



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

División de Ingenierías

Campus Guanajuato

**Departamento de Ingeniería en Minas,
Metalurgia y Geología**

**Estudio del tiempo adecuado de ventilación para un
sistema mono extractivo colocado en el frente de una
obra subterránea.**

TESIS

Que para obtener el grado de licenciatura en:

Ingeniero de Minas

PRESENTA:

Yolanda Guadalupe Zamarripa Perez.

ASESORES:

Dr. Juan Carlos Baltazar Vera.

M. C. Roberto Ontiveros Ibarra.

Guanajuato, Gto., diciembre 2020.

Declaratoria

Por medio de la presente me responsabilizo de la autenticidad y originalidad del presente trabajo titulado:

“Estudio del tiempo adecuado de ventilación para un sistema mono extractivo colocado en el frente de una obra subterránea”.

Dr. Juan Carlos Baltazar Vera.

Director

M. C. Roberto Ontiveros Ibarra.

Co-Director

Guanajuato, Gto., diciembre 2020

Miembros de Comité Tutorial

Miembros del Jurado del examen de grado que para obtener el título de Ingeniero de Minas presenta Yolanda Guadalupe Zamarripa Perez, con el trabajo titulado:

“Estudio del tiempo adecuado de ventilación para un sistema mono extractivo colocado en el frente de una obra subterránea”.

Dra. Carolina de Jesús Rodríguez Rodríguez.

C.Dr. Víctor Manuel Quezada Aguilera.

Dr. Joel Everardo Valtierra Olivares.

Guanajuato, Gto., diciembre 2020

Agradecimiento

Agradezco el apoyo de mi director de tesis el Dr. Juan Carlos Baltazar Vera, quien coordinó y con sus conocimientos me guió en cada una de las etapas en la elaboración de este proyecto, así como a mi compañero Daniel Rodríguez Carmona por apoyarme en la utilización del programa para llevar a cabo las simulaciones.

También agradezco a mis profesores quienes me transmitieron sus conocimientos a lo largo de mi estancia en la universidad. Especialmente al Ing. Víctor Manuel Quezada Aguilar quien como mi tutor siempre me aconsejó y estuvo atento a mi avance académico.

Por último, quiero agradecer a mi familia por apoyarme en cada momento a pesar de la distancia. A mi hermana quien siempre me dio palabras de apoyo y un abrazo reconfortante cada vacaciones para renovar energías. En especial, quiero hacer mención de mis padres por su comprensión y confianza, por su sacrificio y por su ejemplo de superación.

Muchas gracias a todos.

Resumen

En la presente investigación se realizó el estudio de tiempo adecuado para ventilar una obra de desarrollo de mina subterránea. Extrayendo de ella el CO y CO₂ generados por los equipos de combustión, así como disminuir la temperatura y la humedad presentes en la misma.

Para lograr el objetivo, se realizaron los cálculos para la cantidad de flujo de aire necesaria para ventilar la obra, así como la pérdida de la presión en la tubería a utilizar. Se diseñó la obra minera en el programa Gambit con dimensiones de 7 m x 7 m, con una longitud de 150 m y se consideraron los siguientes componentes dentro de la obra:

- Manga de ventilación: inyecta aire fresco.
- Ducto de extracción: sustrae los gases nocivos.
- Tubería de combustión: simula la contaminación generada por el equipo.

Se seleccionó un extractor comercial, el cual se diseñó con el programa MixSim. Al tener la geometría de la obra y los componentes, en conjunto con el extractor se procedió a mallarlos en el programa Gambit, posteriormente se realizó la simulación de extracción en el programa Fluent.

Se realizó la simulación en dos partes: en la primera parte, las condiciones de frontera establecidas, estaban programadas para solo generar gases y contaminar el área de estos, por lo que la tubería de combustión estaba abierta mientras que la manga de ventilación y ducto de extracción permanecían cerradas; en la segunda parte las condiciones de frontera se programaron para generar gases y a su vez extraerlos, la tubería de combustión permaneció abierta y se procedió a abrir el ducto de extracción y la manga de ventilación.

El presente trabajo se enfocó en la segunda simulación, ya que ésta arroja el tiempo necesario de extracción de gases, para que se tengan las condiciones adecuadas establecidas por las normas NOM-015-STPS- 1999 y NOM-121-STPS-1996, para que el trabajador pueda realizar la labor asignada.

Con los resultados obtenidos, se tiene un tiempo adecuado de extracción de gases nocivos, esto permitirá ahorrar tiempos y generar mejores condiciones de trabajo para los empleados.

Índice

Declaratoria	2
Miembros de Comité Tutorial	3
Agradecimiento	4
Resumen	5
Abstract	16
Introducción	17
Hipótesis	19
Objetivo general	19
Objetivos particulares	19
CAPITULO I	20
MARCO TEÓRICO	20
1.1 Minería	20
1.2 Generalidades de la minería a cielo abierto y subterránea	20
1.2.1 Minería a cielo abierto	21
1.2.2 Minería subterránea	23
1.3 Operaciones unitarias en minería subterránea	27
1.3.1 Prospección	27
1.3.2 Exploración	27
1.3.3 Desarrollo	28
1.3.4 Preparación	29
1.3.5 Explotación y extracción	30
1.3.6 Transporte y/o manipulación de minerales	31
1.4 Ventilación	31
1.5 Tipos de ventilación	32
1.5.1 Ventilación natural	32
1.5.2 Ventilación secundaria o auxiliar	32
1.6 Características (composición) del aire	35
1.6.1. Composición del aire.	35
1.6.2 Propiedades del aire	36
1.7 Contaminación del aire en subterránea	36
1.7.1 Contaminante	37
1.7.2 Gases generados por el macizo rocoso	37
1.7.3 Gases generados por combustión y voladura	39

1.8 Control de gases subterráneos	42
1.8.1 Control de gases de los estratos	44
1.8.2 Control de gases de voladura	44
1.8.3 Control de gases de combustión	45
1.8.4 Control de incendios y explosiones	46
1.8.5 Control de gas de la batería	46
1.9 Temperatura y humedad	46
1.9.1 Factores que influyen en la temperatura y humedad	47
1.9.2 Medición e instrumentos de medición	50
1.9.3. Normas en relación a temperatura y humedad.	51
1.10 Normatividades de ventilación de diversos países para obras subterráneas	57
1.10.1 Mexicana	58
1.10.2 Peruana	58
1.10.3 Chilena	59
1.10.4 Americana	60
1.11 Comparativa de las normatividades	60
1.11.1 Comparativa con respecto al volumen de aire requerido en las minas	60
1.11.2 Comparativa con respecto a las velocidades de aire requerido en las minas	61
1.12 Criterios para el requerimiento de aire propuesto por Quevedo	62
1.12.1 Definición de caudales	62
1.12.2 Perdidas de carga de la instalación	64
1.12.3 Factor de fugas de una tubería	66
1.12.4 Potencia instalada	67
1.13 Dinámica de los fluidos computacionales CFD	68
1.13.1 Fluent	68
1.13.2 Gambit	69
CAPITULO II	70
METODOLOGÍA	70
2.1 Requerimiento de aire necesario para la ventilación	70
2.1.1 Requerimiento de aire por personal en interior mina	70
2.1.2 Requerimiento de aire por equipos diésel de combustión interna	72
2.1.3 Requerimiento de aire final	73
2.1.4 Requerimiento del aire generado por el ventilador axial	73
2.1.5 Perdidas de carga de la instalación	76
2.2 Diseño del extractor	82
2.3 Geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea	83
2.4 Mallado de la geometría de la obra de desarrollo en la mina subterránea	84
2.5 Simulación de ventilación en la obra de desarrollo de la mina	85

2.5.1 Contaminación de la zona por gases nocivos	86
2.5.2 Extracción de gases nocivos	88
CAPITULO III	90
RESULTADOS	90
3.1 Monóxido de carbono	90
3.1.1 Obra llena de gases nocivos	91
3.1.2 Simulación 10 segundos	92
3.1.3 Simulación 20 segundos	93
3.1.4 Simulación 40 segundos	95
3.1.5 Simulación 80 segundos	96
3.1.6 Simulación 160 segundos	97
3.1.7 Simulación 320 segundos	99
3.1.8 Simulación 640 segundos	100
3.1.9 Conclusión del monóxido de carbono	101
3.2 Dióxido de carbono	101
3.2.1 Obra llena de gases nocivos	102
3.2.2 Simulación 10 segundos	103
3.2.3 Simulación 20 segundos	104
3.2.4 Simulación 40 segundos	105
3.2.5 Simulación 80 segundos	107
3.2.6 Simulación 160 segundos	108
3.2.7 Simulación 320 segundos	109
3.2.8 Simulación 640 segundos	111
3.2.9 Simulación 970 segundos	112
3.2.10 Simulación 1300 segundos	114
3.2.11 Conclusión del dióxido de carbono	115
3.3 Temperatura	115
3.3.1 Obra llena de gases nocivos	115
3.3.2 Simulación 10 segundos	117
3.3.3 Simulación 20 segundos	118
3.3.4 Simulación 40 segundos	119
3.3.5 Simulación 80 segundos	120
3.3.6 Simulación 160 segundos	121
3.3.7 Simulación 320 segundos	122
3.3.8 Simulación 640 segundos	123
3.3.9 Simulación 970 segundos	124
3.3.10 Simulación 1300 segundos	125
3.4 Humedad	126
3.4.1 Obra llena de gases nocivos	126
3.4.2 Simulación 10 segundos	127
3.4.3 Simulación 20 segundos	128

3.4.4 Simulación 40 segundos	129
3.4.5 Simulación 80 segundos	130
3.4.6 Simulación 160 segundos	131
3.4.7 Simulación 320 segundos	132
3.4.8 Simulación 640 segundos	133
3.4.9 Simulación 970 segundos	134
3.4.10 Simulación 1300 segundos	135
3.4.11 Conclusión de humedad	136
Conclusiones	137
Trabajo futuro	138
Bibliografía	139

Índice de figuras

Figura 1- . Explotación en superficie. Herbert (2006).	22
Figura 2- . Diseño de minería a cielo abierto. Herbert (2006).	23
Figura 3- . Sistema de cuartos y pilares. Vega (s.f.)	24
Figura 4- . Sistema de corte y relleno. Vega (s.f.)	25
Figura 5- . Sistema de hundimiento por subniveles. Vega (s.f.)	26
Figura 6- . Etapa de desarrollo. Vega (s.f.)	28
Figura 7- . Etapa de preparación. Vega (2006).	29
Figura 8- . Etapa de extracción. Vega (s.f.)	30
Figura 9- . Sistemas de ventilación soplante para una obra de desarrollo de mina subterránea. Mejía (2018).	34
Figura 10- . Sistemas de ventilación aspirante para una obra de desarrollo de mina subterránea. Mejía (2018).	34
Figura 11- . Sistemas de ventilación (mixto) para una obra de desarrollo de mina subterránea. Mejía (2018).	35
Figura 12- . Psicrómetro. Hartman (1997).	50
Figura 13- . Carta psicrométrica. Hartman (1997)	51
Figura 14- . Extractor propuesto.	83
Figura 15- . Geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea sin mallar.	84
Figura 16- . Geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea mallada.	85
Figura 17- . Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO).	91
Figura 18- . Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO).	91
Figura 19- . Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 10 segundos de simulación.	92
Figura 20- . Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 10 segundos de simulación.	93
Figura 21- . Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 20 segundos de simulación.	94
Figura 22- . Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 20 segundos de simulación.	94
Figura 23- . Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 40 segundos de simulación.	95
Figura 24- . Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 40 segundos de simulación.	96
Figura 25- . Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 80 segundos de simulación.	96
Figura 26- . Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 80 segundos de simulación.	97
Figura 27- . Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 160 segundos de simulación.	98

Figura 28- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 160 segundos de simulación.	98
Figura 29- Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 320 segundos de simulación.	99
Figura 30- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 320 segundos de simulación.	100
Figura 31- Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 640 segundos de simulación.	100
Figura 32- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 640 segundos de simulación.	101
Figura 33- Perfil de concentración de dióxido de carbono (CO ₂).	102
Figura 34- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO ₂).	102
Figura 35- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO ₂) a los 10 segundos de simulación.	103
Figura 36- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO ₂) a los 10 segundos de simulación.	104
Figura 37- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO ₂) a los 20 segundos de simulación.	104
Figura 38- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO ₂) a los 20 segundos de simulación.	105
Figura 39- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO ₂) a los 40 segundos de simulación.	106
Figura 40- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO ₂) a los 40 segundos de simulación.	106
Figura 41- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO ₂) a los 80 segundos de simulación.	107
Figura 42- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO ₂) a los 80 segundos de simulación.	107
Figura 43- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO ₂) a los 160 segundos de simulación.	108
Figura 44- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO ₂) a los 160 segundos de simulación.	109
Figura 45- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO ₂) a los 320 segundos de simulación.	110
Figura 46- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO ₂) a los 320 segundos de simulación.	110
Figura 47- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO ₂) a los 640 segundos de simulación.	111
Figura 48- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO ₂) a los 640 segundos de simulación.	112
Figura 49- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO ₂) a los 970 segundos de simulación.	113

Figura 50- . Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO ₂) a los 970 segundos de simulación. _____	113
Figura 51- . Perfil de concentración dióxido de carbono (CO ₂) a los 1300 segundos de simulación. _____	114
Figura 52- . Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO ₂) a los 1300 segundos de simulación. _____	115
Figura 53- . Perfil de temperatura. _____	116
Figura 54- . Contorno de temperatura. _____	116
Figura 55- . Perfil de temperatura a los 10 segundos de simulación. _____	117
Figura 56- . Contorno de temperatura a los 10 segundos de simulación. _____	117
Figura 57- . Perfil de temperatura a los 20 segundos de simulación. _____	118
Figura 58- . Contorno de temperatura a los 20 segundos de simulación. _____	118
Figura 59- . Perfil de temperatura a los 40 segundos de simulación. _____	119
Figura 60- . Contorno de temperatura a los 40 segundos de simulación. _____	119
Figura 61- . Perfil de temperatura a los 80 segundos de simulación. _____	120
Figura 62- . Contorno de temperatura a los 80 segundos de simulación. _____	120
Figura 63- . Perfil de temperatura a los 160 segundos de simulación. _____	121
Figura 64- . Contorno de temperatura a los 160 segundos de simulación. _____	121
Figura 65- . Perfil de temperatura a los 320 segundos de simulación. _____	122
Figura 66- . Contorno de temperatura a los 320 segundos de simulación. _____	122
Figura 67- . Perfil de temperatura a los 640 segundos de simulación. _____	123
Figura 68- . Contorno de temperatura a los 640 segundos de simulación. _____	123
Figura 69- . Perfil de temperatura a los 970 segundos de simulación. _____	124
Figura 70- . Contorno de temperatura a los 970 segundos de simulación. _____	124
Figura 71- . Perfil de temperatura a los 1300 segundos de simulación. _____	125
Figura 72- . Contorno de temperatura a los 1300 segundos de simulación. _____	125
Figura 73- . Perfil de porcentaje de humedad. _____	126
Figura 74- . Contorno de porcentaje de humedad. _____	126
Figura 75- . Perfil de porcentaje de humedad a los 10 segundos de simulación. _____	127
Figura 76- . Contorno de porcentaje de humedad a los 10 segundos de simulación. _____	127
Figura 77- . Perfil de porcentaje de humedad a los 20 segundos de simulación. _____	128
Figura 78- . Contorno de porcentaje de humedad a los 20 segundos de simulación. _____	128
Figura 79- . Perfil de porcentaje de humedad a los 40 segundos de simulación. _____	129
Figura 80- . Contorno de porcentaje de humedad a los 40 segundos de simulación. _____	129
Figura 81- . Perfil de porcentaje de humedad a los 80 segundos de simulación. _____	130
Figura 82- . Contorno de porcentaje de humedad a los 80 segundos de simulación. _____	130
Figura 83- . Perfil de porcentaje de humedad a los 160 segundos de simulación. _____	131
Figura 84- . Contorno de porcentaje de humedad a los 160 segundos de simulación. _____	131
Figura 85- . Perfil de porcentaje de humedad a los 320 segundos de simulación. _____	132
Figura 86- . Contorno de porcentaje de humedad a los 320 segundos de simulación. _____	132
Figura 87- . Perfil de porcentaje de humedad a los 640 segundos de simulación. _____	133
Figura 88- . Contorno de porcentaje de humedad a los 640 segundos de simulación. _____	133
Figura 89- . Perfil de porcentaje de humedad a los 970 segundos de simulación. _____	134

Figura 90- Contorno de porcentaje de humedad a los 970 segundos de simulación. _____ 134
Figura 91- Perfil de porcentaje de humedad a los 1300 segundos de simulación. _____ 135
Figura 92- Contorno de porcentaje de humedad a los 1300 segundos de simulación. _____ 135

Índice de tablas.

Tabla 1-	Clasificación mecánica de equipos de ventilación usados en minas.	33
Tabla 2-	Límites máximos de exposición a condiciones térmicas elevadas.	52
Tabla 3-	Definición de régimen de trabajo según la actividad.	53
Tabla 4-	Límites máximos permisibles de exposición a condiciones térmicas abatidas.	55
Tabla 5-	Tiempo de permanencia según la temperatura efectiva.	57
Tabla 6-	Velocidad necesaria para un ambiente ventilado.	63
Tabla 7-	Consideraciones para el cálculo de longitud equivalente.	74
Tabla 8-	Presión máxima de trabajo para ductos de ventilación.	75
Tabla 9-	Coefficiente de pérdidas en tuberías de codos.	80
Tabla 10-	Especificaciones técnicas del extractor.	82
Tabla 11-	Datos para el mallado de las estructuras de la mina.	84
Tabla 12-	Condiciones de frontera para contaminar la zona.	87
Tabla 13-	Condiciones de frontera para la extracción de gases nocivos.	88

Abstract

In the present investigation, the study of the adequate time to ventilate an underground mine development project was carried out. Extracting from it the CO and CO₂ generated by the combustion equipment, as well as reducing the temperature and humidity present in it.

To achieve the objective, calculations are made for the amount of air flow necessary to ventilate the work, as well as the loss of pressure in the pipe to be used. The mining work was designed in the Gambit program with dimensions of 7 m x 7 m, with a length of 150 m and the following components are considered within the work:

- Ventilation sleeve: injects fresh air.
- Extraction duct: subtracts harmful gases.
- Combustion piping: simulates the pollution generated by the equipment.

A commercial extractor was selected, which was designed with MixSim program. Having the geometry of the work and components in conjunction with the extractor, they were meshed in the Gambit program, then the extraction simulation was performed in the Fluent program.

The simulation was carried out in two parts: in the first part, the established boundary conditions were programmed to generate gases and contaminate their area, so our combustion pipeline was open while the ventilation and extraction ducts remained closed; in the second part, the border conditions were programmed to generate gases and in turn extract them, the combustion pipeline stayed open, and then the extraction duct and the ventilation sleeve will be opened.

The second simulation is the one we focus on, since this gives us the necessary time for gas extraction, so that they have the appropriate conditions established by the NOM-015-STPS-1999 and NOM-121-STPS-1996, for the worker can carry out the assigned work.

With the results obtained, we have an adequate time for the extraction of harmful gases, allowing us to save time and generate better working conditions for workers.

Introducción

La minería es una de las actividades más antiguas de la humanidad, la cual, para llevarse a cabo, se realiza básicamente por dos métodos: minería a cielo abierto y minería subterránea. El tipo de método se selecciona según ciertos criterios en los que las características del yacimiento es una de las más importantes para que su explotación sea provechosa económicamente.

Dentro del método de minería subterránea encontramos que existen diversos sistemas de explotación, y estos son utilizados dependiendo de la geometría del yacimiento. Sin embargo, en todo sistema o método subterráneo, es necesario considerar que se necesita aire fresco para que los trabajadores puedan realizar las actividades asignadas y es por eso que el área de ventilación es esencial.

La ventilación es la operación encargada de llevar aire fresco a cualquier parte de la mina para asegurar el contenido de oxígeno en la atmósfera el cual no solo permite la respiración de la persona, sino el funcionamiento de los equipos subterráneos. Es importante conocer que la ventilación no solo es necesaria para obtener oxígeno, sino que también es necesaria para controlar la temperatura y humedad.

Dentro de ventilación existen dos sistemas: natural y auxiliar (artificial o mecánico). En el sistema natural no se utiliza ningún tipo de ventilador o extractor, sin embargo, en el sistema de ventilación auxiliar si se utilizan, ayudados de ductos para direccionar el aire. Siendo el sistema auxiliar el que nos garantiza mejores condiciones de trabajo. Éste a su vez se divide en 3 tipos: soplante, aspirante y mixto. El tercero combina las ventajas de los otros dos.

En cualquier sistema de ventilación la calidad del aire está regulada por normas, leyes y reglamentos mineros que se aplican a nivel nacional. Estas normas especifican la cantidad de aire necesaria para el personal, la velocidad mínima requerida, temperatura y humedad, concentración de gases permitida dentro de los límites de exposición ocupacional, entre otras.

Cuando una mina está en operación los cambios en ella son constantes, por lo tanto, los sistemas de ventilación también deberán estar en constante cambio. Diseñar un circuito de ventilación es complejo, sin embargo, en la actualidad existen distintos programas que ayudan

a que su diseño sea más rápido y a que pueda ser modificado en cualquier momento de manera rápida.

Hipótesis

Aplicando un sistema de ventilación mono extractivo en el programa Fluent se encontrará el tiempo adecuado de extracción que disminuya la concentración de CO y CO₂, así como mejorar la temperatura y humedad de la obra tomando en cuenta los parámetros indicados en las normas.

Objetivo general

Determinar el tiempo que permita tener las condiciones adecuadas para que los trabajadores desarrollen las actividades que les fueron asignadas sin poner en riesgo su salud, contando con un flujo constante de aire limpio.

Objetivos particulares

1. Calcular la cantidad de flujo de aire necesario para la ventilación de la obra de desarrollo.
2. Diseñar la obra y sus componentes utilizando el programa Gambit.
3. Seleccionar el extractor y agregarlo a la obra.
4. Mallar la geometría y sus componentes en conjunto con el extractor en el programa Gambit.
5. Realizar las simulaciones de extracción durante distintos tiempos para encontrar el que permita tener las mejores condiciones.
6. Determinar el tiempo adecuado de extracción de CO y CO₂.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Minería

La minería es un conjunto de actividades que tiene que ver con el descubrimiento y la explotación de yacimientos minerales, esta se lleva a cabo para obtener los recursos acumulados en el suelo y subsuelo. La minería también se relaciona con los trabajos encaminados a la extracción y al tratamiento de una mena.

La minería es una de las actividades más antiguas de la humanidad. Casi desde el principio de la edad de piedra, hace 2.5 millones de años o más, viene siendo la principal fuente de materiales para la fabricación de herramientas. Se puede decir que la minería surgió, cuando los predecesores del homo sapiens empezaron a recuperar determinados tipos de rocas para tallarlas y fabricar herramientas (Ministerio de minas, 2003).

A medida que se agotaban los yacimientos ubicados más cerca de la superficie, las excavaciones se hacían más profundas, hasta que empezó la minería subterránea. La minería de superficie se remonta a épocas mucho más antiguas que la agricultura (Ministerio de minas, 2003).

1.2 Generalidades de la minería a cielo abierto y subterránea

Son varios y diferentes los métodos utilizados en la explotación minera. Los métodos que pueden ser aplicados a un yacimiento de mineral dado están, sin embargo, restringidos

normalmente a un número comparativamente limitado y determinado en función de factores tales como el tamaño, la forma, la dirección, la inclinación y otras características del yacimiento. En principio el método deberá ser seleccionado y será aquel que, a la larga, pueda ofrecer la explotación más provechosa y económica de la capa o del filón en cuestión (Serra, 2003).

Mediante la ingeniería de minas se pueden planear y diseñar las minas, teniendo en cuenta el factor humano y los factores geológicos, técnicos y económicos. Otra parte que se puede abarcar con la ingeniería es la supervisión de la extracción y en algunas ocasiones el refinamiento preliminar del material que será enviado a la planta de beneficio.

Existen dos formas de llevar a cabo la explotación de los minerales. Cuando las actividades y operaciones mineras se desarrollan en superficie se le llamara minería a cielo abierto, mientras que si son llevadas bajo la superficie se designara como minería subterránea.

Si bien las minas de roca dura de superficie aplican el método de tajo abierto a casi cualquier configuración de mineral, además se han desarrollado un gran número de métodos de minería subterránea principalmente en respuesta a los requisitos de geometría diferente y a las propiedades geomecánicas de la roca huésped y la roca circundante (Vergne, 2014).

1.2.1 Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto es una explotación en superficie que se extrae en franjas horizontales llamados bancos, en forma descendente a partir del banco que está en la superficie (Ver Figura 1). Normalmente para la remoción de un banco de mineral es necesario extraer el material estéril que lo cubre, lo que se llama descapote y expresa una relación de tonelaje de descapote a mineral, esta relación es totalmente variable entre las minas ya que dependen netamente de la posición y tipo de yacimiento, que es totalmente variable (Estudios Mineros de Perú, s.f.).

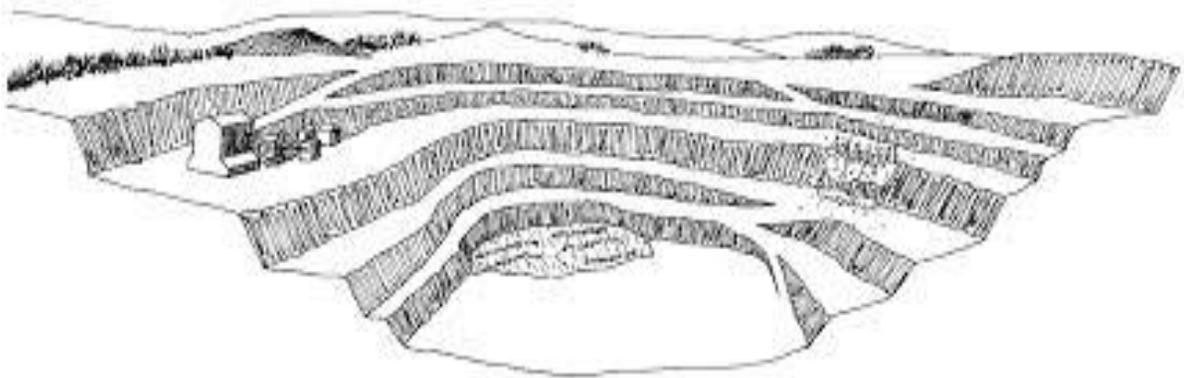


Figura 1- Explotación en superficie. Herbert (2006).

Este tipo de explotación es de gran volumen y se aplica en yacimientos masivos de gran tamaño, cerca de la superficie, puesto que a mayor profundidad aumentará la cantidad de material estéril a remover (relación de descapote) aumentando en consecuencia el costo de producción. Un parámetro que adquiere singular importancia, es la proporción que representa el mineral sobre el total (en volumen o en toneladas métricas), y que determina si la mina a cielo abierto es o no viable económicamente (Estudios Mineros de Perú, s.f.).

El diseño de este método comienza con el proyecto básico del tajo abierto (Ver Figura 2). Esto incluye bancos profundos en intervalos hasta el diseño final. Con el tajo establecido, se planifica la infraestructura, incluidos los caminos, las reservas, los tiraderos, el embalse de jales, los corredores de servicios públicos y el diseño de la planta de superficie (Vergne, 2014).

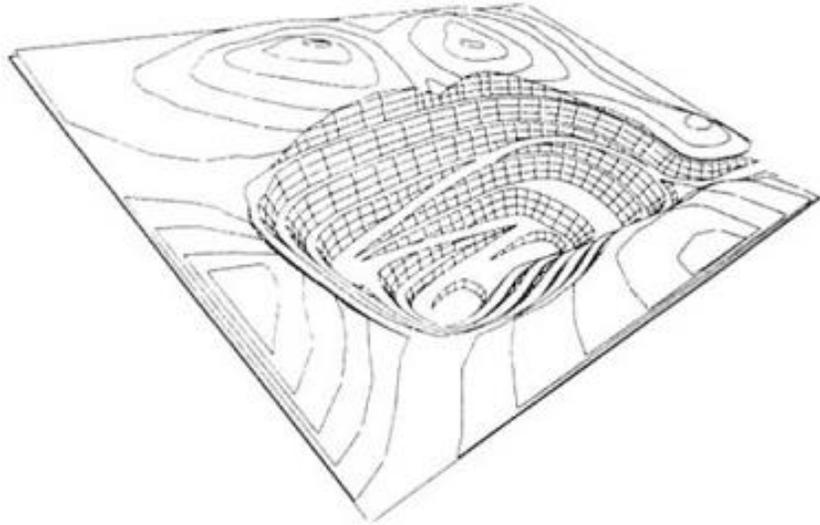


Figura 2- Diseño de minería a cielo abierto. Herbert (2006).

Las actividades o procesos que comprende este método de explotación podemos clasificarlas en: exploración y desarrollo, perforación y disparos, cargado y acarreo (Estudios Mineros de Perú, s.f.).

1.2.2 Minería subterránea

La minería subterránea es aquella que se lleva a cabo bajo tierra, esta puede encontrarse desde unos pocos metros hasta varios kilómetros por debajo de la superficie, haciendo que cada mina sea un caso específico y particular. Sin embargo, existen distintos métodos de explotación que se utilizan de acuerdo a los diferentes tipos de yacimientos.

El método de explotación subterránea, es utilizado cuando las zonas mineralizadas (vetas o cuerpos de mineral económico) son angostas y profundas, por lo que según las evaluaciones técnicas y económicas justifica la apertura de obras subterráneas para posibilitar su extracción. Las actividades o procesos que comprende este método de explotación son: exploración, desarrollo, preparación, explotación, extracción, transporte y manipulación de minerales (Estudios Mineros de Perú, s.f.).

Los diversos métodos de minería subterránea son difíciles de clasificar racionalmente porque cada aplicación depende no solo de la geometría del yacimiento, sino que incluye otras

consideraciones, como las condiciones del terreno, la distribución de pendientes, así como la presencia de estructuras como bóvedas, diques, etcétera (Vergne, 2014).

1.2.2.1 Sistema de explotación subterránea

a) Sistemas con sostenimiento natural: son aquellos sistemas de explotación, que, al terminar de minar el cuerpo, y por consecuencia dejando un hueco entre la roca circundante (encajonante), este se mantiene estable por sí solo. También un sostenimiento natural es, el dejar partes del cuerpo mineral sin minar creando un efecto de pilar, que sostiene el alto y el bajo (Vega, s.f.).

1. Cuartos y pilares (Ver Figura 3).
2. Tumba por subniveles.
3. Barrenación larga.
4. Craterización vertical en retirada.

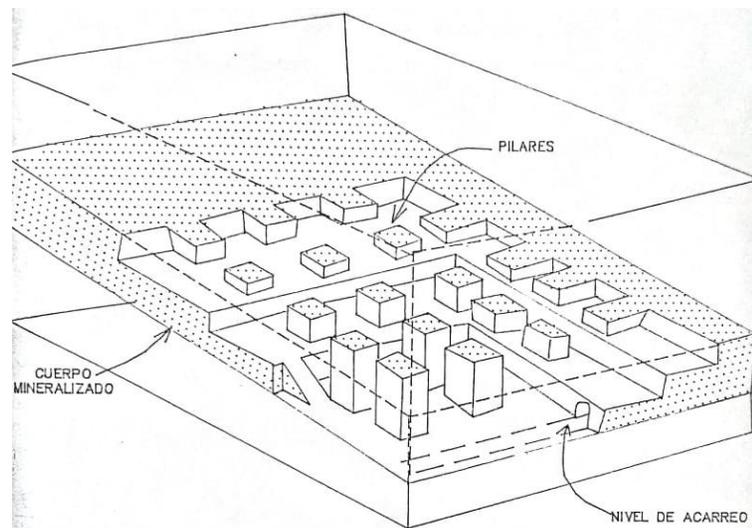


Figura 3- Sistema de cuartos y pilares. Vega (s.f.).

b) Sistemas con sostenimiento artificial: son aquellos sistemas de explotación, que necesitan un sostenimiento extra, debido a una muy baja estabilidad de la roca encajonante, y en casos, también de la misma estructura localizada, es este un sostenimiento extra, el cual el hombre se encarga de crearlo, y este puede ser desde madera hasta un relleno hidráulico (Vega, s.f.).

1. Tumba sobre carga.
2. Corte y relleno (Ver Figura 4).
3. Frentes largos.

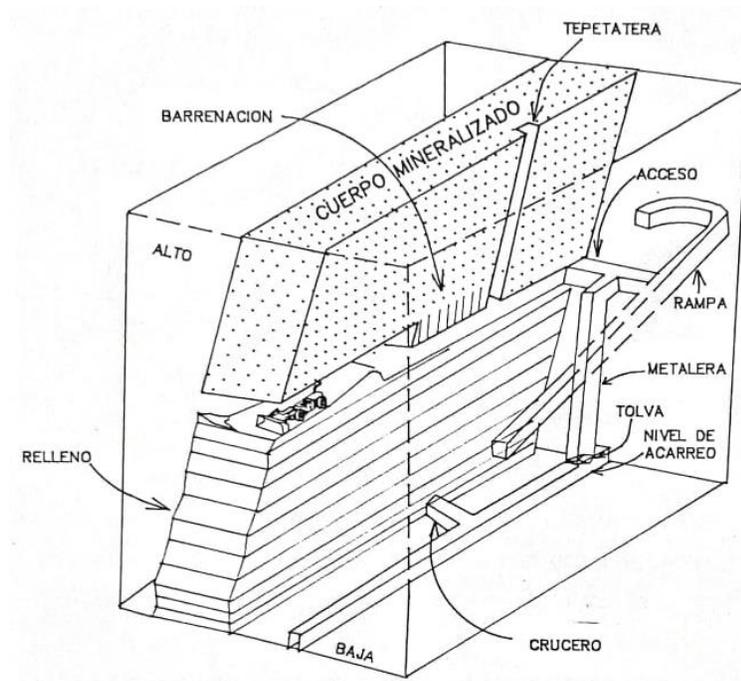


Figura 4- Sistema de corte y relleno. Vega (s.f.).

c) Sistemas de hundimiento: estos sistemas utilizan una característica especificada de la estructura mineralizada (roca huésped) y de la roca encajonante, en la cual, si se quita el sostenimiento inferior, la roca superior colapsará, esto se aprovechará para provocar su fracturamiento y posteriormente ser cargado y extraído. En la actualidad esta característica débil de terreno se provoca con barrenación y detonaciones de grandes volúmenes de roca en la base de cuerpo, causando así un colapso artificial (Vega, s.f.).

