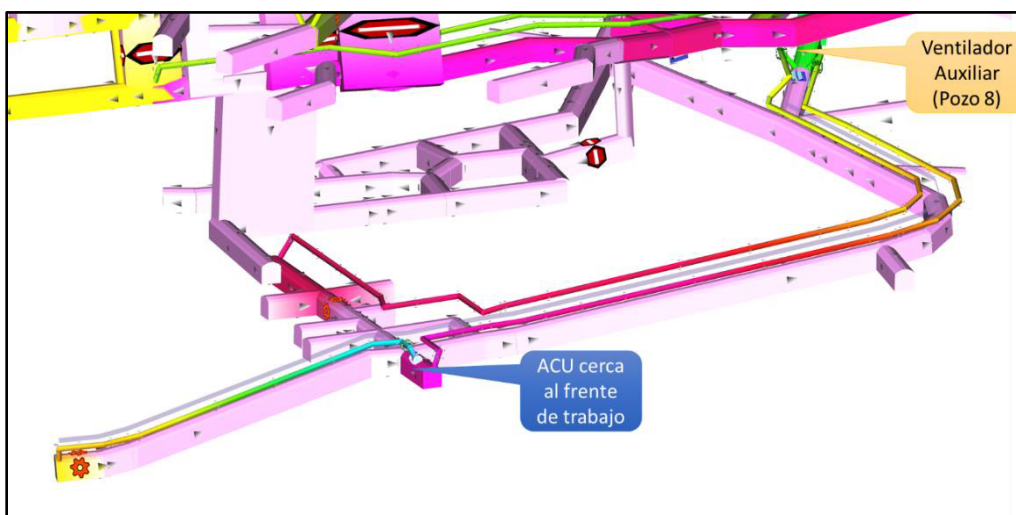
Figura 59: Unidad de acondicionamiento de aire en el frente de trabajo - Vista de planta de su ubicación referencial.



Fuente: Mtech Industrial.

- **Riesgo de Operación – Ductos de Entrega de Aire:** De manera complementaria a lo anteriormente mencionado con respecto al espacio disponible, el riesgo de pérdida de aire a través de los ductos de ventilación es elevada así como el riesgo de calentamiento del aire y pérdida de efectividad de los sistemas puntuales de acondicionamiento del aire, debido a esto se ve potenciada la alternativa de emplear dos sistemas, el de alimentación de aire de largo alcance por un lado, y el de enfriamiento puntual cerca de la zona de trabajo con una distancia en el rango de 50m y 100m que permita garantizar la entrega efectiva de aire y minimizar el riesgo de pérdida de aire y efectividad del sistema (**Figura 60**).

Figura 60: Sistema Mixto - Alimentación y Acondicionamiento.



Fuente: Modelo VentSim planteado – Mina El Limón - 2.

6.1.1.4. Condiciones termo-ambientales

En función de las características del sistema planteado se han identificado los siguientes riesgos:

- **Riesgo de Operación – Estrés Térmico:** El riesgo de golpe de calor por estrés térmico es una condición permanente en la unidad minera, en base a las condiciones termo-ambientales es recomendable contar con cámaras de recuperación con ambientes acondicionados donde el personal pueda llevar a cabo una recuperación adecuada a una temperatura de entre 25°C y 27°C permitiendo así acortar los tiempos de recuperación, mejorando la seguridad y condiciones para una operación productiva (**Figura 61 y Figura 62**).

Figura 61: Cámara de recuperación con acondicionamiento de aire – Exterior.



Fuente: Mine & Flows.

Figura 62: Cámara de recuperación con acondicionamiento de aire – Interior.

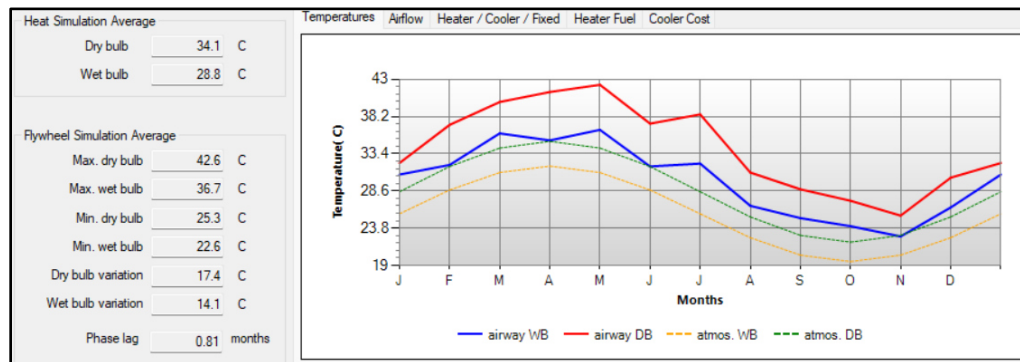


Fuente: Mine & Flows.

- **Variación del Clima:** La variación del clima durante el año es un aspecto clave que se debe tener en consideración, ya que habrá momentos de relativa baja temperatura como de alta temperatura en los cuales el sistema de

acondicionamiento del aire pudiera no contar con la capacidad suficiente para generar las condiciones termo-ambientales adecuadas en interior mina. De acuerdo con el diagrama de temperatura histórica mostrado en la **Figura 49**, se alcanzarán picos de hasta 35 °C, debido a esto las condiciones termo-ambientales variarán de la siguiente manera durante el año, tomando como referencia el año 2027, como se puede observar en la **Figura 63**.

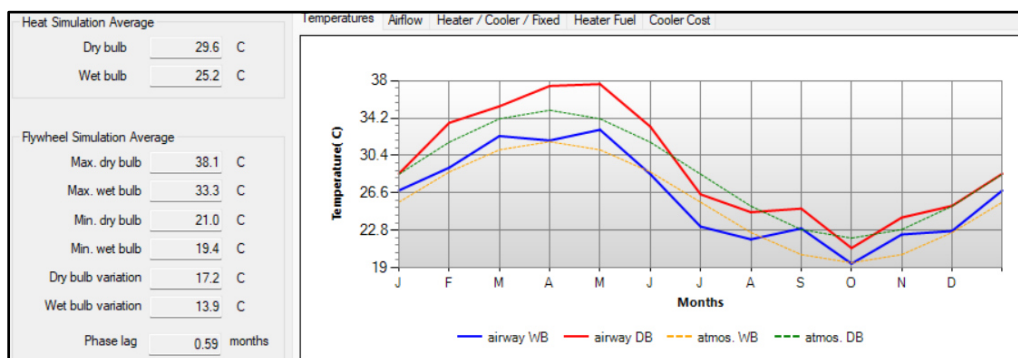
Figura 63: Histórico de condiciones termo-ambientales en interior mina según variación de clima en superficie – 2,500 kW_R de refrigeración.



Fuente: Modelo VentSim planteado – Mina El Limón - 2.

Como podemos observar se alcanzarán picos en interior mina de hasta 38.47°C, de temperatura efectiva, por lo que se hace necesario contar con un sistema de enfriamiento que pueda absorber estos picos, si consideramos una capacidad de hasta 5000 Kw_R, observando la variación de la **Figura 64**.

Figura 64: Histórico de condiciones termo-ambientales en interior mina según variación de clima en superficie - 5,000 kWR de refrigeración.



Fuente: Modelo VentSim planteado – Mina El Limón - 2.

Si bien el sistema no operará a esta condición de manera permanente, contar con dicha capacidad instalada permitirá garantizar condiciones para un trabajo seguro y productivo en interior mina, garantizando una temperatura efectiva máxima de 26.13°C en la zona de trabajo más profunda al año 2027.

- **Fuentes de Calor – Aguas Termales:** La presencia de aguas termales es una de las principales fuentes de riesgo en el sistema, con una temperatura de 65 – 70°C no solo es de consideración su aporte térmico al sistema si no también el riesgo de degeneración de la piel que este pudiese generar en el corto y mediano plazo, es por ello que es importante aplicar técnicas de derivación y colección para minimizar su impacto sobre el personal y condiciones termo-ambientales, para ello el uso de taladros entre diferentes niveles y la acumulación en pozas que permitan su bombeo y correspondiente en encapsulado en tuberías de conducción permitirá limitar su aporte por radiación y humedad al sistema, principalmente en las zonas con presencia de personal.

- **Fuentes de Calor – Flota de Equipos Diésel:** El impacto de los equipos diésel como fuente de aporte de calor sensible y calor latente al sistema es de relevancia ya que al tratarse de equipos con motor de combustión presentan un aporte de humedad con alta temperatura al sistema, es por lo que su relevancia se ve apreciada en el comportamiento del sistema, como se ha podido observar en la **Figura 57**, y por lo tanto es conveniente considerar que la aglomeración de equipos generará inevitablemente un incremento en la temperatura mientras que un uso coordinado y racional de los mismos terminará por reducir la necesidad de enfriamiento de aire para asegurar condiciones termo-ambientales adecuadas en interior mina.

