



# Universidad de Guanajuato

---

---

## Campus Guanajuato.

### Departamento de Minas, Metalurgia y Geología.

**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.**

Trabajo de tesis que para obtener el grado de:

Ingeniero de Minas.

**P R E S E N T A:**

Rosa Isela Lopez Mejia.

Guanajuato, Gto. Septiembre 2018.

## **Declaratoria.**

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

---

Dr. Juan Carlos Baltazar Vera.

Director.

---

Dr. Joel Everardo Valtierra Olivares.

CO-Director.

Guanajuato, Gto. Septiembre 2018.

## **Miembros de Comité Tutorial**

Miembros del Jurado del examen de grado que para obtener el título de Ingeniero de Minas presenta Rosa Isela López Mejía, con el trabajo titulado:

**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.**

---

Dr. Pablo Vizquerra Morales.

---

Dra. Carolina de Jesús Rodríguez Rodríguez.

---

Ing. Roberto Ontiveros Ibarra.

Guanajuato, Gto. Septiembre 2018.

## **Agradecimiento.**

Agradezco y reconozco el apoyo de las personas que de alguna manera contribuyeron para la realización del presente trabajo; en especial al Dr. Juan Carlos Baltazar Vera quien coordinó y trabajó en conjunto en la elaboración del proyecto, así como al Dr. Pablo Vizquerra Morales quien me enseñó las funciones del Software utilizado para las simulaciones como para la solución de problemas surgidos durante el trabajo.

También agradezco a todos los maestros que fueron parte fundamental en mi crecimiento profesional, ya que sin ellos no podría haber llegado a culminar mis estudios de ingeniería. Especialmente la Dra. Carolina de Jesús Rodríguez Rodríguez quien me brindó su apoyo y conocimiento en la redacción del trabajo realizado.

A mi familia y amigos quienes fueron una parte importante durante esta etapa de mi vida, por los consejos que recibí y a quienes me motivaron a seguir adelante y finalizar adecuadamente el trabajo.

## Resumen.

En este proyecto se realizó un estudio comparativo de simulación empleando tres modelos para un sistema sin extracción vs extracción en una obra de desarrollo de mina subterránea, con el fin de reducir las concentraciones CO y CO<sub>2</sub>, así como disminuir la temperatura y humedad presentes en la obra. Para lograr el objetivo se realizaron los cálculos de la cantidad del flujo de aire necesaria para la ventilación de la obra de desarrollo, así como la pérdida de presión que se tendrá en las tuberías utilizadas. Se diseñó la obra de desarrollo con dimensiones de 7m X 7m con una longitud de 150m utilizando el software Gambit 2.4.6. Se consideraron las siguientes características de tubería para la ventilación:

- Manga de ventilación; Inyecta aire fresco en la obra de desarrollo.
- Manga de extracción para los gases tóxicos.
- Tubería de combustión (simula la maquinaria: Cooptan, camión de bajo perfil).

Se seleccionó un extractor comercial, el cual se esquematizó mediante el software MixSim 2.1.10, al tener la geometría de la obra de desarrollo, así como el extractor estos se mallaron en (Gambit 2.4.6) para posteriormente realizar las simulaciones utilizando el software ANSYS FLUEND 16.0.

Se realizó una simulación de 500s sin la implementación de un circuito de ventilación para obtener resultados de las concentraciones de CO, CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad a lo largo de la obra de desarrollo de la mina subterránea. Para las simulaciones con extracción (ventilación) se establecieron las condiciones de frontera para la obra de desarrollo y el extractor, utilizando el mismo tiempo de la simulación sin extractor con el fin de comparar resultados de cada uno de los modelos implantados y si estos entran dentro de los parámetros establecidos por las normas (NOM-015-STPS- 1999, NOM-121-STPS-1996). Con los resultados obtenidos se seleccionó el modelo que generó mejores condiciones para los trabajadores en mina subterránea disminuyendo las concentraciones de CO, CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad.

## **Abstract.**

In this project, a simulation comparative study was carried out using three models for a system without extraction vs. extraction in an underground mine development work, in order to reduce CO and CO<sub>2</sub> concentrations, as well as to reduce the temperature and humidity present in the work. To achieve the objective, calculations were made of the amount of air flow necessary for the ventilation of the development work, as well as the pressure loss that will be had in the pipes used. The development work was designed with dimensions of 7m X 7m with a length of 150m using the Gambit 2.4.6 software. The following pipe characteristics for ventilation were considered:

- Ventilation pipe; Injects fresh air into the development work.
- Extraction pipe for toxic gases.
- Combustion pipe (simulates machinery: Cooptan, low profile truck).

A commercial extractor was selected, which was schematized by the MixSim 2.1.10 software, having the geometry of the development work as well as the extractor these were mallated in (Gambit 2.4.6) to later perform the simulations using the ANSYS software FLUEND 16.0.

A simulation of 500s was carried out without the implementation of a ventilation circuit to obtain results of CO, CO<sub>2</sub>, temperature and humidity concentrations throughout the development work of the underground mine. For the simulations with extraction (ventilation), the boundary conditions for the development work and the extractor used were established, using the same time of the simulation without extractor in order to compare results of each of the implanted models and if these enter within the parameters established by the standards (NOM-015-STPS-1999, NOM-121-STPS-1996). With the results obtained, the model that generated the best conditions for the workers in the underground mine was selected, decreasing the concentrations of CO, CO<sub>2</sub>, temperature and humidity.

# Contenido

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Declaratoria</b> .....                            | <b>2</b>  |
| <b>Miembros de Comité Tutorial</b> .....             | <b>3</b>  |
| <b>Agradecimiento</b> .....                          | <b>4</b>  |
| <b>Resumen</b> .....                                 | <b>5</b>  |
| <b>Abstract</b> .....                                | <b>6</b>  |
| <b>Introducción</b> .....                            | <b>15</b> |
| <b>Hipótesis</b> .....                               | <b>17</b> |
| <b>Objetivo General</b> .....                        | <b>17</b> |
| <b>Objetivos Particulares</b> .....                  | <b>17</b> |
| <br>   |           |
| <b>Capítulo I</b> .....                              | <b>18</b> |
| <b>Marco Teórico</b> .....                           | <b>18</b> |
| <b>1.1. Minería</b> .....                            | <b>18</b> |
| 1.1.1. Mina Subterránea.....                         | 19        |
| 1.1.2. Mina a Cielo Abierto.....                     | 20        |
| <b>1.2 Ventilación en mina subterránea</b> .....     | <b>21</b> |
| 1.2.1. Generalidades.....                            | 21        |
| 1.2.2. Ventilación Natural.....                      | 21        |
| 1.2.3. Ventilación Mecánica o Secundaria.....        | 22        |
| 1.2.4. Sistemas de Ventilación.....                  | 23        |
| 1.2.4.1. Soplante.....                               | 23        |
| 1.2.4.2. Aspirante.....                              | 23        |
| 1.2.4.3. Mixto.....                                  | 24        |
| 1.2.5. Tuberías para ventilación mecánica.....       | 24        |
| <b>1.3 Composición del aire</b> .....                | <b>25</b> |
| 1.3.1. Oxígeno (O <sub>2</sub> ).....                | 26        |
| 1.3.2. Nitrógeno (N <sub>2</sub> ).....              | 26        |
| 1.3.3. Anhídridos de Carbono (CO <sub>2</sub> )..... | 26        |
| <b>1.4 Combustión</b> .....                          | <b>27</b> |
| 1.4.1. Tipos de Combustión.....                      | 27        |
| 1.4.2. Combustibles.....                             | 28        |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.4.2.1. De acuerdo al estado físico: .....   | 28        |
| 1.4.2.2. De acuerdo al origen: .....  | 29        |
| 1.4.2.3. De acuerdo a las características químicas: .....   | 29        |
| 1.4.3. Maquinaria de combustión DH.....   | 29        |
| <b>1.5. Gases generados en minería. ....</b>  | <b>30</b> |
| 1.5.1. Monóxido de Carbono (CO). ....   | 31        |
| <b>1.6. Normatividad en ventilación para minería subterránea. ....</b>  | <b>34</b> |
| <b>1.7. Criterios para la definición de caudal. ....</b>  | <b>35</b> |
| 1.7.1. Caudal requerido por el número de personal. ....   | 36        |
| 1.7.2. Caudal requerido por equipos diésel.....   | 36        |
| 1.7.3. Caudal generado por la ventilación.....  | 37        |
| 1.7.4. Perdida de carga de la instalación. ....   | 37        |
| 1.7.4.1. Perdida por fricción.....  | 37        |
| 1.7.4.2. Perdida por fricción total. ....   | 39        |
| 1.7.4.3. Perdidas singulares.....   | 40        |
| 1.7.4.4. Perdida por presión dinámica.....  | 40        |
| <b>1.8. Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD). ....</b>   | <b>41</b> |
| <b>1.9. Programa FLUENT ANSYS. ....</b>   | <b>42</b> |
| 1.9.1. Modelo Físico. ....  | 42        |
| 1.9.2. Modelo de turbulencia. ....  | 42        |
| 1.9.2.1. Modelo $k - \varepsilon$ estándar.....   | 44        |
| 1.9.2.2. Modelo Transition k-kl-omega. ....   | 45        |
| 1.9.2.3. Modelo Reynolds Stress (RSM). ....   | 45        |
| <b>1.10. Simulación en ventilación de minas subterráneas.....</b>   | <b>47</b> |
| 1.10.1. Ventilación auxiliar en carreteras que conducen al área de trabajo<br>modelado el comportamiento del polvo mediante CFD. .... | 47        |
| 1.10.2. Modelos de comportamiento del metano en la ventilación auxiliar de la<br>minería de carbón subterránea. ....                  | 48        |
| 1.10.3. Estudio y aplicación del sistema de simulación y optimización para la red<br>de ventilación de la mina. ....                  | 48        |
| <b>Capítulo II.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>Metodología .....</b>  | <b>50</b> |
| <b>2.1 Requerimiento de aire necesario para la ventilación.....</b>   | <b>50</b> |