1. Hundimiento por bloques.
2. Hundimiento por subniveles (Ver Figura 5).

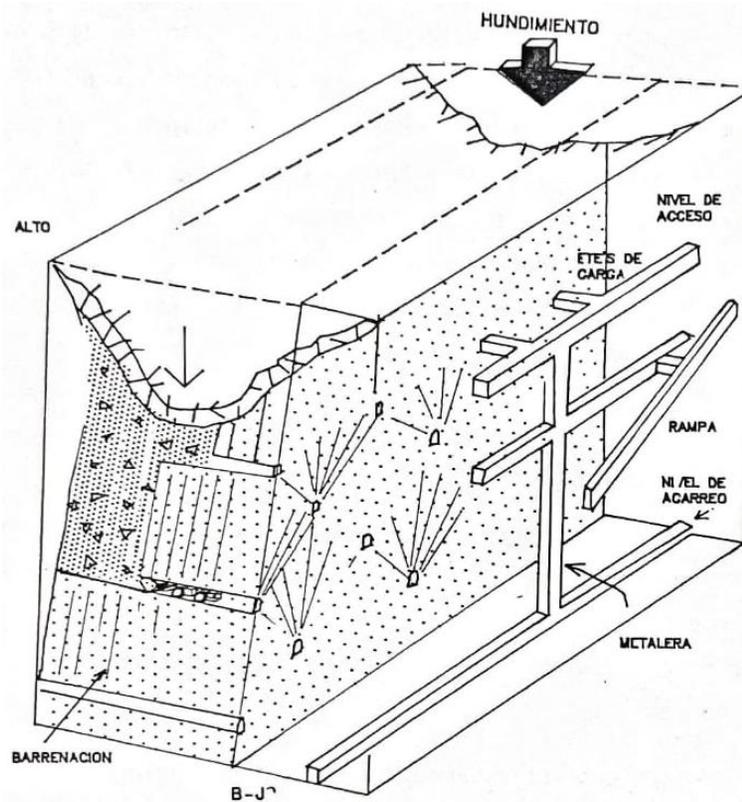


Figura 5-. Sistema de hundimiento por subniveles. Vega (s.f).

La planificación de una mina subterránea comienza con la localización y dimensionamiento de la preproducción. La planificación inicial incluye la determinación de intervalos de nivel, vías de transporte, acceso primario entre otras entradas principales.

El diseño de las entradas principales requiere considerar los requisitos para el manejo de minerales, manejo de rocas residuales, circuito primario de ventilación, relleno, transferencia, manejo de materiales, acceso para personal, estaciones de refugio y rutas de escape.

Una vez que se establece el concepto de mina subterránea, la infraestructura de superficie es diseñada, incluidos los accesos, tiraderos, el depósito de jales, las instalaciones de mantenimiento, el almacenamiento de explosivos y el diseño de la planta de superficie (Vergne, 2014).

1.3 Operaciones unitarias en minería subterránea

El método de minado subterráneo generalmente se aplica para determinados tipos de depósitos minerales, como vetas y mantos angostos, o también cuando depósitos tipo cuerpos o masivos se encuentran en profundidad, de tal manera que extraerlos de forma superficial pueda resultar más costoso. El minado subterráneo ha sido hasta hace algunos años el método de explotación más usado (Estudios Mineros de Perú, s.f.).

1.3.1 Prospección

En esta etapa se llevan a cabo un conjunto de estudios a desarrollarse para definir y localizar un yacimiento mineral, que por lo general se lleva a cabo por medios indirectos (Vega, s.f.).

La prospección es el reconocimiento o exploración superficial de una zona, dirigida a determinar áreas de posible mineralización (objetivos o áreas anómalas), por medio de indicaciones químicas y físicas medidas con instrumentos y técnicas de precisión (Ministerio de minas, 2003).

1.3.2 Exploración

La exploración minera es una actividad minera tendiente a demostrar las dimensiones, posición, características mineralógicas, reservas y valores de los yacimientos minerales (Estudios Mineros de Perú, s.f.).

La exploración es la búsqueda de depósitos minerales mediante labores realizadas para proporcionar o establecer presencia, cantidad y calidad de un depósito mineral en un área específica. La exploración regional es la etapa primaria de un proyecto de exploración encaminada a la delimitación inicial de un depósito mineral, su objetivo es establecer las principales características geológicas del depósito y proporcionar una indicación razonable de

su continuidad y una primera evaluación de sus dimensiones, su configuración, su estructura y su contenido; el grado de exactitud deberá ser suficiente para decidir si se justifican posteriores estudios de prefactibilidad minera y una exploración detallada. La exploración detallada comprende el conjunto de actividades geológicas destinadas a conocer tamaño, forma, posición, características mineralógicas, cantidad y calidad de los recursos o las reservas de un depósito mineral. La exploración incluye métodos geológicos, geofísicos y geoquímicos (Ministerio de minas, 2003).

1.3.3 Desarrollo

El desarrollo como se muestra en la Figura 6, es en sí, la obra minera que se genera para definir o llegar a una zona de mineralización específica dentro del cuerpo mineral (Vega, s.f.).

Una vez delineados los bloques de mineral, se realizan labores mineras para determinar el tonelaje y las leyes del mismo, es decir, clasificar en mena y ganga. Se construyen los accesos e instalaciones que hagan posible la explotación. En esta actividad se desarrollan las galerías, los cruceros, chimeneas de ventilación, rampas y conductos de ventilación, instalación de rieles para carros mineros e instalación de líneas de energía (Estudios Mineros de Perú, s.f.).

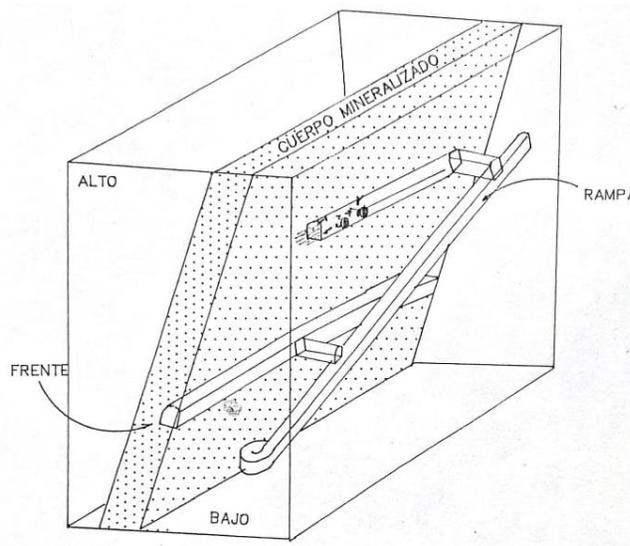


Figura 6-. Etapa de desarrollo. Vega (s.f.).

1.3.4 Preparación

Como se muestra en la Figura 7, corresponde a esta actividad, la preparación de las zonas o secciones de trabajo en la veta o bloques de mineral, para hacer posible su explotación generalmente se preparan tolvas, chimeneas de relleno y ventilación, entre otras labores (Estudios Mineros de Perú, s.f.).

Las obras de preparación son el total de obras minera horizontales y verticales, así como ampliaciones subterráneas que tienen la finalidad de hacer de la zona a explotarse adecuada para:

1. El acceso del personal.
2. El acceso de servicios (agua, aire comprimido, corriente eléctrica y equipo mecánico).
3. Ventilación.
4. La canalización del mineral tumbado.

(Vega, s.f.).

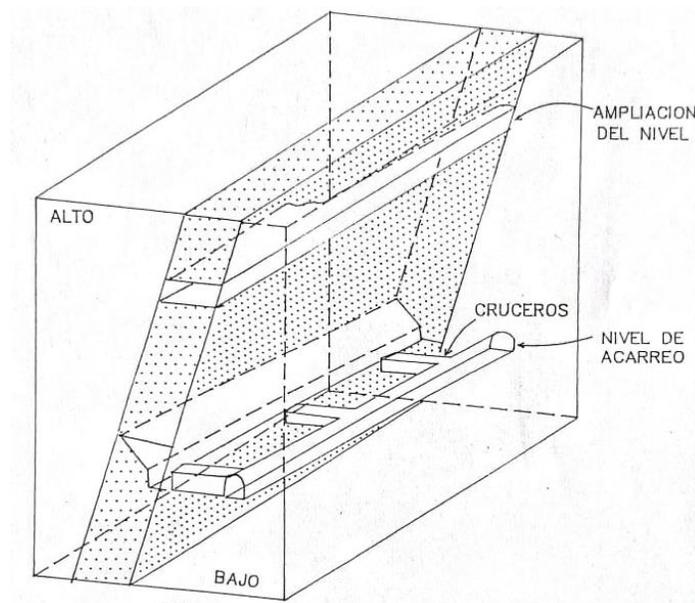


Figura 7- Etapa de preparación. Vega (2006).

1.3.5 Explotación y extracción

La explotación son las aplicaciones de un conjunto de técnicas y normas geológico mineras y ambientales, para extraer un mineral o depósito de carácter económico (Ministerio de minas, 2003).

Esta consiste en tumbar el mineral que se encuentra en su estado natural, el cual es sólido y compacto, que como resultado de este tumbe queda quebrado y abundado (Vega, s.f.).

En esta etapa se realiza la perforación y voladura del mineral en el interior de la mina. Durante esta etapa se llevan a cabo las siguientes operaciones (Ver Figura 8):

- Perforación del frente de trabajo con perforadoras manuales convencionales o mecanizadas.
- Voladura del frente de trabajo, puede ser eléctrica o convencional, etc.

(Estudios Mineros de Perú, s.f.).

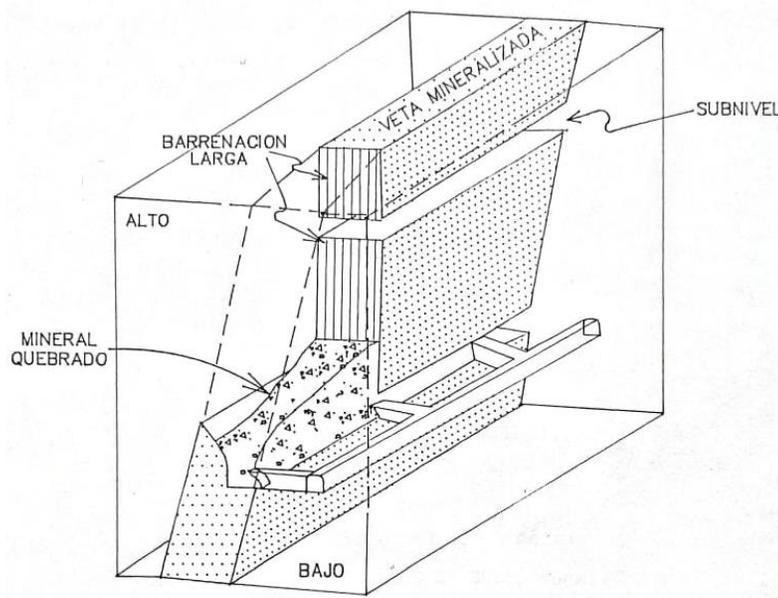


Figura 8- Etapa de extracción. Vega (s.f.).

1.3.6 Transporte y/o manipulación de minerales

Efectuada la voladura del mineral, tomando en cuenta las distintas condiciones presentes en la zona, el mineral se canaliza por diferentes medios a túneles para llevar a cabo la extracción al exterior de la mina.

Para ello, se acumula y se carga a los diferentes medios de transporte de los que se disponen. El transporte puede ser mediante carros mineros, camiones de bajo perfil u otro tipo de equipo que se disponga (Estudios Mineros de Perú, s.f.).

Posterior a ello, el mineral es llevado hacia la planta de beneficio para que este sea concentrado, y así, transportarlo a la fundición y ofrecerse al mercado.

1.4 Ventilación

La ventilación es la operación encargada de llevar aire fresco y limpio a los frentes de explotación y evacuar de ellos el aire viciado, por medio de recorridos definidos en las diferentes secciones de la mina (Ministerio de minas, 2003).

La ventilación en minas y túneles subterráneos es necesaria para asegurar un contenido mínimo de oxígeno en la atmósfera permitiendo no solo la respiración de las personas que trabajan en su interior si no también el funcionamiento de sus equipos, ya que en ella se desprenden diferentes tipos de gases según el tipo de roca y la maquinaria utilizada. Estos gases pueden ser tóxicos, asfixiantes y/o explosivos, por lo que es necesario diluirlos rápida y eficazmente (Quevedo, 2013).

A medida que aumenta la profundidad en la mina la temperatura aumenta. El gradiente geotérmico medio es de 1°C cada 33 m, adicionalmente los equipos y máquinas presentes en el interior contribuyen a elevar la temperatura del aire. En este caso la ventilación es necesaria también para la climatización de la mina (Quevedo, 2013).

1.5 Tipos de ventilación

1.5.1 Ventilación natural

La ventilación natural es un sistema de ventilación que se emplea en las minas subterráneas, principalmente las localizadas en montañas, que se consigue por diferencia de cota, sin utilizar ninguna clase de equipo mecánico o eléctrico como ventiladores y extractores (Ministerio de minas, 2003).

Para que funcione la ventilación natural tiene que existir una diferencia de altura entre las bocaminas de entrada y de salida. En realidad, más importante que la profundidad de la mina es el intercambio termodinámico que se produce entre la superficie y el interior. La energía térmica agregada al sistema se transforma a energía de presión, susceptible de producir un flujo de aire (el aire frío desplaza al aire caliente produciendo circulación) (Quevedo, 2013).

Si bien es importante mencionar que este tipo de ventilación es muy cambiante, esta depende totalmente de la época del año ya que la temperatura del aire cambia conforme al clima. En algunas ocasiones también se ve afectada dependiendo si es de día o de noche.

1.5.2 Ventilación secundaria o auxiliar

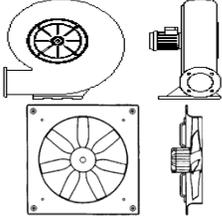
La ventilación secundaria es un sistema que, haciendo uso de ductos y ventiladores auxiliares, ventilan áreas restringidas para la entrada de aire, en las minas subterráneas; para ello se emplean los circuitos de alimentación de aire fresco y de evacuación del aire viciado (Ministerio de minas, 2003).

En las obras de ejecución de túneles, así como en las labores mineras que no son ventiladas por la corriente principal, es necesario una ventilación específica para asegurar que tenemos en el frente de trabajo el aire necesario para remover los gases emitidos por los vehículos y los generados por las voladuras, o, como en el caso de las minas de carbón donde el desprendimiento del metano del yacimiento en las obras puede provocar su acumulación. Es también necesario controlar el polvo y la temperatura (Quevedo, 2013).

Para este tipo de ventilación se necesitan ciertos elementos, principalmente un ventilador y un conducto (ducto rígido y/o manga). La manga de ventilación está formada por un tejido textil de poliéster revestido con PVC. El poliéster proporciona al conducto su resistencia mecánica. Se utilizan varios espesores de textil en función de las diferentes calidades de la tubería (Hartman, 1997).

En la Tabla 1, se mostrarán los equipos de ventilación utilizados en la minería.

Tabla 1- Clasificación mecánica de equipos de ventilación usados en minas.

Ventiladores	Centrifugo Flujo axial	Punta radial Curvado hacia delante Curvado hacia atrás Tubo axial Paleta axial	
Compresores	Centrifugo Flujo axial Desplazamiento positivo	Rotario Flujo axial	 <p>Compresor centrífugo</p>

FUENTE: Hartman (1997).

1.5.2.1 Tipos de sistemas de ventilación

a) Soplante.

El aire entra a través de la manga impulsado por un ventilador, y este, desplaza la masa de aire viciado hacia la corriente principal de aire, a través de la galería. Este es el sistema predominante usado en la mayoría de los túneles subterráneos y minas (Ver Figura 9).

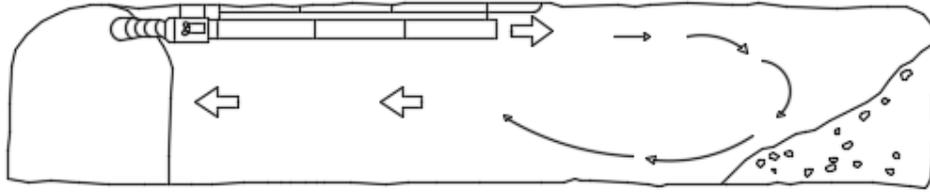


Figura 9.- Sistemas de ventilación soplante para una obra de desarrollo de mina subterránea. Mejía (2018).

La corriente de aire limpio que se genera en este sistema, a una velocidad relativamente alta, provoca al entrar en contacto con los gases que hay en el frente una mezcla turbulenta con lo que se elimina la potencial de acumulación o estratificación del gas en zonas próximas a la frente. La salida del conducto (manga) debe estar situada a una distancia adecuada del frente, de modo que la zona de barrido se extienda hasta este si la distancia es excesiva, se crea una zona muerta, en la que el aire no se renueva (Quevedo, 2013).

b) Aspirante.

En este método, el aire contaminado del frente es succionado a través del conducto (ducto rígido) debido a la depresión creada en esta por un ventilador situado en el otro extremo. Este es el aire evacuado en la corriente de ventilación principal. Procedente de la cual entra aire limpio a través de la galería (Ver Figura 10).

La boca de aspiración de la tubería debe situarse muy próxima a la frente, pero, aun así, debido a la distribución de las curvas de velocidades de aire en las zonas próximas a la aspiración, en este sistema no efectúa en general un buen barrido de frente, por lo que suele ser necesario el uso de la configuración denominada mixta (Quevedo, 2013).

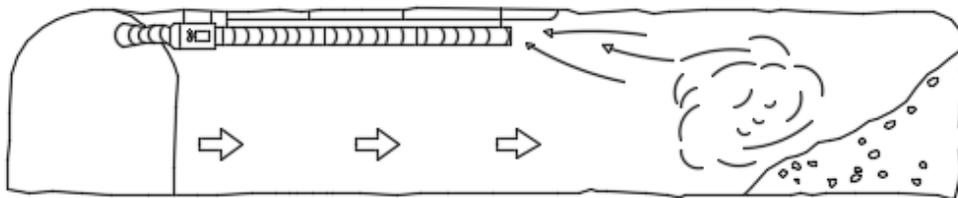


Figura 10.- Sistemas de ventilación aspirante para una obra de desarrollo de mina subterránea. Mejía (2018).

c) Mixto: Soplante con apoyo aspirante.

Forma parte de los sistemas mixtos. El sistema mixto, también llamado sistema soplado, utiliza un ventilador auxiliar de refuerzo, situado frente a la labor, y con un tramo de conducto de poca longitud. Estos sistemas combinan las ventajas de cada sistema, consiguiendo el mejor efecto de ventilación en situaciones concretas de minería (Quevedo, 2013).

d) Mixto: Aspirante con apoyo soplante.

Un aspirante con apoyo soplante tendrá el esquema opuesto (Ver Figura 11), y la función del ventilador auxiliar de refuerzo (soplante) es precisamente la de asegurar un buen barrido del frente, evitando la formación de zonas muertas sin ventilación adecuada (Quevedo, 2013).

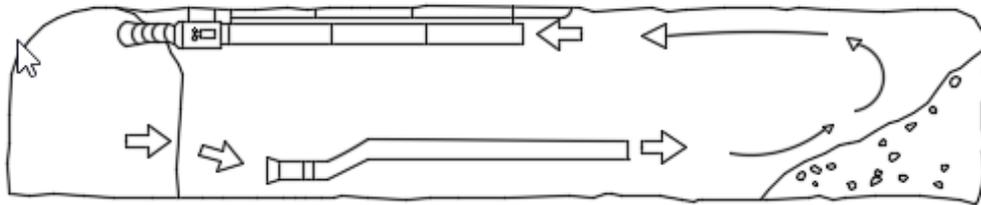


Figura 11- Sistemas de ventilación (mixto) para una obra de desarrollo de mina subterránea. Mejía (2018).

1.6 Características (composición) del aire

1.6.1. Composición del aire

El aire es una mezcla gaseosa, que existe como un vapor, que constituye la esfera de atmósfera natural en la superficie de la tierra. Termodinámicamente, puede considerarse como una mezcla mecánica de aire seco y vapor de agua, cuyo comportamiento se complica por los cambios de estado en el vapor de agua (Hartman, 1997).

La composición química del aire seco al nivel del mar nos muestra que este se constituye de; Nitrógeno con 78.09 % de volumen y 75.55% de peso, Oxígeno con 20.95% de volumen y 23.13% de peso, Dióxido de Carbono con 0.03% de volumen y 0.05% de peso, otros gases raros

con 0.93 de volumen y 1.27% de peso. Sin embargo, para cálculos que involucran al aire se simplifica y solo se toma su composición aproximada que se refiere a 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno y gases inertes (Bolz & Tuve, 1973).

Debe tenerse presente que el aire seco no existe en atmósferas normales. El aire normal es aire húmedo, con contenidos de vapor de agua que varían de 0.1% a 4% en volumen (en las minas generalmente excede el 1%) (Hartman, 1997).

1.6.2 Propiedades del aire

Dentro de las propiedades químicas del aire podemos mencionar que el aire es incoloro, inoloro e insípido. También podemos hacer mención que este apoya a la combustión y a la vida.

Otras propiedades del aire pueden clasificarse como físicas o psicométricas. Las propiedades físicas consisten en las del fluido, tanto en reposo como en movimiento. El control de cantidad (ventilación) se refiere principalmente a las propiedades dinámicas. Las propiedades psicométricas se relacionan con el comportamiento termodinámico de las mezclas de aire-agua-vapor y son de particular importancia en el control de temperatura-humedad (Hartman, 1997).

1.7 Contaminación del aire en subterránea

La contaminación es cualquier alteración física, química o biológica del aire, el agua o la tierra que produce daños a los organismos vivos. La contaminación ambiental proviene de la acción que resulta de la introducción por el hombre, directa o indirectamente, en el medio ambiente, de contaminantes, que tanto por su concentración, al superar los niveles máximos permisibles establecidos, como por el tiempo de permanencia, hagan que el medio receptor adquiera características diferentes a las originales, perjudiciales o nocivas a la naturaleza, a la salud y a la propiedad (Ministerio de minas, 2003).

Al diseñar o trabajar con un sistema de ventilación de minas, el control de la calidad del aire es a menudo uno de los problemas más importantes, todos los trabajos subterráneos de la

mina contienen el potencial de liberación de contaminantes del aire como estratos gaseosos, polvo, gases de explosión y gases de escape diésel (Hartman, 1997).

Las zonas donde son generados o liberados los contaminantes, son las mismas por donde se debe trasladar el aire limpio, para que los trabajadores puedan respirar y llevar a cabo los trabajos. Es importante mencionar, que para poder mantener una buena calidad de aire se deben conocer las propiedades de las impurezas que se están generando, ya que estas suman complejidad a la situación para limpiar las zonas.

El aire subterráneo de las minas es una mezcla de varios gases. El aire que se encuentra bajo tierra rara vez contiene las concentraciones exactas de gases porque, a medida que circula a través de la mina, pierde parte de su oxígeno y gana otros gases de diversas fuentes, como los estratos, la explosión y los motores de combustión interna (Hartman, 1997).

1.7.1 Contaminante

En términos generales, un contaminante, como se usa en ventilación, es cualquier sustancia indeseable que normalmente no está presente en el aire o está presente en una cantidad excesiva. Los contaminantes o impurezas pueden ser no particulados (gases y vapores) o particulados (líquidos y sólidos). Los contaminantes de partículas líquidas incluyen nieblas, y los contaminantes sólidos incluyen polvo, humo y organismos (bacterias, polen, etc.) (Hartman, 1997).

Los tipos más comunes de contaminantes del aire que se encuentran bajo tierra son gases y polvos. Estas dos clases de contaminantes representan los principales problemas en el control de calidad y, por lo tanto, se cubrirán en detalle (Hartman, 1997).

1.7.2 Gases generados por el macizo rocoso

1.7.2.1 Metano

El gas contaminante más común encontrado en las minas de carbón es el metano. Aunque se encuentra frecuentemente relacionada con rocas carbonosas, el metano es también

encontrado en algunas minas que no son de carbón, sobre todo en las minas de trona (natrita) y en algunas de cobre, tungsteno, hierro, yeso, mármol, y frecuentemente asociado con carbonatos y otras rocas carbonosas, como en la potasa, piedra caliza, lutita petrolífera, y minas de sal. Pequeñas cantidades de metano tienen algunas minas de oro y plata (Thimons, 1979).

El metano es incoloro, inodoro, insípido, no tóxico, altamente inflamable y más ligero que el aire. Este último atributo da como resultado la acumulación de metano a lo largo de las líneas del techo y en las zonas altas de las minas (Hartman, 1997).

Durante la formación de una capa de carbón, se produce metano junto con dióxido de carbono, hidrocarburos superiores y otros gases inertes. Al aumentar la presión y la temperatura durante la carbonización o coalificación tiende a evitar la eliminación total temprana de oxígeno con la eliminación simultánea de algo de hidrógeno y carbono, y luego la eliminación total de hidrógeno con la eliminación simultánea de algo de carbono (Hargrave, 1973).

1.7.2.2 Sulfuro de Hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno, tiene un olor que se asemeja al de los huevos podridos, es un gas incoloro, tóxico y explosivo formado por la descomposición de compuestos de azufre. Se pueden encontrar bajas concentraciones en el aire de las gotas calientes o se pueden liberar del agua que se filtra desde los estratos. Se producen grandes concentraciones en los campos de gas natural y petróleo y en algunas minas de azufre y yeso. El sulfuro de hidrógeno es bastante soluble en agua y puede ser transportado a las minas activas por el agua subterránea. Es ligeramente más pesado que el aire y es explosivo en el aire en el rango de 4-44%. El sulfuro de hidrógeno es extremadamente tóxico, para una exposición de 8 h se ha establecido 10 ppm (Anon, 1972).

Aunque el sulfuro de hidrógeno tiene un olor distintivo, no se puede confiar en el sentido del olfato como medio de detección, porque después de una o dos inhalaciones, los nervios olfativos se paralizan y el olor ya no se puede detectar. La concentración letal más baja publicada es 600 ppm (Hartman, 1997).

1.7.2.3 Dióxido de Azufre

El dióxido de azufre es un gas tóxico incoloro, no inflamable, formado cada vez que se queman compuestos de azufre. Bajo tierra, puede formarse durante la voladura de ciertos minerales de azufre, durante incendios que involucran compuestos de azufre como la pirita de hierro, y de motores de combustión interna. Es significativamente más pesado que el aire, y en concentraciones muy bajas es irritante para los ojos, la nariz y la garganta. Para una exposición de 8 horas se estableció 5 ppm (Anon, 1972).

1.7.2.4 Radón

Radón es un producto radiactivo gaseoso, químicamente inerte, de la desintegración del radio. Encontrado principalmente en minas de uranio, aunque presente en pequeñas cantidades en otros tipos de minas, incluidas las minas de carbón (Rock & Beckman, 1975).

El radón se difunde desde los estratos de roca hacia el entorno de la mina, donde continúa el proceso de descomposición. La vida media de una sustancia radiactiva es el tiempo requerido para que una cantidad dada de esa sustancia pierda la mitad de su radiactividad (Hartman, 1997).

1.7.3 Gases generados por combustión y voladura

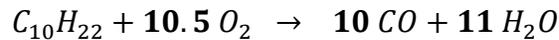
1.7.3.1 Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro, insípido, tóxico e inflamable producido por la combustión incompleta de material carbonoso. El monóxido de carbono es venenoso a concentraciones muy bajas y explosivo en un amplio rango (12.5-74% en el aire). Está formado bajo tierra por incendios y explosiones de minas, voladuras, calentamiento por fricción antes de la combustión abierta, oxidación a baja temperatura y motores de combustión interna (Hartman, 1997).

Aunque explosivo, la propiedad que hace que el monóxido de carbono sea uno de los gases más temidos por el minero subterráneo es su toxicidad extrema. El monóxido de carbono actúa como un tipo de asfixiante al desplazar el oxígeno que normalmente transporta la

hemoglobina de la sangre. La afinidad de la sangre por el monóxido de carbono es aproximadamente 3000 veces mayor que por el oxígeno, por lo tanto, si el aire que se respira hacia los pulmones contiene solo una pequeña cantidad de monóxido de carbono, la hemoglobina lo absorberá con preferencia al oxígeno presente (Forbes & Grove, 1954).

La reacción química que es generada por los equipos de combustión Diésel produciendo este gas tóxico con el que se trabaja diariamente es:



$C_{10}H_{22}$ = Diésel

O_2 = Oxígeno

CO = Monóxido

H_2O = Agua

(Mejía, 2018).

Al diésel se le agrega oxígeno para producir monóxido de carbono más agua.

1.7.3.2 Dióxido de Carbono

El dióxido de carbono es un gas incoloro, inodoro e incombustible que puede tener un sabor ácido cuando está presente en altas concentraciones. Es más pesado que el aire y se encuentran generalmente en lugares bajos cerca del piso. Aunque es un componente del aire normal de la mina (0.03%), el dióxido de carbono se encuentra con mayor frecuencia en áreas abandonadas y sin ventilación de una mina (Hartman, 1997).

Las fuentes subterráneas de dióxido de carbono incluyen los estratos de roca, oxidación, fuego y explosiones, voladuras y el proceso respiratorio humano. El aumento de las concentraciones de dióxido de carbono aumenta la ventilación pulmonar, y las personas expuestas al 0.5% de dióxido de carbono en el aire normal respirarán un poco más profundo y más rápido de lo que lo harían si respiraran aire normal. Cuando está presente un 3% de dióxido de carbono, la ventilación pulmonar se duplica, mientras que una concentración del 5% dará como resultado un aumento del 300% en la frecuencia respiratoria. Se puede tolerar una

concentración del 10% durante solo unos minutos (10 a 15 min). La muerte ocurre rápidamente > 18% de CO₂ (Hartman, 1997).

La reacción química que es generada por los equipos de combustión Diésel produciendo este gas tóxico con el que se trabaja diariamente es:



CO₂= Dióxido de Carbono O₂= Oxígeno

CO= Monóxido H₂O= Agua

(Mejía, 2018).

Al monóxido de carbono más agua (el cual fue resultado de diésel más oxígeno) sólo bastara añadirle más oxígeno para producir dióxido de carbono.

1.7.3.3 Dióxido de Azufre

El dióxido de azufre es un gas tóxico incoloro, no inflamable, formado cada vez que se queman compuestos de azufre o azufre (S). Bajo tierra, puede formarse durante la voladura de ciertos minerales de azufre, durante incendios que involucran compuestos de azufre como la piritita de hierro, y de motores de combustión interna. Es significativamente más pesado que el aire, y en concentraciones muy bajas es irritante para los ojos, la nariz y la garganta. Para una exposición de 8 horas se permiten 5 ppm (Anon, 1972).

1.7.3.4 Oxígeno de Nitrógeno

El nitrógeno, que sale como ocurre en el aire normal, es fisiológicamente inerte; sin embargo, bajo ciertas condiciones formará varios óxidos, algunos de los cuales son extremadamente tóxicos. Los más comunes son el óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno se forman bajo tierra durante la voladura y del funcionamiento de motores de combustión interna (Anon, 1972).

El óxido nítrico se oxida rápidamente a dióxido de nitrógeno en presencia de humedad y aire y, por lo tanto, se encuentra en cantidades significativas bajo tierra. El dióxido de nitrógeno no solo es el más común de los dos, sino también el más tóxico. Para una exposición de 8 h como para una exposición a corto plazo es de 5 ppm (Anon, 1972).

Los óxidos tóxicos de nitrógeno reaccionan con la humedad para formar ácido nítrico. De esta manera, cantidades relativamente pequeñas de estos gases pueden causar la muerte al combinarse con la humedad en los pulmones y corroer los conductos respiratorios. La muerte por exposición a los óxidos de nitrógeno puede ser muy rápida si el nivel de exposición es alto o puede ocurrir varios días después como resultado de un edema pulmonar (agua en los pulmones) o incluso semanas después como resultado de una neumonía infecciosa (Hartman, 1997).

1.7.3.5 Hidrógeno

El hidrógeno es incoloro, inodoro, insípido, no tóxico y el más ligero de todos los gases encontrados bajo tierra. Las fuentes de hidrógeno subterráneas (algunas poco comunes) son la carga de baterías, la acción del agua o el vapor sobre los materiales calientes y la acción del ácido sobre los metales (Hartman, 1997).

El hidrógeno es extremadamente explosivo, tener un metano requiere al menos 12% de oxígeno para la ignición, el hidrógeno puede explotar cuando el contenido de oxígeno del aire es tan bajo como 5% (Hartman, 1997).

1.8 Control de gases subterráneos

Una vez que se identifica un gas contaminante, se localiza su fuente y se determina su velocidad de liberación, el ingeniero de ventilación debe planificar el sistema de ventilación para controlar el gas dentro de su nivel máximo permitido. Las técnicas de control disponibles van desde la simple dilución con la corriente de aire de ventilación principal hasta complejos sistemas de drenaje diseñados para eliminar el gas antes de la extracción.

La técnica de control seleccionada depende de la fuente del gas y la naturaleza de su ocurrencia (liberación continua o intermitente, fuente estacionaria o móvil). Las siguientes son las técnicas utilizadas para controlar los gases en las minas, enumeradas en el orden preferido de su aplicación a una situación dada:

1. Prevención

- a. Procedimiento adecuado en voladuras.
- b. Ajuste y mantenimiento de motores de combustión interna (IC).
- c. Evitar llamas abiertas, etc.

2. Remoción

- a. Drenaje antes de la minería.
- b. Drenaje por entradas.
- c. Ventilación de escape local.
- d. Infusión de agua antes de la minería.

3. Absorción

- a. Reacción química en el acondicionador del motor IC.
- b. Solución por pulverización de aire-agua en voladuras.

4. Aislamiento

- a. Sellado de trabajos abandonados de áreas de incendio.
- b. Voladuras restringidas o voladuras fuera de turno.

5. Dilución

- a. Dilución local por ventilación auxiliar.
- b. Dilución por ventilación principal corriente de aire.
- c. Dilución local por difusores y pulverizadores de agua.

La dilución es la única técnica de control que es de aplicación universal. Otras medidas de control son adecuadas para condiciones particulares, como la fuente y la aparición de gas. A menudo, una combinación de técnicas es la más rentable (Hartman, 1997).

1.8.1 Control de gases de los estratos

El control de gases que emanan del cuerpo mineral o de los estratos circundantes es el problema de gas más común y grave que se encuentra bajo tierra. De particular preocupación es el potencial de acumulación de gases de estratos como el metano y el dióxido de carbono, que pueden conducir a atmósferas deficientes en oxígeno. Se ha observado un efecto peligroso llamado estratificación en minas de carbón con metano (Leach & Thompson, 1968).

Si la corriente de aire de ventilación genera turbulencia insuficiente, cualquier metano presente queda estratificado y forma una capa persistente que se mueve a lo largo del techo. Peor aún, si la abertura de la mina está inclinada y el flujo de aire es "cuesta abajo (descendente), una capa de metano puede retroceder" cuesta arriba "contra la corriente de aire. La velocidad del aire y la turbulencia amplias son las principales garantías contra la estratificación.

La percepción de las posibles condiciones peligrosas derivadas de los gases de los estratos debe desarrollarse mediante la capacitación. El peligro real debe controlarse mediante una ventilación adecuada y otros medios. Además de la dilución, se utilizan varias otras medidas de control para controlar los gases de estratos. Lo más importante es diseñar los sistemas de extracción y ventilación teniendo en cuenta estos gases. Mediante una planificación adecuada, se puede proporcionar una cantidad de aire suficiente, se puede eliminar el gas cerca del punto de emisión mediante el uso de entradas de purga, y las áreas que se han extraído totalmente se pueden aislar del resto de la mina mediante sellado (Hartman, 1997).