6.1.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA – CAPEX Y OPEX DEL SISTEMA

En función de lo anteriormente presentado, se ha procedido a determinar los correspondientes costos de implementación y operación de los sistemas propuestos, tal como podemos observar a continuación:

6.1.2.1. Solo Ventilación – Equipos Disponibles (285 KCFM / 350 KCFM)

Es posible lograr un circuito de ventilación aproximado al requerimiento establecido empleando equipos disponibles en la unidad, razón por la cual se desprende el siguiente análisis de costos:

- **CAPEX:** Desde el punto de vista del CAPEX, solo será necesaria la implementación de las correspondientes plataformas de instalación y cámaras de hermetizado de los ventiladores, tanto el Pozo 8 como en la RB Panteón 1, así como otros gastos asociados a la infraestructura eléctrica necesaria para la operación del sistema, como se aprecia en la **Tabla 35**.

Tabla 35: CAPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector (Disponibles) sin Aire Acondicionado.

CAPEX - sin AC (285 / 350)			
Lugar	Actividad	Cantidad	Inversión (USD)
Pozo 8	Construcción Base Ventilador	1	35,000
Pozo 8	Construcción Plenum Hermetizado	1	30,000
Pozo 8	Instalación de Ventilador	1	10,000
Pozo 8	Inversión Eléctrica	1	25,000
RB Panteón 1	Construcción Base Ventilador	1	35,000
RB Panteón 1	Construcción Plenum Hermetizado	1	30,000
RB Panteón 1	Instalación de Ventilador	1	10,000
RB Panteón 1	Inversión Eléctrica	1	25,000
Total CAPEX (USD)			200,000

***Fuente:** Cálculo de gabinete – Mine & Flows.*

Estimándose así un costo de implementación de 200,000 USD, principalmente en infraestructura para la reubicación de los ventiladores actuales.

- **OPEX:** Desde el punto de vista del costo de operación se ha estimado el costo de la **Tabla 36**.

Tabla 36: OPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector (Disponibles) sin Aire Acondicionado.

OPEX - sin AC (285 / 350)			
Lugar	Actividad	Consumo (HP)	OPEX (US\$/año)
Pozo 8	Extracción	628.7	711,928
RB Panteón 1	Inyección	255.6	289,437
Total OPEX (USD/año)			1,001,365

***Fuente:** Cálculo de gabinete – Mine & Flows.*

Estimándose un costo de operación de 1'001,365 USD/año, sin embargo, esto

considera una operación promedio a máxima capacidad, pudiéndose implementar estrategias de control de dicho consumo.

6.1.2.2. Solo Ventilación – 25% adicional (355 KCFM / 440 KCFM)

Por otro lado, la implementación de un sistema forzado, en un 25% adicional, generará los siguientes costos:

- **CAPEX:** Desde el punto de vista del costo de implementación se ha tomado en cuenta el costo de adquisición de los ventiladores, así como el costo de instalación de los mismo, así como otros gastos asociados a la infraestructura eléctrica necesaria para la operación del sistema, como se muestra en la **Tabla 37**.

Tabla 37: CAPEX - 440 KCFM Extractor / 355 KCFM Inyector (Nuevos) sin Aire Acondicionado.

CAPEX - sin AC (355 / 440)			
Lugar	Actividad	Cantidad	Inversión (USD)
Pozo 8	Ventiladores + Tableros	1	350,000
Pozo 8	Construcción Base Ventilador	1	35,000
Pozo 8	Construcción Plenum Hermetizado	1	30,000
Pozo 8	Instalación de Ventilador	1	10,000
Pozo 8	Inversión Eléctrica	1	25,000
RB Panteón 1	Ventiladores + Tableros	1	300,000
RB Panteón 1	Construcción Base Ventilador	1	35,000
RB Panteón 1	Construcción Plenum Hermetizado	1	30,000
RB Panteón 1	Instalación de Ventilador	1	10,000
RB Panteón 1	Inversión Eléctrica	1	25,000
Total CAPEX (USD)			850,000

Fuente: Cálculo de gabinete – Mine & Flows.

Estimándose un costo de implementación de 850 KUSD.

- **OPEX:** Desde el punto de vista del costo de operación se ha estimado el costo de la **Tabla 38**.

Tabla 38: OPEX - 440 KCFM Extractor / 355 KCFM Inyector (Nuevos) sin Aire Acondicionado.

OPEX - sin AC (355 / 440)			
Lugar	Actividad	Consumo (HP)	OPEX (US\$/año)
Pozo 8	Extracción	1631.7	1,847,707
RB Panteón 1	Inyección	321.2	363,721
Total OPEX (USD/año)			2,211,427

Fuente: Cálculo de gabinete – Mine & Flows.

Estimándose un costo de operación de 2'211,427 USD/año, sin embargo, esto considera una operación promedio a máxima capacidad, pudiéndose implementar estrategias de control de dicho consumo.

6.1.2.3. Ventilación con Aire Acondicionado (285 KCFM / 350 KCFM)

Finalmente, la implementación de un sistema que cumpla con los requerimientos mínimos de necesidad del aire y permita una reducción de la temperatura del aire que ingresa a la mina, contempla los siguientes costos:

- **CAPEX:** Desde el punto de vista de los costos de implementación se tomará en consideración, tanto el ventilador inyector como el sistema de acondicionamiento necesario para reducir la temperatura del aire, desde el punto de vista del extractor se mantendrá el ventilador actual disponible ya que se encuentra relativamente cercano del punto de operación requerido, como

se muestra en la **Tabla 39** y **Tabla 40**.

Tabla 39: CAPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector con Aire Acondicionado (5,000 KWR).

CAPEX - sin AC (285 / 350) - 5,000 kWR			
Lugar	Actividad	Cantidad	Inversión (USD)
Pozo 8	Construcción Base Ventilador	1	35,000
Pozo 8	Construcción Plenum Hermetizado	1	30,000
Pozo 8	Instalación de Ventilador	1	10,000
Pozo 8	Inversión Eléctrica	1	25,000
RB Panteón 1	Ventiladores + Tableros	1	300,000
RB Panteón 1	Sistema de AC - 2500 kWR	1	5,471,940
RB Panteón 1	Construcción Base Ventilador	1	35,000
RB Panteón 1	Construcción Plenum Hermetizado	1	30,000
RB Panteón 1	Instalación de Ventilador	1	10,000
RB Panteón 1	Inversión Eléctrica	1	25,000
Total CAPEX (USD)			5,971,940

Fuente: Cálculo de gabinete – Mine & Flows.

Tabla 40: CAPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector con Aire Acondicionado (10,000 KWR).

CAPEX - sin AC (285 / 350) - 10,000 Kwr			
Lugar	Actividad	Cantidad	Inversión (USD)
Pozo 8	Construcción Base Ventilador	1	35,000
Pozo 8	Construcción Plenum Hermetizado	1	30,000
Pozo 8	Instalación de Ventilador	1	10,000
Pozo 8	Inversión Eléctrica	1	25,000
RB Panteón 1	Ventiladores + Tableros	1	300,000
RB Panteón 1	Sistema de AC - 5000 kWR	1	10,943,880
RB Panteón 1	Construcción Base Ventilador	1	35,000
RB Panteón 1	Construcción Plenum Hermetizado	1	30,000
RB Panteón 1	Instalación de Ventilador	1	10,000
RB Panteón 1	Inversión Eléctrica	1	25,000

Total CAPEX (USD)	11,443,880
--------------------------	-------------------

Fuente: Cálculo de gabinete – Mine & Flows.

Como podemos observar, los costos de implementación de un sistema de acondicionamiento de 2500 kWR ha sido estimado en 5.971 MUSD aproximadamente, mientras para que una planta de 5000 kWR ha sido estimado en 11.443 MUSD.

- **OPEX:** Desde el punto de vista del costo de operación se ha estimado el costo de la **Tabla 41**.

Tabla 41: OPEX - 350 KCFM Extractor / 285 KCFM Inyector (Nuevos) con Aire Acondicionado (5,000 KWR).