|                      |  |           |
|----------------------|--|-----------|
| 2.1.1                | Requerimiento de aire por personal en interior mina.....                                 | 51        |
| 2.1.2                | Requerimiento de aire por equipos diésel de combustión interna. ....                     | 51        |
| 2.1.3                | Requerimiento de aire Final: .....   | 52        |
| 2.1.4                | Requerimiento de aire generado por el Ventilador Axial. ....                             | 53        |
| 2.1.5                | Perdidas de carga en la Instalación. ....  | 55        |
| 2.1.5.1              | Perdida por fricción. ....   | 55        |
| 2.1.5.2              | Perdidas por presión dinámica. ....  | 58        |
| 2.1.5.3              | Perdidas Singulares.....   | 59        |
| <b>2.2.</b>          | <b>Selección del extractor. ....</b>   | <b>60</b> |
| <b>2.3.</b>          | <b>Geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea.....</b>                    | <b>62</b> |
| <b>2.4.</b>          | <b>Mallado de la geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea.</b>          | <b>63</b> |
| <b>2.5.</b>          | <b>Simulación de ventilación en la obra de desarrollo de mina Subterránea..</b>          | <b>64</b> |
| 2.5.1.               | Metodología empleada para el circuito de ventilación. ....                               | 68        |
| <b>Capítulo III.</b> | <b>.....</b>   | <b>70</b> |
| <b>Resultados</b>    | <b>.....</b>   | <b>70</b> |
| <b>3.1.</b>          | <b>Perfiles y contornos de CO, CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura sin extracción.</b> | <b>70</b> |
| 3.1.1.               | Perfiles y contornos de temperatura.....   | 70        |
| 3.1.1.1.             | Modelo KL – Épsilon estándar.....  | 70        |
| 3.1.1.2.             | Modelo K – KL Omega.....   | 72        |
| 3.1.1.3.             | Modelo Reynolds Stress.....  | 74        |
| 3.1.2.               | Perfiles y contornos de humedad. ....  | 75        |
| 3.1.2.2.             | Modelo KL – Épsilon estándar.....  | 75        |
| 3.1.2.3.             | Modelo K – KL Omega.....   | 77        |
| 3.1.2.4.             | Modelo Reynolds Stress.....  | 78        |
| 3.1.3.               | Perfiles y contornos de monóxido de carbono (CO).....                                    | 80        |
| 3.1.3.1.             | Modelo KL – Épsilon estándar.....  | 80        |
| 3.1.3.2.             | Modelo K – KL Omega.....   | 81        |
| 3.1.3.3.             | Modelo Reynolds Stress.....  | 83        |
| 3.1.4.               | Perfiles y contornos de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). ....                      | 84        |
| 3.1.4.1.             | Modelo KL – Épsilon estándar.....  | 84        |
| 3.1.4.2.             | Modelo K – KL Omega.....   | 86        |
| 3.1.4.3.             | Modelo Reynolds Stress.....  | 87        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>3.2. Perfiles y contornos de CO, CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura con sistema de extracción.</b>   | <b>89</b>  |
| 3.2.1. Perfiles y contornos de temperatura.  | 89         |
| 3.2.1.1. Modelo KL – Épsilon estándar.   | 89         |
| 3.2.1.2. Modelo K – KL Omega.  | 90         |
| 3.2.1.3. Modelo Reynolds Stress.   | 92         |
| 3.2.2. Perfiles y contornos de humedad.  | 93         |
| 3.2.2.1. Modelo KL – Épsilon estándar.   | 93         |
| 3.2.2.2. Modelo K – KL Omega.  | 95         |
| 3.2.2.3. Modelo Reynolds Stress.   | 96         |
| 3.2.3. Perfiles y contornos de monóxido de carbono (CO).   | 98         |
| 3.2.3.1. Modelo KL – Épsilon estándar.   | 98         |
| 3.2.3.2. Modelo K – KL Omega.  | 99         |
| 3.2.3.3. Modelo Reynolds Stress.   | 101        |
| 3.2.4. Perfiles y contornos de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).  | 103        |
| 3.2.4.1. Modelo KL – Épsilon estándar.   | 103        |
| 3.2.4.2. Modelo K – KL Omega.  | 104        |
| 3.2.4.3. Modelo Reynolds Stress.   | 106        |
| <b>3.3. Análisis comparativo de los tres modelos utilizados en la simulación para CO, CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura con la extracción.</b> | <b>108</b> |
| 3.3.1. Análisis de los tres modelos para la temperatura.   | 108        |
| 3.3.2. Análisis de los tres modelos para la humedad.   | 109        |
| 3.3.3. Análisis de los tres modelos para el CO.  | 110        |
| 3.3.4. Análisis de los tres modelos para el CO <sub>2</sub> .  | 111        |
| <b>Capítulo IV</b>   | <b>113</b> |
| <b>Conclusión</b>  | <b>113</b> |
| <b>4.1. Trabajo a futuro</b>   | <b>114</b> |
| <b>Capítulo V</b>  | <b>115</b> |
| <b>Referencias y Bibliografía</b>  | <b>115</b> |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Sistemas de ventilación (soplante) para una obra de desarrollo de mina subterránea .....  | 23 |
| <b>Figura 2.</b> Sistemas de ventilación (apirante) para una obra de desarrollo de mina subterránea. ....  | 24 |
| <b>Figura 3.</b> Sistemas de ventilación (mixto) para una obra de desarrollo de mina subterránea. ....   | 24 |
| <b>Figura 4.</b> Efectos fisiológicos del monóxido de Carbono en las personas (Hartman, H.L. Mine Ventilation and Air Conditioning 961:22). .... | 32 |
| <b>Figura 5.</b> Esquema de trabajo .....  | 50 |
| <b>Figura 6.</b> Recubrimiento del extractor .....   | 60 |
| <b>Figura 7.</b> Eje de las aspas del extractor .....  | 61 |
| <b>Figura 8.</b> Aspas del extractor con un ángulo de 45° .....  | 61 |
| <b>Figura 9.</b> Diseño del extractor propuesto .....  | 62 |
| <b>Figura 10.</b> Estructura interna de la mina Subterránea .....  | 63 |
| <b>Figura 11.</b> Geometría de la mina subterránea con enmallado .....   | 64 |
| <b>Figura 12.</b> Perfil de temperatura sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar .....  | 71 |
| <b>Figura 13.</b> Contorno de temperatura sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar .....  | 72 |
| <b>Figura 14.</b> Perfil de temperatura sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.....  | 73 |
| <b>Figura 15.</b> Contorno de temperatura sin extracción utilizando el modelo K – KL omega..   | 73 |
| <b>Figura 16.</b> Perfil de temperatura sin extracción utilizando el modelo Reynold Stress.....  | 74 |
| <b>Figura 17.</b> Contorno de temperatura sin extracción utilizando el modelo Reynold Stress.  | 75 |
| <b>Figura 18.</b> Perfil de humedad sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar  | 76 |
| <b>Figura 19.</b> Contorno de humedad sin extracción utilizando el modelo Reynold Stress.....  | 76 |
| <b>Figura 20.</b> Perfil de humedad sin extracción utilizando el modelo K – KL omega .....   | 77 |
| <b>Figura 21.</b> Contorno de humedad sin extracción utilizando el modelo K – KL omega .....   | 78 |
| <b>Figura 22.</b> Perfil de humedad sin extracción utilizando el modelo Reynold Stress .....   | 79 |
| <b>Figura 23.</b> Contorno de humedad sin extracción utilizando el modelo Reynold Stress.....  | 79 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 24.</b> Perfil de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar .....        | 80 |
| <b>Figura 25.</b> Contorno de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.....       | 81 |
| <b>Figura 26.</b> Perfil de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega .....                 | 82 |
| <b>Figura 27.</b> Contorno de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.....                | 82 |
| <b>Figura 28.</b> Perfil de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.....               | 83 |
| <b>Figura 29.</b> Contorno de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.....             | 84 |
| <b>Figura 30.</b> Perfil de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar. ....         | 85 |
| <b>Figura 31.</b> Contorno de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar .....       | 85 |
| <b>Figura 32.</b> Perfil de concentración de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega ..... | 86 |
| <b>Figura 33.</b> Contorno de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.....                 | 87 |
| <b>Figura 34.</b> Perfil de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynold Stress. ....                | 88 |
| <b>Figura 35.</b> Contorno de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynold Strees.....               | 88 |
| <b>Figura 36.</b> Perfil de temperatura con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar. ....                | 89 |
| <b>Figura 37.</b> Contorno de temperatura con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar. ....              | 90 |
| <b>Figura 38.</b> Perfil de temperatura con extracción utilizando el modelo K – KL omega. ....                         | 91 |
| <b>Figura 39.</b> Contorno de temperatura con extracción utilizando el modelo K – KL omega.                            | 91 |
| <b>Figura 40.</b> Perfil temperatura con extracción utilizando el modelo Reynold Stress. ....                          | 92 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 41.</b> Contorno de temperatura con extracción utilizando el modelo Reynold Stress.                     | 93  |
| <b>Figura 42.</b> Perfil de humedad con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.<br>.....           | 94  |
| <b>Figura 43.</b> Contorno de humedad con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.<br>.....         | 94  |
| <b>Figura 44.</b> Perfil de humead con extracción utilizando el modelo K – KL omega. ....                         | 95  |
| <b>Figura 45.</b> Contorno de humedad con extracción utilizando el modelo K – KL omega. ....                      | 96  |
| <b>Figura 46.</b> Perfil de humedad con extracción utilizando el modelo Reynold Stress. ....                      | 97  |
| <b>Figura 47.</b> Contorno de humedad con extracción utilizando el modelo Reynold Stress. ....                    | 97  |
| <b>Figura 48.</b> Perfil de monóxido de carbono con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar. ....   | 98  |
| <b>Figura 49.</b> Contorno de monóxido de carbono con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar. .... | 99  |
| <b>Figura 50.</b> Perfil de monóxido de carbono con extracción utilizando el modelo K – KL omega. ....            | 100 |
| <b>Figura 51.</b> Contorno de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega. ....          | 101 |
| <b>Figura 52.</b> Perfil de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynold Stress. ....          | 102 |
| <b>Figura 53.</b> Contorno de monóxido de carbono con extracción utilizando el modelo Reynold Stress. ....        | 102 |
| <b>Figura 54.</b> Perfil de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar. ....    | 103 |
| <b>Figura 55.</b> Contorno de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar. ....  | 104 |
| <b>Figura 56.</b> Perfil de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo K – KL omega. ....             | 105 |
| <b>Figura 57.</b> Contorno de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo K – KL omega. ....           | 105 |
| <b>Figura 58.</b> Perfil de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo Reynold Stress. ....           | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 59.</b> Contorno de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo Reynold Stress.....                   | 107 |
| <b>Figura 60.</b> Análisis de los tres modelos en la simulación para la temperatura. ....                                  | 108 |
| <b>Figura 61.</b> Análisis con los tres modelos utilizados en la simulación para la humedad. ..                            | 109 |
| <b>Figura 62.</b> Análisis con los tres modelos utilizados en la simulación para la concentración de CO. ....              | 110 |
| <b>Figura 63.</b> Análisis de los tres modelos utilizados en la simulación para la concentración de CO <sub>2</sub> . .... | 111 |