1.8.2 Control de gases de voladura

Las siguientes medidas de control son aplicables a los gases de voladura. La prevención o reducción de la cantidad de gases liberados de la voladura es posible mediante la selección adecuada de explosivos y técnicas de voladura adecuadas. En las minas de carbón y en las

minas de carbón sin gas, solo se pueden usar explosivos designados como permisibles. La derivación adecuada es esencial para reducir los gases (Hartman, 1997).

La eliminación de gases de explosión a través de sistemas de escape local o ventilación auxiliar se utiliza con bastante frecuencia y se considera una buena práctica. La voladura fuera del turno, o en horarios restringidos, y la localización de la explosión a menudo se practican como medidas de control. La localización o el aislamiento de los efectos de la voladura pueden ser medidas de control efectivas donde el trabajo está aislado o seccionado en el sistema de ventilación (Hartman, 1997).

1.8.3 Control de gases de combustión

El uso de motores de gasolina en la mayoría de las minas subterráneas está prohibido por ley. Los motores diésel, sin embargo, están permitidos. Se emplean ampliamente en minas sin carbón y se utilizan en menor medida en minas de carbón. En la actualidad, se están considerando amplias regulaciones con respecto al uso de equipos a diésel en minas de carbón (Anon, 1972).

Los reglamentos abordan el almacenamiento y manejo de combustible diésel bajo tierra y el control de los gases de escape y las chispas del escape en un explosivo o atmósfera inflamable de gas o polvo. Como parte del proceso de aprobación, se establece la relación máxima permitida de combustible - aire, se determinan los requisitos de ventilación y se especifican los programas de mantenimiento.

El requisito de cantidad de aire se basa en la condición de operación más indeseable y peligrosa y está diseñado para asegurar que no se excedan las siguientes concentraciones de gas en la mezcla de escape diluida: dióxido de carbono, 0.25% de monóxido de carbono, 0.005%; y óxidos de nitrógeno, 0.00125%. Además, el contenido de oxígeno de la mezcla diluida no debe ser inferior al 20%. No se requiere la aprobación de un estándar para partículas de escape de diésel en la atmósfera de la mina (Anon, 1972).

Los convertidores catalíticos se usan, cuando corresponde, para reducir el monóxido de carbono y el óxido nítrico en el escape. Un motor en buen estado producirá menos humo y

gases tóxicos. Por lo tanto, una de las mejores medidas de control es un programa de mantenimiento integral (Hartman, 1997).

1.8.4 Control de incendios y explosiones

La medida de control más efectiva contra incendios y explosiones es la prevención. Una vez que se ha producido la ignición, el aislamiento de la zona de conflagración es la acción más importante que se debe tomar para contener el fuego y los productos gaseosos generados y cerrar el suministro de oxígeno (Hartman, 1997).

1.8.5 Control de gas de la batería

El hidrógeno liberado al cargar baterías de almacenamiento convencionales bajo tierra se puede controlar aislando la estación de carga y proporcionando una ventilación adecuada, incluida una división separada del aire para garantizar dilución de la descarga (Hartman, 1997).

1.9 Temperatura y humedad

La temperatura es una medida del movimiento molecular o el grado de calor de una sustancia. Se mide con una escala arbitraria a partir del cero absoluto, donde las moléculas teóricamente dejan de moverse. Es también el grado de calor y de frío (Ministerio de minas, 2003).

La humedad es el vapor de agua contenido en la atmósfera. También se usa para describir el total de agua en estado líquido, sólido o como vapor contenido en un volumen específico de aire (Ministerio de minas, 2003).

El acondicionamiento climático es una parte muy importante de las minas, ya que las minas muy calientes requieren que se les enfríe el aire, y las más frías en ciertas latitudes, requerirán que el aire se caliente a una temperatura agradable antes de enviarlo a las corrientes generales de ventilación (Moncada, 2002).

El objetivo principal de las mediciones de temperatura en las minas es evaluar el peso específico, humedad y el poder de enfriamiento del aire. Además, los datos de la temperatura de la roca in situ son necesarios para determinar la entrada de calor de la roca circundante en la atmosfera de la mina (Hartman, 1997).

La temperatura crítica es un riesgo en la minería, la sobrecarga térmica afecta la cantidad de trabajo que un individuo puede realizar, ya que afecta la capacidad del sistema termorregulador del organismo, y le ocasiona disturbios que pueden revestir gravedad. El frío también puede causar lesiones serías, debido a quemaduras por congelamiento (Ministerio de minas, 2003).

1.9.1 Factores que influyen en la temperatura y humedad

La temperatura del aire dentro de las minas depende de distintos factores, estos influyen de manera directa sobre el ambiente en el interior de la mina. Estos se mencionarán a continuación.

1.9.1.1 Influencia de la temperatura del aire exterior

El aire exterior que entra a una mina frecuentemente se hace sentir a lo largo de todas las labores de la misma, con una temperatura específica dependiendo de la región en donde se localiza y según la estación del año. En verano el aire que entra del exterior es más caliente que el que entra en invierno.

En muchas minas cuando la temperatura exterior baja de los 0 °C es necesario calentar el aire hasta +2 °C para evitar congelación del agua en las galerías de ventilación (Martin, s.f.).

1.9.1.2 Influencia del calor a compresión

El calentamiento del aire durante su descenso en las minas se debe a su compresión. La temperatura del aire sometido a la presión atmosférica está dada por:

$$T = T_0 + 0,0098 H$$

Donde:

T = temperatura en °C a una profundidad igual a H m.

To= temperatura en la superficie en °C.

H = profundidad en metros. La temperatura aumenta en 0,0098 °C, por cada metro de profundidad, 1 °C por cada 100 m, de profundidad, o sea, a 1,000 m. de profundidad se tiene un aumento de la temperatura, por este solo concepto, igual a 10 °C (Martin, s.f.).

1.9.1.3 Influencia de la temperatura de las rocas

La temperatura de las rocas de las primeras decenas de metros, según la vertical desde la superficie terrestre, cambia durante el año en relación con la temperatura del aire en la superficie y después, al alcanzar la capa neutral de temperatura constante (aproximadamente de 20 a 40 metros en las latitudes medias), queda todo el año igual (Martin, s.f.).

El conocimiento de la temperatura de la roca es importante para conocer la temperatura y humedad. Para encontrar el gradiente geotérmico en la masa de roca y la tasa de flujo de la pared de roca en los conductos de ventilación, es necesario determinar la distribución de temperatura en la roca adyacente a la abierta, incluida la temperatura de la roca virgen (temperatura no afectada por la temperatura de la mina y las operaciones mineras) (Hartman, 1997).

A profundidades mayores, la temperatura de las rocas sube, el aumento es por el "grado geotérmico" el cual se define como la distancia que se tiene que descender para lograr que la temperatura aumente 1°C. El valor inverso del grado geotérmico es el "gradiente geotérmico", que es la temperatura correspondiente al aumento de profundidad por un metro.

El grado geotérmico se calcula por la fórmula:

$$G^{\circ} = \frac{H - h}{t - t_m}$$

Donde:

G° = grado geotérmico.

H = profundidad de la medición, m.

h = profundidad de la zona a temperatura constante.

t = temperatura en la profundidad H, grados.

t_m = temperatura promedio anual de la región.

Para calcular la temperatura que se tendrá, por este concepto, a una profundidad dada, se tiene:

$$t = \frac{t_m + (H - h)}{G^\circ}$$

(Martin, s.f.).

1.9.1.4 Influencia de la velocidad del aire

La velocidad del aire es también de gran importancia en las condiciones climáticas del interior de la mina. Un trabajador no se siente bien en el aire tranquilo, sin movimiento, ya que el calor de su cuerpo producido por el trabajo no se elimina bien desde su piel al medio exterior. Su rendimiento aumenta con el aumento de velocidad del aire, pero no en forma lineal, ya que el aumento de velocidad del aire por arriba de los 5 m /s no tiene influencia práctica (Martin, s.f.).

1.9.1.5 Influencia de otros factores

Además de los factores ya mencionados anteriormente se pueden aunar otros factores que entregan calor al aire de la mina como lo son el trabajo con explosivo, la combustión de equipos diésel y efectos de respiración.

1.9.2 Medición e instrumentos de medición

La temperatura del aire de la mina se puede medir fácilmente con un termómetro de mercurio para obtener lo que comúnmente se conoce como temperatura de bulbo seco. En ambientes cálidos y húmedos, la temperatura del bulbo húmedo se mide con un termómetro de bulbo húmedo (Hartman, 1997).

Para medir la temperatura se seleccionarán dos puntos críticos de la mina donde se hará un seguimiento constante. En los puntos seleccionados se llevará a cabo la medición de las temperaturas del bulbo seco y del bulbo húmedo simultáneamente por un psicrómetro de honda o un higrómetro giratorio (Ver Figura 12).

La temperatura de bulbo seco (T_{bs}) es la verdadera temperatura del aire húmedo y con frecuencia solo se le denomina temperatura del aire. La Temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) es la temperatura que da un termómetro con el bulbo envuelto en algodón húmedo bajo una corriente de aire. La corriente de aire se produce mediante un pequeño ventilador o poniendo el termómetro en un molinete y haciéndolo girar. Al evaporarse el agua, absorbe calor, rebajando la temperatura, efecto que reflejará el termómetro. Cuanto menor sea la humedad relativa del ambiente, más rápidamente se evapora el agua que empapa el paño. Se utiliza para calcular la humedad relativa, esto se hace usando una carta psicrométrica (Ver Figura 13) (Quiceno, 2011).

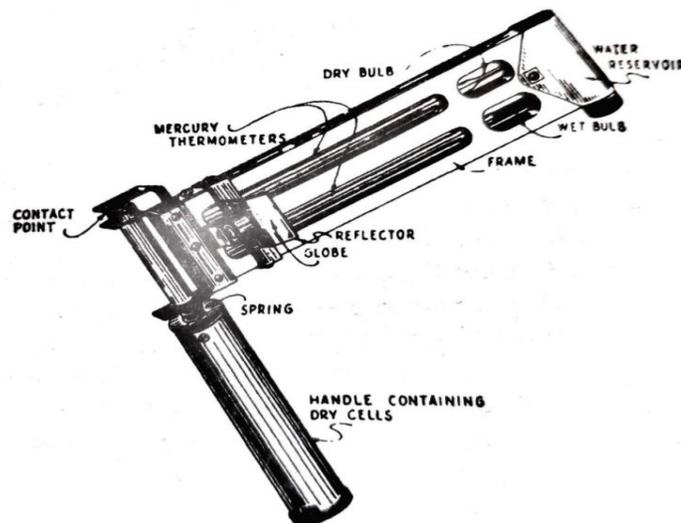


Figura 12-. Psicrómetro. Hartman (1997).

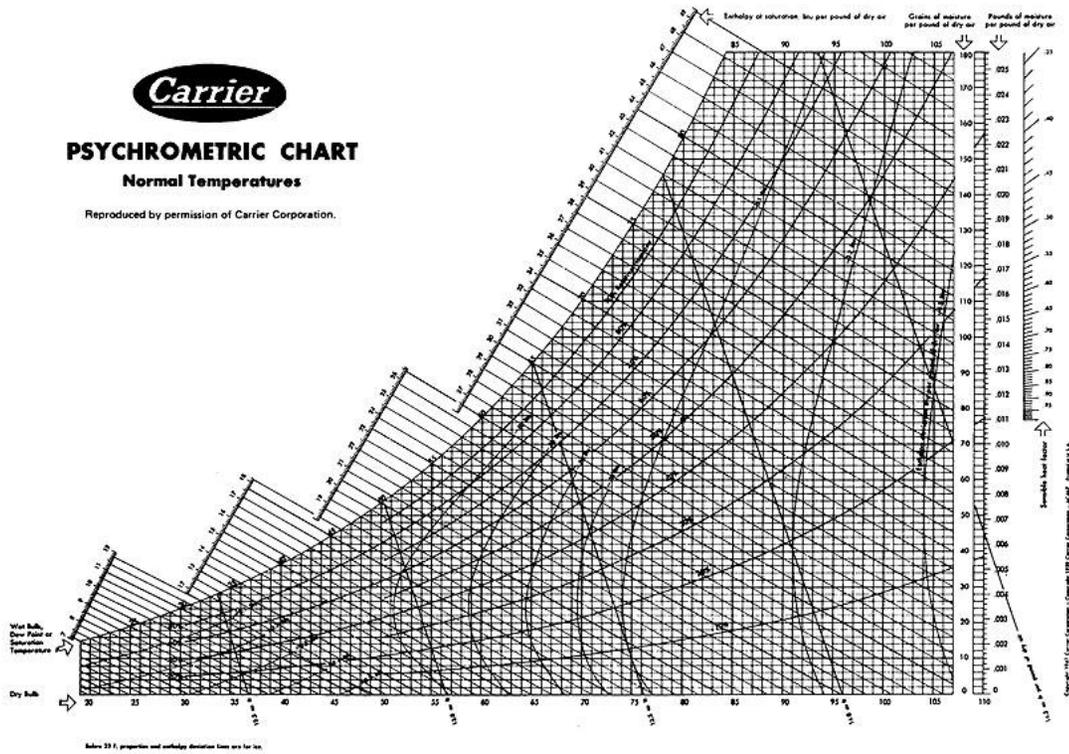


Figura 13-. Carta psicrométrica. Hartman (1997).

1.9.3. Normas en relación a temperatura y humedad.

1.9.3.1 México

En México se toman en cuenta dos condiciones para evaluar las condiciones de seguridad e higiene, los niveles y tiempos máximos permisibles de exposición a condiciones térmicas extremas, que, por sus características, tipo de actividad, nivel, tiempo y frecuencia de exposición, sean capaces de alterar la salud de los trabajadores (Ver Tabla 2).

a) Condición térmica elevada

La condición térmica elevada es la situación ambiental capaz de transmitir calor hacia el cuerpo humano o evitar que el cuerpo humano transmita calor hacia el medio en tal magnitud

que pueda romper el equilibrio térmico del trabajador, y tienda a incrementar su temperatura corporal central.

Tabla 2-. Límites máximos de exposición a condiciones térmicas elevadas.

Temperatura máxima en °C de I_{tgbh}			Porcentaje del tiempo de exposición y de no exposición
Régimen de trabajo			
Ligero	Moderado	Pesado	
30	26.7	25	100% de exposición
30.6	27.8	25.9	75% de exposición 25% de recuperación en cada hora
31.7	29.4	27.8	50% de exposición 50% de recuperación en cada hora
32.2	31.1	30	25% de exposición 75% de recuperación en cada hora

FUENTE: STPS (2001).

Para definir el régimen de trabajo del trabajador nos basaremos en la Tabla 3.

Tabla 3.- Definición de régimen de trabajo según la actividad.

Régimen de trabajo	Actividad
Ligero	Sentarse tranquilamente.
	Sentarse, movimiento moderado de los brazos y el tronco (por ejemplo, trabajo de oficina, mecanografía).
	Sentado, movimientos moderados de los brazos y el tronco (por ejemplo, tocando el órgano o conduciendo un automóvil).
	Parado, trabajo moderado en máquinas o bancos de máquinas, mayormente con las manos.
	Parado, trabajo liviano en máquinas o bancos, a veces caminando un poco.
	Sentado, movimientos pesados de los brazos y piernas.
Moderado	Parado, trabajo moderado en maquina o banco a veces caminando un poco.
	Caminando de un sitio a otro empujando y levantando moderadamente.
Pesado	Levantando, empujando o tirando cargas pesadas, intermitentemente (por ejemplo, trabajo de pico y pala).
	Trabajo pesado constantemente.

FUENTE: STPS (2001).

Método de evaluación para condiciones térmicas elevadas

Consiste en aplicar el índice de temperatura de globo bulbo húmedo (I_{tgbh}), medir la temperatura axilar del trabajador expuesto, la humedad relativa, la velocidad del aire y determinar el régimen de trabajo.

Durante la evaluación, se deben excluir las áreas donde no exista personal ocupacionalmente expuesto y aquellas en las que el índice de temperatura de globo bulbo húmedo sea igual o menor al límite máximo permisible de exposición del régimen de trabajo. La evaluación consiste en medir y promediar a tres diferentes alturas la temperatura de globo bulbo húmedo, colocando los instrumentos de medición en las siguientes alturas: región de los tobillos, región abdominal y región superior de la cabeza.

Una vez concluidas las evaluaciones, se registran los valores obtenidos y se calcula el índice de la temperatura de globo bulbo húmedo por cada punto evaluado mediante la ecuación:

(1) si la medición se realiza en interiores o exteriores sin carga solar:

$$I_{tgbh} = 0.7 t_{bhn} + 0.3t_g$$

(2) si la medición se realiza en exteriores con carga solar:

$$I_{tgbh} = 0.7 t_{bhn} + 0.2t_g + 0.1t_s$$

Para obtener la temperatura de globo bulbo húmedo promedio, se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$I_{tgbh \text{ promedio}} = \frac{I_{tgbh \text{ cabeza}} + 2I_{tgbh \text{ abdomen}} + I_{tgbh \text{ tobillos}}}{4}$$

Donde:

$I_{tgbh \text{ cabeza}}$: Es el índice de temperatura de globo bulbo húmedo, medido en la región de la cabeza.

$I_{tgbh \text{ abdomen}}$: Es el índice de temperatura de globo bulbo húmedo, medido en la región del abdomen.

$I_{tgbh \text{ tobillos}}$: Es el índice de temperatura de globo bulbo húmedo medido, en la región de los tobillos.

b) Condición térmica abatida.

La condición térmica abatida es la situación ambiental capaz de producir pérdida de calor en el cuerpo humano, debido a las bajas temperaturas, que puede romper el equilibrio térmico del trabajador y tiende a disminuir su temperatura corporal central (Ver Tabla 4).

Tabla 4- Límites máximos permisibles de exposición a condiciones térmicas abatidas.

Temperatura en °C	Exposición máxima diaria
de 0 a -18	8 horas
Menores de -18 a -34	4 horas; sujeto a periodos continuos máximos de exposición de una hora; después de cada exposición, se debe de tener un tiempo de no exposición al menos igual al tiempo de exposición.
menores de -34 -57	1 hora; sujeto a periodos continuos máximos de 30 minutos; después de cada exposición al menos 8 veces mayor que el tiempo de exposición.
menores de -57	5 minutos

FUENTE: STPS (2001).

Método de evaluación para condiciones térmicas abatidas

La evaluación del índice de viento frío se debe realizar lo más cerca posible del trabajador, sin que la presencia del evaluador interrumpa la actividad del personal ocupacionalmente expuesto. Se deben excluir aquellas áreas donde no exista personal ocupacionalmente expuesto. La evaluación consiste en medir y correlacionar la temperatura de bulbo seco y la velocidad del aire para calcular el índice de viento frío.

Los instrumentos de medición se deben colocar a una altura de 1.40 y se deben tomar tres lecturas: al inicio, a la mitad y al final de cada ciclo de exposición. Cuando se realicen evaluaciones a diferentes alturas, se deben registrar y fundamentar las causas que las originaron. Con los valores obtenidos se determina el valor del índice de viento frío promedio, como se indica a continuación:

$$I_{vf \text{ promedio}} = \frac{I_{vf \text{ inicial}} + I_{vf \text{ a la mitad}} + I_{vf \text{ al final}}}{3}$$

Donde:

$I_{vf \text{ inicial}}$: Es el valor promedio del índice del viento frío inicial.

I_{vf} a la mitad: Es el valor promedio del índice del viento frío a la mitad.

I_{vf} al final: Es el valor promedio del índice del viento frío final.

Con el resultado del índice de viento frío promedio, se debe determinar el tiempo máximo de exposición del personal ocupacionalmente expuesto (Secretaría de Trabajo y Previsión Social, 2001).

En las minas de carbón se exige que se mantenga la temperatura en el interior de la mina entre 10 y 37°C y la humedad relativa entre 20 y 95%, con excepción de las entradas de la mina (Secretaría de Trabajo y Previsión Social, 2008).

1.9.3.2 Colombia

La Temperatura efectiva (T_e) es un criterio que permite medir el nivel de bienestar a que está sometida una persona al momento de desempeñar su trabajo en un ambiente determinado. A su vez la permanencia de una persona en labores subterráneas, está limitada por este indicador. El valor de esta se obtiene mediante formula (Córdoba Quiceno, 2011).

$$T_e = 0.3T_{bs} + 0.7T_{bh} - V [^{\circ}C]$$

Donde:

T_e : temperatura efectiva.

T_{bs} : temperatura seca en grados centígrados.

T_{bh} : temperatura húmeda en grados centígrados.

V: velocidad de la corriente de aire en m/s.

(Ministerio de Minas y Energías, 1987).

De acuerdo a la caracterización anterior, se definirán los tiempos de permanencia del personal en los frentes de trabajo, según la Tabla 5:

Tabla 5- Tiempo de permanencia según la temperatura efectiva.

T_e (°C)	Tiempo de permanencia (Horas)
28	Sin limitación
29	6
30	4
31	2
32	0

FUENTE: Reglamento de seguridad en las labores subterráneas (1987).

Nota: En sitios de la mina, donde se tenga una temperatura (t_e) superior a 31 °C, solamente podrán entrar cuadrillas de salvamento de la mina o de la Estación de Apoyo y Salvamento Minero (Ministerio de Minas y Energías, 1987).

1.9.3.3 Chile

La temperatura máxima, medida en el termómetro del bulbo húmedo, en el interior de la mina no podrá exceder de treinta grados (30°) centígrados con una duración de la jornada de trabajo de ocho (8) horas, y deberá disminuirse la jornada a seis (6) horas si dicha temperatura se eleva a treinta y dos grados (32°) centígrados, la cual será la temperatura máxima admisible en minas subterráneas en explotación (Ministerio de Minería, 2004).

1.10 Normatividades de ventilación de diversos países para obras subterráneas

Todo sistema de ventilación en la actividad minera, en cuanto se refiere a la calidad del aire, deberá mantenerse dentro de los límites de exposición ocupacional para agentes químicos. Al inicio de cada jornada o antes de ingresar a cualquier labor, en especial labores ciegas programadas, se deberá realizar mediciones de gases tóxicos. Estas deberán ser registradas y comunicadas a los trabajadores que tienen que ingresar a dicha labor.

En cada país se tienen normatividades que regulan el ambiente propicio de una mina para que los trabajadores y equipos puedan laborar sin algún riesgo. A continuación, se mencionarán algunas de normatividades de distintos países.

1.10.1 Mexicana

El sistema de ventilación en las minas subterráneas deberá cumplir al menos con las características siguientes:

a) Suministrar al interior de la mina un volumen de aire de:

- 1) 1.50 m³/min por cada trabajador.
- 2) 2.13 m³/min por cada caballo de fuerza de la maquinaria accionada por motores de combustión diésel, localizados en el interior de la mina.

b) Mantener una velocidad mínima del aire de 15.24 m/min, cuando en cualquier frente, galería o tiro se opere maquinaria impulsada por motores de combustión diésel.

(Secretaría de Trabajo y Previsión Social, 2012).

1.10.2 Peruana

a) En todas las labores subterráneas se mantendrá una circulación de aire limpio y fresco en cantidad y calidad suficientes de acuerdo con el número de trabajadores y con el total de HP de los equipos con motores de combustión interna, así como para la dilución de los gases que permitan contar en el ambiente de trabajo con un mínimo de 19.5% de oxígeno.

Las labores de entrada y salida de aire deberán ser absolutamente independientes. El circuito general de ventilación se dividirá en el interior de las minas en ramales. Esto con la finalidad de que todas las labores en trabajo reciban su parte proporcional de aire limpio y fresco.

En el caso de emplearse equipo diésel, la cantidad de aire circulante no será menor de tres 3 m³/min por cada HP que desarrollen los equipos.

Cuando las minas se encuentren hasta 1500 m sobre el nivel del mar, en los lugares de trabajo, el volumen de aire necesario por hombre será de 3 m³/min. En otras altitudes, la cantidad de aire será de acuerdo con la siguiente escala:

- ❖ De 1500 a 3000 msnm, aumentará en 40% que será igual a 4 m³/min.
- ❖ De 3000 a 4000 msnm aumentará en 70% que será igual a 5 m³/min.
- ❖ Sobre los 4000 msnm aumentará en 100% que será igual a 6 m³/min.

b) En ningún caso la velocidad del aire será menor de 20 m/min. Tampoco será superior a 250 m/min en las labores de explotación, incluido el desarrollo, preparación y en todo lugar donde haya personal trabajando.

Cuando se emplee explosivo ANFO u otros agentes de voladura, la velocidad del aire no será menor de 25 m/min (Normas Legales, 2010).

1.10.3 Chilena

a) En los frentes de trabajo donde se utilice maquinaria diésel deberá proveerse un incremento de la ventilación necesaria para una óptima operación del equipo y mantener una buena dilución de gases. El caudal de aire necesario por máquina debe ser el especificado por el fabricante. Si no existiese tal especificación, el aire mínimo será 2,83 m³/min, por caballo de fuerza efectivo al freno, para máquinas en buenas condiciones de mantenimiento.

En todos los lugares de la mina, donde acceda personal, el ambiente deberá ventilarse por medio de una corriente de aire fresco, de no menos de 3 m³/min por persona, en cualquier sitio del interior de la mina. Dicho caudal será regulado tomando en consideración el número de trabajadores, la extensión de las labores, el tipo de maquinaria de combustión interna, las emanaciones naturales de las minas y las secciones de las galerías.

b) Las velocidades, como promedio, no podrán ser mayores de 150 m/min ni inferiores a 15 m/min (Ministerio de Minería, 2004).

1.10.4 Americana

El sistema de ventilación principal debe ser capaz de funcionar en servicio de soplado o escape y debe estar equipado con un interruptor de inversión, que normalmente funcionará en el escape, y el flujo de aire debe ser:

a) Al menos $15 \text{ m}^3/\text{min}$ por cada metro cuadrado (50 cfm por cada pie cuadrado) del área de la cara de trabajo.

b) Cuando los motores de combustión interna se utilizan bajo tierra, el total de los flujos de aire especificados en el motor serán los que regulen.

(Workers Compensation Act, 2004).

1.11 Comparativa de las normatividades

Para lograr que una mina se ponga en marcha, hablando específicamente del tema de ventilación, es necesario tener en cuenta que se deben de cumplir con ciertos requisitos, cabe destacar que en cada país se tienen que cumplir normas específicas.

1.11.1 Comparativa con respecto al volumen de aire requerido en las minas

En la norma mexicana se establece que al interior de la mina se debe suministrar un volumen de aire de $1.50 \text{ m}^3/\text{min}$ por cada trabajador, así como $2.13 \text{ m}^3/\text{min}$ por cada caballo de fuerza de la maquinaria accionada por motores de combustión diésel que se encuentre dentro de la mina.

A comparación de la norma mexicana, la norma peruana para estipular el volumen de aire por persona se basa en los metros sobre el nivel del mar a los que se encuentra la zona dictando que cuando las minas se encuentren hasta 1500 metros sobre el nivel del mar el volumen necesario por trabajador será de $3 \text{ m}^3/\text{min}$, sin embargo, en otras altitudes la cantidad

de aire cambiará, de 1500 a 3000 msnm el volumen del aire será de 4 m³/min, de 3000 a 4000 msnm cambiará a 5 m³/min, y si se encuentra sobre los 4000 msnm aumentará a 6 m³/min.

Con respecto al aire requeridos por equipo diésel se conserva que se necesita 3 m³/min por cada HP del equipo diésel sin verse afectado por la elevación. Con esto podemos darnos cuenta que la exigencia de volumen de aire en las minas peruanas es mayor que el de la mexicana.

Por otro lado, en las normas de ventilación de Chile el volumen de aire requerido por máquina dentro de la mina debe ser especificado por el fabricante, si este no está especificado, el aire mínimo será igual a 2.83 m³/min por HP y se deberá cumplir con 3 m³/min por persona.

Sabiendo esto podemos decir que en cuanto al aire requerido por persona la norma chilena y peruana estipulan lo mismo, dejando a la mexicana con un requerimiento de aire por debajo. Sin embargo, en cuanto a la norma mexicana y la peruana especifican un número fijo por cada HP de equipo, mientras que en la chilena se pone como preferencia el que indique el fabricante.

Por último, tenemos la norma americana la cual no se basa ni en el número de personas ni en número de equipos sino en los metros cuadrados del área de trabajo y nos indica que se requiere un volumen de aire de 15 m³/min.

1.11.2 Comparativa con respecto a las velocidades de aire requerido en las minas

La velocidad en la que el aire debe circular dentro de la mina al igual que el volumen de aire requerido varía según las normas de cada país. El sistema de ventilación mexicano establece que el aire debe mantener una velocidad mínima de 15.24 m/min en la mina cuando en esta se encuentre operando una máquina impulsada por motores de combustión diésel.

El sistema de ventilación chilena plantea que las velocidades no podrán ser superiores a 150 m/min ni menores a 15 m/min. Por otro lado, la norma americana se basa en las especificaciones de los equipos de combustión, tomando en cuenta el total de flujos especificados en el motor.

En el caso de la peruana la velocidad del aire no será menor a 20 m/min, pero tampoco será superior a 250 m/min en labores de explotación, preparación y en todo lugar donde se encuentre personal laborando, además de que en esta también se considera el uso de explosivo, mencionando que al emplearse este, la velocidad del aire no será menor de 25 m/min.

1.12 Criterios para el requerimiento de aire propuesto por Quevedo

1.12.1 Definición de caudales

El Art. N° 204 del Decreto Supremo N° 055-2010-EM de Perú, exige que cuando los túneles o minas se encuentren hasta 1,500 metros sobre el nivel del mar, en los lugares de trabajo, la cantidad mínima de aire necesaria por hombre será de 03 m³/min. En otras altitudes la cantidad de aire será de acuerdo a la siguiente escala:

- De 1,500 a 3,000 metros aumentará en 40%; será igual a 4 m³/min.
- De 3,000 a 4,000 metros aumentará en 70%; será igual a 5 m³/min.
- Sobre los 4,000 metros aumentará en 100%; será igual a 6 m³/min.

El caudal de aire para personal se calcula mediante la siguiente formula:

$$Q= K \times N \text{ (m}^3/\text{ min)}$$

Donde:

- Q =Caudal total para “n” personas que trabajen en interior del túnel (m³/ min).
- K =Caudal mínimo por persona.
- N =Número de personas en el lugar.

1.12.1.2 Caudal requerido por temperatura

Como norma para el cálculo del aire respecto a la temperatura, se dan los valores mostrados en la Tabla 6:

Tabla 6- Velocidad necesaria para un ambiente ventilado.

Humedad relativa	Temperatura seca	Velocidad mínima	Para una labor de 20 m ² (5x4 m)
< 85%	24 a 30 °C	30 m/min	600 m ³ /min
> 85%	> 30°C	120 m/min	2240 m ³ /min

FUENTE: Quevedo (2013).

1.12.1.3 Caudal requerido por equipos diésel

El Art. N° 204 del Decreto Supremo. N° 055-2010-EM de Perú, exige para el uso de equipo diésel, la cantidad de aire circulante no será menor 3 m³/ min por cada HP que desarrollen los equipos. Para el cálculo del caudal de equipos diésel se aplicará la siguiente formula convertida a m³/s:

$$Q = K \times N \text{ (m}^3/\text{ min)}$$

Donde:

- Q = Caudal total para “n” equipos diésel que trabajen en interior del túnel (m³/min).
- K = Caudal mínimo por equipo diésel.
- N = Cantidad de HP de los equipos diésel.

Para determinar el caudal de aire por maquinaria diésel se considera la simultaneidad de los equipos presentes en el interior de la mina cuya asignación representa la flota operativa, y por tanto el caudal de aire real requerido, se estima entre un 40% a 60%.

1.12.1.4 Caudal por el requerimiento de consumo de explosivos

$$Q = n \times V \times A \text{ (m}^3/\text{ min)}.$$

Donde:

- Q = Caudal total para diluir contaminantes por explosivos (m³/min).
- n = Numero de niveles del túnel.

- V = Velocidad de aire según norma en el Art. N° 204 del Decreto Supremo N° 055-2010 de Perú, indica que cuando se emplee explosivo ANFO u otros agentes de voladura, la velocidad del aire no será menor de 25 m/min.
- A = Área de la sección de labores (m^2).

1.12.1.5 Caudal requerido por desprendimiento de gases y polvo en suspensión

Para determinar este caudal de aire se toma como criterio la fijación de velocidad en las labores, que según el Art. N° 204 del Decreto Supremo N° 055-2010 de Perú indica que en ningún caso la velocidad del aire será menor de veinte (20) metros por minuto ni superior a doscientos cincuenta (250) metros por minuto en las labores de explotación incluido el desarrollo, preparación y en todo lugar donde haya personal trabajando, con esta apreciación es suficiente para asegurar las áreas despejada.

1.12.2 Perdidas de carga de la instalación

Las pérdidas de carga de un circuito de ventilación auxiliar pueden dividirse en pérdidas por fricción, pérdidas singulares y pérdidas por presión dinámica.

1.12.2.1 Perdidas por fricción

Cuando el aire fluye a través de un ducto o galería minera, la presión requerida para mover el aire a través de él depende no sólo de la fricción interna, sino también del tamaño, longitud, forma del ducto, velocidad y densidad del aire. Todos estos factores son considerados en la ecuación de J. Atkinson, denominada "Ley de Atkinson".

$$P = KCLV^2/A$$

Donde:

- P : Caída de presión (Pa).

- K: Factor de fricción de la tubería.
- C: Perímetro del ducto (m).
- L: Longitud del túnel (m).
- V: Velocidad (m/s). A: Área del ducto (m²).

Sabiendo que: $Q = VA$

La fórmula anterior se puede expresar como:

$$P = KCLQ^2/A^3$$

En un circuito de ventilación auxiliar, las pérdidas por fricción de importancia de cara al diseño de la instalación son las de la tubería, siendo las de las galerías del túnel o mina despreciables frente a estas (suponen en general menos de un 1% en relación a las de las tuberías).

1.12.2.2 Pérdidas singulares

Las pérdidas singulares son aquellas que se producen cuando el flujo de aire cambia de dirección o el conducto cambia de sección. Estas pérdidas se calculan como un porcentaje sobre la presión dinámica del fluido calculada en el punto singular:

$$\Delta P_{\text{sin}} = \varepsilon \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2}$$

Donde:

- ΔP_{sin} , es la pérdida de carga del aire [Pa].
- ε , es el coeficiente de pérdida del elemento, obtenido experimentalmente.
- ρ , es la densidad del aire [kg/m³].
- u , es la velocidad del aire en el conducto [m/s].

En un circuito de ventilación auxiliar, esto ocurre en elementos como codos, cambios de diámetro de la tubería, puntos de bifurcación de la tubería, rejillas de protección de tubería o ventilador, etc.

La única dificultad del cálculo de estas pérdidas está en usar una correcta estimación del factor ζ . Es mucha la literatura, basada principalmente en ensayos experimentales, que se ocupan de esta labor.

La suma de estas dos pérdidas, la de fricción y singulares nos da como resultado la Presión estática.

1.12.2.3 Pérdidas por presión dinámica

Al final del circuito, usualmente a la salida de la tubería (sistemas soplantes) o la salida del ventilador (sistemas aspirantes) se ha de tener en cuenta la presión dinámica con la que el aire sale, ya que ésta es una pérdida más. Estas pérdidas no tienen mayor complicación y se calculan por la fórmula general de la presión dinámica:

$$\Delta P_{\text{sin}} = \frac{\rho \cdot u^2}{2}$$

Donde:

- ΔP_{sin} , es la pérdida de carga del aire [Pa].
- ρ , es la densidad del aire [kg/m^3].
- u , es la velocidad del aire en el conducto [m/s].