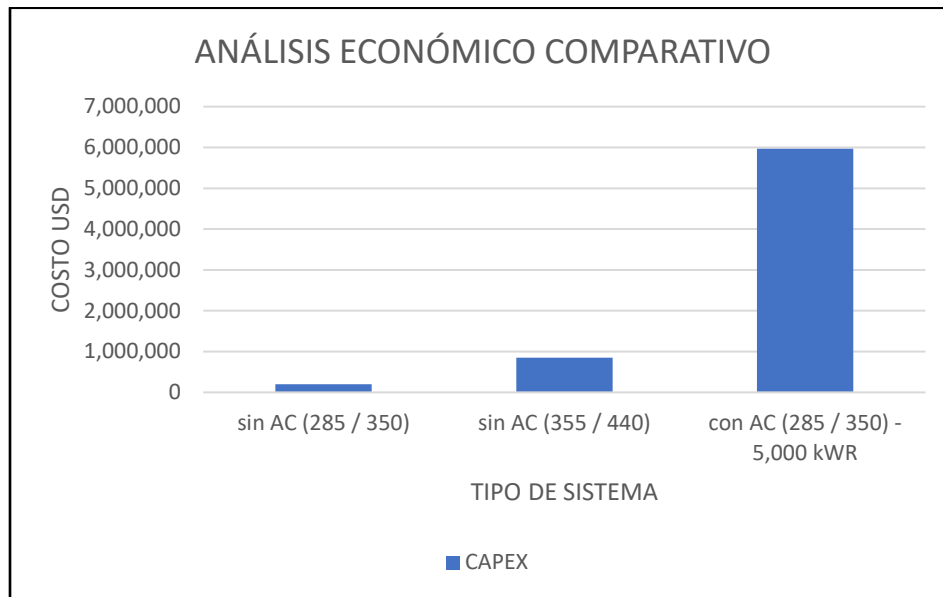
OPEX - con AC (285 / 350) - 5,000 kWR			
Lugar	Actividad	Consumo (HP)	OPEX (US\$/año)
Pozo 8	Extracción	349.25	395,484
RB Panteón 1	Inyección	283.2	320,690
RB Panteón 1	Acondicionamiento	957.87	1,084,674
Total OPEX (USD/año)			1,800,849

Fuente: Cálculo de gabinete – Mine & Flows.

Estimándose un costo de operación de 1'800,849 USD/año, el cual, en todos los casos, se ha estimado considerando una operación continua a plena carga.

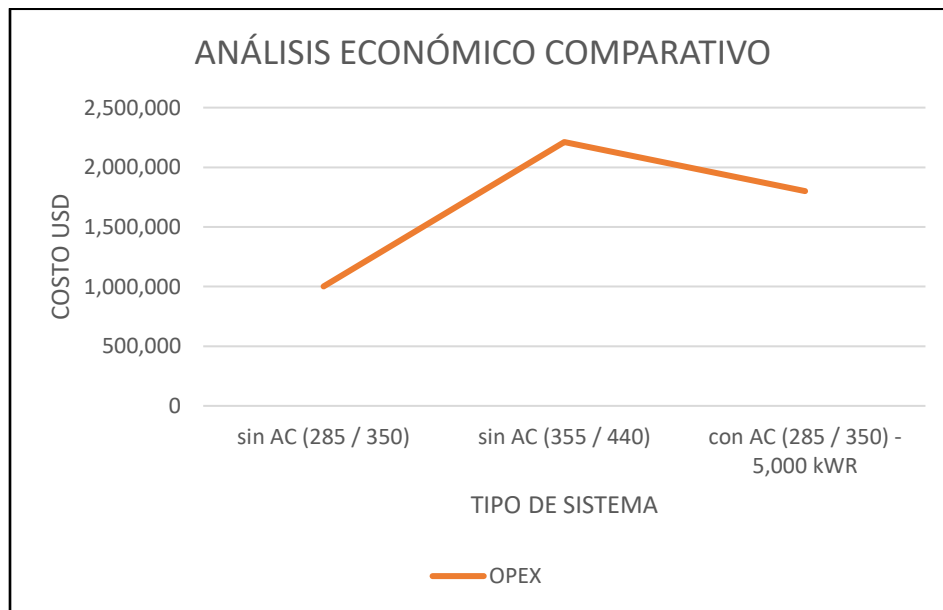
Finalmente, se presenta a continuación el análisis comparativo en el que se resume preliminarmente la relación existente entre el CAPEX y OPEX considerado para cada uno de los escenarios planteados, como se muestra en la **Figura 65** y **Figura 66**.

Figura 65: Análisis comparativo de valores CAPEX por tipo de sistema propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 66: Análisis comparativo de valores OPEX por tipo de sistema propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, respecto a las ganancias proyectadas en función del NSR, se estimó la capacidad de retorno de las opciones propuestas, siendo las alternativas de sin AC (285/350) y sin AC (355/440) económicamente viables con un retorno inmediato, tal y como se expresa en la **Tabla**

Tabla 42: Cuadro comparativo de CAPEX y OPEX de alternativas propuestas eb función del NSR proyectado.

ALTERNATIVA	CAPEX	OPEX	NSR PROYECTADO
CAPEX - sin AC (285 / 350)	200,000	1,001,365	6,000,000
CAPEX - sin AC (355 / 440)	850,000	2,211,427	6,000,000
CAPEX - sin AC (285 / 350) - 5,000 kWR	5,971,940	1,800,849	6,000,000

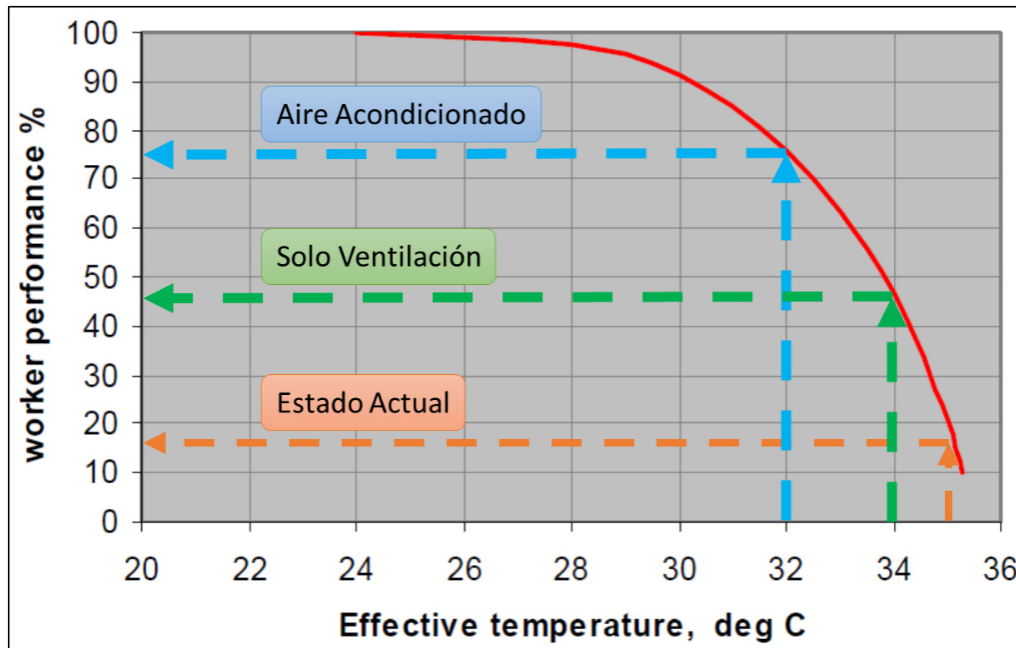
Fuente: Elaboración propia.

6.1.3. MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS TRABAJADORES

Como hemos podido observar, si bien la inversión para la implementación del sistema de acondicionamiento del aire y su costo de operación superan al sistema que considera solo la implementación de un sistema de ventilación con equipos actuales, siendo inferior que la opción de ventilación forzada, su impacto sobre las condiciones termo-ambientales permitirá mejorar la productividad y producción de mineral por lo que, si consideramos que bajo las condiciones actuales se lleva a cabo una producción de 2,000 onzas en mina El Limón - 2, con una temperatura efectiva media de 35 °C que se encuentra asociada a una productividad del 15 % (como se detalló en el apartado 5.1.10), esto debido al cálculo compartido por el departamento de productividad de la unidad minera, así.

Con la aplicación del sistema de acondicionamiento del aire se ha estimado una temperatura efectiva media de 32 °C, la cual se encontrará asociada a una productividad del 75 % y por lo tanto se estimaría un aporte de 10,000 onzas (**Figura 67**).

Figura 67: Análisis comparativo de mejora de productividad respecto a circuito de ventilación con AC vs sin AC.



Fuente: Adaptación propia a diagrama original de J. McPherson.

Así mismo, la aplicación del sistema propuesto solo con sistema de ventilación generará una temperatura media efectiva estimada en 34 °C razón por la cual se estima una productividad del 45% y por lo tanto un aporte estimado en 6,000 onzas.

Entonces, como se presenta en el gráfico anterior, la relación existente entre la temperatura efectiva de trabajo (en grados Celsius), respecto al rendimiento de los trabajadores (en porcentaje). La curva roja en la gráfica representa la relación general que existe entre la temperatura efectiva del aire en el ambiente de trabajo y el rendimiento de los trabajadores. A medida que la temperatura del aire incrementa, el rendimiento de los trabajadores disminuye notablemente.