## **Tablas**

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Características de los gases en trabajos subterráneos.....          | 33 |
| <b>Tabla 2.</b> Consideraciones para el cálculo de la longitud equivalente. ....    | 53 |
| <b>Tabla 3.</b> Presión máxima de trabajo para ductos de ventilación.....           | 54 |
| <b>Tabla 4.</b> Coeficiente de pérdidas en tuberías de codos.....                   | 58 |
| <b>Tabla 5.</b> Especificaciones técnicas del extractor .....                       | 60 |
| <b>Tabla 6.</b> Condiciones de frontera para el análisis de la mina propuesta. .... | 65 |
| <b>Tabla 7.</b> Propiedades de la mezcla de compuestos de la combustión.....        | 66 |
| <b>Tabla 8.</b> Condiciones de frontera para el extractor.....                      | 67 |
| <b>Tabla 9.</b> Propiedades del aire.....   | 68 |
| <b>Tabla 10.</b> Propiedades del material estéril (tepetate).....                   | 69 |

## **Introducción.**

El objetivo principal de la ventilación a lo largo de la historia es proporcionar un flujo constante de aire fresco, suficiente para reemplazar el oxígeno consumido por los trabajadores en las obras de desarrollo. La ventilación minera contemporánea trata de resolver la problemática de los gases nocivos generados principalmente por equipo de combustión diésel. La efectividad de la ventilación en este caso depende de un hecho simple: una vez que los gases nocivos se mezclan con aire, permanecerán uniformemente difusos y nunca se separarán. Por lo tanto, si los gases tóxicos (NO, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, etc.) se diluyen en su fuente con suficiente aire fresco para que no sigan concentrándose en cierto lugar u obra minera hasta que finalmente se agoten en el interior de la mina. En la minería subterránea no solo se habla de la cantidad de aire ventilado requerido para la dilución de los gases nocivos, sino, que también se necesita de una cantidad de aire para reemplazar el oxígeno consumido por el personal y los motores de combustión diésel que están en operación. Dicha ventilación no solamente cubrirá las necesidades ya antes mencionadas, también es suficiente para mejorar la visibilidad y eliminar el polvo de roca generado en la extracción a medida que se van desarrollando obras mineras. Hoy en día, los motores LHD (equipos de combustión diésel) de equipos empleados en minas subterráneas están equipados con depuradores catalíticos de escape para completar la combustión de gases tóxicos que se logra con una eficiencia de aproximadamente 90%. Los motores LHD también producen diminutas partículas sólidas de material diésel debido a la combustión incompleta e impurezas en el combustible. Este asunto consiste en carbono impregnado y una variedad de compuestos orgánicos, como parafina, aldehídos e hidrocarburos. Algunos de estos compuestos son carcinógenos reconocidos. Desafortunadamente, el depurador catalítico no es eficiente en la eliminación de estas partículas y, además, pueden no mantenerse uniformemente distribuidas en el aire de escape de la mina (son sujetos a la estratificación). Por lo que la solución a este problema se ha convertido recientemente en un foco de atención para los ingenieros mineros (la ventilación mecánica), ya que, en la mayoría de los casos, la ventilación natural no es suficiente para solucionar la problemática.

El requerimiento mínimo de aire fresco está regulado por la normatividad, leyes y reglamentos mineros que se aplican a nivel nacional y en algunos de los casos, existen normas que solo son aplicables en la ubicación de la mina (estado). La normatividad establece la cantidad mínima de aire fresco que cubrirá las necesidades para los trabajadores, sin embargo, se debe tener en consideración un aumento del mismo, el cual puede ser necesario para cubrir otros factores que se presentan diariamente tales como: las temperaturas altas, el porcentaje de humedad, etc. [1].

Las fórmulas y los cálculos para estimar la cantidad de aire que necesita una mina tomando en cuenta todos los factores, condiciones ya antes mencionadas emplean factores de fricción empíricos, presión, temperatura, evaporación / condensación, etc. En la mayoría de los casos, los procedimientos simplificados producen resultados satisfactorios; sin embargo, cuando el aire de la mina debe circular a una distancia vertical significativa, o cuando se requiere aire para enfriamiento, un análisis más sofisticado suele ser necesario. En condiciones de una mina en operación cambia día a día, por lo que el establecer un circuito de ventilación tiene un grado de dificultad mayor, en respuesta, los programas de computadora fueron pioneros y desarrollados para aplicaciones prácticas. Hoy en día, la mayoría de diseños y modificaciones a sistemas de ventilación se realizan mediante software especializados que simulan condiciones y/o generan diseños de acuerdo a características específicas de cada caso, los cuales permiten a estimar la cantidad de aire necesario para una mina con condiciones específicas, al igual que la capacidad del extractor o inyector de aire (ventilación mecánica) según sea el caso para tener un flujo constante de aire fresco, entre otros aspectos [2].



## **Hipótesis.**

Se espera que, al simular un sistema de ventilación, se obtenga el modelo adecuado que mejor represente las condiciones termo-ambientales, así como la disminución en la concentración de CO y CO<sub>2</sub> necesarias para que los trabajadores pueden desempeñar sus actividades diariamente en mina subterránea (obtener resultados dentro de los parámetros que indican las normas). Así como el establecer el tipo de ventilador y la posición del mismo para generar un circuito de ventilación constante.

## **Objetivo General.**

Seleccionar el modelo de transferencia de masa y energía que mejor represente el fenómeno del caso de estudio con la finalidad de mantener una ventilación adecuada en una obra de desarrollo de mina subterránea generando un flujo constante de aire limpio para mantener las condiciones adecuadas y desarrollar las diferentes actividades de los trabajadores.

## **Objetivos Particulares.**

1. Realizar los cálculos para determinar la cantidad de flujo de aire necesario para la ventilación de la obra de desarrollo.
2. Diseñar la obra de desarrollo de mina subterránea mediante el software Gambit 2.4.6.
3. Seleccionar el tipo de extractor para la ventilación.
4. Mallar la geometría de la obra de desarrollo de mina subterránea, así como la tubería y el extractor.
5. Realizar las simulaciones con la implementación de un circuito de ventilación mediante los tres modelos diferentes y sin la ventilación con el software ANSYS FLUEND 16.0.
6. Realizar el estudio comparativo de los resultados obtenidos.
7. Seleccionar el modelo más adecuado para el diseño del sistema de ventilación.

# Capítulo I

## Marco Teórico

### 1.1. Minería.

La minería ha sido a lo largo de la historia una de las actividades básicas para el desarrollo económico y tecnológico para la humanidad. Ya que la evolución de los humanos y la minería han ido trascendiendo a lo largo del tiempo, sin la minería las personas seguiríamos viviendo en la era de las cavernas [3]. Los minerales constituyen el elemento base de la mayoría de las industrias, desde la materia prima hasta el producto ya fabricado. La minería es el inicio de todo lo que conocemos hoy en día desde la cosa más simple hasta las grandes tecnologías, debido a esto a través del tiempo la minería ha hecho uso de la ingeniería para tener un mejor método de explotación, extracción de los diferentes minerales dejando atrás la extracción rudimentaria con pico y pala [4]. Debido a la gran demanda generada por la sociedad, la minería ha tenido que incrementar los volúmenes de producción para cubrir estas necesidades es por esto que se ha implementado el uso de tecnologías y maquinaria pesada como lo es:

- Barrenación: máquina de pierna, jumbo (de una o dos plumas), robbins, etc,
- Acarreo: camiones de bajo perfil, bandas transportadoras, skips, etc.
- Trituración: martillos hidráulicos, quebradoras (quijada, rotatoria, etc.)

En prácticamente todos los países del mundo se realiza algún tipo de explotación minera. Esta actividad tiene importantes repercusiones económicas, ambientales, laborales y sociales, tanto en los países o regiones en que se practica como a escala global. Para muchos países en desarrollo la minería representa una parte significativa y, en muchos casos la entrada de inversiones extranjeras [4]. No solo se ha implementado el uso de tecnología para la extracción del mineral, sino que, se ha analizado la parte económica de la minería donde intervienen factores como:

- Rentabilidad de la extracción (mineral del yacimiento).
- Tipo de maquinaria a utilizar.
- Tipo de yacimiento.
- Infraestructura.
- Etc.

De ahí proviene el tipo de explotación que se llevara a cabo, si es conveniente desarrollan obras subterráneas o a cielo abierto tomando en cuenta las características de cada uno de estos métodos.

### **1.1.1. Mina Subterránea.**

La minería subterránea tiene una trascendencia a lo largo de la historia ya que fue el primer método de extracción de mineral (rústicamente) con el uso de pico y pala, lo cual se ha ido perfeccionando mediante la aplicación de la ingeniería [5]. La minería subterránea consiste en la extracción de minerales ocultos en los estratos rocosos de la corteza terrestre mediante excavaciones de profundidades consideradas. El mineral extraído se transporta a la superficie para seguir con el proceso de mismo y obtener un concentrado de alta calidad. Este método se utilizada cuando se trata de minerales de alta ley, y en volúmenes menores de material a comparación de la extracción a cielo abierto. Para el desarrollar obras subterráneas se requiere una gran inversión y por consiguiente la extracción e infraestructura resultan económicamente elevadas. La mayoría de las minas subterráneas se desarrollan en yacimientos de minerales valiosos [6].