1.12.3 Factor de fugas de una tubería

Estas fugas, inicialmente, dependen de las propias características de la tubería, pero ha de tenerse en cuenta que estas tuberías están instaladas en un sistema dinámico, es decir, al mismo tiempo que se aporta aire están trabajando en el frente, por lo que es muy frecuente que las tuberías se vean deterioradas con el paso del tiempo.

El caudal final total considerando las fugas se calculan con la siguiente fórmula empírica:

$$Q_{\text{FINAL}} = Q_X \left(1 - \frac{F}{100}\right)^{-\frac{L}{100}}$$

Donde:

- Q_{FINAL} , caudal final a la salida del ventilador axial (m^3/s).

- Q, caudal requerido en el frente de trabajo (m³/s).
- L, longitud equivalente del túnel (m).
- F, factor de fuga de la tubería otorgada por el fabricante (%).

Estas consideraciones se deben tener muy en cuenta tanto en el diseño como en las labores de mantenimiento, y, por tanto, hacemos hincapié en que cada proyecto es diferente y debe ser estudiado en profundidad. No obstante, la experiencia dice que la formula anterior, si es usada considerando las particularidades del proyecto, es una buena aproximación a la realidad.

1.12.4 Potencia instalada

Las consideraciones que deben hacerse para calcular la potencia del motor son:

- Q = Caudal de aire en m³/s.
- H = Depresión del circuito en Pa (presión estática en Pascales).
- η = Eficiencia del ventilador, la cual varía entre 70% a 85% (dependiendo de la fabricación, tamaño y punto de trabajo).
- AHP = Potencia necesaria para mover el caudal Q de aire en un circuito cuya depresión es H, en Kw.
- BHP = Potencia del ventilador en Kw.
- DE = Eficiencia de la transmisión, la cual varía entre 90% para transmisión por poleas y bandas, y 100% para transmisión directa.

$$AHP = \frac{QH}{6350}$$

$$BHP = \frac{QxHxDE}{6350x\eta}$$

(Quevedo, 2013).

1.13 Dinámica de los fluidos computacionales CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se define como la técnica informática que busca la simulación del movimiento de los fluidos. Las principales ventajas de la técnica de CFD sobre otro tipo de estudios de mecánica de fluidos son la reducción sustancial de tiempo y costes en los experimentos, la posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de simular experimentalmente (Tena, 2014).

Para obtener una descripción completa del campo de un fluido es necesario representar por medio de unas ecuaciones las leyes que rigen los fluidos tomando en cuenta el avance de estos en el espacio y/o tiempo. Sin embargo, algunos problemas de flujo de fluidos se pueden simplificar y no es necesario tener en cuenta en su solución el espacio y/o tiempo.

La solución a todos estos problemas requiere de métodos numéricos, y CFD es el conjunto de estos métodos que han sido desarrollados para la solución de estos problemas. Para la solución de dichos métodos se requieren computadores de alta velocidad, y el avance de CFD se ve influenciado en gran medida del desarrollo de hardware de alta velocidad, debido a que la solución a estos problemas requiere del manejo de cantidades enormes de números.

En sí podríamos resumir CFD como la sistematización de métodos numéricos para la solución de las ecuaciones que rigen la dinámica de los fluidos alrededor de un objeto teniendo en cuenta que en la interacción del fluido con estos objetos ocurren fenómenos como la disipación, difusión, convección, ondas de choque, las superficies de deslizamiento, capas límite, y turbulencia.

La aplicación de CFD es diversa, algunos de los campos en donde se aplica son: Mecánica de fluidos, transferencia de calor, aerodinámica espacial (vehículos espaciales), aerodinámica de vehículos terrestres, dinámica de vehículos navales y otras más (Osorio, 2010).

1.13.1 Fluent

El software fluido contiene las amplias capacidades de modelado físico necesarias para modelar flujo, turbulencia, transferencia de calor y reacciones para aplicaciones industriales.

Estos van desde el flujo de aire sobre el ala de un avión hasta la combustión en un horno, desde columnas de burbujas hasta plataformas petroleras (Fluent).

1.13.2 Gambit

Gambit es la herramienta de inferencia de modelos más allá del estándar global y modular, es un marco de software de código abierto para realizar ajustes estadísticos globales de modelos de física de partículas, utilizando una amplia gama de datos de partículas y astropartículas (Kyellestad, 2020).

CAPITULO II

METODOLOGÍA

2.1 Requerimiento de aire necesario para la ventilación

Al realizar el diseño de un sistema de ventilación en minas subterráneas es fundamental evaluar el requerimiento de aire necesario para cada zona de trabajo, este sistema debe generar un circuito de aire fresco, para calcularlo se debe de considerar tanto al personal que está laborando en el interior, así como los equipos que se encuentran en funcionamiento dentro de ella, además se debe considerar un factor de seguridad para que el aire no sea muy justo. Es importante decir que se debe prestar más atención a los topes de mina, las cuales son zonas con ventilación escasa.

En esta tesis se trabajó sobre el caso de estudio abordado en la tesis **“Estudio comparativo de tres modelos de transferencia de masa y energía mediante simulación en CFD para un sistema de ventilación mono extractivo en una obra de desarrollo de mina subterránea”** (Mejia, 2018) con la finalidad de encontrar el tiempo adecuado de ventilación de la obra.

2.1.1 Requerimiento de aire por personal en interior mina

La Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012 establece que se debe suministrar un volumen de aire de 1.50 m³/min por cada trabajador que se encuentre laborando en el interior de una mina subterránea, por lo cual, a partir de esto calculamos el caudal necesario a partir de la siguiente formula:

$$Q_1 = K \times N \quad (1)$$

Donde:

Q = Caudal total para número de personas que trabajen en mina (m^3/min).

K = Caudal mínimo por persona (m^3/min).

N = Número de personas en el lugar.

Se consideró una cantidad total de 8 personas laborando en interior mina.

$$Q_1 = \left(1.5 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) (8)$$

$$Q_1 = 12 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 423.72 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

Se realizó el ajuste en base a la normatividad peruana, la cual establece que, según la altitud, la cantidad de aire requerido por persona, ira aumentando a partir de la ya establecida de acuerdo a la siguiente escala.

- De 1,500 a 3,000 metros aumentará en un 40%.
- De 3,000 a 4,000 metros aumentará en un 70%.
- Sobre los 4,000 metros aumentará en 100%.

La mina subterránea que se analizó se encuentra localizada en el estado de Guanajuato, esto quiere decir que se encuentra a una altitud de 2012 metros sobre el nivel del mar, por lo tanto, al requerimiento de aire original por persona se le agrego un 40 % del mismo.

$$Q_1 = 12 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} + \left(12 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times 0.40 \right)$$

$$Q_1 = 16.8 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

2.1.2 Requerimiento de aire por equipos diésel de combustión interna

La Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012 establece que se debe suministrar un volumen de aire de 2.13 m³/min por cada caballo de fuerza de la maquinaria accionada por motores de combustión diésel, y para esto se deben tomar en cuenta las especificaciones de cada uno de los equipos que están en funcionamiento. Para este caso tomamos en cuenta un equipo de rezagado y uno de acarreo de mineral.

Para el LHD (rezagado):

- Potencia 278.94HP.
- Capacidad 12 m³.

Para el Camión (acarreo):

- Potencia 409.01 HP.

Para conocer el total de HP por equipo de combustión diésel se realizó una suma de los HP requeridos por cada uno de ellos:

$$HP_t = 278.94 \text{ hp} + 409.01 \text{hp}$$

$$HP_t = 687.95 \text{ HP}$$

Para calcular el requerimiento de aire fresco en base a los HP_t para el equipo de combustión interna utilizamos la siguiente formula:

$$Q_2 = K \times R \quad (2)$$

Donde:

Q = Caudal total para el número de equipos diésel trabajando en mina convertir a (m³/min).

K = Caudal mínimo por maquinaria diésel.

R = HP totales.

$$Q_2 = (2.13 \text{ m}^3/\text{min}) (687.95 \text{ hp})$$

$$Q_2 = 1465.33 \text{ m}^3/\text{min} = 51747.64 \text{ ft}^3/\text{min}$$

2.1.3 Requerimiento de aire final

Para calcular el caudal total requerido solo se realizó una sumatoria del caudal requerido por el personal que labora más el caudal requerido por los equipos de combustión diésel.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

$$Q_t = 16.8 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} + 1465.33 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$Q_t = 1482.13 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 24.70 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

2.1.4 Requerimiento del aire generado por el ventilador axial

Para el cálculo del caudal necesario que debe generar el ventilador axial, como primer punto se estimó la longitud de la mina, considerando las diferentes formas que tiene la tubería, para ello nos basamos en los datos de la Tabla 7:

Tabla 7-. Consideraciones para el cálculo de longitud equivalente.

No	FORMAS	L (Long. Equiv.)	Unid.	A considerar en el Túnel	L (Long. Equiv.)
1	Curva obtusa redonda	0.5	Pies	0	0
2	Angulo recto redondeado	1	Pies	0	0
3	Curva aguda redondeada	3	Pies	0	0
4	Curva obtusa curvada	15	Pies	0	0
5	Angulo Recto quebrado	150	Pies	0	0
6	Curva aguda curvada	150	Pies	0.5	75
7	Contracción gradual	1	Pies	0	0
8	Contracción abrupta	10	Pies	0	0
9	Expiación gradual	1	Pies	0	0
10	Expansión abrupta	20	Pies	1	20
11	Paso sobre nivel (optimo)	1	Pies	0	0
12	Paso sobre nivel (bueno)	65	Pies	0	0
13	Paso sobre nivel (malo)	290	Pies	0.5	145
14	Marco para puerta	70	Pies	0	0
15	Carro o jaula 20% de área de la galería	100	Pies	0	0
16	Carro o jaula 40% de área de la galería	500	Pies	0	0
17	Entrada	3	Pies	1	3
18	Descarga	65	Pies	1	65
19	Bifurcación :				
	- Derivación recta	60	Pies	0	0
	- Derivación a 90°	30	Pies	1	30
20	Junturas:				
	- Derivación recta	60	Pies	0	0
	- Derivación a 90°	30	Pies	1	30

FUENTE: Quevedo (2013)

A la longitud real se le adicionaron algunos metros debido al ángulo recto quebrado (150 ft), marco para puerta (70 ft) y una entrada a la mina (3 ft) dándonos una longitud equivalente de 223 ft la cual convertimos a metros.

$$223 \text{ ft} = 67.97 \text{ m}$$

$$L_{eq} = 150 \text{ m} + 67.97 \text{ m} = 217.97 \text{ m}$$

Para la ventilación se utilizó una tubería flexible (manga) que presenta las siguientes características:

- Tubería de poliéster reversible con PVC (100% sellada).
- Diámetro de 1 m.
- Factor de seguridad de 5.

Las características de la tubería cumplen con las Normas Internacionales de ductos flexibles de ventilación para minería. El fabricante proporciona un factor de fuga del 1% en cada 100m de tubería flexible.

Tabla 8.- Presión máxima de trabajo para ductos de ventilación.

Material	Máxima presión de trabajo permitido para ductos nuevos.	
	Presión de ruptura	Factor de seguridad 5xSF
Peso 600 g/m ² Espesor 0.75 mm	167.44" de c.a	33.48" de c.a
	41,709.00 Pa	8341.00 Pa
	4251.68 mm de c.a	850.25 mm de c.a

FUENTE: Quevedo (2013).

La información antes mencionada se reemplazó en la siguiente ecuación para obtener el requerimiento de aire fresco (al final de la tubería) el cual ventilará la obra.

$$Q_f = Q_t \left(1 - \frac{F}{100}\right)^{-\left(\frac{L}{100}\right)} \quad (4)$$

Donde:

Q_t= Requerimiento de aire para el número de personal y equipo de combustión diésel.

F= Factor de fuga (proporciona el fabricante).

L= Longitud equivalente de la mina.

$$Q_f = 24.70 \text{ m}^3/\text{s} \left(1 - \frac{1}{100}\right)^{-\left(\frac{217.97\text{m}}{100}\right)}$$

$$Q_f = 25.24 \text{ m}^3/\text{s} = 53480.53 \text{ ft}^3/\text{min}$$

2.1.5 Pérdidas de carga de la instalación

Las pérdidas de carga de un circuito de ventilación auxiliar pueden dividirse en pérdidas por fricción, pérdidas singulares y pérdidas por presión dinámica.

2.1.5.1 Pérdida por fricción

Para calcular la pérdida de presión por fricción cambiamos las unidades al sistema inglés, es decir la P será en pulgadas de c.a., C en ft, L en ft, Q en ft³ y A en ft². El factor de fricción K del ducto proporcionado por el fabricante es 2×10^{-9} .

$$P = \frac{K \times C \times L \times Q^2}{A^3} \quad (5)$$

Donde:

P = Caída de presión (Pa).

K = Factor de fricción de la tubería.

C = Perímetro del ducto (m).

L = Longitud del túnel (m).

Q = Caudal.

A = Área del ducto (m²).

- a) Para Q se tomó el promedio del caudal requerido por el número de personal y el equipo de combustión diésel (Q_t), así como del caudal final que saldrá por la tubería (Q_f) utilizada para la ventilación de la mina.

$$Q_{\text{Promedio}} = \frac{Q_t + Q_f}{2} \quad (6)$$

$$Q_{\text{Promedio}} = \frac{(24.70 \text{ m}^3/\text{s}) + (25.24 \text{ m}^3/\text{s})}{2}$$

$$Q_{\text{Promedio}} = 24.97 \text{ m}^3/\text{s} = 52908.43 \text{ ft}^3/\text{min}$$

- b) Para obtener C se debió calcular el perímetro de la tubería a utilizar para la ventilación de la mina:

$$C = (\pi)(d) \quad (7)$$

Donde:

C = Perímetro de la tubería (m).

d = Diámetro de la tubería (m).

$$C = (\pi)(1 \text{ m})$$

$$C = 3.1416 \text{ m} = 10.30 \text{ ft.}$$

- c) Para “L” se utilizó la longitud equivalente de la mina ya antes calculada, en este caso solo cambiamos las unidades al sistema inglés.

$$L = 217.97 \text{ m} = 715.12 \text{ ft}$$

- d) Se calculó el área de la tubería en base a su sección geométrica (círculo).

$$A = (\pi)(r)^2 \quad (8)$$

Donde:

$A = \text{Área de la tubería (m}^2\text{)}$.

$r = \text{radio de la tubería (m)}$.

$$A = (\pi)(0.5)^2$$

$$A = 0.785 \text{ m}^2 = 8.45 \text{ ft}^2$$

Al tener calculadas todas las variables que intervienen en la fórmula para estimar la pérdida de presión por fricción, sustituimos en la ecuación:

$$P = \frac{(2 \times 10^{-9})(10.30 \text{ ft})(715.125 \text{ ft})(52908.44 \text{ ft}^3/\text{min})^2}{(8.45 \text{ ft}^2)^3}$$

$$P = 68.39" \text{ c. a}$$

“c.a: Pulgada de columna de agua. Unidad de presión, igual a la presión ejercida por una columna de agua de una pulgada de altura a temperatura estándar.

A la pérdida de presión por fricción obtenida se le considero un porcentaje de pérdida de presión en la entrada y en la salida.

- Pérdidas por fricción en la entrada (5.5%):

$$P_e = (0.055)(68.39" \text{ c. a})$$

$$P_e = 3.76" \text{ c. a}$$

- Pérdidas por fricción en la salida (2.77%):

$$P_s = (0.0277)(68.39" \text{ c. a})$$

$$P_s = 1.89" \text{ c. a}$$

La pérdida de presión por fricción total está dada por la ecuación:

$$P_t = P + P_e + P_s \quad (9)$$

$$P_t = 68.39" \text{c.a} + 3.76" \text{c.a} + 1.89" \text{c. a}$$

$$P_t = 74.04" \text{c. a}$$

2.1.5.2 Perdidas por presión dinámica

En la configuración del sistema de ventilación al finalizar la ventana tendremos que utilizar un codo y poder entrar al túnel de conducción. Para calcular esta pérdida usamos la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{\text{din}} = \left(\frac{\rho \times V^2}{2 \times g} \right) \quad (10)$$

Donde:

ΔP_{din} = La pérdida de carga del aire (pulgadas de columnas de agua - c.a.).

ζ = El coeficiente de pérdida de carga.

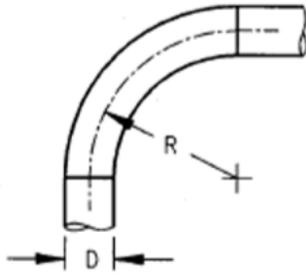
ρ = La densidad del aire (kg/m^3).

V = La velocidad del aire en el conducto (m/s).

g = Gravedad (m/s^2).

- a) Para determinar el coeficiente de la pérdida del elemento en tuberías en forma de codos utilizamos la Tabla 9, en la cual elegimos el caso más crítico, donde $R/D = 1.25$ y la pérdida $\zeta = 0.55$.

Tabla 9- Coeficiente de pérdidas en tuberías de codos.



R/D	Pérdida de carga Fracción de PD
2,75	0,26
2,50	0,22
2,25	0,26
2,00	0,27
1,75	0,32
1,50	0,39
1,25	0,55

CODOS DE SECCIÓN CIRCULAR

FUENTE: Quevedo (2013).

- b) Para conocer la velocidad del aire en el conducto se calculó la velocidad promedio del requerimiento de aire en la tubería aplicando la ecuación de continuidad:

$$Q = V \times A$$

Tenemos:

$$V = \frac{4 \times Q_{\text{promedio}}}{\pi (d)^2} \quad (11)$$

$$V = \frac{4 (24.97 \text{ m}^3/\text{s})}{\pi (1)^2}$$

$$V = 31.79 \text{ m/s} = 104.29 \text{ ft/s}$$

Al conocer estas variables se pasó a resolver la ecuación:

$$\Delta P_{\text{din}} = \left(\frac{(1.22 \text{ kg/m}^3)(31.79 \text{ m/s})^2}{2 (9.81 \text{ m/s}^2)} \right)$$

$$\Delta P_{\text{din}} = 63.1498 \text{ kg/m}^2 = 2.48 \text{ "c. a}$$

2.1.5.3 Perdidas singulares

Para calcular las perdidas singulares solo se multiplico el coeficiente de pérdida de carga determinado en base a la tabla 9 por la pérdida de presión dinámica.

$$\Delta P_{\text{sin}} = \kappa P_{\text{din}}$$

$$\Delta P_{\text{sin}} = (0.55)(2.48" \text{ c. a})$$

$$\Delta P_{\text{sin}} = 1.364" \text{ c. a}$$

2.1.5.4 Presión total

Al tener calculadas cada una de las pérdidas que intervienen en la tubería, pudimos determinar la pérdida de presión total en el sistema mediante la siguiente formula:

$$P_t = P_f + \Delta P_{\text{din}} = P_{\text{estatica}} + P_{\text{dinamica}} \quad (12)$$

$$P_t = 74.14" \text{ c. a} + 2.48" \text{ c. a}$$

$$P_t = 76.62" \text{ c. a}$$

Al analizar los cálculos obtenidos se estimó:

- Un caudal final de 53480.53 ft³/min.
- Una presión total de sistema de 76.62" c.a.

Debido a que los datos obtenidos de caudal y presión total del sistema son muy elevados. El modelo del extractor propuesto no será suficiente para cumplir con esos requerimientos para este caso se necesitarán 3 extractores, en este sentido en el presente trabajo se simulará el efecto de extracción de una sola unidad con la finalidad de conocer la posible transferencia de masa y calor del mismo. El extractor con el que se trabajará tendrá los siguientes requerimientos de presión y caudal.

$$P_r = \frac{76.62" \text{ c. a}}{3} = 25.54" \text{ c. a}$$

$$Q_r = \frac{52908.44 \text{ ft}^3/\text{min}}{3} = 17636.14 \text{ ft}^3/\text{min}$$

2.2 Diseño del extractor

El extractor propuesto para el sistema de ventilación es un Aéreo extractor- Inyector de tubo axial ATC con hélice de aluminio inyectado y/o polipropileno reforzado con fibra de vidrio de 7 alabes en ángulo de 45°, las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10-. Especificaciones técnicas del extractor.

Modelo	Caudal		Amperaje		Potencia (PH)	RPM	Peso Aprox.	
	CFM	m ³ /hr	220 V	440 V			Lb	Kg
XDP/A '6-24/45°	9200	15631	6.2	3.1	2	1160	92	42

FUENTE: Mejía (2018).

Una vez elegido el modelo del extractor, se construye y se adapta su geometría mediante el programa MixSim 2.1.10, el cual nos permite crear o diseñar equipo que tiene movimiento (Ver Figura 14).

1. Se generó un tanque cilíndrico, este tiene la función de recubrir el extractor propuesto.
 - Diámetro= 1 m
 - Altura 1.1 m
 - Fondo plano y parte superior abierta.
2. Se procedió a generar un cilindro el cual es el soporte (eje) del extractor. Este se ubicó en el centro del recubrimiento del extractor.
 - Diámetro= 0.08 m
 - Altura= 0.9 m
3. Se crearon las aspas del extractor, las cuales están a 0.1 m de la parte inferior del eje.
 - 7 alabes (aspas)

- Angulo de 45°
4. Para finalizar el diseño se llevó a cabo el mallado la geometría en el programa Gambit.

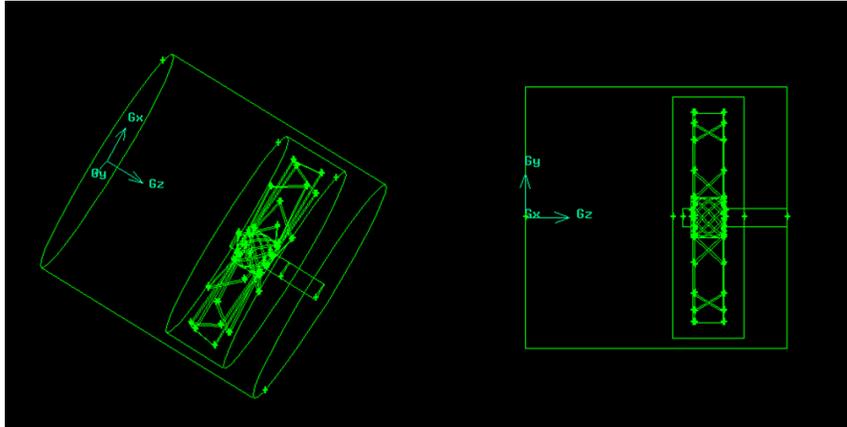


Figura 14-. Extractor propuesto.

2.3 Geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea

Mediante el uso del programa Gambit el cual crea volúmenes utilizando sólidos, se llevó a cabo el diseño geométrico de la obra subterránea, así como la tubería para el circuito de ventilación (tubería para el suministro de aire fresco y tubería para la extracción del aire viciado). A continuación, se proporcionan los detalles que conformaron el diseño:

- Obra subterránea: dimensión de 7 m x 7 m con una longitud de 150 m.
- Manga de ventilación: tubería concéntrica con un radio de 0.5 m y una longitud de 120 m se colocó en la parte superior derecha a una altura de 5 m.
- Ducto de extracción: tiene un diámetro de 1 m, longitud de 145 m y se ubicó en el centro de la obra a una altura de 6 m.
- Generador de combustión diésel: se generó un tubo concéntrico con un diámetro de 0.08 m, a la altura de 1 m ubicado a 5 m del tope de la mina. La combustión generada será constante ya que los equipos están en constante movimiento (Ver Figura 15).

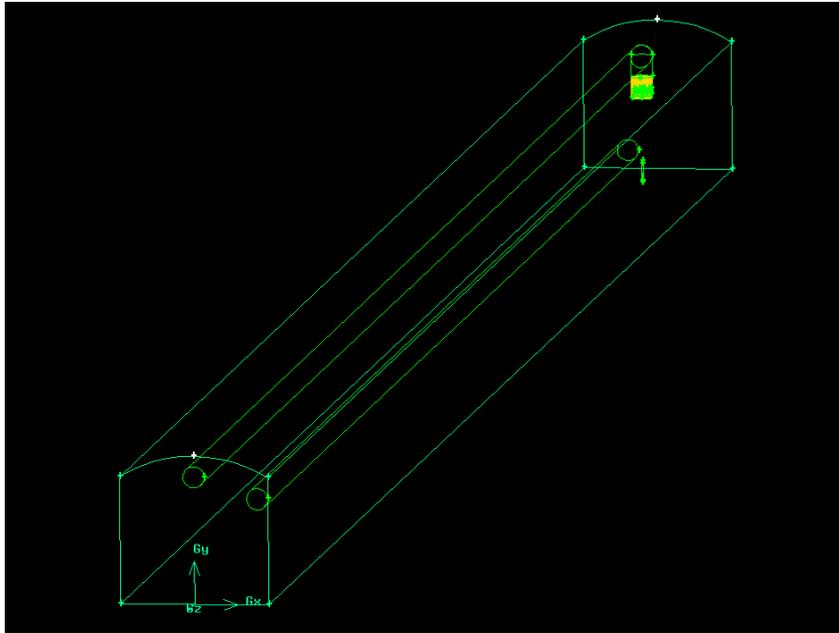


Figura 15.- Geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea sin mallar.

2.4 Mallado de la geometría de la obra de desarrollo en la mina subterránea

Una vez teniendo la geometría completa se comenzó a realizar el mallado de cada una de las estructuras utilizando debido a sus características geométricas un tipo de celda y fisura diferente esto es con la finalidad de tener una mejor resolución (Ver Tabla 11) (Ver Figura 16).

Tabla 11.- Datos para el mallado de las estructuras de la mina.

Estructura	Celda	Fisura
Mina	Hexaédrica	0.05
Tubería	Tetraédrica	0.03

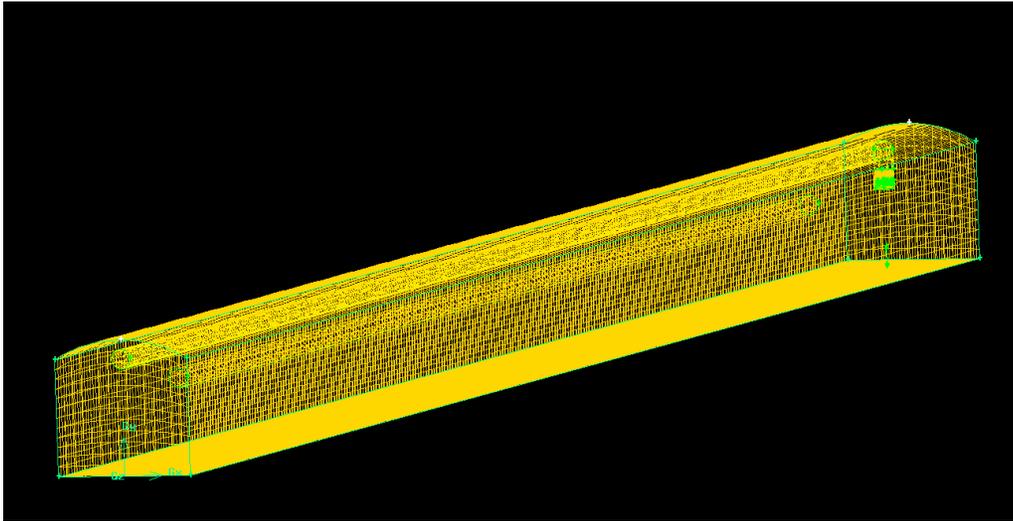


Figura 16-. Geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea mallada.

2.5 Simulación de ventilación en la obra de desarrollo de la mina

La ventilación auxiliar es un método muy efectivo en la minería subterránea, su objetivo es proporcionar un ambiente adecuado para el buen desempeño de los trabajadores y de la maquinaria. Además, este tipo de ventilación permite acortar los tiempos de espera para entrar a un lugar después de voladura, esto ayuda a la evacuación de los gases nocivos con mayor rapidez.

Es importante mencionar que siempre que se ventile una zona esta requerirá una cantidad de aire y presión en específico, en la presente investigación se simulo en el programa Fluent la combustión de los equipos diésel los cuales generan CO y CO₂ y a partir de esto se realizó la ventilación y extracción de dichos gases.

2.5.1 Contaminación de la zona por gases nocivos

- 1) Se cargó la geometría mallada de la obra subterránea creada en Gambit (formato.msh) en el programa Fluent.
- 2) Como primer punto definimos la escala en metros ya que necesitamos que esté en escala real. Esto es necesario, ya que Fluent toma como unidad de medida la que se generó en Gambit, y en este, la geometría se realizó en milímetros.
- 3) Seleccionamos el modelo “K- épsilon”. Se elige este debido a que “podría existir la probabilidad de que la ventilación aplicada en un sitio genere resultados que estén en el límite de lo establecido por las normas, sin ningún factor de seguridad o que estos solo den buenos resultados en un solo factor (temperatura, humedad, CO, CO₂) analizado” (López Mejía, 2018).
- 4) Se dieron de alta los compuestos de las reacciones generados por los equipos de combustión diésel en la sección de especies.

Reacciones:

- Monóxido de carbono: $C_{10}H_{22} + 10.5 O_2 \rightarrow 10 CO + 11 H_2O$
- Dióxido de Carbono: $2 CO + 2 H_2O + O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 2 H_2O$

(Mejía, 2018)

Compuestos:

- C (Carbono monoatómico).
 - H (Hidrogeno monoatómico).
 - O₂ (Oxígeno).
 - CO₂ (Bióxido de Carbono).
 - H₂O (Agua).
 - CO (Monóxido de Carbono).
- 5) Seleccionaremos los materiales a trabajar, los cuales fueron un fluido (aire) y un sólido roca (tepetate).

- 6) Se definieron las condiciones de zonas celulares para el caso propuesto, todas las que aparecieron fueron modificadas a en tipo fluido.
- 7) Se definieron las condiciones de frontera para contaminar la zona como se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12- Condiciones de frontera para contaminar la zona.

Condición de frontera	Tipo de condición
Aire fresco	Pared
Aire quemador	Entrada de flujo
Diésel quemador	Entrada de flujo
Entrada extractor	Pared
Entrada mina	Pared
Pared derecha	Pared
Pared izquierda	Pared
Techo	Pared
Tope mina	Pared

En la Tabla 12 podemos notar que la mayoría se encuentran en modo pared y solo tenemos aire quemador y diésel quemador como entrada de flujo, esto es porque estos últimos se encargaron de contaminar la zona y los demás solo están reteniendo esta contaminación dentro del lugar.

- 8) Se revisará que el apartado de métodos de solución, el de monitores y el de inicialización de solución hayan generado valores con la información ya dada.
- 9) Nos dirigimos al apartado de cálculo de actividades en donde se programó para que cada 10 segundos corridos en el programa se guardara la información.
- 10) Para comenzar a calcular, nos dirigimos a ejecutar cálculo, en el cual se programaron los segundos a calcular, se recomienda sea de poco a poco para que no tenga fallas el programa. Para iniciar y comprobar que el programa funcionara solo corrimos 10 segundos.

- 11) Para revisar los resultados utilizamos la opción de contornos (esta nos mostrara en forma de dibujo los resultados) y la opción de gráficos (esa nos mostrara los resultados en gráficas) .
- 12) Para concluir esta parte se le fueron corriendo más segundos y verificando al mismo tiempo los contornos hasta que la zona se tiño de color rojo. Este color indica que la zona está llena de gases nocivos.

2.5.2 Extracción de gases nocivos

- 1) Regresamos a la parte donde se definieron las condiciones de frontera (paso 6 del subtema “Contaminación de la zona por gases nocivos”) y 3 de ellas fueron cambiadas como se muestra en la Tabla 13:

Tabla 13-. Condiciones de frontera para la extracción de gases nocivos.

Condición de frontera	Tipo de condición
Aire fresco	Entrada de flujo
Aire quemador	Entrada de flujo
Diésel quemador	Entrada de flujo
Entrada extractor	Presión de salida
Entrada mina	Presión de salida
Pared derecha	Pared
Pared izquierda	Pared
Techo	Pared
Tope mina	Pared

- a) El aire fresco cambio de pared a entrada de flujo, esto indica que se está inyectando aire por la manga de ventilación.
- b) La entrada de extractor cambio de pared a presión de salida, esto quiere decir que se están extrayendo los gases por medio del extractor.
- c) La entrada mina cambio de pared a presión de salida, esto significa que por medio de la entrada también se están extrayendo los gases.

- 2) Se realizan los pasos 7, 8, 9 y 11 mencionados en el subtema anterior “Contaminación de la zona por gases nocivos”.
- 3) Para concluir con la simulación, se fueron corriendo más segundos y verificando al mismo tiempo los contornos hasta que la zona se tiñó de color verde-azul. Este color indica que la zona está limpia de gases nocivos.

Para conocer más detalles de los aspectos de simulación en el software Fluent consultar “Manual de uso del software CFD para la simulación de sistemas de ventilación en minas subterráneas”.

CAPITULO III

RESULTADOS

En el presente capítulo se mostrarán los perfiles y contornos obtenidos en la simulación a partir de cada tiempo seleccionado en función de los gases nocivos (CO y CO₂) generados por los equipos, así como la temperatura y humedad de tal manera que a partir de ellos podamos encontrar el tiempo adecuado de extracción para tener las condiciones establecidas en las normas que regulan estos aspectos para que un trabajador pueda llevar a cabo las actividades que le fueron asignadas. Dichos resultados se clasificarán de la siguiente manera:

1. Perfiles y contornos de monóxido de carbono CO con distintos tiempos de simulación.
2. Perfiles y contornos de dióxido de carbono CO₂ con distintos tiempos de simulación.
3. Perfiles y contornos de temperatura con distintos tiempos de simulación.
4. Perfiles y contornos de humedad con distintos tiempos de simulación.
5. Conclusiones.

3.1 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un gas con toxicidad extrema, debido a esto, en la NOM-010-STPS-1999 se establece que, para condiciones normales de temperatura y presión, y para una jornada laboral de 8 horas diarias y 40 horas a la semana, el límite máximo permisible de exposición de monóxido de carbono es de 50 ppm.

3.1.1 Obra llena de gases nocivos

En las Figura 17 se muestra el perfil y en la Figura 18 el contorno del monóxido de carbono de la obra subterránea. En estos se muestran los valores sin simulación para la extracción de los gases nocivos. En base a esto podemos afirmar que la mayor concentración de monóxido de carbono se encuentra a los 20 m de la entrada y la menor concentración se encuentra en el tope de la obra.