En la gráfica se observan tres escenarios diferentes marcados con las curvas respectivas

- **Aire Acondicionado (línea azul discontinua):**

- Representa el incremento del porcentaje de productividad de un valor de 15 % establecido por el área de productividad de la unidad minera hasta un valor proyectado del 75 % determinado en función de la curva de relación previamente establecida.
- Se extiende desde una temperatura efectiva de aproximadamente 22°C hasta 32°C, indicando que el rendimiento de los trabajadores se mantiene relativamente constante dentro de un valor aceptable limitada por un rango de temperaturas cuando se usa aire acondicionado.

- **Solo Ventilación (línea verde discontinua):**

- Representa el incremento del porcentaje de productividad de un valor de 15 % establecido por el área de productividad de la unidad minera hasta un valor proyectado del 50 % determinado en función de la curva de relación previamente establecida y que, como se presentará en función a las mediciones realizadas de tiempos efectivos párrafos más abajo se logró con un valor real de 45%.
- Cubre un rango de temperaturas efectivas desde aproximadamente 22°C hasta 34°C, sugiriendo que, con solo ventilación, el rendimiento de los trabajadores se mantiene constante, pero a un nivel más bajo comparado con el aire acondicionado.

- **Estado Actual (línea naranja discontinua):**

- Representa el incremento del porcentaje de productividad de un valor de 15 % establecido por el área de productividad de la unidad minera hasta un valor

proyectado del 25 % determinado en función de la curva de relación previamente establecida.

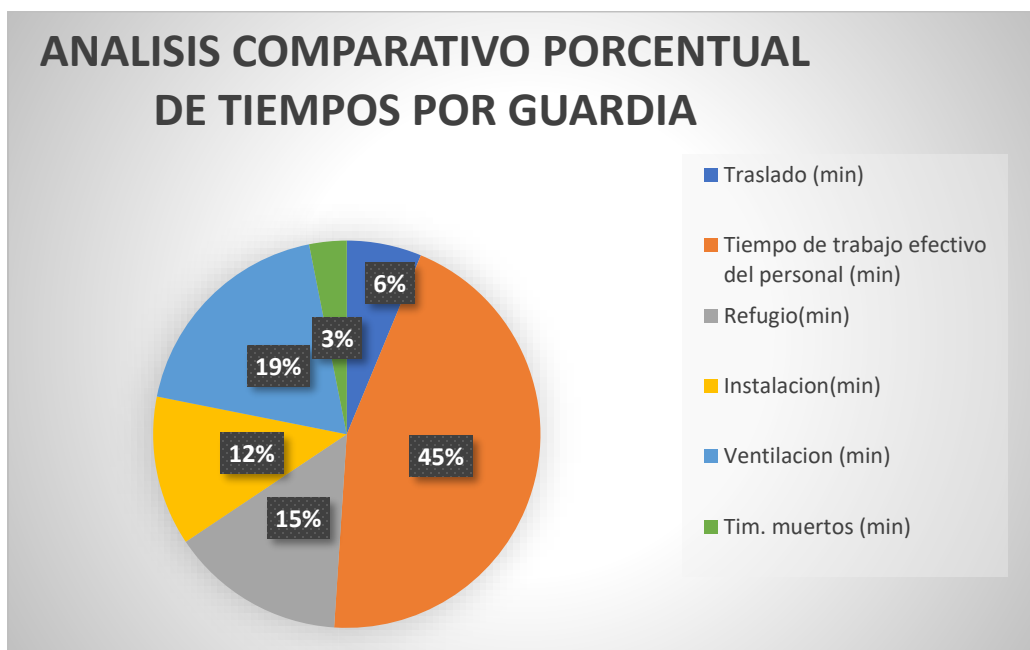
- Indica que, en el estado actual sin mejoras en la ventilación o aire acondicionado, el rendimiento de los trabajadores se mantiene muy bajo y constante entre temperaturas efectivas de 22°C hasta 34°C.

Entonces:

- **Aire Acondicionado:** La implementación de aire acondicionado puede mantener el rendimiento de los trabajadores en un nivel alto (75%) hasta una temperatura efectiva de 32°C. Esto implica una mejora significativa en la productividad en ambientes de trabajo con altas temperaturas.
- **Solo Ventilación:** El uso de ventilación sola mantiene el rendimiento a un nivel moderado (50% - 45% verificado) en un rango de temperaturas más amplio (22°C a 34°C). Sin embargo, este nivel es considerablemente menor comparado con el aire acondicionado.
- **Estado Actual:** Sin mejoras, el rendimiento se mantiene muy bajo (25%) independientemente de la temperatura efectiva hasta 34°C, donde el rendimiento cae casi a 0%. Esto indica condiciones de trabajo muy desfavorables y la necesidad urgente de mejoras en la ventilación o la implementación de aire acondicionado.

Finalmente, se presenta el análisis comparativo de tiempos que, siguiendo la misma metodología de medición planteada por el departamento de productividad que se planteó en apartados anteriores (CÁLCULO DE PRODUCTIVIDAD DE TRABAJADORES ACTUAL) se presentan los valores medidos de la **Figura 68**.

Figura 68: Análisis comparativo de tiempos empleados por guardia de trabajo - Escenario optimizado.



Fuente: Elaboración propia – Valores medidos en Mina El Limón – 2 – 2023.

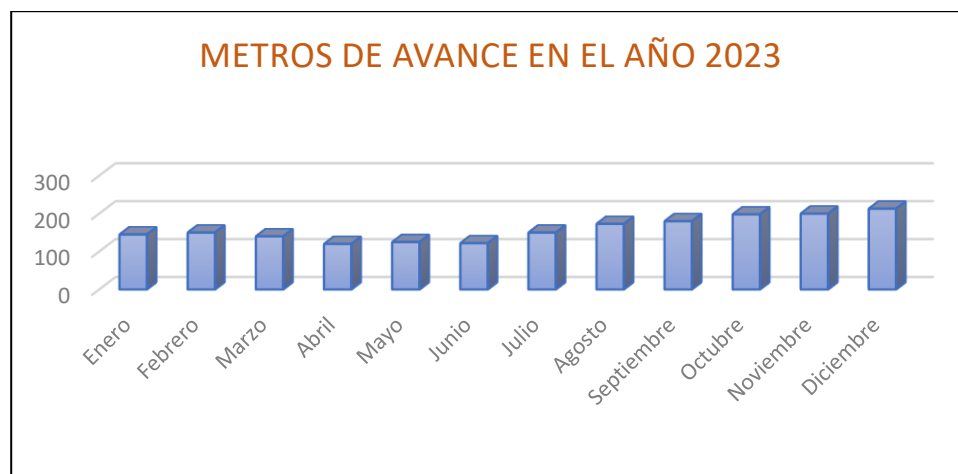
Así, como se detalla en el gráfico anterior, se presenta el valor incrementado de la productividad de los trabajadores con los cambios determinados de “solo ventilación” a un valor de 45% de un proyectado del 50%, el detalle de los valores medidos se adjunta en el **ANEXO 8**.

Se ve relacionado el incremento de tiempo de trabajo efectivo con los metros avanzados incrementando la producción de tonelaje mensual la información mostrada en siguiente tabulación de la **Figura 69** y **Figura 70**. Donde se muestra que los tres primeros meses del año 2023, el avance es menor a 150 metros, con una producción menor de 1000 toneladas mensuales cayendo la producción a menos 800 toneladas mensuales los meses de abril, mayo y junio; meses donde se desarrollaron la implementación de equipos e instalaciones de los accesorios de ventilación dimensionadas al nuevo sistema.

Se presenta un aumento de la producción de manera progresiva los meses de julio

hasta diciembre; llegando al valor más alto el mes de diciembre 1200 toneladas con un avance superior a los 150 metros mensuales. Es a partir de esta información y desglosando la data; donde se observa el aumento de avance específicamente de los 4 tajos ubicados en los niveles 120 y Pozo_8, donde la temperatura oscilaba los 38 a 40 °C es por ello que la reducción a 32 – 34 °C aumenta el despeño de los colaboradores y equipos.

Figura 69: Metros de avance en las labores mineras 4 m x 4 m.



Fuente: Elaboración propia – Metros de avance en Mina El Limón 2 – 2023.

Figura 70: Producción minera en toneladas durante 2023.



Fuente: Elaboración propia – Producción en Mina El Limón 2 – 2023.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

A partir del análisis integral del sistema de ventilación en la mina hipertermal El Limón – 2, se identificó que las condiciones estructurales subterráneas y térmicas, sumadas a una distribución inadecuada del aire, generaban un entorno de trabajo con temperaturas efectivas medias de hasta 35 °C y puntuales de hasta 40 °C, ocasionando fatiga térmica y limitando el rendimiento de trabajadores y equipos. El sistema previo operaba con un caudal de 350 KCFM en extracción y 285 KCFM en inyección, presentando problemas críticos como recirculación no controlada (53.2 KCFM), fugas (23.5 KCFM), y una eficiencia de ventilación del 76.2 % en sectores como Pozo_8. Estas condiciones comprometían la salud ocupacional, al verse agravadas por un gradiente geotérmico de 8 °C/100 m y la presencia de aguas hipertermales con cargas térmicas entre 900 y 1000 kW.