Las obras que se desarrollan para la extracción del mineral son rampas generales y/o de acceso, una red de contrapozos, galerías, niveles, subniveles, etc. conectados con la superficie que permiten el constante movimiento del personal, maquinaria y el mineral, así como de circuitos de ventilación (flujo de aire fresco y viciado) [8].

La rampa general es una galería inclinada que conecta los niveles subterráneos a distintas profundidades para el fácil acceso al mineral, en algunas minas también es utilizada como entrada principal para el flujo de aire fresco.

Todas las galerías deben disponer de servicios tales como ventilación y aire fresco, electricidad, agua y aire comprimido, desagües y bombas para el agua subterránea que se filtra, así como un sistema de comunicación, todo esto con el objetivo de generar las condiciones adecuadas para los trabajadores.

### **1.1.2. Mina a Cielo Abierto.**

Las innovaciones técnicas han modificado radicalmente la minería a partir de la segunda mitad del siglo XX, de modo que se ha pasado del aprovechamiento de vetas subterráneas de gran calidad a la explotación en minas a cielo abierto, de yacimientos de menor calidad con minerales diseminados [6]. La minería a cielo abierto remueve la capa superficial de la tierra, para hacer acceder a los yacimientos de mineral de baja ley. La minería a cielo abierto quita completamente el recubrimiento estéril y extrae el material útil. Abarca superficies extensas, además de la mina en sí, incluye escombreras, que llegan a tener grandes dimensiones [7]. A ello se suman los vertederos para residuos del procesamiento, que en el caso de menas con bajo contenido metálico también requieren una gran superficie, y las superficies de infraestructura como complejos de viviendas para los mineros, suministro de energía, vías de transporte, talleres, oficinas administrativas, plantas de tratamiento, etc.

Los modernos equipos de excavación, las cintas transportadoras, la gran maquinaria, el uso de nuevos insumos y las tuberías de distribución, permiten hoy remover grandes cantidades de material (estéril o mineral) en cuestión de horas, haciendo rentable la extracción de menos de un gramo de oro por tonelada de material removido. En algunos casos, debido al comportamiento del yacimiento (extensión, profundidad, etc.) la extracción de mineral a cielo abierto se vuelve no rentable (los costos de extracción del mineral son más altos que las ganancias) por lo que esta será más conveniente el hacer la extracción mediante obras subterráneas [7-10].

## **1.2 Ventilación en mina subterránea.**

### **1.2.1. Generalidades.**

La ventilación es un flujo constante de aire que circula a través de las obras mineras subterráneas desarrolladas para esta actividad tales como, contrapozos, robines, rampas, niveles, etc. El cual ocurre debido a unas diferencias de presiones. La diferencia de presiones es ocasionada por las temperaturas de los gases y el aire entrante en interior mina. En ocasiones los gases generados por las actividades mineras son mayores al aire fresco por lo que no se lleva a cabo el circuito de ventilación, se debe optar por aplicar una ventilación mecánica, haciendo uso de ventiladores o extractores (ayudaran a tener la ventilación necesaria para seguir con el desarrollo y producción) generando condiciones seguras [11].

### **1.2.2. Ventilación Natural.**

La ventilación natural que puede mantener un flujo constante de aire (debido a la diferencia en temperaturas), esta diferencia de temperaturas genera una diferencia de peso específico entre el aire fresco y el aire viciado (saliente). El calentamiento del aire es causado por su circulación constante en las obras mineras (se tienen operaciones) que es cuando se adiciona la energía térmica, esto es suficiente para llegar a tener una pérdida de presión resultado del flujo de aire [1].

En terrenos montañosos, si hay una gran diferencia entre la temperatura de la roca subterránea y la atmósfera, cantidades significativas de aire de ventilación fluirán desde una entrada en una elevación a una salida en otra. El flujo de aire puede estancarse y luego invertir la dirección de día a noche o de verano a invierno. Para proporcionar un flujo de aire confiable se requiere ventilación forzada (Mecánica). En algunos casos se considera que la ventilación natural no tiene ninguna consecuencia para forzar minas subterráneas ventiladas que tienen entradas a una elevación similar en la superficie. De hecho, todas las minas subterráneas están sujetas a los efectos de la ventilación natural.

En minas frías y poco profundas que tienen menos de 1450 m de profundidad, el efecto de la ventilación natural no es confiable. El flujo de aire debido a la ventilación natural puede tender a fluir en cualquier dirección, o no fluir en absoluto. Afortunadamente, las presiones generadas por los gases y el flujo de aire, la ventilación en este caso generalmente no es significativa y puede ignorarse en los cálculos rutinarios de ventilación mecánica. En minas poco profundas y en minas profundas, la temperatura de la roca es más alta que la temperatura atmosférica; por lo tanto, hay una transferencia de energía al aire de ventilación. El efecto es inducir ventilación natural que invariablemente actúa a favor del sistema de ventilación mecánica. Puede ser suficiente por sí solo para permitir una salida segura de la mina en caso de una gran potencia fracaso [12].

### **1.2.3. Ventilación Mecánica o Secundaria.**

La implementación de la ventilación forzada o mecánica se debe a la deficiencia del circuito de ventilación natural, por lo que se implementa el uso de extractores o inyectores para forzar el circuito de ventilación, disminuyendo la cantidad de gases nocivos producidos por las diferentes actividades que se llevan a cabo en interior mina. Para la instalación de un extractor o inyector se deben considerar las necesidades que se tienen en la ventilación, ya que cada uno de estos tiene funciones diferentes, cuando se tiene un flujo constante de aire fresco, pero no es suficiente para remover los gases emitidos por los vehículos, la voladura, de la propia mina explotada se debe instalar un extractor para que realice esta función (extraer gases tóxicos) [13]. Pero se tiene el caso en el que la cantidad no es suficiente para que ventile todas las áreas de la mina (no cuenta con la velocidad adecuada) se deberá instalar un inyector, el cual forzará el circuito de ventilación (desplazamiento de los gases). Es también necesario controlar el polvo y la temperatura.

#### 1.2.4. Sistemas de Ventilación.

El sistema de ventilación implica una trayectoria cerrada recorrida por el aire. Así mismo, es la trayectoria definida por el conjunto de conductos que parten desde una fuente de presión y regresan a la misma fuente. En el caso de los circuitos de ventilación de minas, parte del circuito está constituido por conductos y la otra parte se complementa de la atmosfera [14]. Los sistemas de ventilación se clasifican de la siguiente manera:

##### 1.2.4.1. Soplante.

El flujo de aire entra a través de la tubería hacia el tope de la obra minera, el cual es impulsado por un ventilador (inyector) desplazando la concentración de gases nocivos generados por equipos de combustión interna o voladura (producción o desarrollo) según sea el caso, hacia la corriente principal de aire, a través de la galería. La corriente de aire fresco que se genera en este sistema, a una velocidad relativamente alta genera un circuito de ventilación contante a lo largo de la galería, así como para las zonas próximas al tope (donde se tiene el desarrollo de la obra). La salida del conducto debe estar situada a una distancia adecuada de tope de modo se continúe con el circuito como se muestra en la Figura 1 [15].

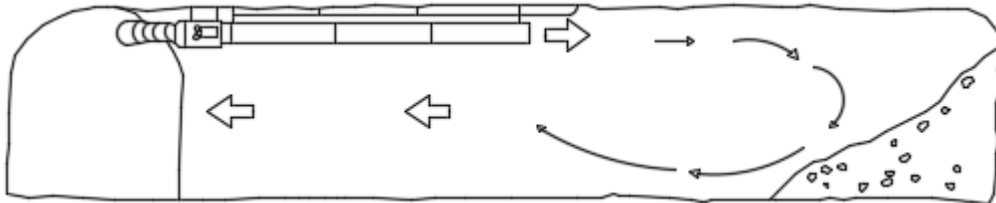


Figura 1. Sistemas de ventilación (soplante) para una obra de desarrollo de mina subterránea.

##### 1.2.4.2. Aspirante.

En este sistema, el aire contaminado del tope es succionado a través del conducto debido a la depresión creada por un extractor situado en el otro extremo. Este aire es evacuado por la corriente de ventilación principal, el flujo de aire limpio entra por el otro extremo a lo largo de la galería hasta llegar al tope de la obra. El extractor debe situarse cerca de la entrada

principal a la galería. Debido a la poca velocidad del flujo de aire fresco, este sistema no efectúa un buen circuito de ventilación en el área, por lo que suele ser necesario el uso de un sistema de ventilación mixta (ver Figura 2) [16].

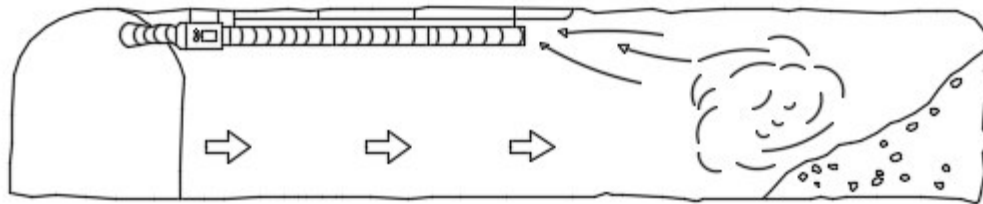


Figura 2. Sistemas de ventilación (aspirante) para una obra de desarrollo de mina subterránea.

#### 1.2.4.3. Mixto.

El sistema mixto, también llamado sistema soplante- aspirante, en el cual se utiliza un ventilador auxiliar (realiza dos funciones soplar aire fresco-aspirar aire viciado) de refuerzo para forzar la entrada de aire fresco, situado en la entrada de la galería con un tramo de conducto de poca longitud. Estos sistemas combinan las ventajas de cada sistema, consiguiendo el mejor efecto de ventilación en las áreas donde la corriente de aire le es difícil llegar como se observa en la Figura 3 [17].

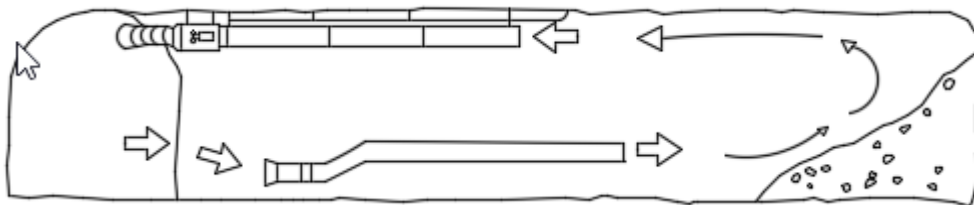


Figura 3. Sistemas de ventilación (mixto) para una obra de desarrollo de mina subterránea.