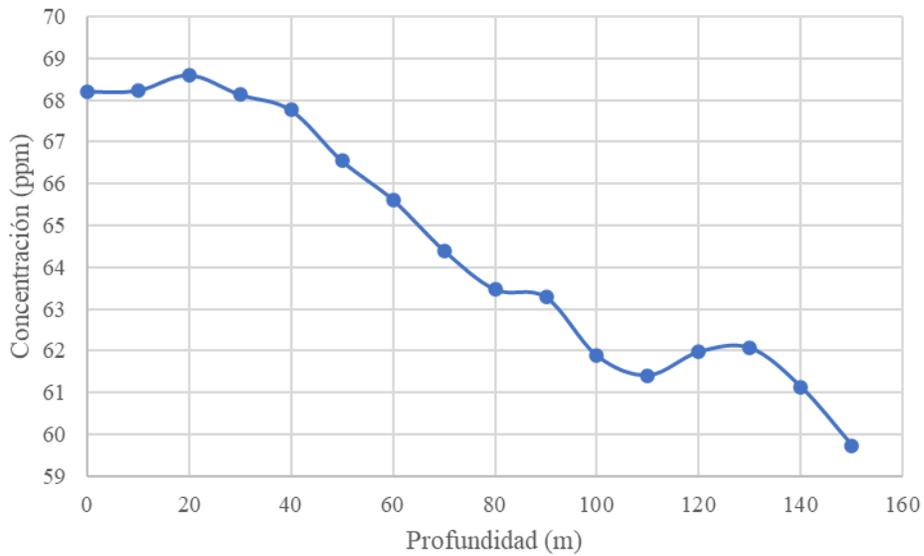


Figura 17-. Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO).

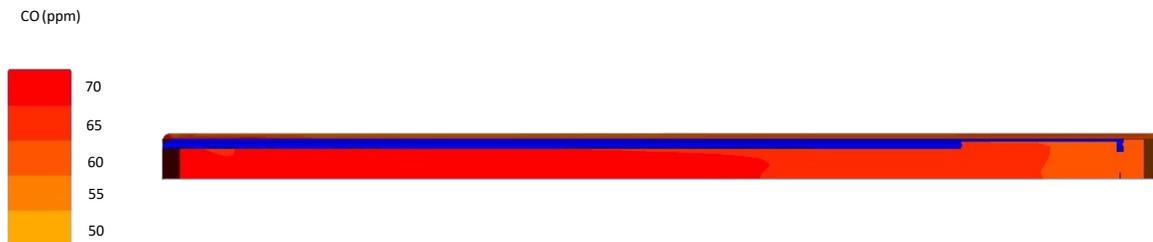


Figura 18-. Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO).

3.1.2 Simulación 10 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción de monóxido de carbono con un tiempo de 10 segundos la mayor concentración se sigue ubicando a los 20 m sin embargo ésta subió 0.5 ppm, pero esto no es alarmante debido a que en los primeros metros las concentraciones disminuyeron. La menor concentración se ubica nuevamente en el tope, pero esta sigue siendo la misma que al inicio.

Podemos notar que a los 100 m hay una baja en la concentración mientras que a los 130 m se observa un aumento y a los 150 m hay una disminución. Esto sucede en esta zona debido al sistema mixto de ventilación con el que se está trabajando (Ver Figura 19).

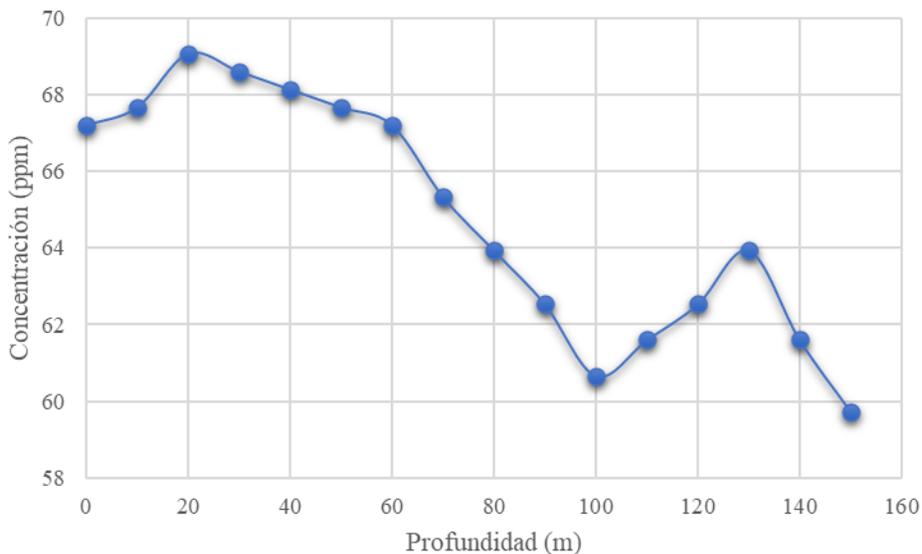


Figura 19.- Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 10 segundos de simulación.

La Figura 20 muestra el contorno de distribución de concentración de monóxido de carbono en la obra. En este contorno podemos notar que en los primeros 20 m de la obra la concentración es menor debido a que esta se está dispersando en la entrada. De los 20 m a los 100 m es la zona con más altas concentraciones. En los últimos 50 m se nota un juego con la concentración que va variando de entre 61 ppm y 64 ppm. Además, se comienza a notar como los gases están siendo absorbidos por el extractor.

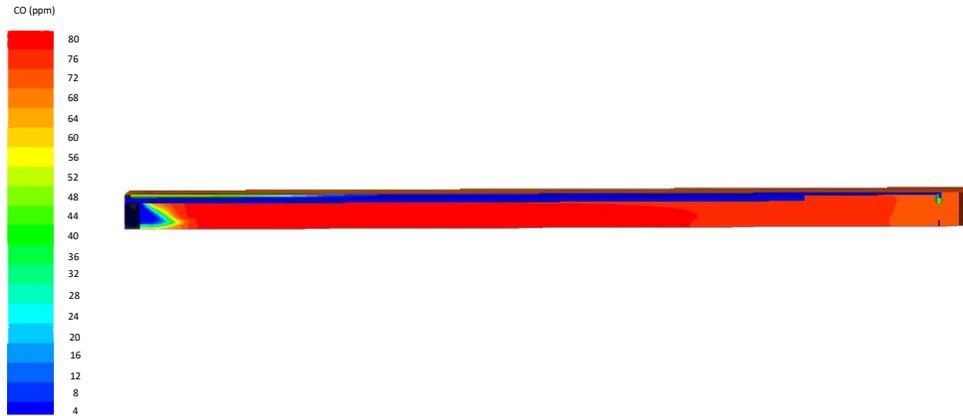


Figura 20- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 10 segundos de simulación.

3.1.3 Simulación 20 segundos

En la Figura 21 podemos observar el perfil de monóxido de carbono obtenido con 20 segundos de simulación, en este podemos ver que la concentración en los primeros 20 m ha disminuido un 55%. De los 20 m a los 90 m partiendo de la entrada las concentraciones van disminuyendo a mayor profundidad, en algunos puntos la concentración se redujo hasta 5.8 ppm.

A partir de los 100 m todos los valores aumentaron en comparación de los obtenidos en la simulación de 10 segundos mostrando el tope (150 m) como la zona con mayor concentración con 67.9 ppm.

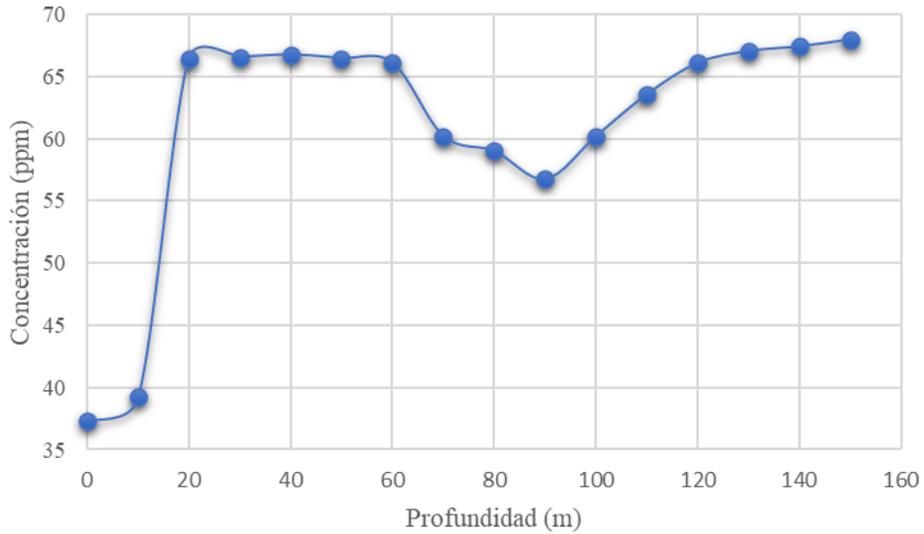


Figura 21- Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 20 segundos de simulación.

En la Figura 22 se muestra el contorno y se observa que partiendo de la entrada en los primeros 10 m la concentración es muy poca, se nota como la parte del suelo tiene menor concentración que la zona del techo. También en el extractor se logra apreciar como la concentración ha aumentado teniendo dentro un aproximado de 48 ppm.

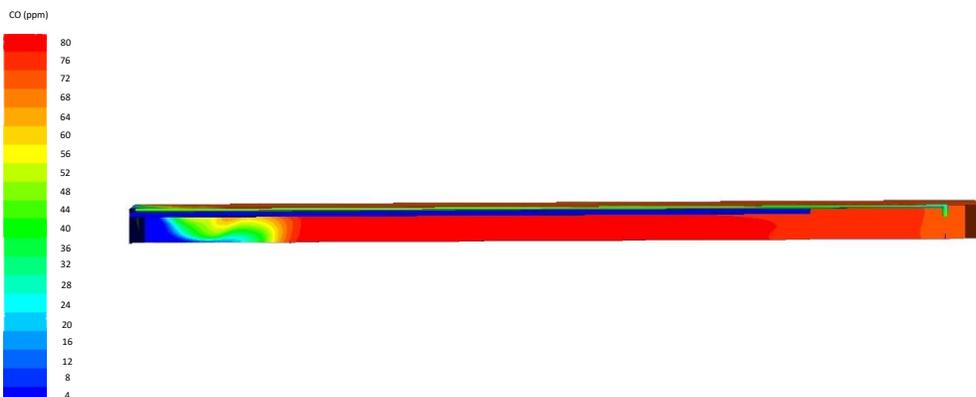


Figura 22- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 20 segundos de simulación.

3.1.4 Simulación 40 segundos

En la Figura 23 se muestra el perfil de monóxido de carbono con simulación de 40 segundos, analizándolo podemos llegar a las siguientes conclusiones: en los primeros 20 m existe una concentración mínima; a los 20 m la concentración bajo de 66.5 ppm obtenida en la simulación de 20 segundos a 12.4 ppm, esto quiere decir que con 20 segundos más aplicando el sistema hubo una diferencia de concentración de 54.1 ppm.

En general, se puede afirmar que la concentración disminuyó en todos los puntos de la obra y a diferencia de los resultados del tiempo anterior en donde la zona con mayor concentración se encontraba a los 150 m con 67.9 ppm bajo a una concentración de 57.6 ppm y ahora la concentración mayor se encuentra entre los 50 m y 80 m.

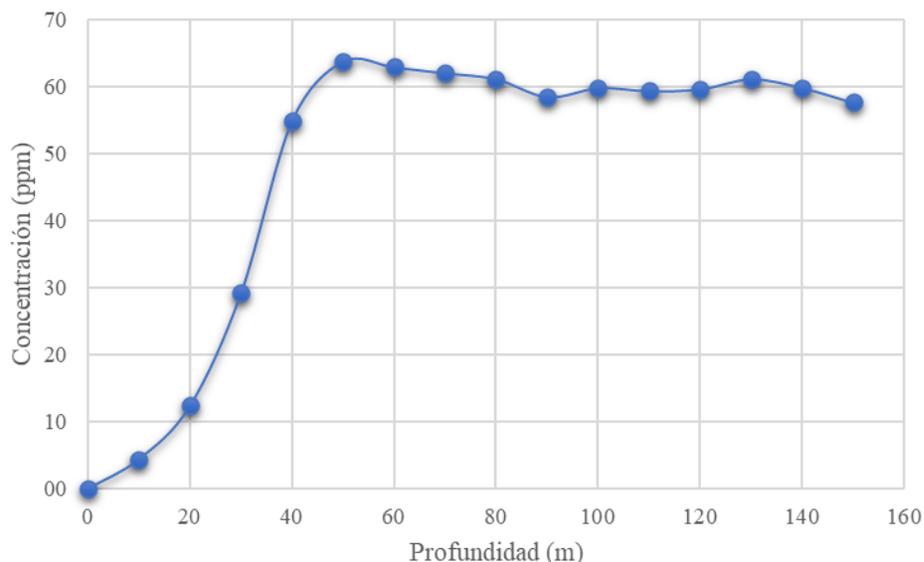


Figura 23.- Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 40 segundos de simulación.

Observando el contorno obtenido alcanzamos a percibir como en los primeros 30 m la concentración disminuyó considerablemente e incluso en los primeros 10 m esta no pasa de 5 ppm, sin embargo, en el resto de la obra se nota más uniforme con concentraciones entre las 10 ppm y 64 ppm (Ver Figura 24).

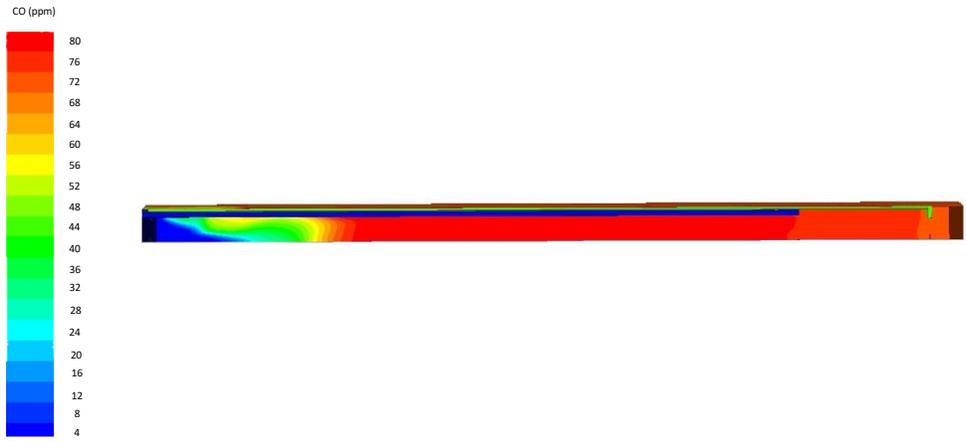


Figura 24.- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 40 segundos de simulación.

3.1.5 Simulación 80 segundos

En la Figura 25 podemos observar el perfil de monóxido de carbono obtenido con 80 segundos de simulación, en él se muestra como en los primeros 30 m de la obra la concentración del monóxido es menor de la presente en la simulación de 40 segundos. En los 40 m y 50 m se disminuyó la concentración en un 50% y después de esta zona hasta el tope la disminución fue de 5 ppm a lo largo de la obra.

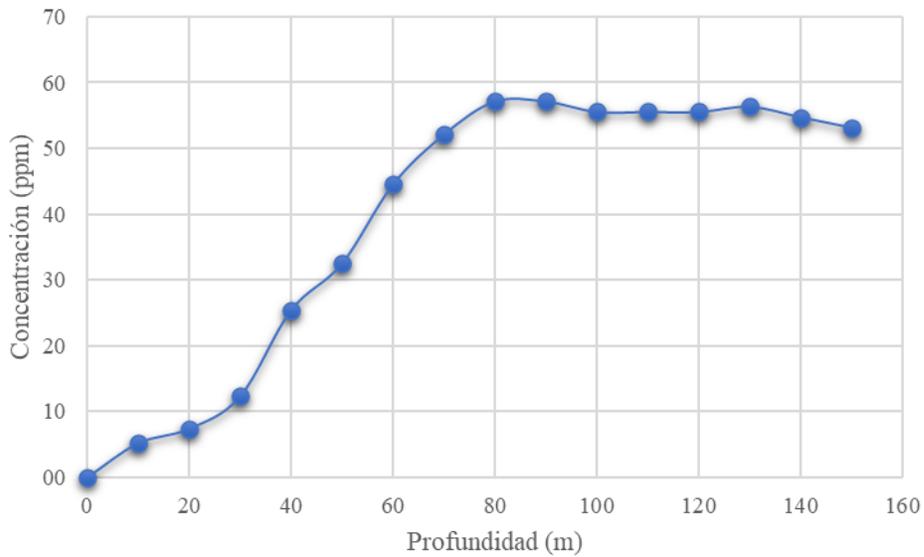


Figura 25.- Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 80 segundos de simulación.

En el contorno de la Figura 26 observamos que de la entrada de la mina a los 60 m se muestran tonalidades distintas que nos indican que las concentraciones están ente 0 ppm y 45 ppm. En el resto de la obra las concentraciones son mayores yendo desde las 50 ppm hasta las 57.1 ppm. Dentro del tubo de extracción se puede notar una concentración de aproximadamente 40 ppm.

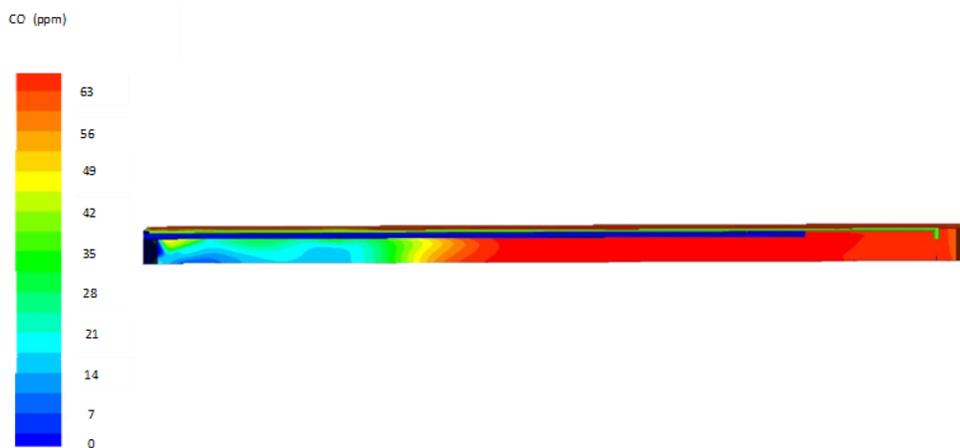


Figura 26.- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 80 segundos de simulación.

3.1.6 Simulación 160 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción con un tiempo de 160 segundos obtuvimos los resultados mostrados en la Figura 27 en donde se muestra que de la entrada a los 70 m en comparación a los 80 segundos la disminución de concentración de monóxido fue de 0.5 ppm a 3.6 ppm.

En el resto de la obra las concentraciones se mantuvieron entre las 50 ppm y 55 ppm mientras que al mismo tiempo estas fueron más bajas que las obtenidas en la simulación anterior.

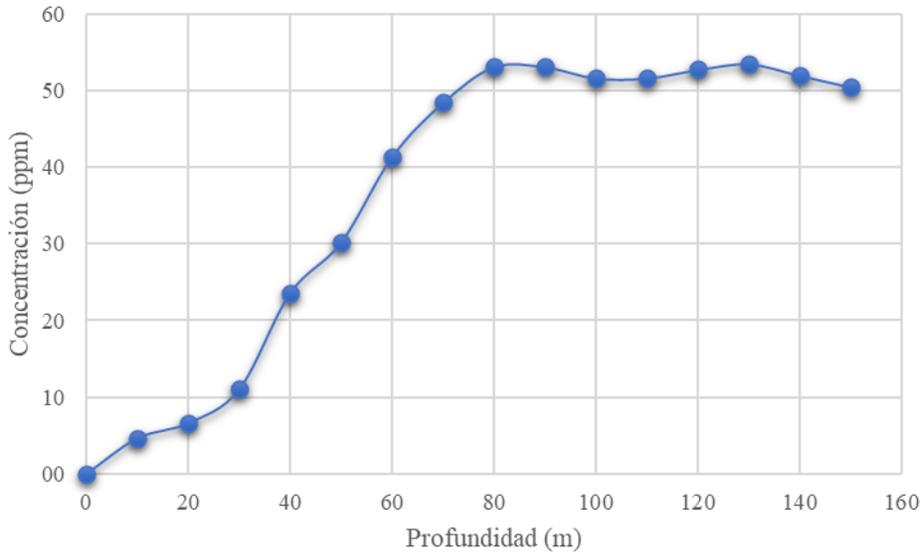


Figura 27- Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 160 segundos de simulación.

En el contorno de la Figura 28 podemos notar que la mayor concentración de monóxido de carbono se encuentra entre los 80 m y 90 m, además, este también nos muestra que la tubería del extractor ahora tiene dentro una concentración de entre 38 ppm y 56 ppm, esto nos muestra que los gases efectivamente están siendo extraídos.

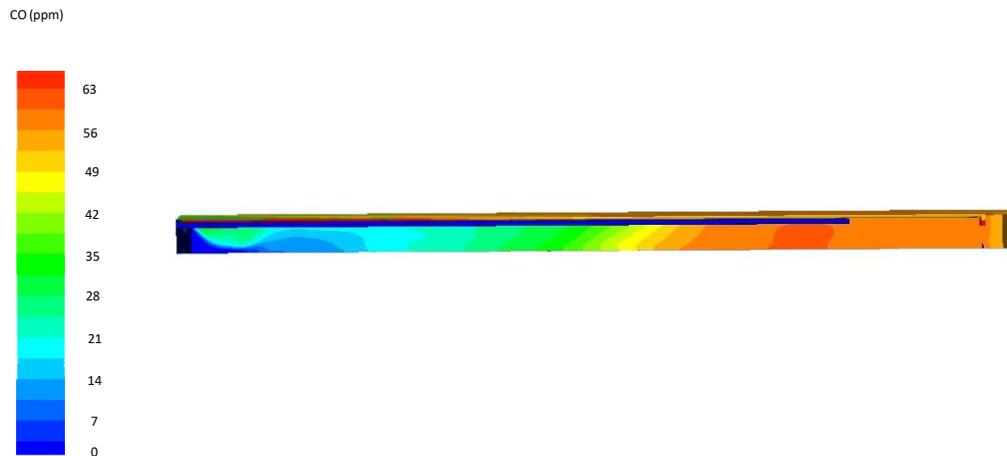


Figura 28- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 160 segundos de simulación.

3.1.7 Simulación 320 segundos

En la Figura 29 podemos observar el perfil de monóxido de carbono obtenido con 320 segundos de simulación, este nos arrojó como resultado que desde la entrada hasta los 40m la concentración registrada se encuentra por debajo de las 20 ppm. A lo largo de la obra restante la concentración disminuyó a comparación de la registrada en el tiempo anterior, en la mayoría de disminuyó 10 ppm, aunque en algunos puntos llevo a bajar hasta 20 ppm.

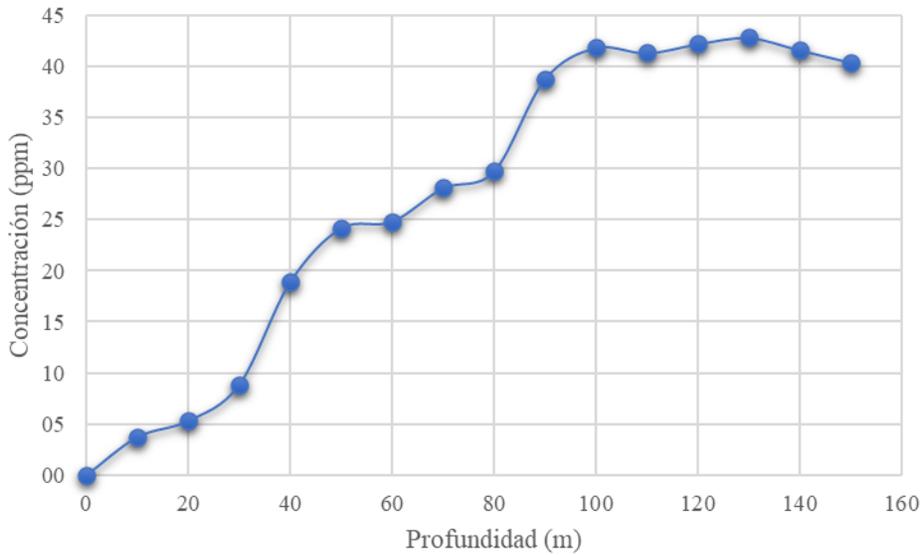


Figura 29.- Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 320 segundos de simulación.

Analizando el perfil mostrado en la Figura 29 en conjunto con el contorno de la Figura 30, se obtuvo que la concentración más alta, se encuentra ubicada a los 130 m con una concentración de 42.8 ppm. También podemos notar que la concentración dentro de la tubería de extracción aumento considerablemente.

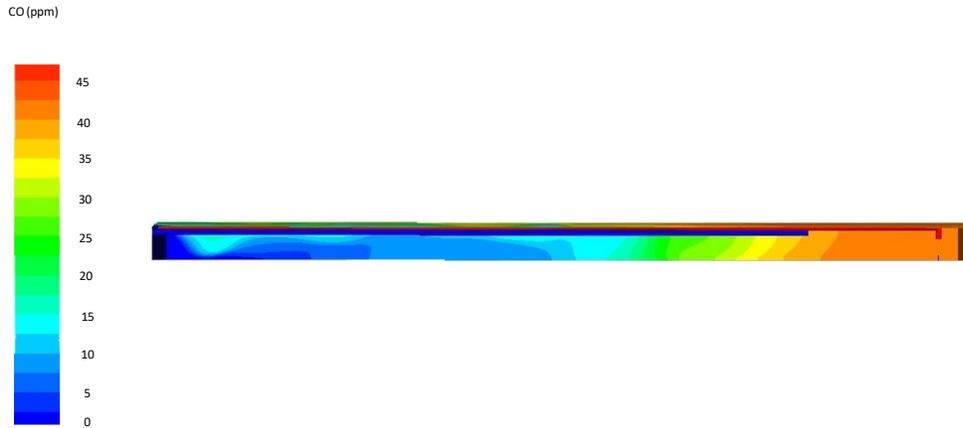


Figura 30- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 320 segundos de simulación.

3.1.8 Simulación 640 segundos

La concentración disminuyó considerablemente a lo largo de toda la obra, en la simulación de 320 segundos, a partir de los 40 m hasta el final las concentraciones estaban por arriba de las 15 ppm, ahora en cualquier punto las concentraciones son igual a 15 ppm o menos (Ver Figura 31).

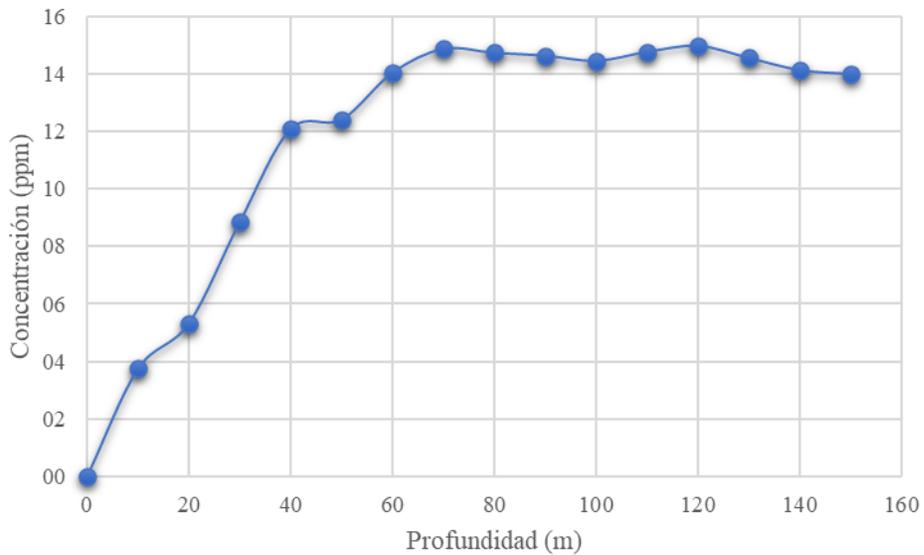


Figura 31- Perfil de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 640 segundos de simulación.

El contorno mostrado en la Figura 32, nos deja ver como toda la zona de la obra ahora se encuentra sin alta concentración de monóxido y además como la tubería del extractor sigue extrayendo el gas.

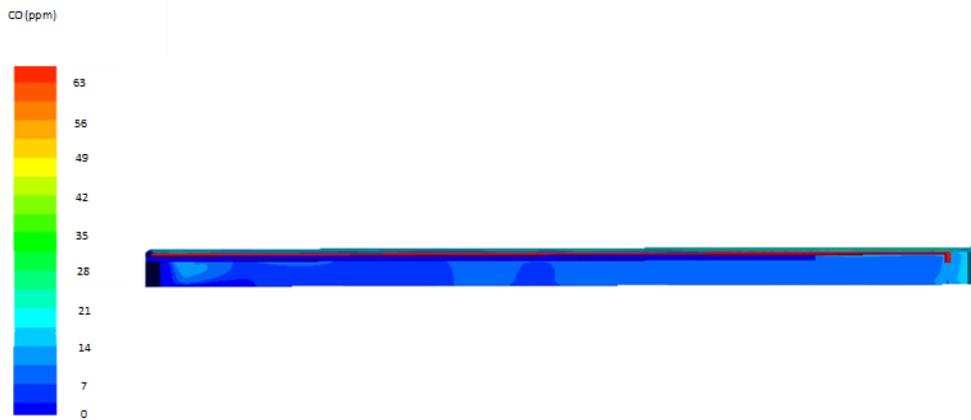


Figura 32-. Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO) a los 640 segundos de simulación.

3.1.9 Conclusión del monóxido de carbono

El mejor tiempo para el parámetro del monóxido de carbono es el de 320 segundos en el cual encontramos que la mayor concentración es de 42.8 ppm la cual nos indica que la concentración está por debajo del límite máximo permisible establecido por la norma y que se ha llegado a condiciones deseables.

3.2 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono es un gas que puede afectar la respiración de las personas expuestas al mismo, debido a esto, en la NOM-010-STPS-1999 se establece que, para condiciones normales de temperatura y presión, y para una jornada laboral de 8 horas diarias y 40 horas a la semana, el límite máximo permisible de exposición de CO₂ es de 5000 ppm.

3.2.1 Obra llena de gases nocivos

En la Figura 33 se muestra el perfil y en la Figura 34 el contorno del monóxido de carbono de la mina subterránea. En estos se muestran los valores sin simulación para la extracción de los gases nocivos. En base a esto podemos afirmar que la mayor concentración de dióxido de carbono se encuentra a los 130 m de la entrada y la menor concentración se encuentra en los primeros 10 m. La concentración total de la zona es de 83,200 ppm.

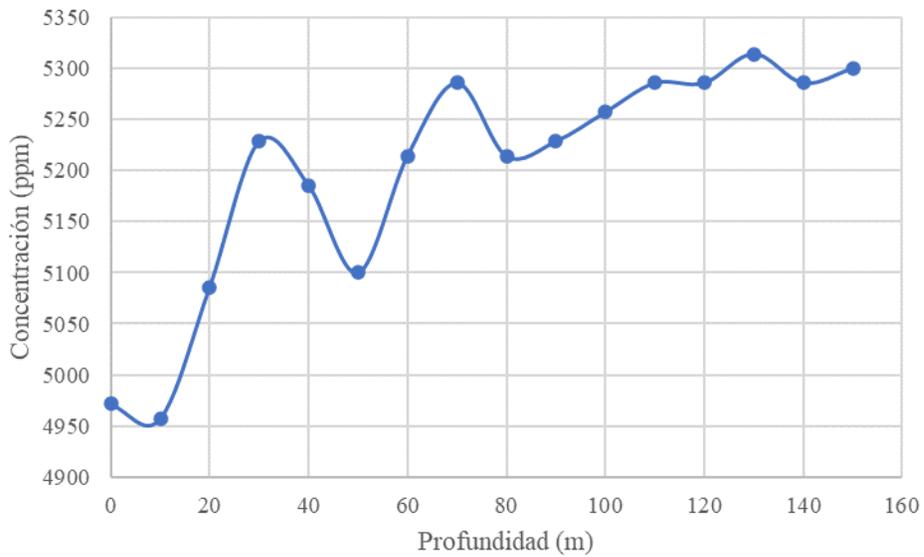


Figura 33- Perfil de concentración de dióxido de carbono (CO₂).

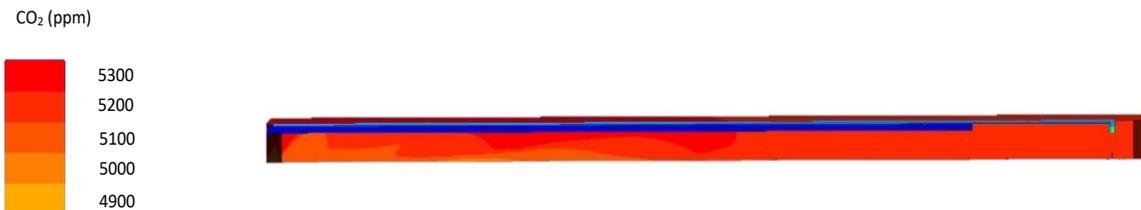


Figura 34- Contorno de concentración de monóxido de carbono (CO₂).

3.2.2 Simulación 10 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción con un tiempo de 10 segundos la concentración bajo, ahora, en ningún punto de la obra la concentración llega a 5300 ppm. La máxima concentración registrada es en el tope de la obra de desarrollo de la mina, el cual corresponde 5297.1 ppm, sin embargo, esta es menor que la registrada antes de llevar a cabo la extracción (Ver Figura 35).

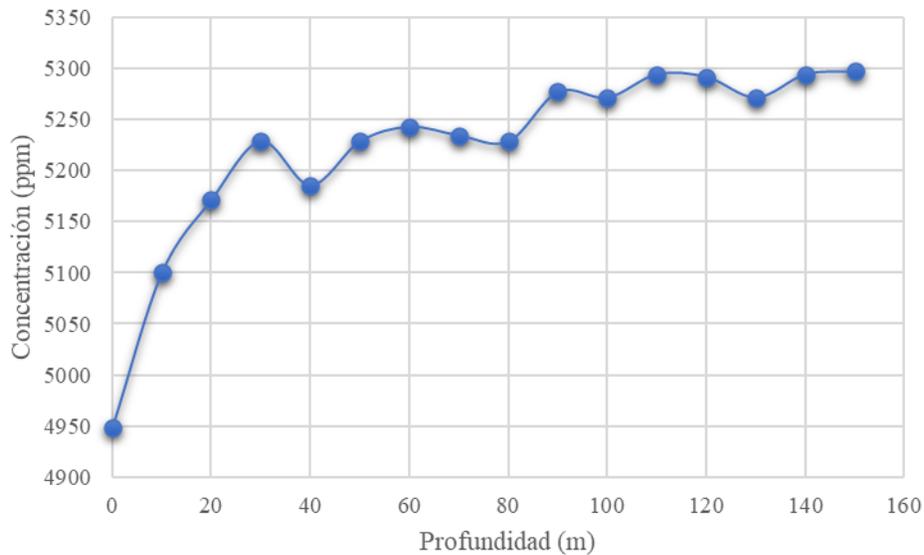


Figura 35.- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO₂) a los 10 segundos de simulación.

La Figura 36 muestra el contorno de dióxido de carbono a lo largo de la obra de desarrollo de la mina subterránea. En este contorno podemos observar que la concentración va aumentando conforme se avanza a partir de la entrada al tope que es donde se encuentra el equipo trabajando. En la entrada apenas y se puede observar que la concentración es menor, mientras que se empieza a notar en la entrada del extractor el trabajo que está realizando.