Se determinó que el sistema existente era insuficiente para disipar el calor generado por los procesos naturales y operativos, por lo que se proyectó una configuración optimizada de 440 KCFM en extracción y 355 KCFM en inyección, sin necesidad inmediata de aire acondicionado. Este rediseño permitió reducir la temperatura efectiva promedio a 32 °C, con una cobertura de caudal del 138 % en condiciones pico. Además, se estableció que la demanda unitaria por frente requería un caudal representativo de 40 KCFM. La implementación del sistema generó una mejora significativa en la continuidad operativa, evidenciada en el incremento del tiempo efectivo de trabajo por turno de 75 a 215 minutos, al reducir los tiempos de reposo por estrés térmico.

Finalmente, se concluyó que la optimización del sistema de ventilación incidió

directamente en la productividad minera, al incrementar el avance mensual de 145 m a 192 m, y la producción de 830 a 1100 toneladas en el último trimestre del 2023, alcanzando 1200 toneladas en diciembre. Estos valores representan un aumento en la productividad estimada del 15 % al 45 %, lo que permitió un crecimiento proyectado de la producción mensual de oro de 2000 a 6000 onzas. Si bien un sistema complementado con aire acondicionado (5,000 KWR) podría elevar la productividad hasta un 75 % y una producción estimada de 10,000 onzas, el sistema propuesto representa una solución técnica viable, rentable y sostenible a nivel operativo y financiero, considerando un OPEX anual de 2,211,427 USD.

7.2. RECOMENDACIONES

Implementar de forma definitiva un sistema de ventilación de 440 KCFM en extracción y 355 KCFM en inyección, el cual permitió reducir la temperatura efectiva promedio de 35–40 °C a 32 °C, incrementando la productividad operativa del 15 % al 45 % sin requerir, en esta etapa, un sistema de aire acondicionado.

Corregir las fugas identificadas en las troncales Pozo 2 y RB_580, con un total estimado de 23.5 KCFM, mediante el mantenimiento y refuerzo de tapones, ductos y sellos, con el fin de evitar pérdidas de aire fresco y mejorar la cobertura del sistema de ventilación.

Prevenir la recirculación de aire caliente (estimada en 53.2 KCFM) mediante el monitoreo continuo y el mantenimiento regular de los ventiladores auxiliares, especialmente en zonas críticas como Pozo_8, y asegurar su hermetización temporal ante fallas.

Minimizar la sobrepresión en ventiladores auxiliares mediante la implementación de sistemas de ventilación de doble manga en paralelo y el uso de mangas de diámetro mínimo Ø 3.1 m, tal como se aplicó en la solución propuesta, lo que reduce pérdidas de carga y mejora el flujo de aire.

Priorizar la construcción de la RB Panteón 1 para garantizar un flujo permanente de aire fresco hacia la zona de operación, complementado con un inyector principal y la posibilidad de reubicar extractores estratégicamente hacia el Pozo 8.

Evitar la acumulación excesiva de equipos diésel en interior mina, ya que su operación simultánea genera una carga térmica adicional que sobrecarga el sistema de ventilación, especialmente en zonas con alta influencia geotérmica.

Evaluar, como etapa futura, la implementación de un sistema de aire acondicionado puntual (por ejemplo, 250 KWR con torre de enfriamiento) en frentes de alta carga térmica, considerando los beneficios en productividad (hasta 75 %) y el costo operativo asociado.

Estandarizar un protocolo de operación y mantenimiento del sistema de bombeo y ventilación reversible a través del Pozo 8, de modo que se garantice el trabajo continuo en frentes profundos incluso durante operaciones de bombeo.

Aplicar el diseño optimizado validado como modelo de referencia para futuras expansiones, considerando una demanda unitaria de 40 KCFM por frente de labor y adaptando las troncales en función de la carga térmica del entorno.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Bluhm, S. J., & du Plessis, J. J. L. (2006). Control of heat and humidity in South African deep mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 106(6), 393-400. <https://www.saimm.co.za>**
- **MCPHERSON, M. J.** Subsurface ventilation and environmental engineering. 2009.
- **HARTMAN, H. L., MUTMANSKY, J. M., RAMANI, R. V., & WANG, Y. J.** Mine Ventilation and Air Conditioning. 3rd Editio. 2012
- **Galante, Erick & Lima, A & França, Tanos & Haddad, Assed. (2014).** Exposure Limits and its Applications in Chemical Warfare. *Revista Virtual de Química*. 6. 591-600. 10.5935/1984-6835.20140038.
- De Souza, E. (2019). **Advances in cooling and ventilation systems in hyperthermal mining environments. *Mining Engineering*, 71(10), 30-36.** <https://doi.org/10.19150/me2019>
- **Dziurzyski, W., Tracz, J. and Trutwin, W. (1988).** Simulation of mine fires. 4th Int. Mine Ventilation Congress, Brisbane, Australia, pp 357-363.
- **Froger, C.E. (1985).** Firefighting expertise in French underground mines. 2nd U.S. Mine Ventilation Symp., Reno, Nevada.
- Love, R. G., Miller, B. G., & Groat, S. K. (2007). **Heat stress in mining: An evaluation of exposure and control measures. *Occupational Medicine*, 57(6), 430-436.** <https://doi.org/10.1093/occmed/kqm058>
- **McPherson, M.J. (1995).** The Adiabatic Compression of Air by Large Falls of Roof, 7th US Mine Ventilation Symposium, Lexington KY.
- **MSHA (U.S. Mine Safety and Health Administration) (1984).** Report of Investigation, Underground Coal Fire, Wilberg Mine, Utah.
- **MSHA (2008).** News Release No. 08-126-NAT.

- **Castillo Turpo, N. R., & Soto Ramos, J. G. (2022).** Análisis del sistema de ventilación y propuesta de mejora para optimizar el caudal de aire de la minera aurífera Retamas S.A. Marsa - 2020. Universidad Tecnológica del Perú.
- **Almerco, Z., & Enrique, L. (2022).** Evaluación del sistema de ventilación para mejorar deficiencia de aire en mina Antapite de Empresa Sierra Antapite S.A.C. 2022. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- **Elvis Humberto Zavaleta Herrera (2023).** Optimización del sistema de ventilación en la mina Sheridan Mining Explorations El Combe E.I.R.L. – Algamarca, 2023. Universidad Nacional de Trujillo.
- **Ramos Quispe, Jaqueline (2021).** Aplicación de la ergonomía para mejorar la productividad en el área comercial de la empresa Moncav CJE S.A.C., Puente Piedra, 2021. Universida Cesar Vallejo.
- Smith, A. C., & Wall, R. E. (2018). **A comprehensive study of air quality and ventilation in underground mines.** *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(5), 745-753. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.05.014>
- Quick, J. C., & Howard, B. (2021). **Mitigating thermal stress in high-temperature underground mining environments.** *Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 27(4), 323-331. <https://doi.org/10.1080/10803548.2021.1933159>
- **AMCA 201-02 (R2011)** - Fans and Systems.
- **Herrera, J. (2019).** Introducción a la Ventilación Minera.
- **Xu, Y., Li, Z., Chen, Y., Jia, M., Zhang, M. y Li, R. (2022).** Minería sinérgica de energía geotérmica en minas profundas: Un método innovador para el control de riesgos térmicos. *Ingeniería Térmica Aplicada*, 210, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118398>.

- **Qiaoyun, H., Yi, Z., Kongqing, L. y Shenghua, Z. (2019). Evaluación computacional del sistema de refrigeración en una mina de carbón profunda, caliente y húmeda en China: Un estudio de confort térmico.** Tecnología de Túneles y Espacio Subterráneo, 90, 394-403.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.05.010>.

9. ANEXOS

ANEXO 1: DETALLE DEL ANEXO 38 – CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE AIRE - D.S.N°024-2016 Y SU MODIFICATORIA D.S.N°023-2017.