#### 1.2.5. Tuberías para ventilación mecánica.

En la ventilación secundaria se hace uso de tubería para conducir el flujo de aire fresco por las galerías hacia el tope de las obras en desarrollo. Hoy en día existen dos tipos de tubería que la industria minera utiliza para la ventilación, las cuales se muestran a continuación:



- *Tubería Flexible*: Está formada por un tejido textil de poliéster, Proporciona al conducto una resistencia mecánica. Se utilizan varios espesores de poliéster esto en función de las condiciones a las que se someterá. Este tipo de tubería es la más utilizada debido a las características de su material como su resistencia y economía que esta representa y su flexibilidad (fácil manejo y transporte).
- *Tubería Rígida*: Son tuberías de PVC o metálicas. No es fácil adquirir este tipo de tubería debido a su elevado costo, y la dificultad de su manejo, así como el peso que representa y el traslado de la misma, así como su instalación. Por lo antes mencionado la tubería rígida no es muy utilizada en la industria minera (lleva a utilizar tubería flexible) [18].

### **1.3 Composición del aire.**

Su composición ha variado mucho desde la etapa de formación del planeta Tierra, al principio contenía H<sub>2</sub> y He. Actualmente el aire atmosférico se compone esencialmente de una mezcla de gases aproximadamente 20.9 % de volumen de Oxígeno (O) y 79% de nitrógeno, además de 1% de anhídridos de carbono y una diminuta cantidad de vapores de agua, las cuales dependen de la temperatura y presión atmosférica. El aire presenta características, las cuales ayudan a entender el comportamiento del mismo, tales como: la temperatura a la cual se expande (1°C expandiéndose 1/273 partes de su volumen), presión, peso específico, etc. Se debe tener en consideración los aspectos importantes de los gases que componen el aire, así como la problemática de salud que representarían estos en las personas por el incremento o deficiencia del mismo. De tal manera que se analicen los principales componentes en el flujo de aire que se encuentran en interior mina, los cuales en su mayoría son deficientes generando condiciones inseguras para los trabajadores.

### **1.3.1. Oxígeno (O<sub>2</sub>).**

Si se tiene una concentración de oxígeno en el aire por debajo del 16%, esta se considera una situación insegura para la subsistencia humana debido a los problemas de salud que representa como lo es: deficiencia en las funciones corporales, procesos mentales y coordinaciones motrices. Si el contenido de oxígeno disminuye por debajo del 13%, existe peligro de muerte, ya que el desfallecimiento físico puede presentarse en cualquier momento.

Es muy importante que cualquier persona que ingrese a una obra subterránea conozca las condiciones a las que se está trabajando, así como los límites permisibles de oxígeno con los que se puede laborar para evitar algún accidente o incluso la pérdida de una vida. Existen técnicas sencillas que pueden realizarse antes de entrar a una obra minera y saber si esta cuenta con un flujo de aire, Por ejemplo: Si se tiene una flama (encendedor, cerillo, etc.) y esta se apaga, es por la falta de oxigenación del área, por consiguiente, corren peligro, ya que para la conservación de la misma se necesita mínimo un 12% de oxígeno, lo cual indica que este ha sido desplazado, por lo que inmediatamente deberán abandonar o evacuar el área que presenta esas deficiencias.

### **1.3.2. Nitrógeno (N<sub>2</sub>).**

Una característica importante de este gas es que es fisiológicamente inerte. Este elemento no presenta alguna acción química durante la respiración, su peso específico es de 1.250kg/m<sup>3</sup>. Una alta concentración ocasiona una deficiencia de oxígeno con los síntomas asociados por esta causa.

### **1.3.3. Anhídridos de Carbono (CO<sub>2</sub>).**

El dióxido de carbono no es tóxico, sin embargo, el aumento del mismo en un área determinada de 5 a 6% o más ocasiona problemas de salud como: dolores de cabeza, pérdida del conocimiento o muerte por asfixia. El contenido de dióxido de carbono en la ventilación tiende a aumentar considerablemente de su cantidad inicial 0.04% alcanzando hasta un 0.2 a

0.6% en la corriente general de salida. Este gas se encuentra presente en obras mineras subterráneas, ya que se produce por la descomposición de la madera (la cual se usa como soporte en algunas obras) que se están explotando o incluso en obras abandonadas, también es resultado de los explosivos, con los que se trabaja diariamente para llevar a cabo voladuras y continuar con el desarrollo de la mina. Por lo que el personal debe de tomar en cuenta estas consideraciones y no poner en riesgo su integridad física antes de laborar en un área determinada [11].

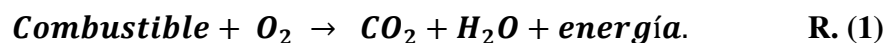
## **1.4 Combustión.**

La combustión es una reacción química que consiste en la oxidación violenta de un elemento con desprendimiento de calor. Intervienen en la misma el combustible y el oxígeno como comburente. Con el objeto de analizar este tipo de reacción es necesario distinguir entre tres distintos tipos de combustión, la denominada combustión perfecta, la incompleta y la completa.

### **1.4.1. Tipos de Combustión.**

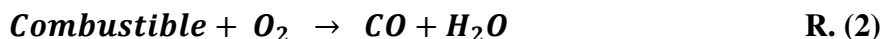
#### **➤ Combustión completa.**

La combustión completa es aquella en la cual todo el carbono del combustible reacciona con el oxígeno del comburente para dar dióxido de carbono como se muestra en la Reacción 1. La cual es similar a la de la combustión perfecta, con la diferencia que, para que ocurra, es necesario agregar una mayor cantidad de oxígeno con el comburente que la requerida de acuerdo al cálculo estequiométrico. Dicha cantidad en exceso cuando se utiliza aire como comburente, se denomina “exceso de aire”.



➤ **Combustión incompleta.**

Es la reacción en la cual no se quema todo el carbono del combustible dando dióxido de carbono, sino que reacciona para dar monóxido de carbono y en algunos casos queda un carbono libre (ver Reacción 2). Este tipo de combustión es la que presentan los motores de combustión diésel y que por consiguiente se tiene una producción constante del monóxido de carbono.



### **1.4.2. Combustibles.**

Los combustibles son sustancias que al combinarse con el oxígeno producen un gran desprendimiento de calor. En otras palabras, se puede decir que los combustibles son sustancias que al reaccionar con el oxígeno dan lugar a reacciones exotérmicas. Las transformaciones básicas de los minerales se hacen utilizando el calor, como agente físico, en hornos y para ello se requieren los combustibles. Existen diversas formas de clasificar los combustibles, seguidamente se desarrollarán tres de ellas, de acuerdo al estado físico, al origen y a las características químicas de los mismos.

#### **1.4.2.1. De acuerdo al estado físico:**

*Sólidos:* carbón de piedra, carbón de leña, residuo de la destilación del petróleo.

*Líquidos:* petróleo y sus productos de destilación (combustible, aceite, gasolina, etc.).

*Gaseosos:* gas natural, gas de gasógeno, gas de alto horno.

### **1.4.2.2. De acuerdo al origen:**

*Naturales:* hulla, lignito, antracita, petróleo, gas natural, etc.

*Artificiales:* coque, derivados de petróleo, gas de alto horno, etc.

### **1.4.2.3. De acuerdo a las características químicas:**

*Orgánicos:* Todos aquellos que contienen carbono en su composición química, es decir todos los citados en las clasificaciones anteriores.

*Inorgánicos o accidentales):* Los que no tienen carbono en su composición tales como el hidrógeno, fósforo, silicio, etc [19].

También se denominan accidentales pues trabajan por accidente, como es el caso del fósforo y silicio que suelen encontrarse como impurezas, los cuales trabajan como combustibles en los convertidores para producir acero.

El poder calorífico de un combustible es una característica física del mismo y permite prever el calor que podemos esperar que nos ceda en un proceso térmico. Lo que se define como la cantidad de calorías que produce un combustible durante la combustión completa de un kilogramo del mismo. Se pueden distinguir dos tipos de poderes caloríficos para cada combustible, el poder calorífico superior y el inferior. Se diferencian entre sí en que el primero comprende todo el calor producido, incluyendo el requerido para vaporizar la humedad que contiene el mismo. El inferior no considera las calorías consumidas para vaporizar la humedad que contiene el combustible, por consiguiente, éste es el que da las calorías que realmente son aprovechables en un proceso térmico [20].

### **1.4.3. Maquinaria de combustión DH.**

La combustión de los motores diésel consiste en carbono impregnado y una variedad de compuestos, tales como parafina (cera), aldehídos e hidrocarburos aromáticos polinucleares. Algunos de estos compuestos son carcinógenos reconocidos. Desafortunadamente, el

depurador catalítico estándar (convertidor catalítico de oxidación) no es eficiente en la eliminación de estas partículas y, además, las partículas no permanecen uniformemente difundidas en el aire de escape de la mina (están sujetos a la estratificación).

Para un combustible condensado en presencia de una atmosfera comburente se determina como la temperatura a la que hay que calentar un combustible condensado, en presencia de una atmosfera infinita de aire en calma (aunque habrá convección natural por flotabilidad). Para el desarrollo de las obras mineras subterráneas se hace uso de maquinaria de combustión diésel con la finalidad de hacer más productivo el proceso, pero debido a esto se lidia con la generación de los gases por la combustión incompleta. Algunos de los equipos utilizados son:

➤ **ScoopTram o cargador frontal.**

Es un equipo de carguío en minería subterránea, posee un cucharón de nivelación de carguío plano (el tipo de cucharón varía, dependiendo de la cantidad de material que se desea remover). La forma del cucharón está diseñada para proporcionar flexibilidad para desempeñar diversas funciones en diferentes condiciones (lugares estrechos, cortos, etc.) como es remover material de una zona a otra, nivelar un área, etc. El uso de este equipo es fundamental en el desarrollo de obras mineras, así como para la producción de mineral.