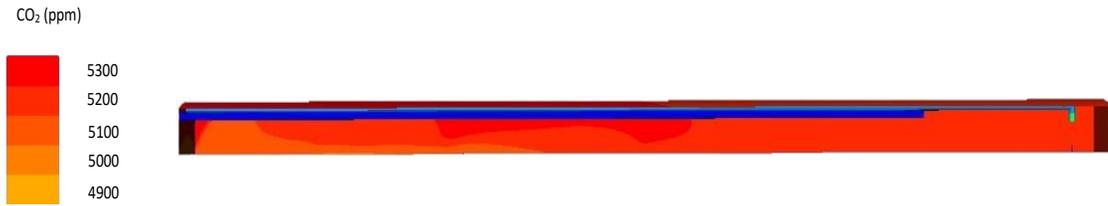


Figura 36- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO₂) a los 10 segundos de simulación.

3.2.3 Simulación 20 segundos

En la Figura 37 tenemos el perfil de dióxido de carbono obtenido al simular 20 segundos de extracción, después de analizar los resultados podemos llegar a las siguientes conclusiones: en general la concentración dentro de la obra se redujo en todos los puntos; desde la entrada hasta los 90 m la concentración se encuentra con valores menores a 5000 ppm; de los 100 m hasta los 150 m donde finaliza la obra, la presencia de gases no excede las 5050 ppm; la mayor concentración se sigue ubicando en el tope de la obra, sin embargo, descendió 264.8 ppm.

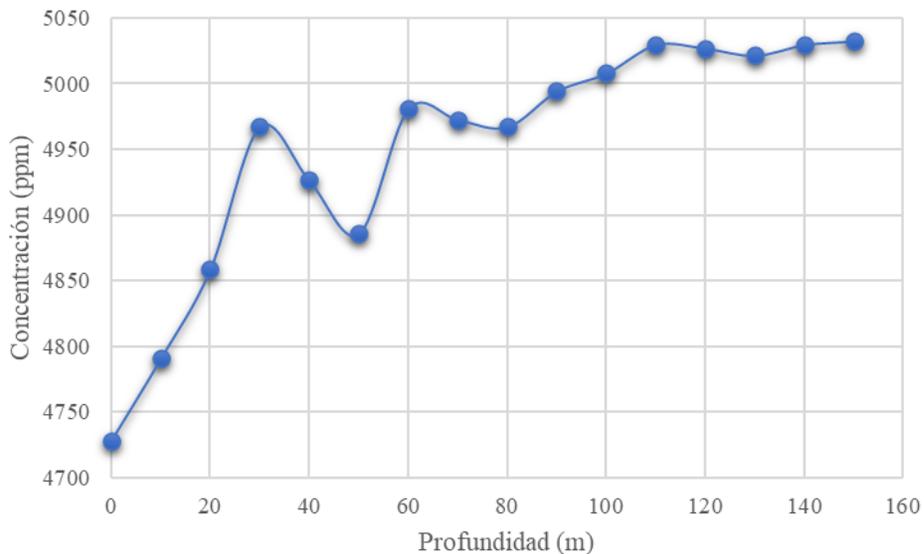


Figura 37- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO₂) a los 20 segundos de simulación.

Obtenido el contorno (Ver Figura 38), y después de analizarlo podemos notar que, en base a la gama mostrada al lado izquierdo, en los primeros 30 m se nota una concentración menor al resto de la obra la cual no sobrepasa las 4900 ppm. En la tubería de extracción se logra ver una concentración menor a la registrada en la simulación de 10 segundos, esto indica que el extractor en conjunto con la tubería está realizando su trabajo.

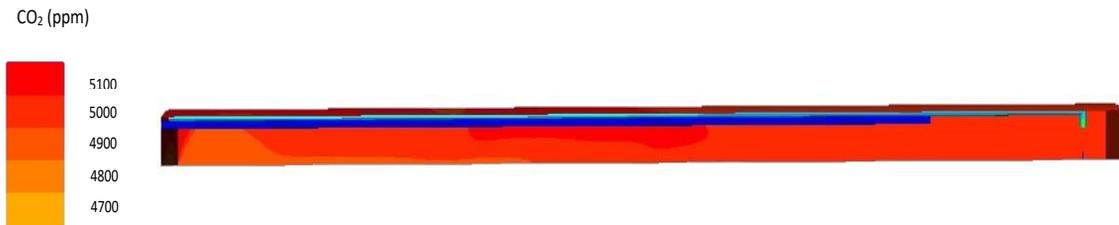


Figura 38- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO₂) a los 20 segundos de simulación.

3.2.4 Simulación 40 segundos

En la Figura 39 podemos observar el perfil de dióxido de carbono obtenido con 40 segundos de simulación, en él se muestra como las concentraciones no exceden de 5000 ppm en ningún punto. La zona con menor concentración es de la entrada hasta los 20 m, después de ahí las concentraciones están entre 4700 ppm y 4800 ppm y aunque la mayor concentración se sigue ubicando en el tope este disminuye 239.2 ppm, dejando a la zona con 4793.1 ppm.

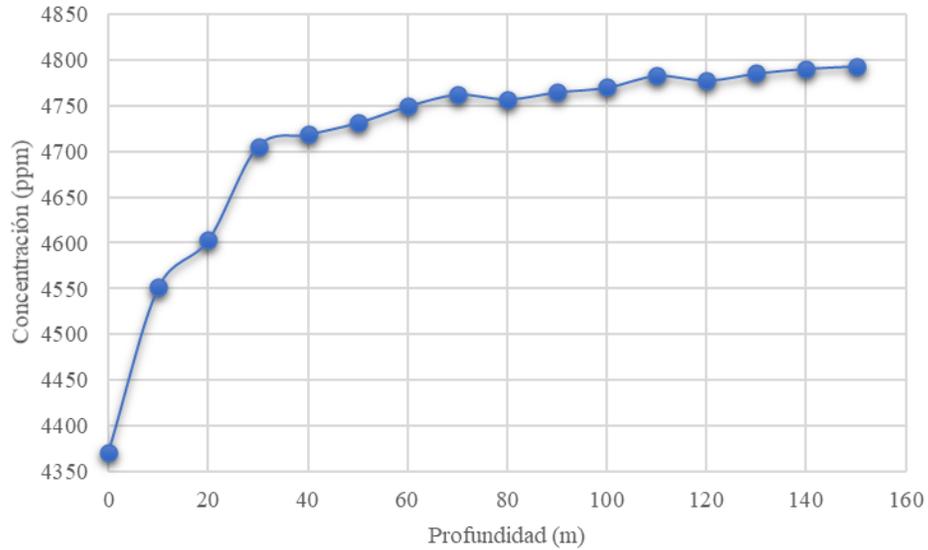


Figura 39- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO₂) a los 40 segundos de simulación.

Después de asimilar el contorno mostrado en la Figura 40, encontramos que a partir de los 30 m se visualiza una concentración uniforme a lo largo del resto de la obra, agregando a esto que en el tubo que sirve para la extracción de gases se nota con concentraciones mayores dentro de él.

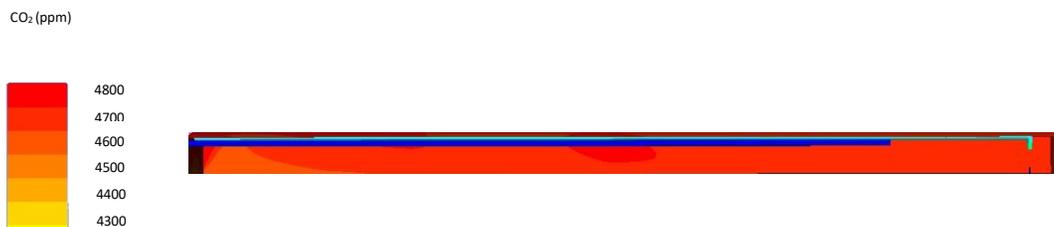


Figura 40- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO₂) a los 40 segundos de simulación.

3.2.5 Simulación 80 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción con un tiempo de 80 segundos todos los valores de concentración bajaron, encontrándose estos por debajo de 4000 ppm. La concentración bajo uniformemente a lo largo de toda la obra. El tope sigue siendo la zona más contaminada, aunque está bajo 958.6 ppm en base al resultado obtenido anteriormente (Ver Figura 41).

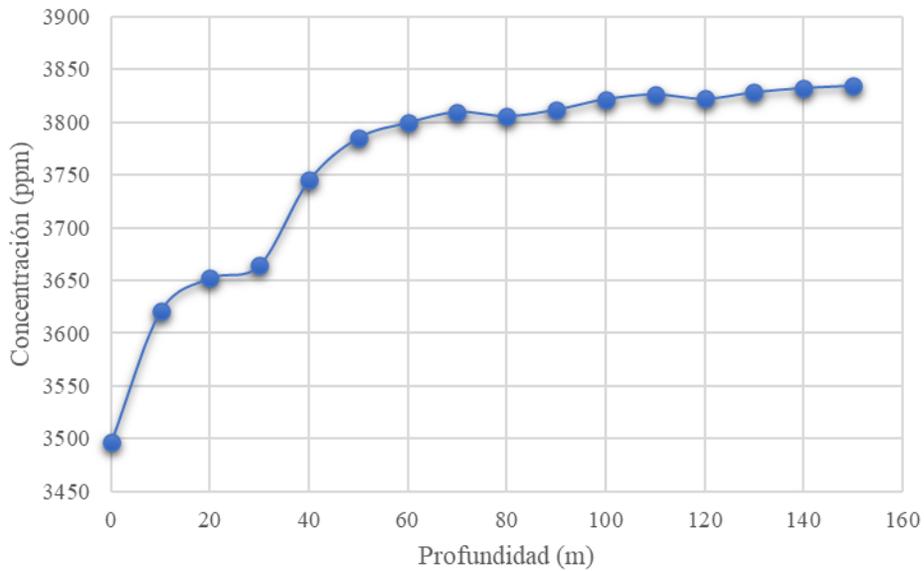


Figura 41.- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO₂) a los 80 segundos de simulación.

El contorno obtenido, muestra una concentración uniforme a lo largo de la obra teniendo un rango de 3400 ppm a 3900 ppm dentro de ella (Ver Figura 42).

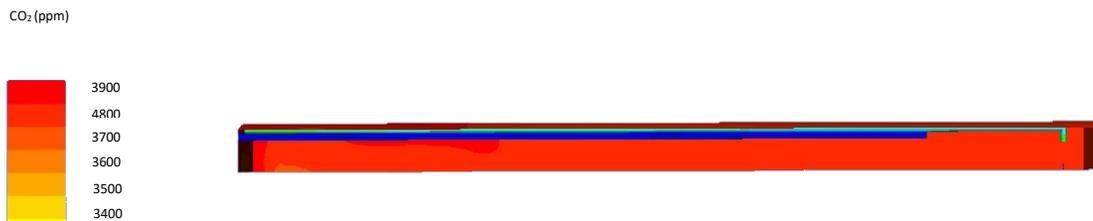


Figura 42.- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO₂) a los 80 segundos de simulación.

3.2.6 Simulación 160 segundos

En la Figura 43 tenemos el perfil de dióxido de carbono obtenido al simular 160 segundos de extracción, después de analizar los resultados notamos que las concentraciones se dividen en 3 rangos (debido a la cantidad que hay de diferencia en la concentración entre ellos): el primer rango se encuentra de la entrada a los 30 m teniendo como aproximado 3200 ppm; el segundo rango se encuentra de los 40 m a los 80 m con un aproximado de 3500 ppm; el tercer rango se encuentra de los 90 m hasta el tope de la obra (150 m) con una concentración aproximada de 3600 ppm.

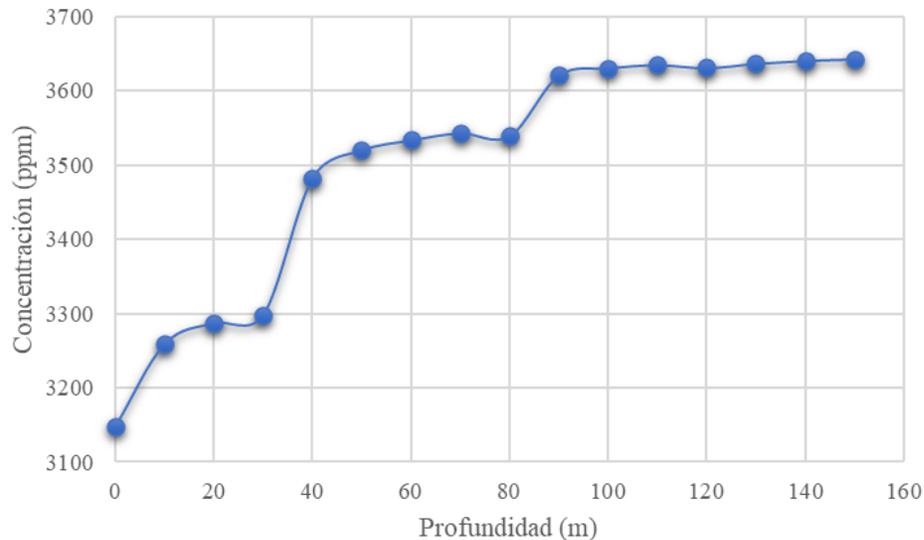


Figura 43.- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO₂) a los 160 segundos de simulación.

En la Figura 44 podemos observar el contorno perteneciente a 160 segundos de simulación en el cual podemos notar a simple vista que las concentraciones en los distintos puntos son uniformes. La concentración más alta sigue estando en el tope, sin embargo, esta continúa disminuyendo, ahora bajo 191.7 ppm quedando una concentración en la zona de 3642.8 ppm.

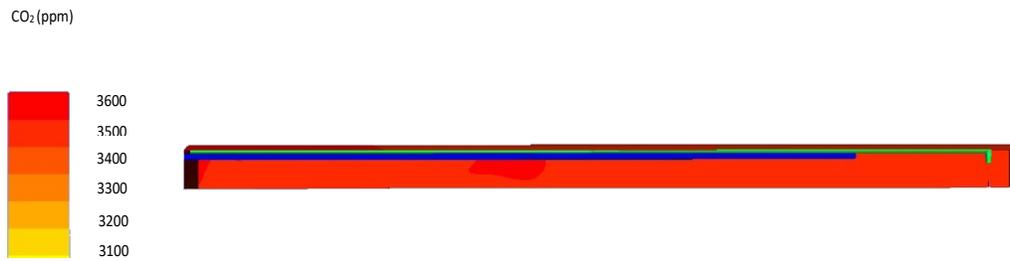


Figura 44-. Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO₂) a los 160 segundos de simulación.

3.2.7 Simulación 320 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción con un tiempo de 320 segundos obtuvimos los resultados mostrados en la Figura 45 en esta podemos ver que a mayor profundidad de obra mayor será la concentración en la zona, también podemos destacar que desde la entrada hasta los 70 m las concentraciones son menores de 3000 ppm y a partir de los 80 m hasta el tope de la obra las concentraciones son mayores a 3000 ppm, sin embargo, estas no exceden de 3300 ppm.

Al igual que en las simulaciones anteriores la mayor concentración de dióxido de carbono se encuentra en el tope, pero sigue teniendo el mismo comportamiento que ha tenido a lo largo de la simulación en donde este va disminuyendo conforme va aumentando el tiempo de simulación, en esta ocasión bajo 364.3 ppm.

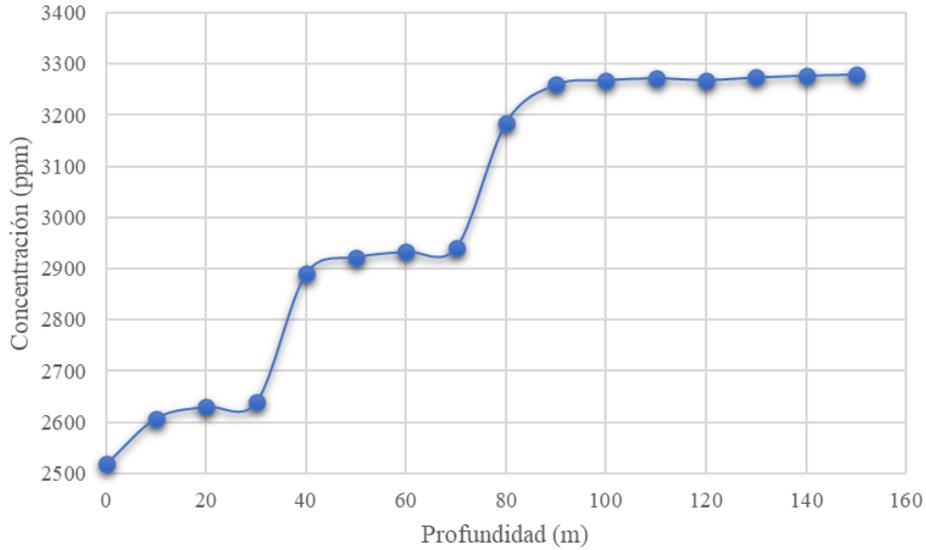


Figura 45- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO₂) a los 320 segundos de simulación.

A comparación de los 160 segundos donde su concentración menor es de 3147.4 ppm y en este caso la menor concentración es de 2517.9 ppm existe una diferencia de 629.5 ppm. Tomando en cuenta que 3147.4 ppm es la menor concentración registrada en la simulación anterior podemos decir que ahora solo a partir de la mitad de la obra se tienen concentraciones mayores, sin embargo, la concentración mayor registrada en este tiempo simulado solo la sobrepasa con una cantidad de 130 ppm (Ver Figura 46).

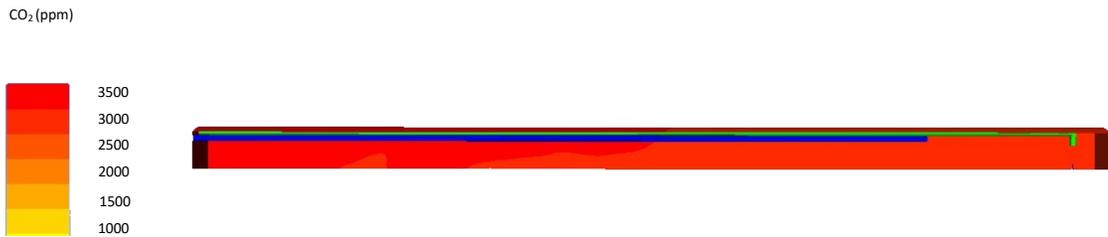


Figura 46- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO₂) a los 320 segundos de simulación.

3.2.8 Simulación 640 segundos

La Figura 47 nos muestra el perfil de dióxido de carbono obtenido con 640 segundos de simulación, este nos deja ver que la menor concentración se encuentra nuevamente en la entrada de la mina, aunque con 377.7 ppm menos y la mayor concentración de dióxido sigue estando en el tope de la obra, sin embargo, esta disminuyó 163.9 ppm.

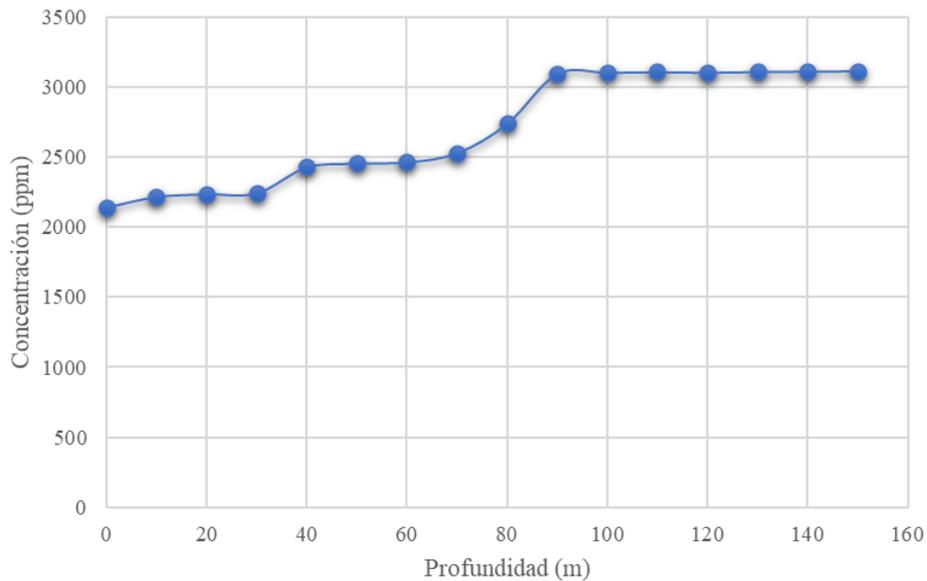


Figura 47- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO₂) a los 640 segundos de simulación.

Al observar el contorno mostrado en la Figura 48 podemos distinguir que a la mitad de la obra la concentración ha disminuido considerablemente mostrando valores menores a 3000 ppm.

También a lo largo de la obra podemos notar que las concentraciones menores se hacen notar en el piso de la obra en donde más podemos notarlo es a partir de los 70 m hasta unos metros antes del tope.

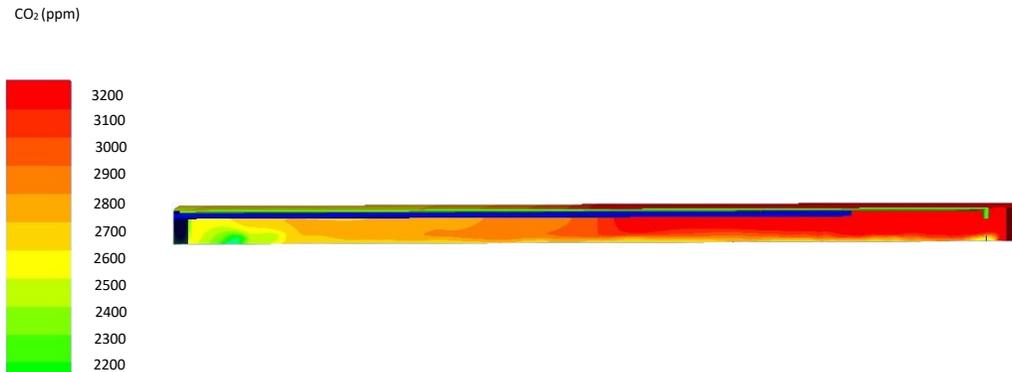


Figura 48-. Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO₂) a los 640 segundos de simulación.

3.2.9 Simulación 970 segundos

En la Figura 49 tenemos el perfil obtenido al simular 970 segundos de extracción, después de analizar los resultados notamos que las concentraciones se dividen en 3 rangos (debido a la cantidad que hay de diferencia en la concentración entre ellos de aproximadamente 200 ppm): el primer rango se encuentra de la entrada a los 30 m teniendo como aproximado 2200 ppm; el segundo rango se encuentra de los 40 m a los 70 m con un aproximado de 2400 ppm; el tercer rango se encuentra de los 80 m hasta el tope de la obra (150 m) con una concentración aproximada de 2800 ppm.

Al observar este perfil podemos destacar que todas las concentraciones obtenidas son menores a 3000 ppm a diferencia de la simulación anterior en donde en algunas las concentraciones si llegaban a alcanzar y a sobrepasar las 3000 ppm. La mayor concentración registrada sigue encontrándose al fondo de la obra, aunque continúa con la tendencia de bajar, y en esta ocasión tuvo una disminución de 218 ppm, quedando 2896.6 ppm.

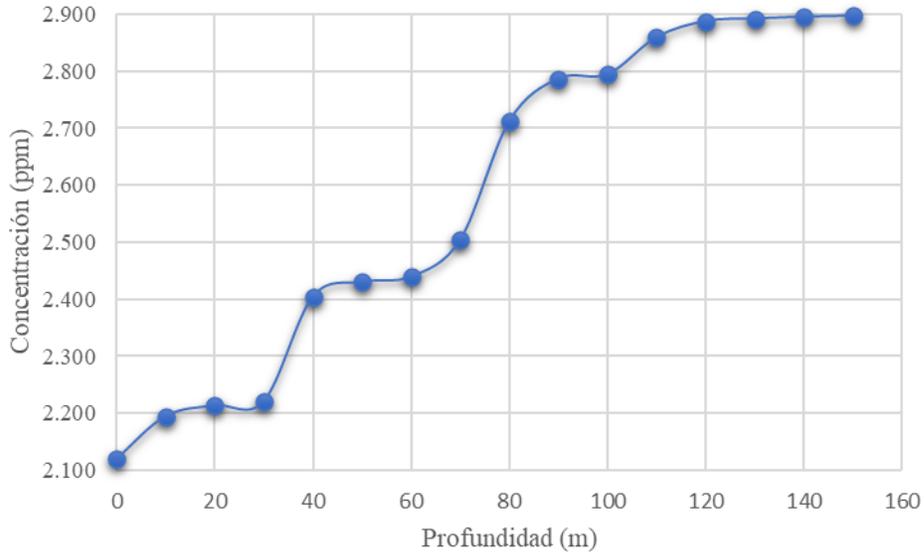


Figura 49- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO₂) a los 970 segundos de simulación.

En la Figura 50 se muestra el contorno perteneciente a los 970 segundos de simulación, a partir de éste llegamos a las siguientes conclusiones: en los primeros 10m se puede ver a simple vista que la concentración es mínima; de los 10 m y 30 m nos encontramos con concentraciones muy bajas; a lo largo de entre los 30 m y los 120 m podemos encontrarnos con un juego de concentraciones ya que en piso podemos ver como la concentración es menor que en el cielo; en los metros restantes se nota como la concentración se regulariza y tanto en el piso como en el cielo la concentración no varía mucho. También el contorno nos muestra que en la tubería de extracción se encuentran concentraciones de entre 3100 ppm a 3200 ppm.

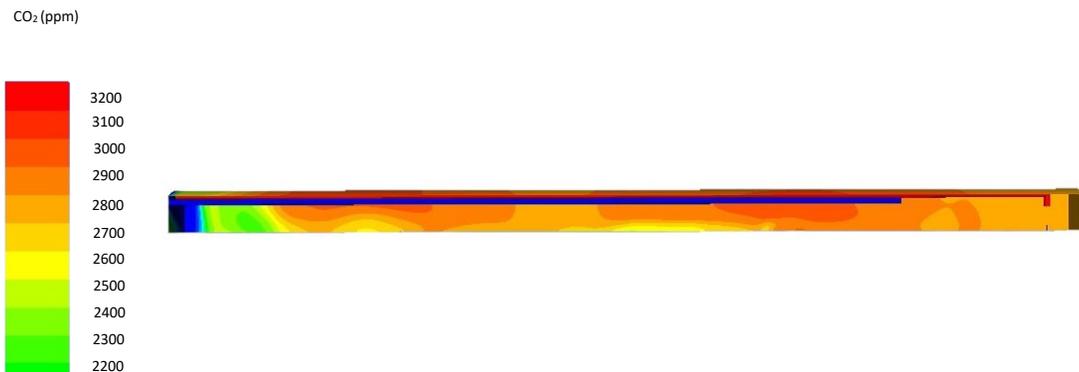


Figura 50- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO₂) a los 970 segundos de simulación.

3.2.10 Simulación 1300 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción con un tiempo de 1300 segundos obtuvimos el perfil mostrado en la Figura 51 el cual nos muestra como a lo largo de toda la obra subterránea las concentraciones bajaron a comparación de las obtenidas anteriormente.

La mayor concentración sigue estando en la misma zona, aunque esta tuvo una disminución muy notable quedando en 2027.6 ppm. Es importante decir que a pesar de ser la zona con mayor concentración en estos segundos de simulación es menor que la menor en la simulación de 970 segundos.

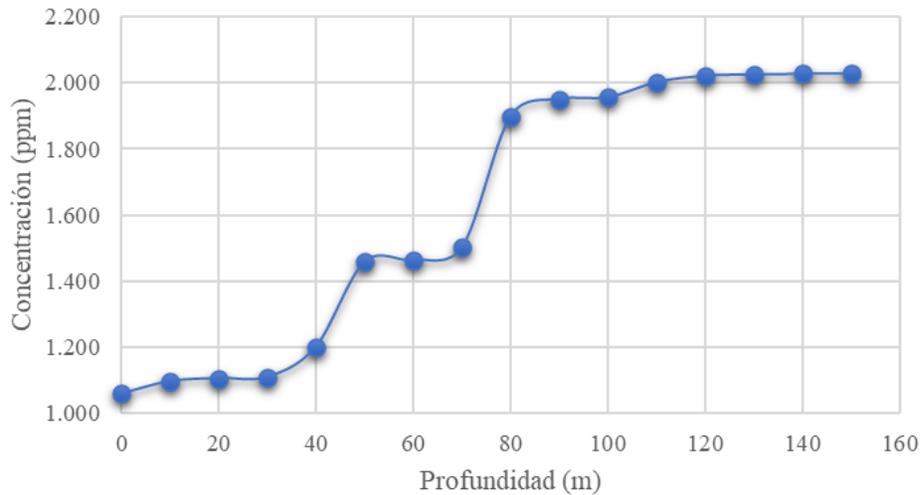


Figura 51- Perfil de concentración dióxido de carbono (CO₂) a los 1300 segundos de simulación.

Al analizar el contorno correspondiente a este tiempo mostrado en la Figura 52 de abajo llegamos a las siguientes afirmaciones: en los primeros 40 m es evidente que la concentración es mínima; de los 50 m a los 80 m encontramos concentraciones de 1400 ppm a 1900 ppm, en el resto de la obra las concentraciones van de 1900 ppm a 2100 ppm; a pesar de que el tope muestra una mayor concentración se nota más despejado debido al extractor.

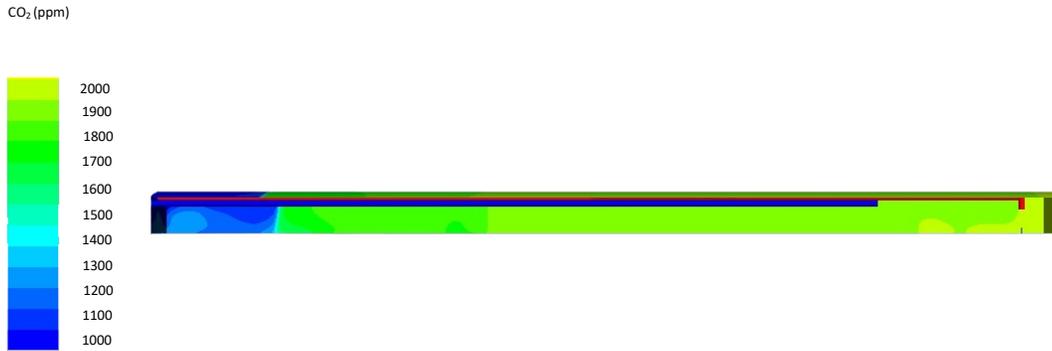


Figura 52- Contorno de concentración de dióxido de carbono (CO₂) a los 1300 segundos de simulación.

3.2.11 Conclusión del dióxido de carbono

El mejor tiempo para el parámetro del dióxido de carbono es el de 40 segundos en el cual encontramos que la mayor concentración es de 4793.1 ppm la cual nos indica que la concentración está por debajo del límite máximo permisible establecido por la norma y que se ha llegado a condiciones deseables.

3.3 Temperatura

La temperatura es un factor muy importante en la minería ya que este puede influir en la cantidad de trabajo que un individuo puede realizar, debido a esto, en la NOM-015-STPS-2001 se establecen los límites máximos de exposición a condiciones térmicas elevadas en donde se indica que las temperaturas deben de estar entre 25°C y 32.2°C según el régimen del trabajo.

3.3.1 Obra llena de gases nocivos

En la Figura 53 se muestra el perfil de temperatura sin extracción. En la figura se puede observar la menor temperatura registrada se encuentra en la entrada correspondiendo a esta 30°C y la mayor temperatura se encuentra al fondo de la obra la cual es de 37°C, teniendo estos valores podemos decir que a mayor profundidad de obra la temperatura va incrementando.

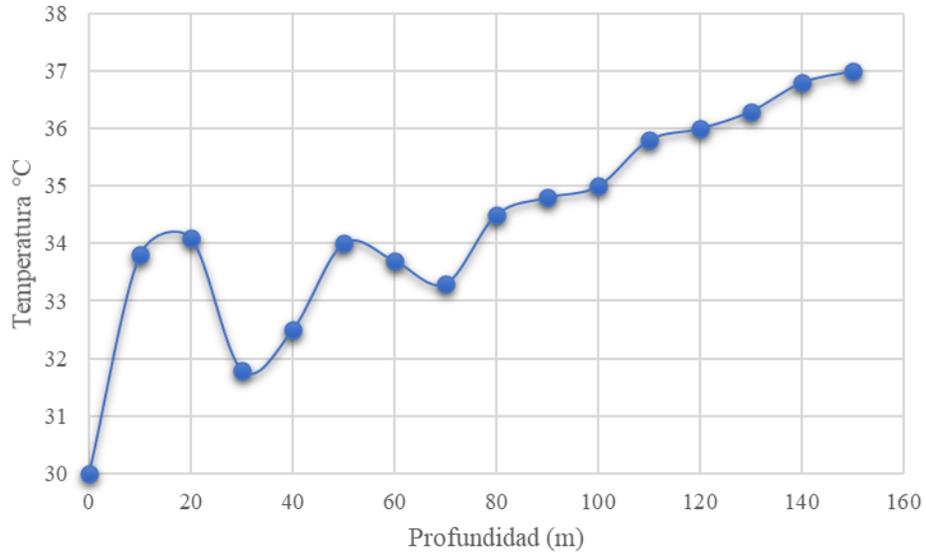


Figura 53.- Perfil de temperatura.

En la Figura 54 se muestra el contorno perteneciente al perfil de temperatura sin extracción, y en este podemos ver que que las temperaturas más altas se encuentran principalmente en la zona baja de la obra.

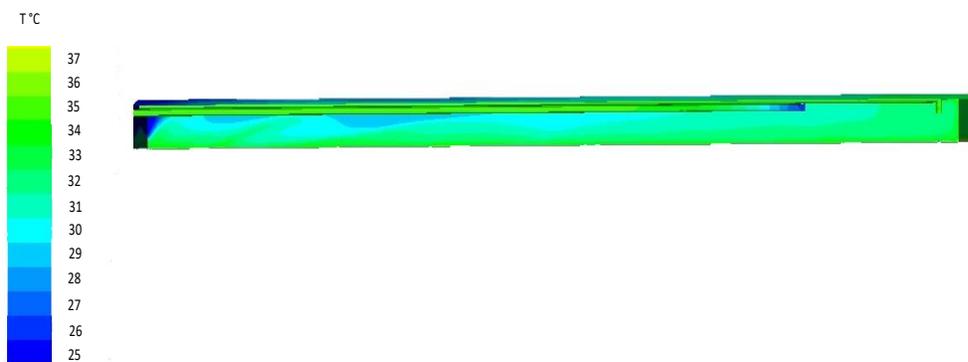


Figura 54.- Contorno de temperatura.

3.3.2 Simulación 10 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción con un tiempo de 10 segundos obtuvimos el perfil de temperatura mostrado en la Figura 55 y el contorno mostrado en la Figura 56, este nos indica que la zona de menor temperatura se encuentra en la entrada con 29.8°C y la mayor temperatura se encuentra en el tope de la mina con 38.5°C, esto nos indica que a mayor profundidad de obra la temperatura va incrementando, teniendo la misma conducta que en el perfil sin extracción aunque con temperaturas menores.