ANEXO 38

CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE AIRE

1. **REQUERIMIENTO DE AIRE TOTAL (Q_{To}).**-Cuando en la operación se utilice equipos con motor petrolero:

La demanda de aire al interior de la mina debe ser calculada de acuerdo con el literal d) del artículo 252 del reglamento, considerando la fórmula siguiente:

$$Q_{To} = Q_{T1} + Q_{Fu}$$

Donde:

Q_{To} = Caudal total para la operación

Q_{T1} = La sumatoria de caudal requerido por:

- a) el número de trabajadores (Q_{Tr}),
- b) el consumo de madera (Q_{Ma}),
- c) temperatura en labores de trabajo (Q_{Te}) y
- d) equipos con motor petrolero (Q_{Eq})

Q_{Fu} = 15% del Q_{T1}

A estos efectos, previamente debe determinarse lo siguiente:

- a) **Caudal requerido por el número de trabajadores (Q_{Tr})**

$$Q_{Tr} = F \times N \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Tr} = Caudal total para “n” trabajadores (m³/min);

F = Caudal mínimo por persona de acuerdo con escala establecida en el artículo

247 del reglamento;

N = Número de trabajadores de la guardia más numerosa.

b) Caudal requerido por el consumo de madera (Q_{Ma})

$$Q_{Ma} = T \times u \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Ma} = Caudal requerido por toneladas de producción (m³/min)

u = Factor de producción, de acuerdo con escala establecida en el segundo párrafo del literal d) del artículo 252 del reglamento;

T = Producción en toneladas métricas húmedas por guardia.

FACTOR DE PRODUCCIÓN DE ACUERDO CON EL CONSUMO DE MADERA	
CONSUMO DE MADERA (%)	FACTOR DE PRODUCCIÓN (m ³ /min)
< 20	0.00
20 a 40	0.60
41 a 70	1.00
> 70	1.25

c) Caudal requerido por temperatura en las labores de trabajo (Q_{Te})

$$Q_{Te} = V_m \times A \times N \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Te} = Caudal por temperatura (m³/min);

V_m = Velocidad mínima;

A = Área de la labor promedio;

N = Número de niveles con temperatura mayor a 23°C, de acuerdo con escala

establecida en el tercer párrafo del literal d) del artículo 252 del reglamento.

VELOCIDAD MÍNIMA	
TEMPERATUR A SECA (°C)	VELOCIDAD MÍNIMA (m/min)
< 24	0.00
24 a 29	30.00

d) Caudal requerido por equipo con motor Petrolero (Q_{Eq})

$$Q_{Eq} = 3 \times HP \times D_m \times F_u \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Eq} = Volumen de aire necesario para la ventilación (m³/min);

HP = Capacidad efectiva de potencia (HPs);

D_m = Disponibilidad mecánica promedio de los equipos (%);

F_u = Factor de utilización promedio de los equipos (%).

e) Caudal requerido por fugas (Q_{Fu})

$$Q_{Fu} = 15\% \times Q_{T1} \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

$$Q_{T1} = Q_{Tr} + Q_{Te} + Q_{Ma} + Q_{Eq}$$

2. **REQUERIMIENTO DE AIRE TOTAL (Q_{To}).**- Cuando en la operación no se utilicen equipos con motor petrolero:

Debe calcularse el caudal total para la operación conforme la fórmula que se detalla a

continuación y luego compararla con el caudal por el consumo de explosivos. Luego de obtener cada uno de los valores se determina como Requerimiento de Aire Total el de mayor valor.

La demanda de aire al interior de la mina debe ser calculada de acuerdo con el literal d) del artículo 252 del reglamento, considerando la fórmula siguiente:

$$Q_{To} = Q_{T1} + Q_{Fu}$$

Donde:

Q_{To} = Caudal total para la operación

Q_{T1} = La sumatoria de caudal requerido por:

- a) el número de trabajadores (Q_{Tr}),
- b) el consumo de madera (Q_{Ma}) y
- c) temperatura en labores de trabajo (Q_{Te})

Q_{Fu} = 15% del Q_{T1}

A estos efectos, previamente debe determinarse lo siguiente:

a) Caudal requerido por el número de trabajadores (Q_{Tr})

$$Q_{Tr} = F \times N \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Tr} = Caudal total para “n” trabajadores (m³/min);

F = Caudal mínimo por persona de acuerdo con escala establecida en el artículo 247 del reglamento;

N = Número de trabajadores de la guardia más numerosa.

b) Caudal requerido por el consumo de madera (Q_{Ma})

$$Q_{Ma} = T \times u \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Ma} = Caudal requerido por toneladas de producción (m^3/min)

u = Factor de producción, de acuerdo con escala establecida en el segundo párrafo del literal d) del artículo 252 del reglamento;

T = Producción en toneladas métricas húmedas por guardia.

FACTOR DE PRODUCCIÓN DE ACUERDO CON EL CONSUMO DE MADERA	
CONSUMO DE MADERA (%)	FACTOR DE PRODUCCIÓN (m^3/min)
< 20	0.00
20 a 40	0.60
41 a 70	1.00
> 71	1.25

c) Caudal requerido por temperatura en las labores de trabajo (Q_{Te})

$$Q_{Te} = V_m \times A \times N \text{ (} m^3/min \text{)}$$

Donde:

Q_{Te} = Caudal por temperatura (m^3/min);

V_m = Velocidad mínima;

A = Área de la labor promedio;

N = Número de niveles con temperatura mayor a $23^\circ C$, de acuerdo con escala establecida en el tercer párrafo del literal d) del artículo 252 del reglamento.

VELOCIDAD MÍNIMA	
TEMPERATUR A SECA ($^\circ C$)	VELOCIDAD MÍNIMA

	(m/min)
< 24	0.00
24 a 29	30.00

d) Caudal requerido por fugas (Q_{Fu})

$$Q_{Fu} = 15\% \times Q_{t1} \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

$$Q_{T1} = Q_{Tr} + Q_{Te} + Q_{Ma}$$

e) Caudal requerido por consumo de explosivo (Q_{Ex})

Cuando en la operación no se utilicen equipos con motor petrolero, debe calcularse y tenerse en cuenta la necesidad de aire requerido por consumo de explosivos, conforme lo siguiente:

$$Q_{Ex} = A \times V \times N \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q_{Ex} = Caudal de aire requerido por consumo de explosivo detonado (m³/min)

A = Área promedio de labores (m²);

V = Velocidad mínima requerida según norma (m/min);

N = Número de niveles en voladura.

ANEXO 2: MATRIZ DE TRONCALES.

Nivel	Pozo 1	Pozo 1 - Línea Norte (Ch 025)	Pozo 1 - Línea Sur (Ch 030)	R3-150	R3-300	Pozo 2	Pozo 8	Ch-Pozo 8
Superficie	Chimenea 5.1m tubo de escape con tubo	Tubo de escape con tubo con 0°C		R3-150 falso tubo de escape	Características 300 KCM	Características 300 KCM	Ingrediente de partícula y tubo sobre tubo con agua caliente	Chimenea 2m x 2m ligera
100								
80								
60								
40								
20								
0	Pozo en Azúcar Debería tener 2 líneas (R3-150 y R3-300)	Chimenea con camino de escape Carga en 10 segundos	Chimenea con camino de escape Carga en 10 segundos			Acceso a chimenea frente regulador de ventilador exterior		
-20		Nº 11 comunicación aproximadamente con línea	Nº 11 por acceso a pozo 1, según de concreto con tubo ligero			Comunicación con línea de escape con manga		
-40								Debería comunicación a Pozo 8 (no accesible)
-60		Nº 30 comunicación por la R3-150			Debería haber chimenea hacia abajo está cubierto	Comunicación de la misma línea de escape		
-80			R3-150 Regulador 0.5 x 1.4 regulador 0.5m			Regulación de la presión de escape	Nº 30 2 ventiladores de 40 CCM	
-100		Nº 30 comunicación por la R3-150		Nº 30 por de troncal Debería haber de carga según regulador	antes de salir a la R3 aproximadamente con escudo de escape	Comunicación de la misma línea aproximadamente con línea de escape	Nº 35 1 ventilador de 40 CCM	
-120					Nº 32 de escape en el mismo nivel	Regulación de la presión de escape	Doble comunicación 2 ventiladores de chimenea de verificación de escape	2 ventiladores hacia frente de escape aproximadamente
-140		Nº 32 escape de bomba 0.05			De aquí hacia abajo está fundido	De aquí hacia abajo está fundido	2 ventiladores hacia frente de escape aproximadamente	2 ventiladores hacia frente de escape aproximadamente

ANEXO 3: CÁLCULO DE FACTORES DE FRICCIÓN PARA LABORES HORIZONTALES.