➤ **Camión de bajo perfil.**

El camión está diseñado para trasladar grandes volúmenes de material con un bajo costo por tonelada en trabajos de minería subterránea. Los camiones utilizados en minería subterránea cuentan con un motor de combustión diésel los cuales generan gases tóxicos, pero son indispensables para las actividades que se llevan diariamente en la industria minera [21].

## **1.5. Gases generados en minería.**

Como se señaló en la introducción, los gases nocivos emitidos por los equipos de combustión diésel en minas subterráneas son un problema que recientemente se ha convertido en el foco

de atención para los ingenieros de minas, el motivo es que las industrias mineras están obligadas a tener las condiciones óptimas y seguras para los colaboradores. Las emisiones de los motores diésel producen diminutas partículas sólidas (DPM) debido a combustión incompleta e impurezas del combustible, generando una atmosfera de gases nocivos para los trabajadores, lo que implica un peligro constante para su salud, y por consiguiente un bajo rendimiento en sus actividades, lo que es contraproducente para la industria [22].

Los gases generados en las minas subterráneas por las actividades que se realizan (barrenación, acarreo de mineral, voladuras, etc.) son: metano (en la exploración de los mantos de carbón), el sulfhídrico (producto de la oxidación natural de las piritas), aldehídos, monóxido de carbono etc. La situación que afecta a los trabajadores por tener contacto con gases como el monóxido de carbono, el cual se genera con mayor frecuencia.

### **1.5.1. Monóxido de Carbono (CO).**

Es un gas inflamable, y como cualquier otro, es explosivo, encontrándose que el límite inferior de explosividad es de 15% en mezcla. Este gas se forma principalmente durante incendios y explosiones en las obras subterráneas; también como producto de los motores de combustión interna, su presencia en las obras subterráneas es mayor debido a la deficiencia de los motores de combustión interna. Una de las características de este gas es que es más ligero que el aire atmosférico, porque su peso es de  $1.250 \text{ Kg/m}^3$ . El monóxido de carbono es sumamente toxico y peligroso, porque no puede ser detectado por los sentidos, dado que es incoloro, inodoro e insípido. La acción toxica de este gas sobre las personas se debe a que tiene una afinidad química más estrecha con los glóbulos rojos de la sangre que el oxígeno. El límite inferior de la peligrosidad del monóxido de carbono con respecto al organismo humano es de 0.01%, si se respira durante un periodo de 5 a 6 horas con esas concentraciones de CO, se presentan dolores de cabeza. Una exposición de 2 a 3 horas satura la sangre (con el 0.1% de CO en el aire) pero no existe peligro de muerte con esta concentración. Debido a esto se debe tener un control de las emisiones de este gas (concentración) en las obras mineras. En la Figura 4 se muestran las horas de exposición al gas y las consecuencias que esto conlleva [23].

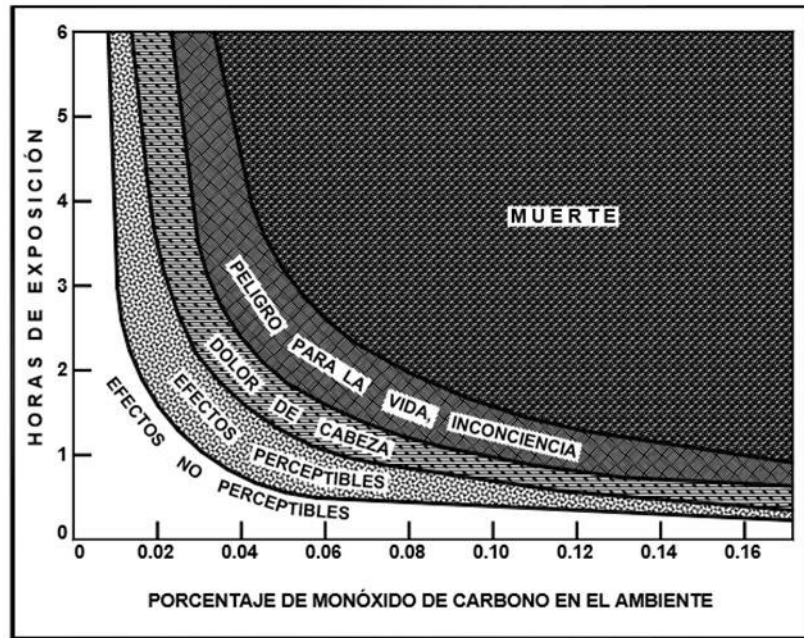


Figura 4. Efectos fisiológicos del monóxido de carbono en las personas (Hartman, H.L. Mine Ventilation and Air Conditioning 961:22).

En la Tabla 1 se muestran las propiedades de los gases, así como los efectos en la salud si estos se mantienen en la atmósfera de trabajo por un periodo considerado. Dichos gases son imposibles de generar en las actividades mineras, por lo que solo queda controlar su concentración [23].



**Tabla 1. Características de los gases en trabajos subterráneos.**

| Nombre              | Símbolo                                      | Propiedades Físicas   | Efecto Dañino    | Fuente  | Máxima Concentración Permisible (%) | Punto Fatal (%)              |
|---------------------|--|---|------------------|---|-------------------------------------|------------------------------|
| Nitrógeno           | N  | Inoloro.<br>Incoloro.<br>Insaboro.  | Asfixiante       | Ventilación natural   | 80                                  | --                           |
| Dióxido de Carbono  | CO <sub>2</sub>                              | Inoloro.<br>Incoloro.<br>Insaboro.<br>Sofocante.<br>Ligeramente con sabor ácido | Asfixiante       | Motores de CI.<br>Cualquier tipo de combustión.<br>Incendios.<br>Explosiones. | 0.5                                 | 18                           |
| Monóxido de Carbono | CO   | Inodoro.<br>Incoloro.<br>Insaboro.  | Tóxico explosivo | Explosiones.<br>Motores CI.<br>Cualquier tipo de combustión interna.          | 0.01                                | 0.03<br>(12-75)<br>Explosivo |
| Óxido de Nitrógeno  | NO <sub>2</sub><br>N <sub>2</sub> O<br>NO    | Olor irritante-dolor rojo obscuro.<br>Sabor amargo.                             | Tóxico           | Explosiones.<br>Motores CI.<br>Cualquier tipo de combustión interna.          | 0.0005                              | 0.005                        |
| Dióxido de Azufre   | SO <sub>2</sub>                              | Olor irritante.<br>Incoloro.<br>Sabor ácido.                                    | Tóxico.          | Combustión de minerales sulfurosos.<br>Motores de CI.<br>Fuego.               | 0.0005                              | 0.01                         |
| Aldehídos           | H <sub>x</sub> C <sub>y</sub> O <sub>z</sub> | Olor irritante.<br>Incoloro.<br>Sabor ácido.                                    | Tóxico.          | Motores de CI.  | 0.0005-0.001                        | ---                          |

J.J. Forbes and G. W. Grove. "Mine Gases and Methods of Detecting Them". U.S. Bur. Miners' Circ. 33 (1956). 3-18; Heating Ventilating Air Conditioning Guide (37 the end; New York: Ames. Soc. Heating Refrig. Air Cond. Engle. 1959). Pp 77-80. Federal Mine Safety Code for Coal and lignite Mines, Pt. I, "U.S. Bur. Mines (October, 1953), pp. 29-30.

## **1.6. Normatividad en ventilación para minería subterránea.**

Para llevar acabo trabajos, operaciones y servicios en minería subterranea existe una legislacion y reglamentación al respecto, la cual se ha aplicado atraves de los años en forma ordinaria por la importacia que esto conlleva en materia de seguridad. Por lo tanto, es importante resaltar la necesidad de vigilar que se cumpla con lo establecido en las Normas Oficiales Mexicanas, Reglamento y leyes que en la materia sean aplicables y se encuentren vigentes [23]. Por lo anterior, se hacen las siguientes referencias:

1. Legislación Minera.
2. Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo.
3. Norma Oficial Mexicana NOM-121-STPS-1996.
4. Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2003.
5. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional y otras medidas complementarias en minería. PERUANO (N° 055-2010-EM).
6. Norma Oficial Mexicana NOM-015-STPS-1993.

En nuestro pais se cuenta con Normas de ventilación sobre trabajos de desarrollo y producción en mina pero al comparar la normatividad existente con otros países, se debería profundizar en el tema y abarcar más aspectos que ayudaran a mejorar las condiciones de trabajo. Es por esto que también se consideraron normatividades peruanas como complemento en el tema de ventilación.

A continuación, se expresan algunas referencias normativas en trabajo de minas:

1. Ley Minera, el aspecto de ventilación y seguridad del medio ambiente de trabajo en las obras que se realizan al interior de las minas está regulada por los artículos 132 al 142 del capítulo IV, Titulo Cuarto; y Artículos 143 al 150 del Capítulo V, Titulo Cuarto [24].
2. En el Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo, en el artículo 99 y 100 establece los requerimientos a cumplir con respecto a las condiciones del medio ambiente del trabajo [25].

3. En la Norma Oficial Mexicana NOM-121-STPS-1996, en los artículos 7.4.8.1 al 7.4.8.8, 7.4.8.10 y 7.4.8.13 establecen los requerimientos de ventilación para los trabajos que se realicen en las minas, norma de la cual la Secretaria del Trabajo y Prevención Social se encarga de verificar su cumplimiento mediante inspecciones que se realizan en los centros de trabajo [26].
4. En la Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2003, en los artículos 8.4 a 8.4.4 se señalan las características que debe contener un sistema de ventilación en mina subterránea [27].
5. En Decreto Supremo Peruano N° 055-2010-EM, específicamente en el artículo 24. 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 tres (03) metros cúbicos por minuto [28]. 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 m<sup>3</sup>/min.
  - De 3,000 a 4,000 metros aumentará en 70%; será igual a 5 m<sup>3</sup>/min.
  - Sobre los 4,000 metros aumentará en 100%; será igual a 6 m<sup>3</sup>/min.
6. En la Norma Oficial Mexicana NOM-015-STPS-1993, específicamente en la fracción 7.3 en los artículos 7.3.1 al 7.3.8 nos menciona que la temperatura máxima que debe tener el área de trabajo debe estar entre los 10°C y los 37 °C. y el porcentaje de humedad debe ser de 20% al 90% esto para la seguridad de los trabajadores y no poner en riesgo sus vidas [29].