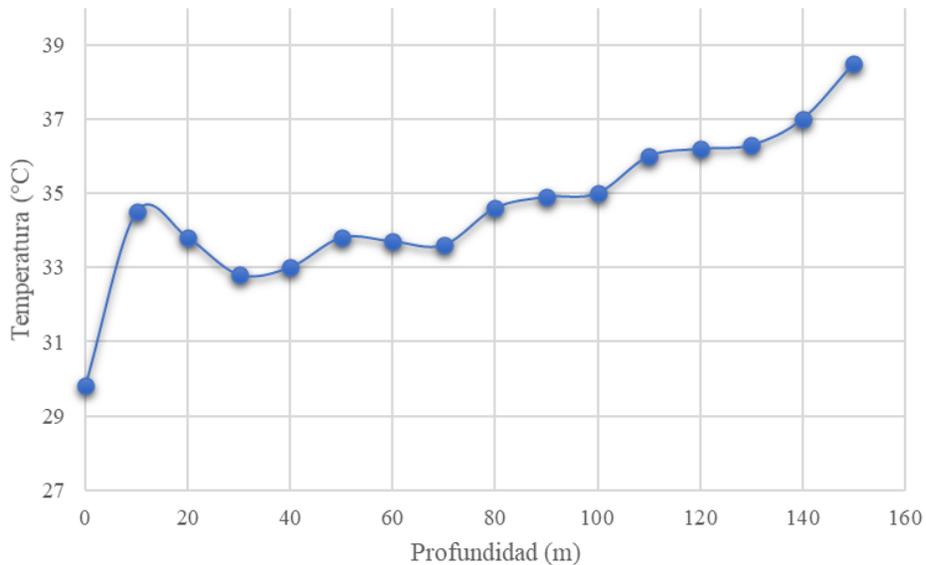


Figura 55- Perfil de temperatura a los 10 segundos de simulación.

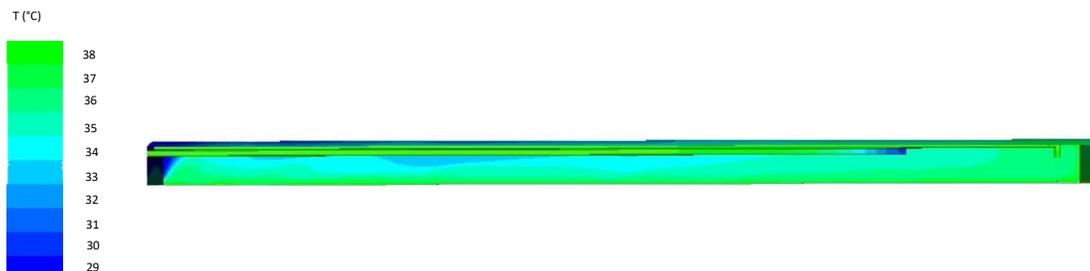


Figura 56- Contorno de temperatura a los 10 segundos de simulación.

3.3.3 Simulación 20 segundos

En las Figuras 57 y 58 se muestran respectivamente los resultados del perfil y contorno de temperatura obtenidos después de llevar a cabo 20 segundos de simulación en ellos se indica que la zona de menor temperatura se encuentra en la entrada con 29.2°C y la mayor temperatura se encuentra en el tope de la mina con 37.7°C , además al analizar más a fondo, obtuvimos que cada 10 m la temperatura va aumentando de 0.3°C a 1.3°C .

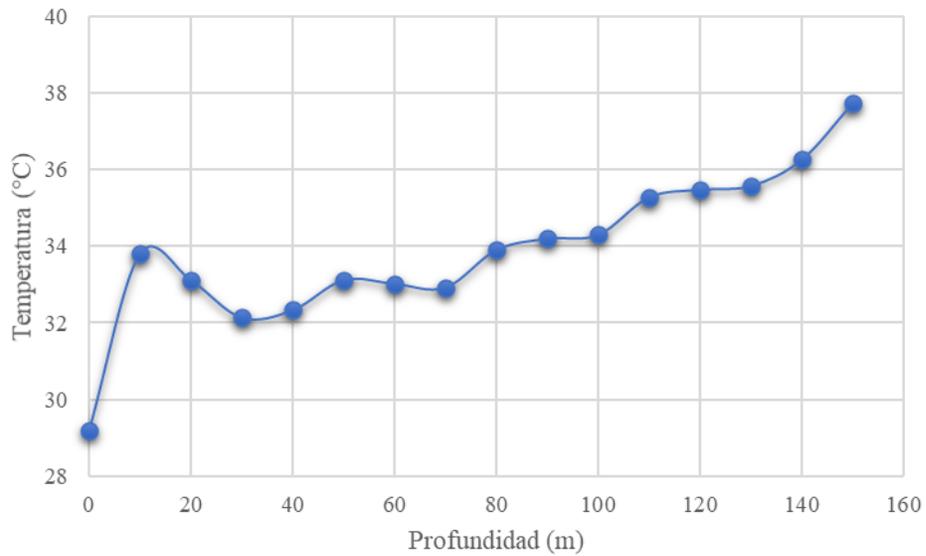


Figura 57- Perfil de temperatura a los 20 segundos de simulación.

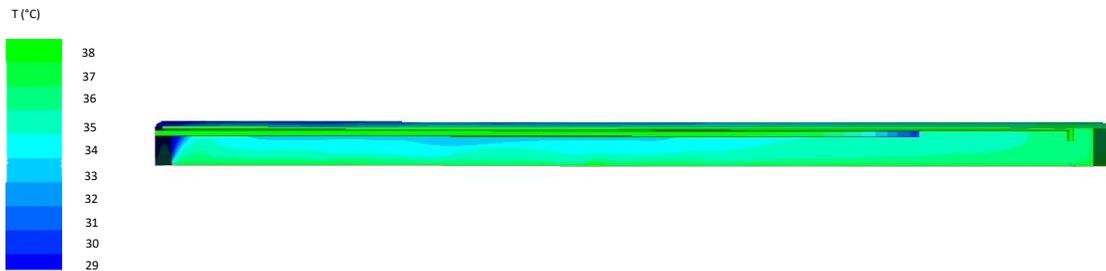


Figura 58- Contorno de temperatura a los 20 segundos de simulación.

3.3.4 Simulación 40 segundos

Al continuar con la simulación la temperatura menor y la mayor continúan con la tendencia mostrada en las simulaciones anteriores, sin embargo, como lo muestran las Figuras 59 y 60 de los 120 m hasta el tope (150 m) existe un juego de temperaturas debido a que esta es la zona donde se encuentra en ventilador y el extractor.

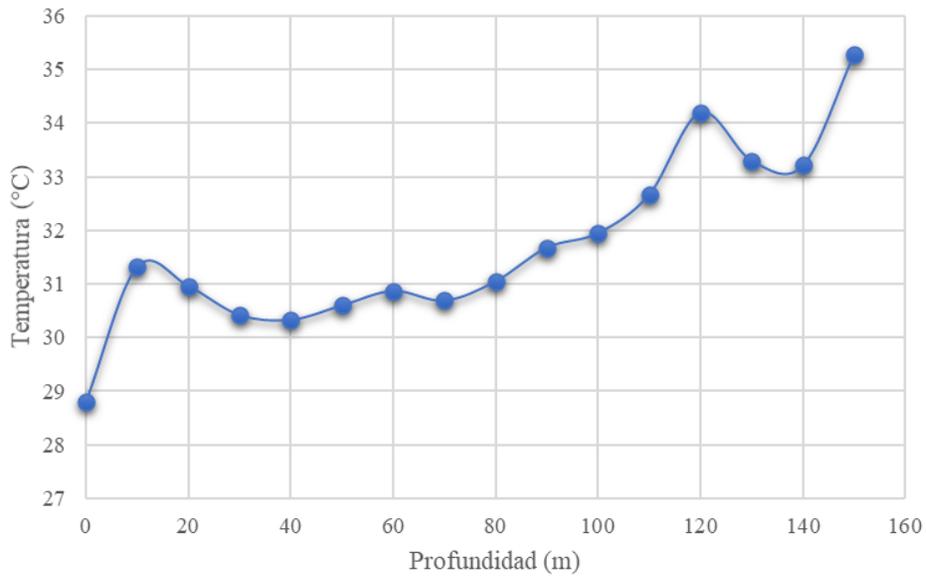


Figura 59- Perfil de temperatura a los 40 segundos de simulación.

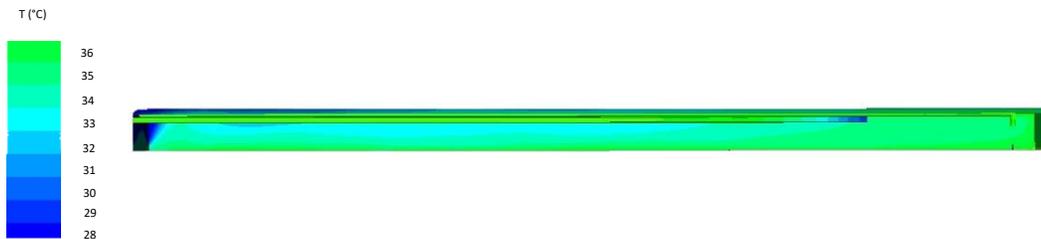


Figura 60- Contorno de temperatura a los 40 segundos de simulación.

3.3.5 Simulación 80 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción con un tiempo de 80 segundos obtuvimos los resultados mostrados en las Figuras 61 y 62 en donde la temperatura menor y mayor se siguen ubicando en las mismas zonas mencionadas anteriormente. Desde la entrada hasta los 110 m las temperaturas registradas se encuentran por debajo de los 30°C y en la zona restante las temperaturas son mayores llegando hasta 31.8°C.

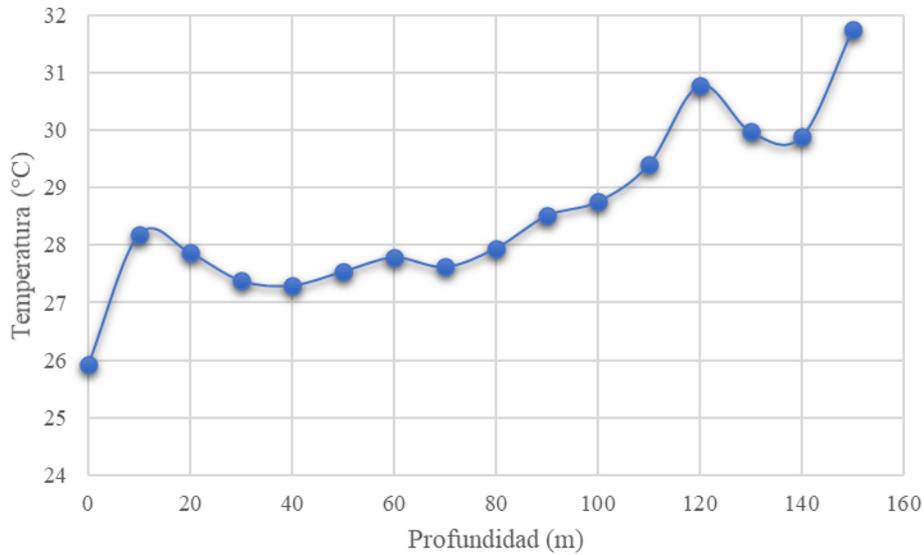


Figura 61- Perfil de temperatura a los 80 segundos de simulación.

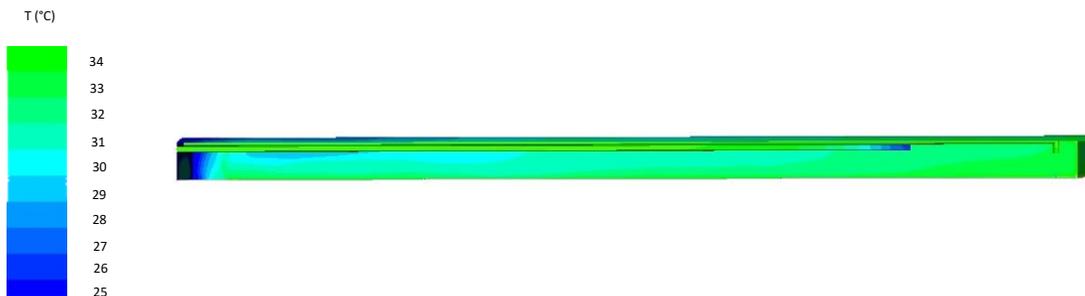


Figura 62- Contorno de temperatura a los 80 segundos de simulación.

3.3.6 Simulación 160 segundos

Al llevar a cabo la simulación de 160 segundos obtuvimos los resultados mostrados en las Figuras 63 y 64, donde, la menor temperatura registrada se sigue ubicando en la entrada (24.6°C), mientras que la mayor ahora se encuentra a los 120 m de la entrada con 30.5° C.

En la última zona, de los 120 m a los 150 m se nota una variación en las temperaturas que no va de manera ascendente ni descendente, mostrando que a los 140 m es la temperatura más baja del tramo, esto podemos atribuirlo a la ubicación del extractor en cual se encuentra a los 145 m de la entrada.

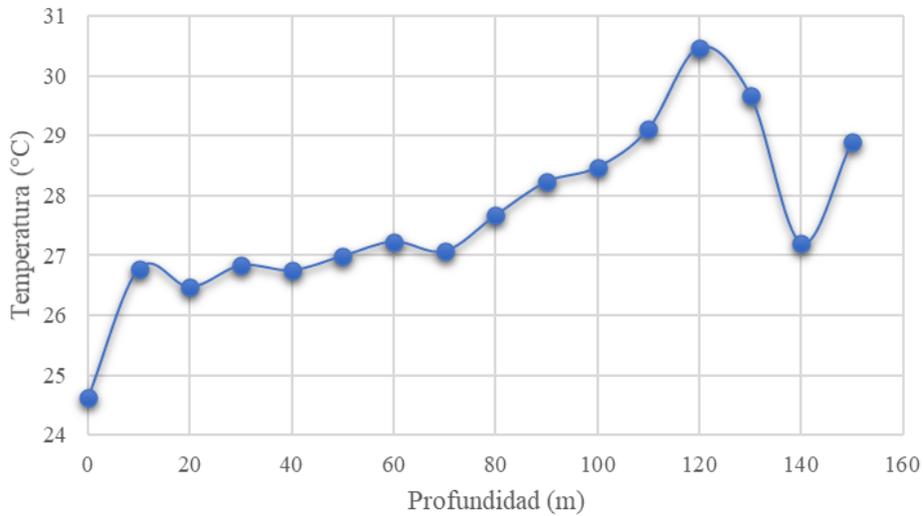


Figura 63- Perfil de temperatura a los 160 segundos de simulación.

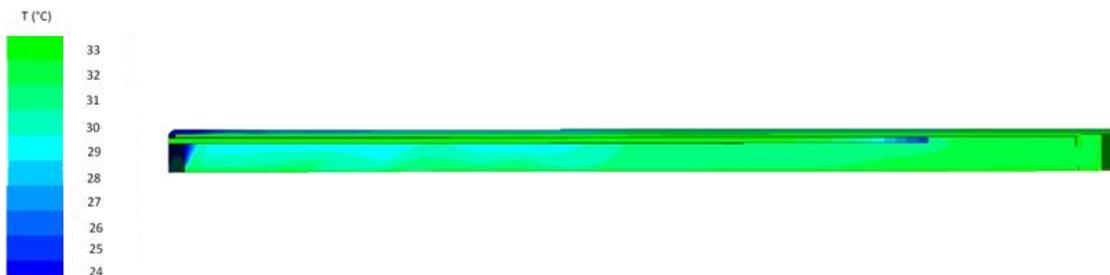


Figura 64- Contorno de temperatura a los 160 segundos de simulación.

3.3.7 Simulación 320 segundos

En las Figuras 65 y 66 se muestran los datos obtenidos con 320 segundos de simulación, en base a estos se afirma que la temperatura más baja y más alta se encuentran a las mismas distancias mencionadas en el tiempo anterior respectivamente y que la temperatura sigue variando en la zona de entre al ventilador y el extractor. Es importante mencionar que ahora ninguna zona la temperatura es igual o mayor a 30°C.

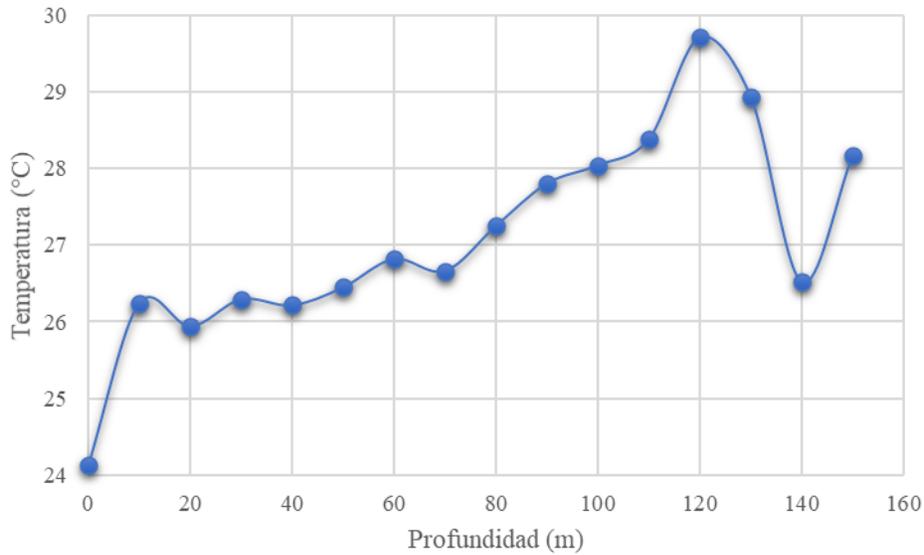


Figura 65- Perfil de temperatura a los 320 segundos de simulación.

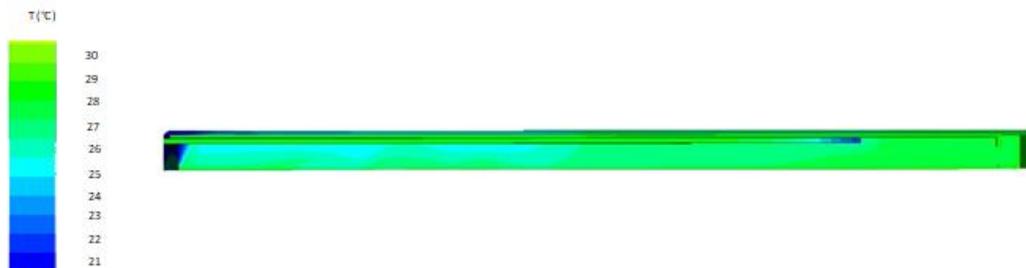


Figura 66- Contorno de temperatura a los 320 segundos de simulación.

3.3.8 Simulación 640 segundos

En las Figuras 67 y 68 se muestran los resultados del perfil y contorno de temperatura obtenidos después de llevar a cabo 640 segundos de simulación, en ellos se indica que la zona de menor temperatura se encuentra en la entrada con 23.4°C y la mayor temperatura se encuentra a 120 m con 28.8°C , entre cada 10 m la temperatura va variando de entre 0.5°C a 1°C aproximadamente.

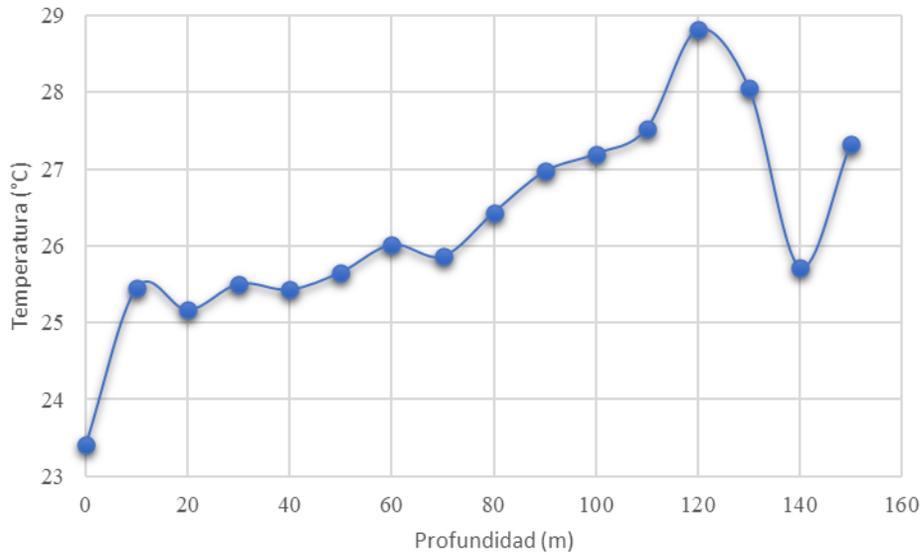


Figura 67- Perfil de temperatura a los 640 segundos de simulación.

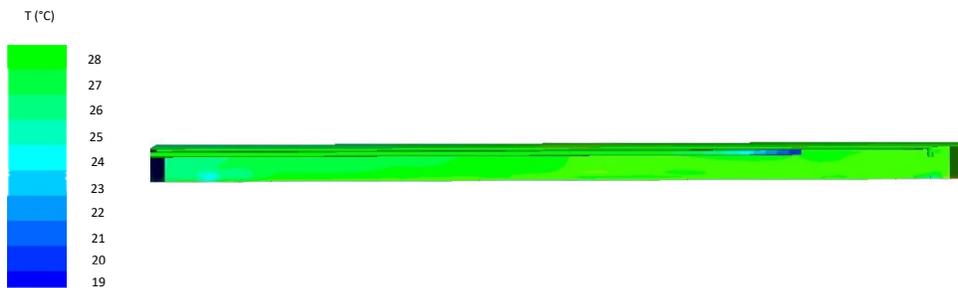


Figura 68- Contorno de temperatura a los 640 segundos de simulación.

3.3.9 Simulación 970 segundos

Al llevar a cabo la simulación de 970 segundos obtuvimos los resultados mostrados en las Figuras 69 y 70, donde, la menor temperatura registrada se sigue ubicando en la entrada con 22.9°C, mientras que la mayor se sigue encontrando a los 120 m de la entrada con 28.2° C.

De la entrada hasta entre los 120 m y 130 m la temperatura no cambia ni 1°C a diferencia de entre los 130 m al tope donde la diferencia de temperaturas cada 10 m es de 2.3°C y 16.6°C. Además, podemos notar que a lo largo de la obra la temperatura se ve de manera uniforme.

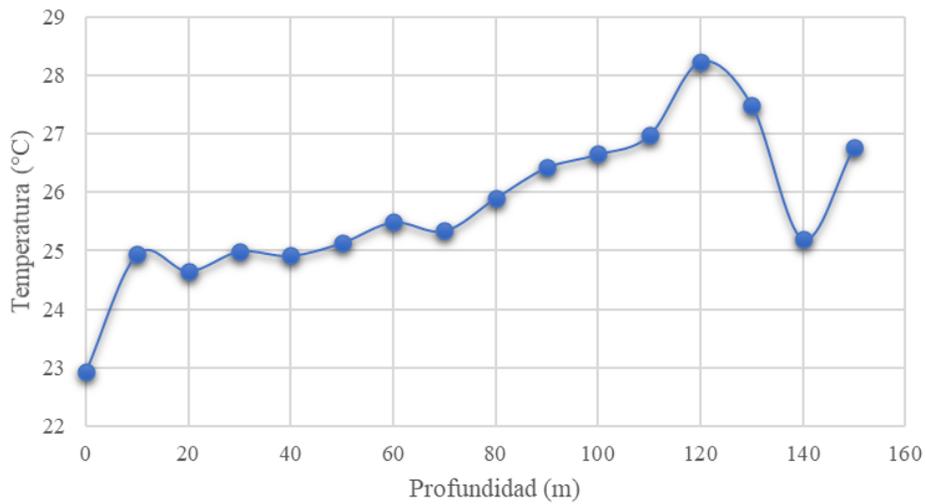


Figura 69- Perfil de temperatura a los 970 segundos de simulación.

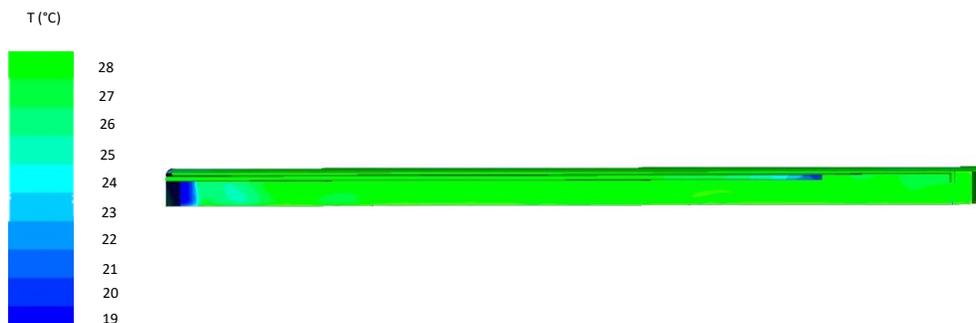


Figura 70- Contorno de temperatura a los 970 segundos de simulación.

3.3.10 Simulación 1300 segundos

En las Figuras 71 y 72 se muestran los datos obtenidos con 1300 segundos de simulación, en base a estos se afirma que la temperatura más baja y más alta se encuentran a las mismas distancias mencionadas en el tiempo anterior con 22.5°C y 27.7°C respectivamente. A los 140 m se nota como la temperatura baja considerablemente, esto podemos atribuir a la cercanía con el cruce de conexión a la rampa principal.

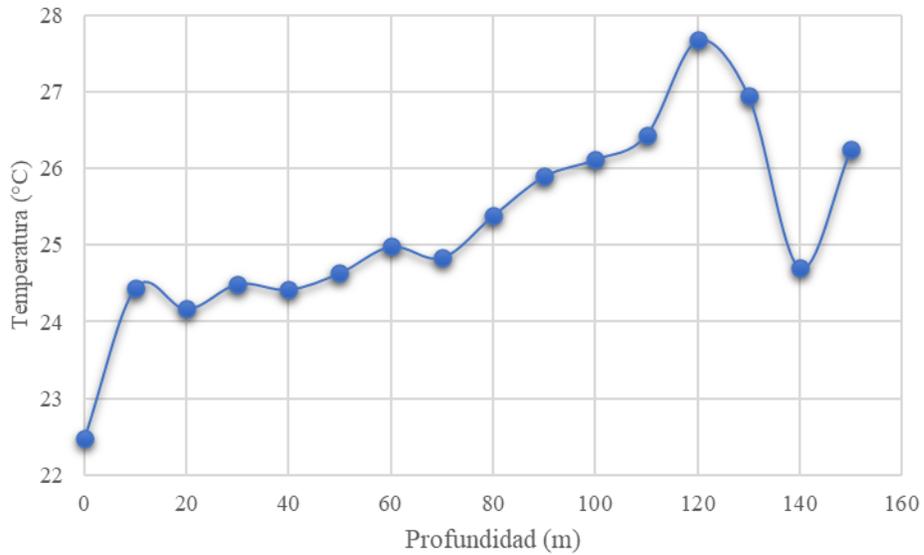


Figura 71- Perfil de temperatura a los 1300 segundos de simulación.

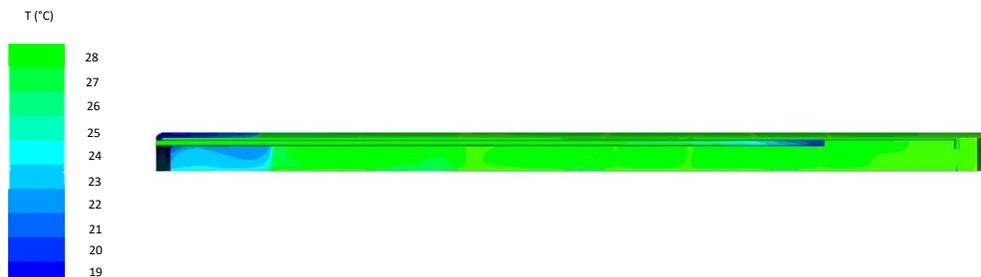


Figura 72- Contorno de temperatura a los 1300 segundos de simulación.

3.4 Humedad

3.4.1 Obra llena de gases nocivos

En la Figura 73 se muestra el perfil de humedad a lo largo de la obra de la mina subterránea. El mayor porcentaje de humedad se encuentra en la entrada de la mina y el menor se encuentra en el tope de la obra (150 m). Los valores de humedad están entre 50% y 90%. Además, al observar el contorno mostrado en la Figura 74 podemos notar que el mayor porcentaje de humedad se encuentra en la parte baja de la obra.

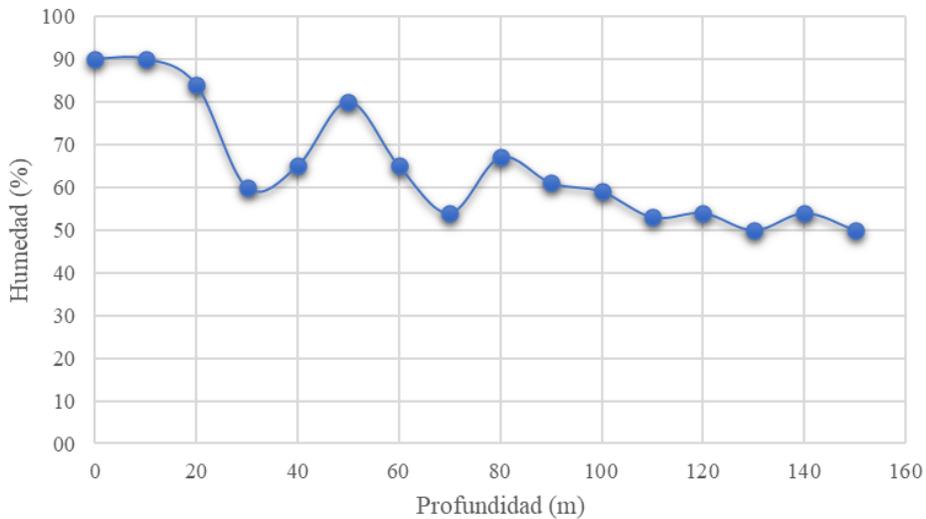


Figura 73- Perfil de porcentaje de humedad.

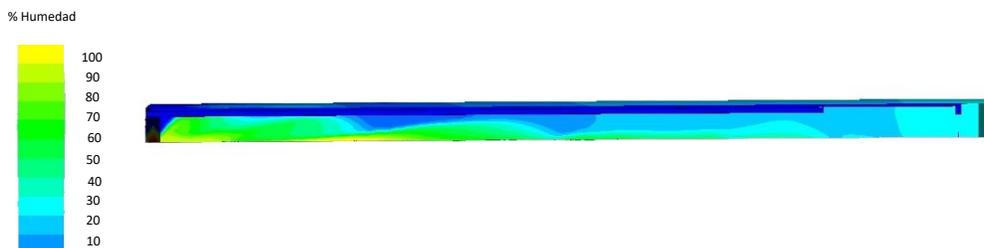


Figura 74- Contorno de porcentaje de humedad.

3.4.2 Simulación 10 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción con un tiempo de 10 segundos obtuvimos el perfil mostrado en la Figura 75 y el contorno mostrado en la Figura 76 En base a estos encontramos que el mayor porcentaje de humedad se encuentra en los primeros 10 m (90%) y el menor se encuentra en el tope de la obra bajando un 2% a partir del mencionado anteriormente quedando actualmente un 48% de humedad en la zona.

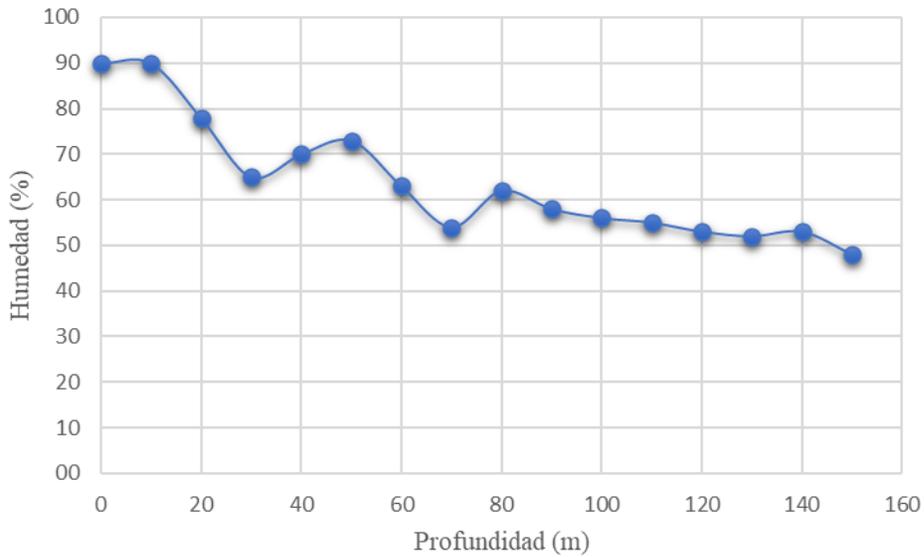


Figura 75- Perfil de porcentaje de humedad a los 10 segundos de simulación.

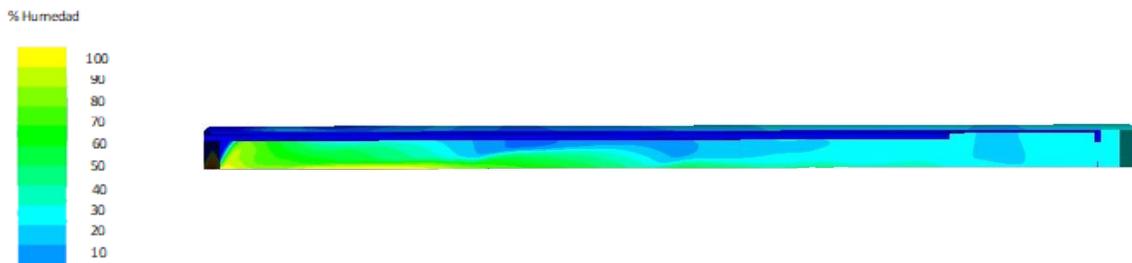


Figura 76- Contorno de porcentaje de humedad a los 10 segundos de simulación.

3.4.3 Simulación 20 segundos

En las Figuras 77 y 78 se muestran los resultados del perfil y contorno obtenidos después de llevar a cabo 20 segundos de simulación en ellos se observa que en los primeros 10 m el porcentaje de humedad es muy bajo y que a partir los 10 m a los 80 m el porcentaje de humedad es muy variable y no tiene un orden ascendente o descendente, sin embargo, después de los 80 m y hasta el tope la humedad se vuelve más uniforme y el porcentaje va descendiendo conforme nos acercamos al tope.