		CÁLCULO DE FACTORES DE FRICCIÓN PARA LABORES HORIZONTALES - MINA SANTA PANCHÁ																									
		ANCHO DE SECCIÓN				ALTURA DE SECCIÓN					ALTURA DE ASPEREZAS					ANÁLISIS DE RESULTADOS											
Id	LABOR	A1	A2	A3	AVG	H1	H2	H3	H4	H5	AVG	e1	e2	e3	e4	e5	MIN	MAX	AVG	cción (m	erímetro (m	Dh	nsidad (kg/m	k mín	k prom	k máx	
1	RP Principal - Nv -185 Frente a Estación de bombas		4.9	4.7	4.7	4.8	3.6	4.8	4.8	5.0	4.1	4.4	30.0	25.0	15.0	10.0	22.0	0.1	0.3	0.2	21.9	18.0	4.9	1.2	0.0074	0.0099	0.0118
2	RP Principal - Nv -135 Antes de Ventilador Auxiliar		5.4	5.3	5.2	5.3	4.1	4.5	4.7	4.4	3.9	4.3	40.0	35.0	20.0	25.0	10.0	0.1	0.4	0.3	23.2	18.7	5.0	1.2	0.0073	0.0110	0.0136
3	Nv -120 Salida hacia Pie de Pozo 2		5.2	5.1	4.8	5.0	4.0	4.9	4.9	4.7	4.2	4.5	30.0	32.0	25.0	21.0	10.0	0.1	0.3	0.2	23.4	18.7	5.0	1.2	0.0073	0.0104	0.0120
4	Nv -120 Salida de Panteón Sur		4.9	4.8	4.7	4.8	3.4	4.3	4.6	4.6	3.5	4.0	20.0	25.0	15.0	10.0	22.0	0.1	0.3	0.2	20.2	17.2	4.7	1.2	0.0075	0.0096	0.0110
5	Nv -95 Salida hacia la rampa		4.1	4.0	3.9	4.0	2.8	3.5	3.9	3.9	3.4	3.5	15.0	12.0	10.0	15.0	10.0	0.1	0.2	0.1	14.4	14.6	3.9	1.2	0.0080	0.0087	0.0095
6	Rampa Nv -75 Acceso a tajo de explotación		5.0	5.0	4.8	4.9	4.2	4.3	4.4	4.6	2.4	4.0	30.0	5.0	25.0	10.0	10.0	0.1	0.3	0.2	20.4	17.7	4.6	1.2	0.0058	0.0091	0.0122
7	Nv -80 RP Norte, intersección con RP Sur		4.8	5.1	5.0	5.0	4.4	4.9	4.6	4.5	2.9	4.3	50.0	40.0	35.0	30.0	37.0	0.3	0.5	0.4	22.0	18.2	4.8	1.2	0.0119	0.0134	0.0155
8	Nv -80 RP Sur, intersección con RP Norte		4.9	4.8	4.9	4.9	3.7	4.3	4.3	4.0	3.7	4.0	30.0	35.0	25.0	40.0	32.0	0.3	0.4	0.3	20.0	17.4	4.6	1.2	0.0112	0.0127	0.0141
9	Nv -15 RP Sur, portones		5.0	4.6	4.7	4.7	2.4	3.8	4.0	3.8	3.5	3.5	35.0	40.0	10.0	12.0	15.0	0.1	0.4	0.2	17.2	16.1	4.3	1.2	0.0077	0.0110	0.0147
10	Nv -10 RP Sur, antes de portones		4.6	4.4	4.5	4.5	3.0	5.3	5.2	4.3	4.3	4.4	60.0	50.0	35.0	37.0	25.0	0.3	0.6	0.4	20.8	18.1	4.6	1.2	0.0112	0.0144	0.0178
11	Nv 0 RP Sur, por tubos hacia el Pozo 1		5.5	5.3	5.1	5.3	3.7	4.7	4.8	4.8	3.2	4.2	30.0	25.0	22.0	15.0	12.0	0.1	0.3	0.2	23.5	18.5	5.1	1.2	0.0078	0.0098	0.0116
		4.8				4.1					0.2					0.0084 0.0109 0.0131											

ANEXO 4: CÁLCULO DE DEMANDA DE AIRE – PLENA CARGA.

RELACIÓN DE EQUIPOS DIESEL QUE OPERAN EN INTERIOR MINA - 2022																		
ITEM	FAMILIA DE EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA NOMINAL VERIFICADA	RPM NOMINAL	FU	HP RALENTÍ	RPM RALENTÍ	RPM MEDIA / 50%	POTENCIA MEDIA HP / 50%	ESTADÍA EN MINA	FACTOR DE CORRECCIÓN	HP UNITARIO	HP TOTAL	REQ. AIRE (m³/min)	REQ. AIRE (CFM)		
1	SCOOP	Scoop Atlas 1004.59m³	2	250	2000	0.70	63	1000	1500	156	1.000	0.999	87.32	174.64	524	18.502		
2	SCOOP	Scoop Toro 400.3 m³	0	215	2200	0.50	54	1000	1600	134	1.000	0.999	53.64	-	0	-		
3	SCOOP	Scoop CAT R1700.66m³	2	345	1100	0.70	86	1000	1050	216	1.000	0.999	120.50	241.01	723	25.533		
4	JUMBO	Jumbos Horizontal	2	77.8	2300	0.15	19	1000	1650	49	1.000	0.999	5.82	11.65	35	1.234		
5	JUMBO	Jumbos Vertical (Smba)	1	107.2	3600	0.15	27	1000	2300	67	1.000	0.999	8.02	8.02	24	850		
6	JUMBO	Jumbos Vertical (Raptor)	1	142.1	2200	0.15	36	1000	1600	89	1.000	0.999	10.64	10.64	32	1.127		
7	JUMBO	Jumbos Vertical (Cubex)	0	96.55	2200	0.15	24	1000	1600	60	1.000	0.999	7.23	-	0	-		
8	JUMBO	Jumbos Emparrador	1	97.1	2300	0.15	24	1000	1650	61	1.000	0.999	7.27	7.27	22	770		
9	JUMBO	Scissors	0	96.55	2500	0.50	24	1000	1750	60	1.000	0.999	24.09	-	0	-		
10	VOQUETE	Cat Articulados	4	367	1200	0.60	92	1000	1100	229	0.800	0.999	87.90	351.60	1055	37.250		
11	SCOOP	Bajo Perfil Semi Nuevos	3	250	2000	0.60	63	1000	1500	156	1.000	0.999	74.85	224.54	674	23.789		
12	VOQUETE	Camiones Bajo Perfil TMSA	1	315.4	2200	0.60	79	1000	1600	197	0.800	0.999	75.54	75.54	227	8.093		
13	AUXILIARES	Telehandler CAT	3	73.8	1800	0.70	18	1000	1400	46	1.000	0.999	25.78	77.33	232	8.193		
14	AUXILIARES	Tractor D5G CAT	0	99	2400	0.50	25	1000	1700	62	1.000	0.999	24.70	-	0	-		
15	AUXILIARES	Motoniveladora CAT	1	145	2000	0.70	36	1000	1500	91	0.800	0.999	40.52	40.52	122	4.293		
16	AUXILIARES	Vibrocompactadora CAT	0	131	2200	0.50	33	1000	1600	82	0.800	0.999	26.15	-	0	-		
17	SOSTENIMIENTO	Mini Robot Shotcreteo	1	142	2200	0.40	36	1000	1600	89	0.700	0.999	19.84	19.84	60	2.102		
18	SOSTENIMIENTO	Mixer	1	225	2300	0.40	56	1000	1650	141	1.000	0.999	44.91	44.91	135	4.758		
19	AUXILIARES	Back Hoe	1	100	2200	0.30	25	1000	1600	63	1.000	0.999	14.97	14.97	45	1.586		
20	CAMONETA	Camionetas	10	166	5200	0.50	42	1000	3100	104	0.600	0.999	24.85	248.49	745	26.326		
21	CAMON	Camión Hino	1	148	2500	0.60	37	750	1625	93	0.700	0.999	31.02	31.02	93	3.286		
22	AUXILIARES	Tractores	3	55	2400	0.50	14	1000	1700	34	1.000	0.999	13.72	41.17	123	4.361		
															REQUERIMIENTO DE AIRE - EQUIPOS		4,869	171,962
															REQUERIMIENTO DE AIRE - COLABORADORES		310	10,933
															REQUERIMIENTO DE AIRE - CALOR EN NIVELES		2,750	97,115
															SUBTOTAL DEMANDA		7,929	280,011
															DEMANDA TOTAL CON FUGAS		9,118	322,012

ANEXO 5: CÁLCULO DE DEMANDA DE AIRE – CARGA REDUCIDA.