## **1.7. Criterios para la definición de caudal.**

La cantidad necesaria de aire en un área de trabajo es fundamental para generar condiciones ambientales adecuadas para los colaboradores que establece la normatividad, lo que conlleva a tener un buen diseño de ventilación. Para el cálculo del caudal se debe considerar la cantidad de aire requerido por personal, maquinaria de combustión diésel y el consumo de explosivos, esto dará la cantidad de aire total necesario para que la mina esta ventilada, dicho cálculo deberá estar apegado a lo establecido en las normas ya mencionadas [30].

### 1.7.1. Caudal requerido por el número de personal.

El caudal de aire necesario para personal que labora en interior mina se calcula mediante la Ecuación 1:

$$Q_1 = K \times N \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

- $Q$  = Caudal total para número de personas que trabajen en mina ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $K$  = Caudal mínimo por persona.
- $N$  = Número de personas en el lugar.

### 1.7.2. Caudal requerido por equipos diésel.

Para el uso de equipo diésel, la cantidad de aire circulante no será menor de  $3\text{m}^3/\text{min}$  por cada HP que desarrollen los equipos. Para el cálculo del caudal de equipos diésel se calcula mediante la Ecuación 2:

$$Q_2 = K \times R \quad \text{Ec. (2)}$$

Dónde:

- $Q$  = Caudal total para número de equipos diésel que trabajen en mina ( $\text{m}^3/\text{min}$ ).
- $K$  = Caudal mínimo por maquinaria.
- $R$  = HP total de la maquinaria utilizada.

El caudal total requerido se calcula mediante la sumatoria de la cantidad de caudal requerido por el número de personal y el número de maquinaria de combustión diésel que trabaja en interior mina (ver Ecuación 3).

$$Q_t = Q_1 + Q_2 \quad \text{Ec. (3)}$$

### 1.7.3. Caudal generado por la ventilación.

El caudal final requerido obtenido mediante la aplicación de la Ecuación 4 es el que deberá tener la salida de la tubería para poder ventilar el área de interés (tope de mina) y así mantener el circuito de ventilación.

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

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.

Al implementar una ventilación secundaria se debe tomar en cuenta el cálculo de la perdida carga la cual se calcula mediante los siguientes parámetros.

### 1.7.4. Perdida de carga de la instalación.

Las pérdidas de carga de un circuito de ventilación auxiliar (secundaria) pueden dividirse en pérdidas por fricción, pérdidas singulares y pérdidas por presión dinámica. Se debe calcular cada una de estas pérdidas y determinar la pérdida total a lo largo de la tubería.

#### 1.7.4.1. Perdida 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 5 (e J. Atkinson, denominada "Ley de Atkinson").

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

Dónde:

- $P$  = 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 (m<sup>2</sup>).

Para poder determinar la pérdida de presión por fricción en la tubería, se debe conocer el valor de cada uno de los factores que intervienen en la Ecuación 5. Se debe tomar 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 (ver Ecuación 6).

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

El perímetro, así como el área de la tubería se calculan mediante la aplicación de las Ec. 7 y 8

$$C = (\pi)(d) \quad \text{Ec. (7)}$$

$$A = (\pi)(r)^2 \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

- $A$  = Área de la tubería (m<sup>2</sup>).
- $r$  = radio de la tubería (m).
- $C$  = Perímetro de la tubería (m).
- $d$  = Diámetro de la tubería (m).

Para determinar la pérdida de presión total por la fricción que se tiene en una tubería (ventilación secundaria) se debe considerar un porcentaje adicional de esta presión (calculada mediante la ecuación 5) tanto en la entrada como en la salida del ventilador, dichas presiones se calculan mediante las Ecuaciones 9 y 10.

#### **Perdidas por fricción en la entrada.**

$$P_e = (\%considerado\ entrada)(P) \quad \text{Ec. (9)}$$

#### **Perdidas por fricción en la salida.**

$$P_e = (\%considerado\ salida)(P) \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

- P = Presión por fricción.

#### **1.7.4.2. Pérdida por fricción total.**

$$P_t = P + P_e + P_s \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:

- P = Presión por fricción.
- P<sub>e</sub> = Pérdida de fricción en la entrada de la tubería.
- P<sub>s</sub> = Pérdida de fricción en la salida de la tubería.

### 1.7.4.3. 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, mediante la Ecuación 12.

$$\Delta P_{sin} = \zeta \left( \frac{\rho \times U^2}{2} \right) \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde:

- $\Delta P_{sin}$  = La pérdida de carga del aire (Pa).
- $\zeta$  = El coeficiente de pérdida del elemento, obtenido experimentalmente.
- $P$  = La densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).
- $U$  = 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. [13,30].

### 1.7.4.4. Pérdida por presión dinámica.

Antes de calcular la pérdida de presión dinámica, se debe calcular la velocidad promedio dentro del requerimiento de aire, aplicando la Ecuación 13.

$$U = \frac{4 \times Q}{\pi (d)^2} \quad \text{Ec. (13)}$$

Dónde:

- $Q$  = Caudal promedio requerido.
- $P$  = Diámetro de la tubería.

Al final del circuito, usualmente a la salida de la tubería (sistema soplante) o la salida del ventilador (sistema aspirante) se debe tener en cuenta la presión dinámica con la que el aire sale considerándola como una pérdida más. Dicha pérdida se calcula con la Ecuación 14.



$$\Delta P_{din} = \left( \frac{\rho \times U^2}{2} \right) \quad \text{Ec. (14)}$$

Dónde:

- $\Delta P_{din}$  = La pérdida de carga del aire (Pa).
- $\rho$  = La densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).
- $U$  = La velocidad del aire en el conducto (m/s).

La pérdida de presión total del sistema de ventilación se calcula mediante la sumatoria de las dos presiones (singular y dinámica) mediante la Ecuación 15.

$$P_t = \Delta P_{sin} + \Delta P_{din} \quad \text{Ec. (15)}$$

## **1.8. Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD).**

El CFD por sus siglas en inglés Computational Fluid Dynamics, es un tipo de análisis computacional para la simulación del movimiento de los fluidos y en ocasiones, de otros fenómenos asociados: transferencia de calor, reacciones químicas, arrastre de sólidos, etc. Este método está siendo usado por varios profesionales de la ingeniería para resolver problemas prácticos y teóricos en la investigación de fenómenos aún no entendidos completamente [31]. La dinámica de fluidos computacional es una rama de la aerodinámica que usa métodos y algoritmos numéricos para resolver problemas que involucran fluidos turbulentos. Esta disciplina ha adquirido mucha importancia entre los métodos de ingeniería actuales gracias a los softwares, los cuales desde la última década han sido esenciales para la resolución de problemas ejecutando los cálculos requeridos y simulando la interacción de los líquidos y gases con superficies definidas por las condiciones de aborde de cada problema, entre los programas comerciales que implementan CFD se encuentran ABACUS®, ANSYS® y ALGOR, etc. [32].

## **1.9. Programa FLUENT ANSYS.**

Es un programa informático de vanguardia para modelar el flujo de fluidos y la transferencia de calor en geometrías complejas FLUENT proporciona una flexibilidad de malla completa, que incluye capacidad para resolver sus problemas de flujo utilizando mallas no estructuradas que se pueden generar sobre geometrías complejas con relativa facilidad. Es ideal para simulaciones de flujo de fluido compresible e incompresible en geometrías complejas, el cual permite calcular soluciones para casos con mallas muy grandes en múltiples procesadores, ya sea en la misma computadora o en diferentes computadoras en una red. El Software Fluent Inc. ofrece otros solucionadores que abordan diferentes flujos regímenes e incorporar modelos físicos alternativos [33].

### **1.9.1. Modelo Físico.**

Los modelos usados para describir varios procesos físicos en la simulación de la combustión del metano y la absorción del dióxido de carbonos son modelos de turbulencia ( $k - \varepsilon$  estándar, etc.). Estos modelos en conjunción con las ecuaciones de gobierno, complementan el requerimiento matemático necesario para simular el fenómeno de combustión (motores de combustión incompleta) así como las condiciones en las que se labora día a día en minas subterráneas [34].

### **1.9.2. Modelo de turbulencia.**

La turbulencia es el estado del movimiento del fluido en el cual se caracteriza por tener una vorticidad aparentemente caótica y al azar, cuando la turbulencia se presenta en los fluidos domina a los demás fenómenos presentes, dando como resultado un incremento en la energía de disipación, mezclado y transferencia de calor [35].

Los flujos turbulentos se caracterizan por la fluctuación en los campos de velocidades que mezclan cantidades de transporte como son; momento, energía y concentración de especies. Estas fluctuaciones pueden ser de pequeña escala y alta frecuencia las cuales son bastante

costosas para simular directamente con cálculos de ingeniería. En cambio, las ecuaciones determinantes instantáneas pueden ser promediadas con el tiempo o manipuladas de alguna manera para quitar las pequeñas fluctuaciones de una escala menor dándonos como resultado un conjunto modificado de ecuaciones que son menos costosas para resolverse computacionalmente, estas ecuaciones modificadas contienen variables desconocidas adicionales y es necesario el uso de modelos de turbulencia para determinar estas variables en términos de cantidades conocidas.

Los modelos de turbulencia se pueden clasificar en:

- Modelos algebraicos
- Modelos de transporte de viscosidad de remolino y modelos de una o dos ecuaciones.
- Modelos de viscosidad de remolino no lineales y modelos de esfuerzo algebraicos.
- Modelos de transporte de esfuerzos de Reynolds.
- Modelos híbridos.
- Simulaciones de grandes remolinos.
- Simulaciones numéricas directas.

Especialmente para nuestros fenómenos que se están analizando, se ha encontrado que el mejor modelo para realizar la simulación, tomando en cuenta como resultados y tiempo de cómputo es el modelo estándar, a continuación, se describirá este modelo. De los diferentes modelos de turbulencia, el modelo  $k-\epsilon$  es un modelo semi-empírico de dos ecuaciones donde estas se derivaron de consideraciones fenomenológicas y empirismo. Este modelo fue propuesto por Launder y Spalding basado en el modelo de las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la razón de disipación ( $\epsilon$ ) [36, 37,38].