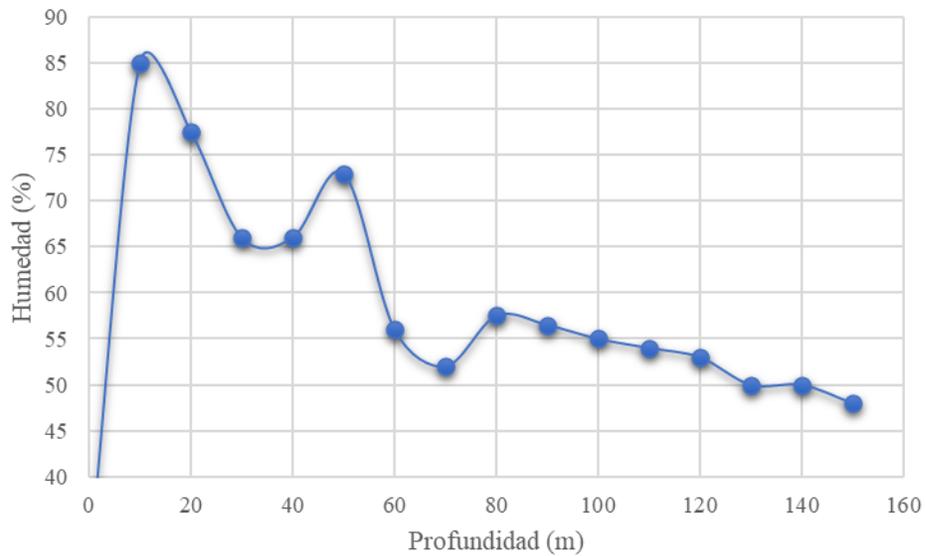


Figura 77- Perfil de porcentaje de humedad a los 20 segundos de simulación.

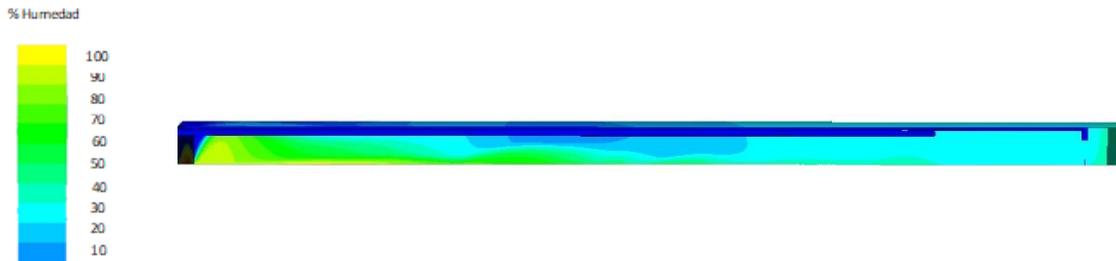


Figura 78- Contorno de porcentaje de humedad a los 20 segundos de simulación.

3.4.4 Simulación 40 segundos

Al continuar con la simulación del porcentaje de humedad el menor y el mayor continúan con la tendencia mostrada en la simulación anterior, además, se observa como en la mayor parte de las zonas la humedad se presenta entre un 50% y 60% (Ver Figuras 79 y 80).

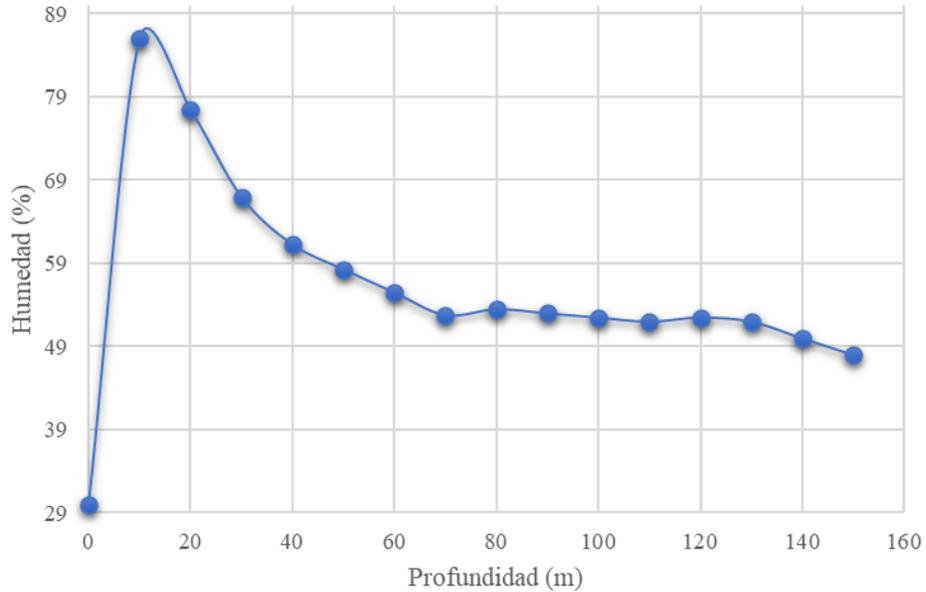


Figura 79- Perfil de porcentaje de humedad a los 40 segundos de simulación.

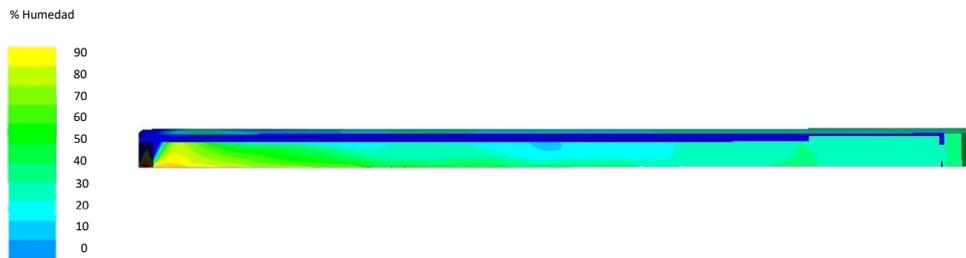


Figura 80- Contorno de porcentaje de humedad a los 40 segundos de simulación.

3.4.5 Simulación 80 segundos

Al llevar a cabo la simulación de extracción con un tiempo de 80 segundos obtuvimos los resultados mostrados en las siguientes figuras en donde la zona con mayor % de humedad se encuentra en la entrada de la obra y el menor porcentaje de humedad se encuentra al fondo de la obra con 46.5%. Es importante recalcar que ahora de los 80 m a los 150 m el porcentaje es menor a 50% y en el tramo de la entrada a los 80 m no se tienen zonas con humedad mayor al 70% (Ver Figuras 81 y 82).

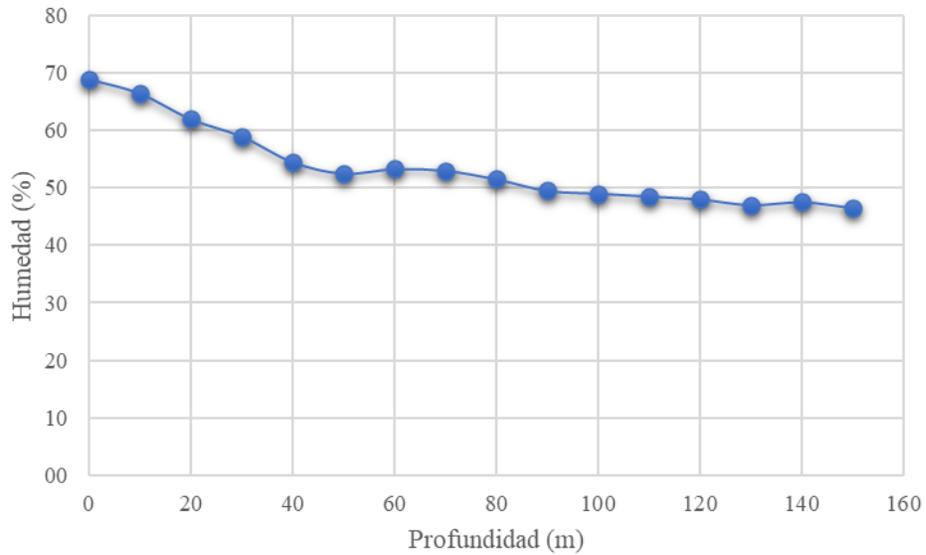


Figura 81- Perfil de porcentaje de humedad a los 80 segundos de simulación.

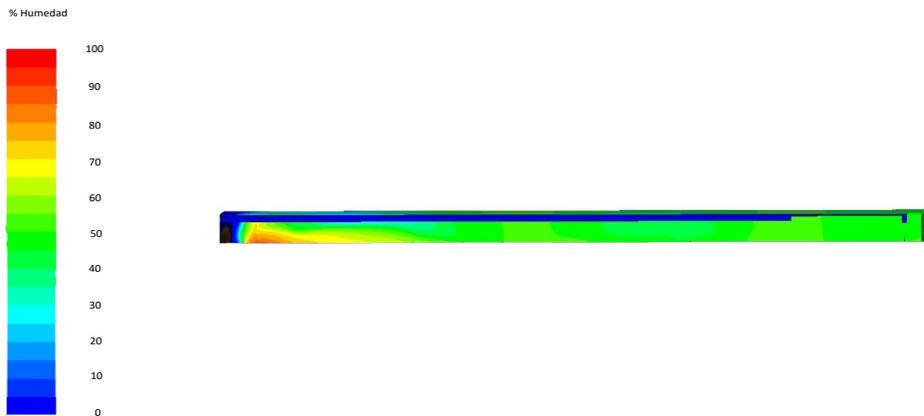


Figura 82- Contorno de porcentaje de humedad a los 80 segundos de simulación.

3.4.6 Simulación 160 segundos

Al llevar a cabo la simulación de 160 segundos obtuvimos los resultados mostrados en las Figuras 83 y 84, donde, la zona con mayor humedad se encuentra en la entrada con 49.5%, esto quiere decir que en ninguna zona la humedad excede del 50%. También al observar las figuras se observa que la humedad varía mucho a lo largo de toda la obra y no lleva un orden ascendente o descendente conforme a las distancias.

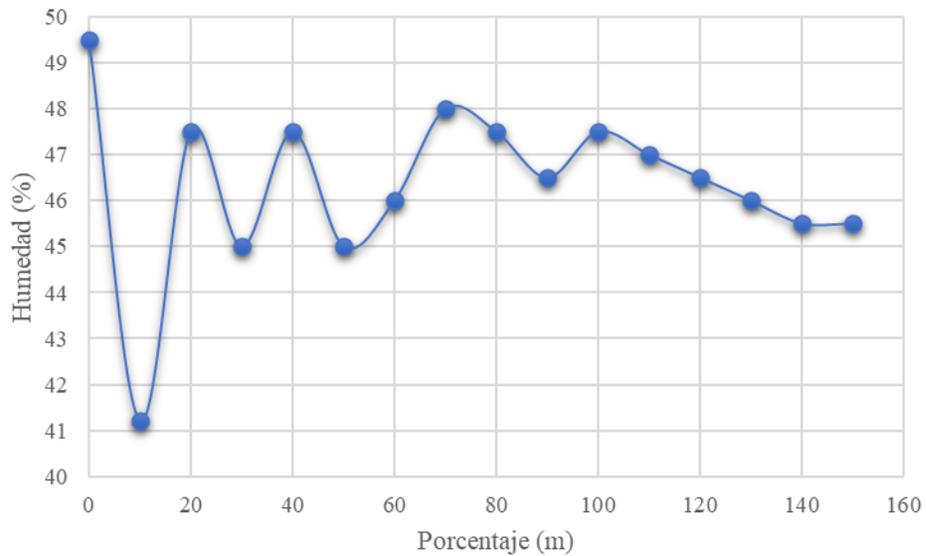


Figura 83-. Perfil de porcentaje de humedad a los 160 segundos de simulación.

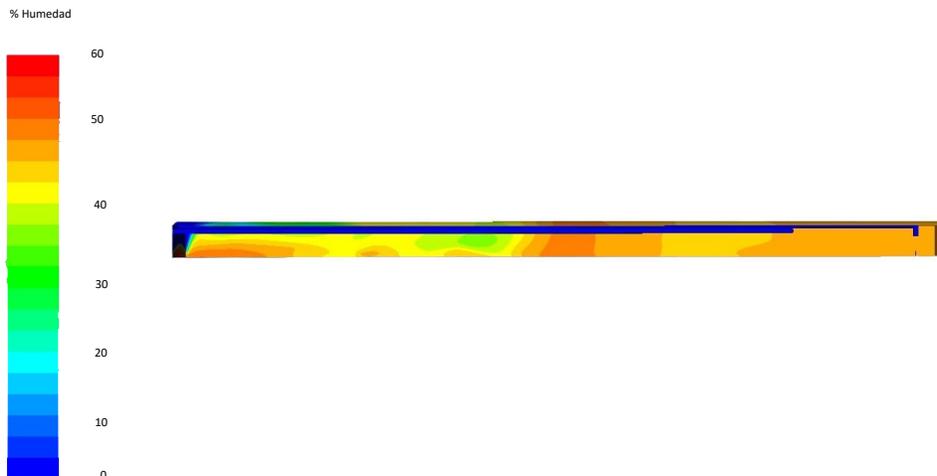


Figura 84-. Contorno de porcentaje de humedad a los 160 segundos de simulación.

3.4.7 Simulación 320 segundos

En las Figuras 85 y 86 se muestran los datos obtenidos con 320 segundos de simulación, en base a estos se obtiene que hubo un cambio radical en base a lo que se nos había mostrado anteriormente, ahora nuestro mayor porcentaje de humedad se encuentra en el tope y el menor en la entrada, el porcentaje de humedad va en ascenso partiendo de la entrada y terminando en el tope.

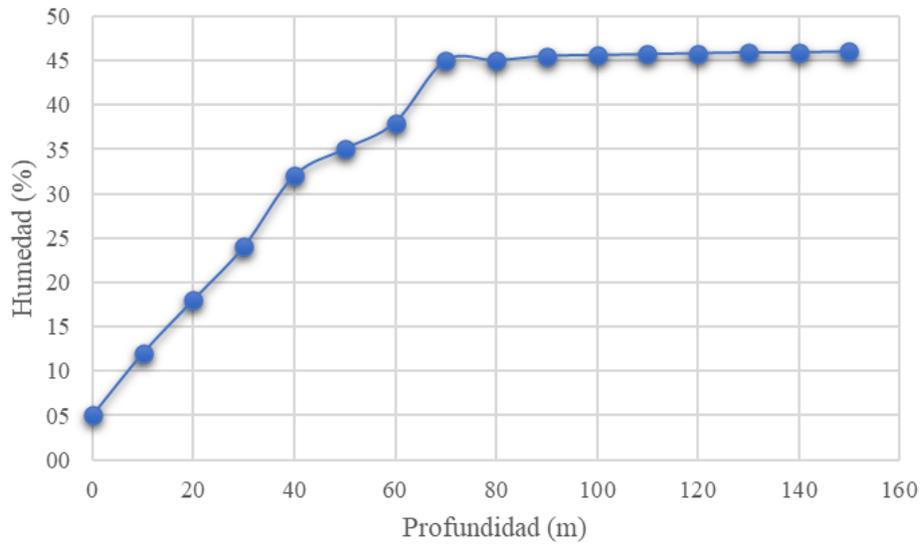


Figura 85- Perfil de porcentaje de humedad a los 320 segundos de simulación.

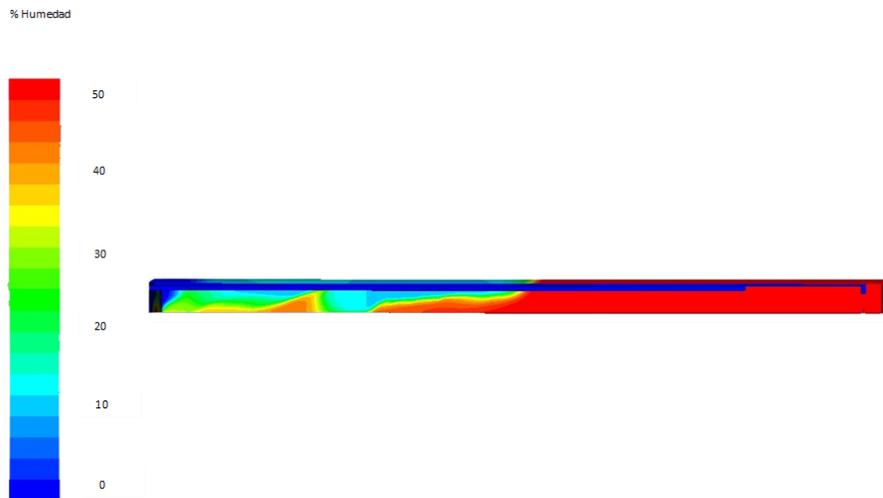


Figura 86- Contorno de porcentaje de humedad a los 320 segundos de simulación.

3.4.8 Simulación 640 segundos

En las Figuras 87 y 88 se muestran los resultados del perfil y contorno obtenidos después de llevar a cabo 640 segundos de simulación, en ellos se indica que en la zona de la entrada hasta los 60m el porcentaje de humedad no sobrepasa el 40% y en el resto de la obra no sobrepasa de 44%.

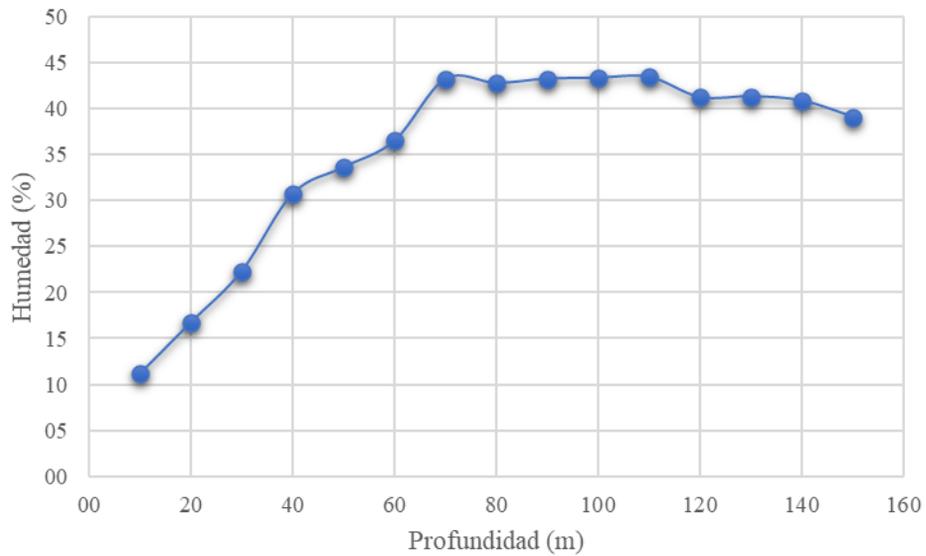


Figura 87- Perfil de porcentaje de humedad a los 640 segundos de simulación.

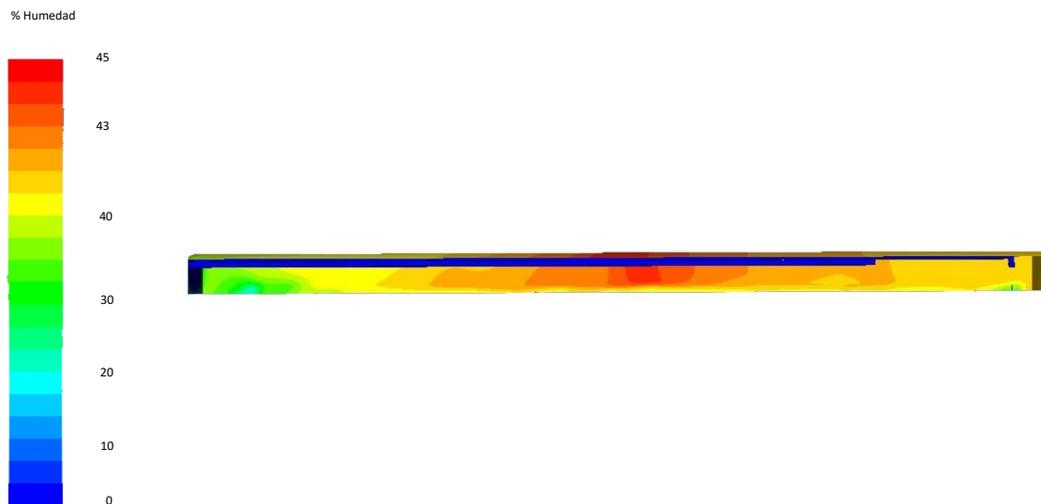


Figura 88- Contorno de porcentaje de humedad a los 640 segundos de simulación.

3.4.9 Simulación 970 segundos

Al llevar a cabo la simulación de 970 segundos obtuvimos los resultados mostrados en las Figuras 89 y 90, donde, de la entrada a los 100 m de la obra, la humedad disminuyó, mientras que, de los 110 m a los 150 m hubo un aumento en el porcentaje a comparación al obtenido en la simulación anterior.

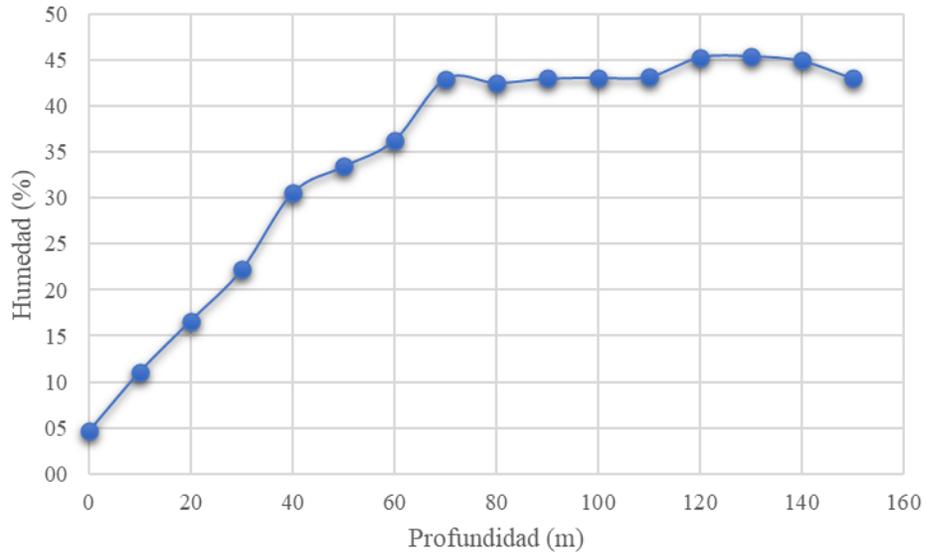


Figura 89- Perfil de porcentaje de humedad a los 970 segundos de simulación.

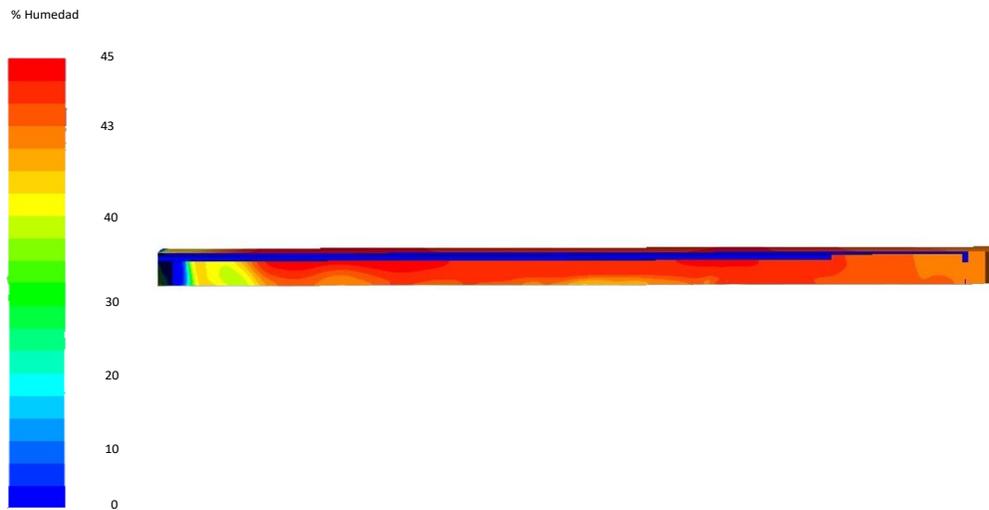


Figura 90- Contorno de porcentaje de humedad a los 970 segundos de simulación.

3.4.10 Simulación 1300 segundos

En la Figuras 91 se muestran los datos obtenidos con 1300 segundos de simulación, en base a estos se afirma que a los 130 m de la entrada es la zona con mayor humedad registrada. Y a partir del contorno mostrado en la Figura 92, se observa como la humedad es mínima en los primeros 30 m mientras que en el resto de la obra se tiene de 31.2% a 45.8% de humedad.

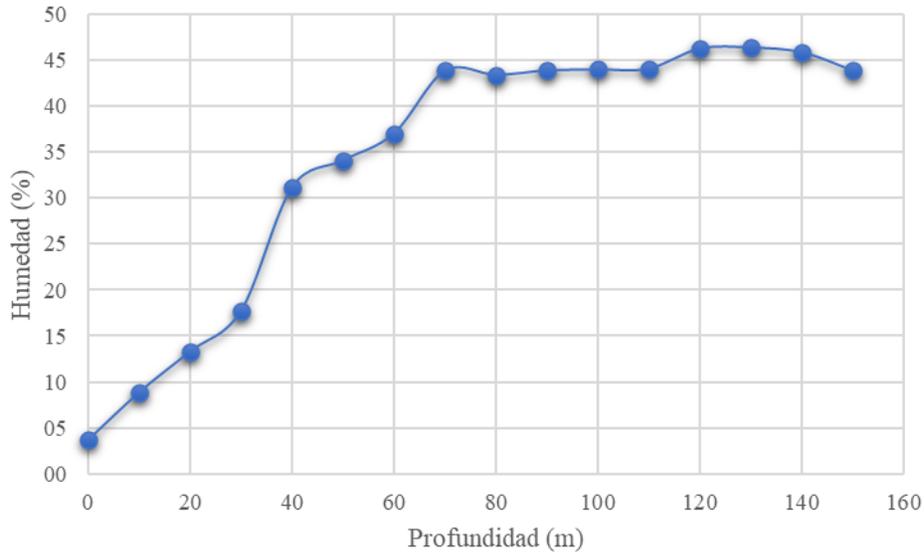


Figura 91- Perfil de porcentaje de humedad a los 1300 segundos de simulación.

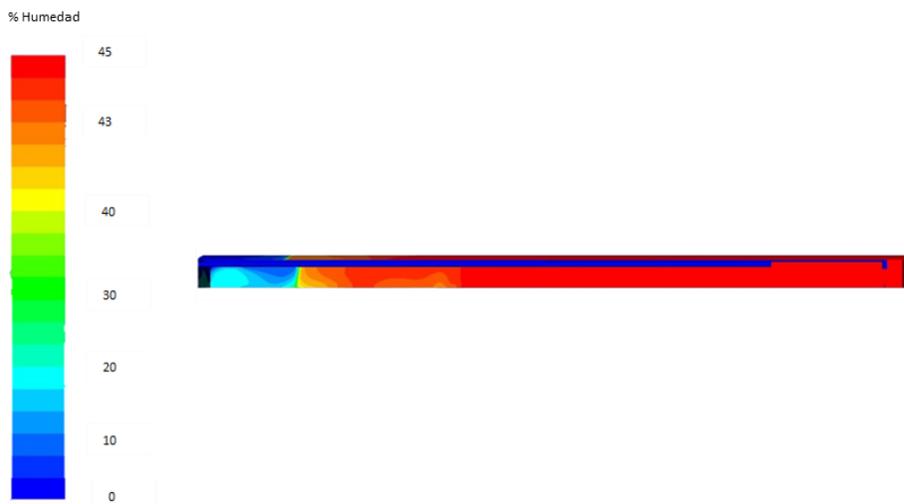


Figura 92- Contorno de porcentaje de humedad a los 1300 segundos de simulación.

3.4.11 Conclusión de humedad

La humedad no tiene una norma que la rijan, por lo tanto, para seleccionar la ideal se elegirá en base a la temperatura, por lo tanto, tomaremos que el tiempo adecuado sería de 80 segundos al igual que en la temperatura en donde la humedad no excede del 70%.

Conclusiones

Con la aplicación del sistema de ventilación mono extractivo en la obra de desarrollo subterránea analizamos distintos parámetros: monóxido de carbono, dióxido de carbono, temperatura y humedad. Al analizar individualmente cada uno de ellos obtuvimos algunas variantes las cuales son pautas que nos ayudaron a seleccionar el tiempo adecuado.

Para el caso del monóxido de carbono obtuvimos que el tiempo óptimo de simulación fue de 320 segundos (5 minutos, 20 segundos) ya que la concentración más alta registrada es de 42.8 ppm siendo esta menor a la indicada por la norma NOM-010-STPS-1999.

Para el caso del dióxido de carbono obtuvimos que el tiempo óptimo de extracción fue de 40 segundos ya que la mayor concentración en este tiempo es de 4793.1 ppm, encontrándose por debajo de los límites máximos permisibles dictados por la norma NOM-010-STPS-1999.

Para la temperatura el tiempo que cumplía con lo dictado por la NOM-015-STPS-2001 fue el de 80 segundos ya que esta la mayor temperatura registrada fue de 31.8°C, para regular la humedad no existe ninguna norma, por lo tanto, para dicho parámetro se tomara en cuenta el tiempo óptimo establecido por la temperatura, ya que estos van de la mano.

Analizando los parámetros en conjunto tenemos que el monóxido sería el que mayor tiempo tardaría en encontrarse en condiciones óptimas para los trabajadores, mientras que el dióxido de carbono tan solo necesito 40 segundos de simulación y la temperatura y humedad 80 segundos, en base a esto podemos determinar que la extracción es regida por el tiempo que se tarde en extraer el monóxido de carbono.

Para este caso el tiempo adecuado para la extracción de gases nocivos es de 320 segundos (5 minutos, 20 segundos) ya que a partir de este los parámetros cumplen con las normas, sin embargo, en la simulación no se consideran pérdidas de nada en el sistema de ventilación como pasaría en la realidad, por lo tanto, sugiero se realice la extracción mayor tiempo.

Tomando en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior podemos tomar en cuenta realizar 640 segundos (10 min, 40 segundos) de extracción, en donde como resultado final tendríamos: 15 ppm de monóxido, 3115 ppm de dióxido, 27.7° C y 45.8% de humedad. De esta manera tendríamos factor de error por pérdidas.

Trabajo futuro

El tema de ventilación en minería subterránea es de gran importancia, es por eso que la presente investigación es de gran utilidad para esta rama de la ingeniería de minas, por ello, es que se debería tener en cuenta continuar con investigaciones similares a estas, ya que sería de gran utilidad para solucionar problemáticas en la ventilación de empresas mineras.

En la presente investigación obtuvimos los parámetros de CO, CO₂, temperatura, humedad para un caso específico en donde las tuberías se encontraban a ciertas distancias, por lo que sería interesante, conocer el comportamiento de los parámetros antes mencionados con las tuberías ubicadas en distintos lugares y así conocer en que ubicación se tiene las condiciones adecuadas en menor tiempo.

Lo mencionado anteriormente se puede lograr tomando como referencia este caso de estudio y compararlo con investigaciones futuras, incluso se podría implementar y corroborar para algún caso real.

Bibliografía

- Anon. (1972). *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices*. Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Bolz, R. E., & Tuve, G. (1973). *Handbook of Tables for Applied Engineering Science* (Segunda edición ed.). Cleveland: CRC Press.
- Estudios Mineros de Perú. (s.f.). *Manual de Minería*. Lima, Perú. Obtenido de http://www.estudiosmineros.com/ManualMineria/Manual_Mineria.pdf
- Fluent. (s.f.). Obtenido de <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- Forbes, J. J., & Grove, G. (1954). *Mine Gases and Methods for Detecting Them* (Vol. 33). USBM M.C.
- Hargrave, S. J. (1973). *Planning and Operation of Gaseous Mines* (Vol. 66). Montreal.
- Hartman, H. L. (1997). *Mine Ventilation and Air Conditioning* (Third edition ed.). Wiley Interscience.
- Kyellestad, A. (2020). GAMBIT and its application in the search for physics Beyond the Estándar Model. *ScienceDirect*, 113. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0146641020300168>
- Leach, S. J., & Thompson, H. (1968). *Observations on a Metane Roof Layer at Cambrian Colliery*. London .
- Martin, R. T. (s.f.). *Apuntes de ventilación*. SERNAGEOMIN.
- Mejia, R. I. (2018). *Estudio comparativo de tres modelos de transferencia de masa y energía mediante simulación en CFD para un sistema de ventilación mono extractivo en una obra de desarrollo de mina subterránea*. Guanajuato, Guanajuato, México: Universidad de Guanajuato.
- Ministerio de minas. (2003). *Glosario Tecnico Minero*. Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://books.google.com.mx/books?id=YUsbzGmMEogC&pg=PA33&dq=ventilacion+de+minas+subterraneas&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjY9r78w4LpAhVDKKwKHWRACTEQ6AEIRDAE#v=onepage&q=ventilacion%20de%20minas%20subterraneas&f=false>
- Ministerio de Minas y Energías. (1987). *Reglamento de seguridad en las labores subterráneas, Decreto 1335, 1987*. Colombia.
- Ministerio de Minería. (2004). *Reglamento de seguridad minera decreto supremo N°132*. Chile: Diario Oficial .

- Moncada, J. J. (2002). *Diseño de instalaciones mineras*. Hermosillo, Sonora, México: Universidad de Sonora.
- Normas Legales. (2010). *Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional y otras medidas complementarias en minería*. Lima, Perú.
- Osorio, V. (2010). Dinamica de los fluidos computacional CFD. (U. N. Colombia, Ed.) *Virtual Pro*. Obtenido de <https://www.virtualpro.co/biblioteca/dinamica-de-fluidos-computacional-cfd>
- Quevedo, C. M. (2013). *Tesis sistema de ventilación de diez kilometros del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Huanza*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Quiceno, C. C. (2011). *Caracterización de sistemas de ventilación a minería subterránea*. Colombia: Universidad de Colombia.
- Rock, R. L., & Beckman, G. (1975). *Evaluation of Radioactive Aerosols in United States Underground Coal Mines* (Vol. 1025).
- Secretaría de Trabajo y Previsión Social. (2001). "NORMA Oficial Mexicana NOM-015-STPS-2001, Condiciones térmicas elevadas o abatidas-Condicionde seguridad e higiene. Estados Unidos Mexicanos .
- Secretaría de Trabajo y Previsión Social. (2008). *NORMA Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008, Seguridad para minas subterráneas de carbón*. Estados Unidos Mexicanos.
- Secretaría de Trabajo y Previsión Social. (2012). *NORMA Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012, Minas subterráneas y minas a cielo abierto - Condiciones de seguridad y salud en el trabajo*. Estados Unidos Mexicanos.
- Serra, M. E. (2003). "Topografía subterránea para minería y obras". Barcelona, España: Edicions UPC. Obtenido de <https://books.google.com.mx/books?id=YUsbzGmMEogC&pg=PA33&dq=ventilacion+de+minas+subterranas&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjY9r78w4LpAhVDKKwKHWRACTEQ6AEIRDAE#v=onepage&q=ventilacion%20de%20minas%20subterranas&f=false>
- Tena, A. F. (05 de 09 de 2014). Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional a la neumología. *Archivos de Bronconeumología*, 51(6), 293. Obtenido de <https://www.archbronconeumol.org/es-aplicaciones-dinamica-fluidos-computacional-neumologia-articulo-S0300289614003573>
- Thimons, E. D. (1979). *Forecasting Methane in Metal and Non Metal Mines*. USBM R.I.
- Vega, A. N. (s.f.). *Tesis sistemas de explotación minado subterráneo*. Guanajuato, México: Universidad de Guanajuato.
- Vergne, J. d. (2014). *Hard Rock Miner's Handbook*. Canadá: Stantec Consulting Ltd.

Workers Compensation Act. (2004). *Occupational Health and Safety Regulation*. Estados Unidos de America .