CALIBRE

MINING CORP

RELACIÓN DE EQUIPOS DIESEL QUE OPERAN EN INTERIOR MINA - 2022

ITEM	FAMILIA DE EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA NOMINAL VERIFICADA	RPM NOMINAL	FU	HP RALENTÍ	RPM RALENTÍ	RPM MEDIA / 50%	POTENCIA MEDIA (HP) / 50%	ESTADÍA EN MINA	FACTOR DE CORRECCIÓN	HP UNITARIO	HP TOTAL	REQ. AIRE (m³/min)	REQ. AIRE (CFM)
1	SCOOP	Scoop Atlas 1030 4.59 m3	2	250	2000	0.70	63	1000	1500	156	1.000	0.999	87.32	174.64	524	18,502
2	SCOOP	Scoop Toro 400 3 m3	0	215	2200	0.50	54	1000	1600	134	1.000	0.999	53.64	-	0	-
3	SCOOP	Scoop CAT R1700 6.6 m3	2	345	1100	0.70	86	1000	1050	216	1.000	0.999	120.50	241.01	723	25,533
4	JUNBO	Jumbos Horizontal	1	77.8	2300	0.15	19	1000	1650	49	1.000	0.999	5.82	5.82	17	617
5	JUNBO	Jumbos Vertical (Simba)	1	107.2	3600	0.15	27	1000	2300	67	1.000	0.999	8.02	8.02	24	850
6	JUNBO	Jumbos Vertical (Raptor)	1	142.1	2200	0.15	36	1000	1600	89	1.000	0.999	10.64	10.64	32	1,127
7	JUNBO	Jumbos Vertical (Cubex)	0	96.55	2200	0.15	24	1000	1600	60	1.000	0.999	7.23	-	0	-
8	JUNBO	Jumbos Empalmador	0	97.1	2300	0.15	24	1000	1650	61	1.000	0.999	7.27	-	0	-
9	JUNBO	Scissors	0	96.55	2500	0.50	24	1000	1750	60	1.000	0.999	24.09	-	0	-
10	VOLQUETE	Cat Articulados	2	367	1200	0.60	92	1000	1100	229	0.800	0.999	87.90	175.80	527	18,625
11	SCOOP	Bajo Perfil Semi Nuevos	1	250	2000	0.60	63	1000	1500	156	1.000	0.999	74.85	74.85	225	7,990
12	VOLQUETE	Camiones Bajo Perfil TMSA	1	315.4	2200	0.60	79	1000	1600	197	0.800	0.999	75.54	75.54	227	8,003
13	AUXILIARES	Telehandler CAT	1	73.8	1800	0.70	18	1000	1400	46	1.000	0.999	25.78	25.78	77	2,731
14	AUXILIARES	Tractor D5G CAT	0	99	2400	0.50	25	1000	1700	62	1.000	0.999	24.70	-	0	-
15	AUXILIARES	Motorizadora CAT	0	145	2000	0.70	36	1000	1500	91	0.800	0.999	40.52	-	0	-
16	AUXILIARES	Vibrocompactadora CAT	0	131	2200	0.50	33	1000	1600	82	0.800	0.999	26.15	-	0	-
17	SOSTENIMIENTO	Mini Robot Shotcreteo	0	142	2200	0.40	36	1000	1600	89	0.700	0.999	19.84	-	0	-
18	SOSTENIMIENTO	Mixer	0	225	2300	0.40	56	1000	1650	141	1.000	0.999	44.91	-	0	-
19	AUXILIARES	Back Hoe	1	100	2200	0.30	25	1000	1600	63	1.000	0.999	14.97	14.97	45	1,586
20	CAMONETA	Camionetas	3	166	5200	0.50	42	1000	3100	104	0.600	0.999	24.85	74.55	224	7,888
21	CAMON	Camión Hino	1	148	2500	0.60	37	750	1625	93	0.700	0.999	31.02	31.02	93	3,286
22	AUXILIARES	Tractores	1	55	2400	0.50	14	1000	1700	34	1.000	0.999	13.72	13.72	41	1,454
REQUERIMIENTO DE AIRE - EQUIPOS															2,779	98,141
REQUERIMIENTO DE AIRE - COLABORADORES															310	10,933
REQUERIMIENTO DE AIRE - CALOR EN NIVELES															2,750	97,115
SUBTOTAL DEMANDA															5,839	206,190
DEMANDA TOTAL CON FUGAS															6,714	237,118

ANEXO 6: CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE AIRE EN UN FRENTE DE TRABAJO - VENTILACIÓN AUXILIAR.

DEMANDA DE VENTILACIÓN - CICLO DE MINADO								
Relación de equipos								
ETAPA	REQ.	CANTIDAD	CAPACIDAD MÁXIMA (HP)	DISP. MECÁNICA (%)	FACTOR DE UTILIZACIÓN (%)	REQ. AIRE (CFM)	REQ. SUBTOTAL DE AIRE (CFM)	
DESATE	EQUIPO	Telehandler CAT	1	73.8	100%	106	7,823	
	PERSONAL	OPERADOR	1	--	--	212	212	
		SUBTOTAL DESATE					8,035	
LIMPIEZA EN FRENTE	EQUIPO	Scoop Atlas 1030 4.59 m3	1	250	100%	106	26,500	
	PERSONAL	OPERADOR	1	--	--	212	212	
		SUBTOTAL LIMPIEZA EN TAJO					26,712	
ACARREO EN FRENTE	EQUIPO	Cat Articulado	1	367	100%	106	38,902	
	PERSONAL	OPERADOR	1	--	--	212	212	
		SUBTOTAL LIMPIEZA EN FRENTE					39,114	
SOSTENIMIENTO ACTIVO	EQUIPO	Jumbos Empernador	1	97.1	100%	106	2,059	
	PERSONAL	OPERADOR	1	--	--	212	212	
		SUBTOTAL SOSTENIMIENTO ACTIVO					2,271	
SOSTENIMIENTO PASIVO	EQUIPO	Mini Robot Shotcretero	1	142	100%	106	3,010	
		MIXER	1	225	100%	106	23,850	
	PERSONAL	OPERADOR	2	--	--	212	424	
		SUBTOTAL SOSTENIMIENTO PASIVO					27,284	
PERFORACIÓN	EQUIPO	Jumbos Vertical (Simba)	1	107.2	100%	106	106	
	PERSONAL	OPERADOR	2	--	--	212	424	
		SUBTOTAL PERFORACIÓN					530	
VOLADURA	EQUIPO	Scissors	1	96.55	100%	106	10,234	
	PERSONAL	OPERADOR	3	--	--	212	636	
		SUBTOTAL VOLADURA					10,870	
		DEMANDA MÁXIMA DE VENTILACIÓN (CFM)					40,000	

ANEXO 7: CÁLCULO DE TIEMPOS PARA LA PRODUCTIVIDAD DE LOS TRABAJADORES - ESCENARIO ACTUAL 2022.

EFICIENCIA DEL PERSONAL POR GUARDIA/ 8 hrs											
ETAPA	Actividad	Cargo	Cantidad	Hrs. Planeadas	Traslado (min)	Produccion (min)	Refrigo(min)	Instalacion(min)	Ventilacion (min)	Tim. muertos (min)	Eficiencia(%)
Desate	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	75	140	60	150	25	15.63
Limpieza en Frente	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	75	140	60	150	25	15.63
Acarreo en Frente	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	75	140	60	150	25	15.63
Sostenimiento Activo	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	75	140	60	150	25	15.63
Sostenimiento Pasivo	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	75	140	60	150	25	15.63
Perforacion	PERSONAL	OPERADOR	2	8	30	75	140	60	150	25	15.63
Voldura	PERSONAL	OPERADOR	3	8	30	75	140	60	150	25	15.63
Jefe de guardia	SUPERVISOR	INGENIERO	1	8	30	75	140	60	150	25	15.63
Seguridad	SUPERVISOR	INGENIERO	1	8	30	60	140	60	150	35	12.50
Geomecanica	SUPERVISOR	INGENIERO	1	8	30	60	140	60	150	35	12.50
Ventilacion	SUPERVISOR	INGENIERO	1	8	30	60	140	60	150	35	12.50

ANEXO 8: CÁLCULO DE TIEMPOS PARA LA PRODUCTIVIDAD DE LOS TRABAJADORES - ESCENARIO OPTIMIZADO 2022

EFICIENCIA DEL PERSONAL POR GUARDIA / 8 hrs											
ETAPA	Actividad	Cargo	Cantidad	Hrs. Planeados	Traslado (min)	Produccion (min)	Refugio (min)	Instalacion(min)	Ventilacion (min)	Tm. muertos (min)	Eficiencia(%)
Desate	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	215	70	60	90	15	44.79
Limpieza en Frente	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	215	70	60	90	15	44.79
	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	215	70	60	90	15	44.79
Acarreo en Frente	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	215	70	60	90	15	44.79
Sostenimiento Activo	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	215	70	60	90	15	44.79
Sostenimiento Pasivo	PERSONAL	OPERADOR	1	8	30	215	70	60	90	15	44.79
Perforacion	PERSONAL	OPERADOR	2	8	30	215	70	60	90	15	44.79
Voldura	PERSONAL	OPERADOR	3	8	30	215	70	60	90	15	44.79
Jefe de guardia	SUPERVISOR	INGENIERO	1	8	30	215	70	60	90	15	44.79
Seguridad	SUPERVISOR	INGENIERO	1	8	30	215	70	60	90	25	44.79
Geomecanica	SUPERVISOR	INGENIERO	1	8	30	215	70	60	90	25	44.79
Ventilacion	SUPERVISOR	INGENIERO	1	8	30	215	70	60	90	25	44.79