### 1.9.2.1. Modelo Épsilon- Estándar.

Los modelos más completos y simples para flujos turbulentos son los modelos de dos ecuaciones, en los cuales la solución de dos ecuaciones de transporte separadas permite determinar la velocidad turbulenta y la longitud de escala en forma independiente. El modelo  $k - \varepsilon$  estándar está dentro de esta clase de modelos de turbulencia y es una de las principales herramientas en el cálculo de flujos para ingeniería, es muy útil para simulación de flujos y transporte de calor esto se debe a su robustez, economía, exactitud razonable para un gran rango de flujos turbulentos.

El modelo  $k - \varepsilon$  estándar es un modelo semi-empírico basado en la solución de las ecuaciones de transporte para la energía cinética  $k$  y la disipación cinética  $\varepsilon$ . La ecuación de transporte  $k$  esta derivada de una ecuación exacta, mientras que para  $\varepsilon$  fue obtenida usando un razonamiento físico y sostiene un pequeño parecido a su contraparte matemática exacta. El uso del modelo  $k - \varepsilon$  considera que el flujo es totalmente turbulento y por lo tanto los efectos de viscosidad molecular son despreciables [36 ,39].

La energía cinética turbulenta  $k$  y su razón de disipación  $\varepsilon$ , se obtienen de las Ecuaciones de transporte 16 y 17 respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad \text{Ec. (16)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{3\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad \text{Ec. (17)}$$

En estas ecuaciones,  $G_k$  representa la generación de turbulencia cinética debido a los gradientes de velocidad promedio,  $G_b$  es la generación de energía cinética turbulenta debido a las fuerzas boyantes,  $Y_M$  representa la contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible a la velocidad de disipación Global,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  y  $C_{3\varepsilon}$  son constantes,  $\sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  son los números de Prandtl turbulentos para  $k$  y  $\varepsilon$  respectivamente,  $S_k$  y  $S_\varepsilon$  son términos fuente.

### 1.9.2.2. Modelo Transition k-kl-omega.

El modelo k-kl-omega se considera un tipo de viscosidad Eddy de tres ecuaciones, que incluye ecuaciones de transporte para energía cinética turbulenta ( $k_T$ ), energía cinética laminar ( $k_L$ ), y la escala de tiempo inversa turbulenta ( $\omega$ ) [40]. Este método se usa principalmente para problemas en los que el fluido pasa de régimen laminar a turbulento en algún punto dentro del volumen de control [41]. Este método genera las soluciones mediante las Ecuaciones 18 Y 19.

$$\frac{Dk_T}{Dt} = Pk_T + R + R_{NAT} - \omega k_T - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\alpha_T}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right] \quad \text{Ec. (18)}$$

$$\frac{Dk_L}{Dt} = Pk_L + R + R_{NAT} - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( v \frac{\partial k_L}{\partial x_j} \right) \quad \text{Ec. (19)}$$

### 1.9.2.3. Modelo Reynolds Stress (RSM).

Los modelos de turbulencia de dos ecuaciones muestran el comportamiento de las características físicas de la mayoría de los flujos de relevancia industrial (flujos turbulentos). En los flujos en los que el transporte turbulento o los efectos de no equilibrio son importantes, la suposición de viscosidad de remolino (no es válida) y los resultados de los modelos de viscosidad de remolino pueden ser inexactos. Los modelos de estrés de Reynolds incluyen naturalmente los efectos de la curvatura aerodinámica, los cambios repentinos en la velocidad de deformación, los flujos secundarios o la flotabilidad en comparación con los modelos de turbulencia que utilizan la aproximación de viscosidad de remolino. El modelo de estrés de

Reynolds se puede utilizar para resolver problemáticas relacionados con los siguientes tipos de flujo [42]:

- Flujos con cambios repentinos en la tasa de deformación media.
- Flujos donde los campos de deformación son complejos y reproducen la naturaleza anisotrópica (presenta diferentes características según la dirección) de la turbulencia en sí misma.
- Fluye con una fuerte curvatura aerodinámica.
- Flujo secundario.
- Flujo flotante.

Los modelos de estrés de Reynolds han demostrado un rendimiento superior en comparación con los modelos de viscosidad. Estos modelos se caracterizan por un mayor grado de universalidad (es un alto grado de complejidad en el sistema matemático resultante). El mayor número de ecuaciones de transporte conduce a una robustez numérica reducida, por lo que requiere un mayor esfuerzo de cálculo. Teóricamente, los modelos de estrés de Reynolds son más adecuados para flujos complejos, sin embargo, la práctica muestra que a menudo no son superiores a los modelos de dos ecuaciones. En el modelo de estrés de Reynolds intervienen tres variables, las cuales utilizan constantes diferentes según sea el caso:

- Modelo de estrés Reynolds (LRR-IP).
- Modelo de estrés de QI Reynolds (LRR-IQ).
- Modelo de estrés SSG Reynolds (SSG).

En general, el modelo SSG es más preciso que las versiones LRR para la mayoría de los flujos. Esto es particularmente cierto para los flujos turbulentos. Por lo tanto, el modelo SSG se recomienda sobre los otros modelos, que están ahí por razones históricas y porque son modelos estándar. En principio, se puede usar el mismo intervalo de tiempo para todas las variantes de modelos de turbulencia, pero pragmáticamente se debe reducir el paso de tiempo para el modelo de estrés de Reynolds debido a la mayor complejidad de sus ecuaciones y

debido a aproximaciones numéricas hechas en interfaces de cuadrícula general (GGI) y las condiciones de frontera periódicas. Si la convergencia es difícil, se recomienda que primero se obtenga una solución de modelo basada o base y luego se puede intentar una solución de modelo de estrés de Reynolds a partir de la solución de dos ecuaciones convergentes [43].

### **1.10. Simulación en ventilación de minas subterráneas.**

Las simulaciones mediante la dinámica de fluido computacionales (CFD) en el tema de ventilación en mina subterránea son muy pocos. Ya que son muy pocas las personas que conocen de simulación, así como de la minería subterránea. Las investigaciones que se han realizado sobre la ventilación con CFD tratan de temperatura y tiempo y como esto afecta en interior mina, así como la disminución de las partículas de polvo ocasionadas por la maquinaria que se utiliza.

Aun no existen simulaciones en las que involucren la complejidad en el ambiente de trabajo que se ve diariamente en las galerías y topes de desarrollo en mina subterránea como lo es las condiciones termo ambientales y el comportamiento de los gases producidos por el equipo de combustión diésel mediante el software. Con los que se puede simular dichas condiciones y proponer el mejor método de ventilación (secundaria) para que los gases tóxicos sean desplazados y al mismo tiempo controlar las temperaturas a las que se está trabajando [44-45]. Algunos de los estudios realizados se muestran a continuación:

#### **1.10.1. Ventilación auxiliar en carreteras que conducen al área de trabajo modelado el comportamiento del polvo mediante CFD.**

Este artículo presenta un estudio del comportamiento del polvo en dos sistemas de ventilación auxiliar mediante modelos de dinámica de fluidos computacional, teniendo en cuenta la influencia del tiempo. La precisión de estos modelos de CFD se evaluó por la velocidad del flujo de aire y las mediciones de concentración de polvo respirable tomadas en seis puntos de seis secciones transversales de la carretera de la mencionada mina de carbón operativa.

Se concluye que estos modelos predijeron el flujo de aire y el comportamiento del polvo en la cara de trabajo, donde se encuentra la fuente de polvo, y en diferentes caminos cruzados

detrás de la cara de trabajo. Como resultado, los modelos CFD permiten la optimización de los sistemas de ventilación auxiliares, evitando las deficiencias importantes cuando se calcula mediante métodos convencionales [46].

### **1.10.2. Modelos de comportamiento del metano en la ventilación auxiliar de la minería de carbón subterránea.**

Se realizaron estudios en una carretera excavada en un lecho de carbón de una mina subterránea ubicada en el norte de España (Hullera Vasco Leonesa SA), tanto por la velocidad del flujo de aire como por las mediciones de la concentración de metano. Se presenta un modelo de la ventilación y el comportamiento del metano de esa carretera mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) a través del software Ansys CFX 10.0. Se encontró una buena correlación entre los datos experimentales y los resultados predichos por CFD. Luego se realizó una comparación del resultado obtenido por métodos convencionales con los resultados obtenidos por modelado CFD 4D para la ventilación auxiliar en un camino sin salida.

Aunque los métodos convencionales dan resultados satisfactorios cuando se considera la dilución de metano, esta investigación demuestra que puede haber algunas zonas de camino en las que la concentración de metano es más alta que los valores de regulación. Esto se debe al flujo de aire y al comportamiento del metano en la calle principal con la presencia de zonas muertas, y el hecho de que solo una parte del flujo de aire proporcionado por el ventilador alcanza la superficie de trabajo. El modelado CDF nos permite saber en qué zonas de la carretera puede ser necesario reforzar la ventilación forzada mediante sistemas adicionales, como sistemas de forzado con superposición de axones, ventiladores de chorro, sistemas de ventilador de pulverización o inyectores de aire comprimido [47].

### **1.10.3. Estudio y aplicación del sistema de simulación y optimización para la red de ventilación de la mina.**

Teniendo en cuenta la escasez de software de optimización para el sistema de ventilación minera, como función insuficiente, propiedad universal deficiente, entrada de datos maliciosos y mala visualización, etc., se programó un software de simulación y optimización



multiuso para el sistema de ventilación minera de minas subterráneas. Basado en la base de datos y el software de dibujo 3D, SolidWorks ha solucionado muchos problemas, como la gestión de la información de la ventilación minera, los parámetros automáticos de la red de trazado, etc. [48].

# Capítulo II

## Metodología

En el presente capítulo se presenta la metodología que se llevó a cabo para realizar el análisis de simulación en CFD de ventilación y la extracción de gases nocivos mediante un extractor, y el quemador que alimenta de aire contaminado con monóxido y dióxido de carbono el interior de la mina subterránea con dimensiones de 7m x 7m y una longitud de 150m esto para poder controlar el diseño, así como los diferentes factores que intervienen en el circuito de ventilación (temperatura, presión, velocidad etc.) Aplicando tres modelos de solución para simular y el movimiento de las fases de contaminación mediante el uso de Software como MixSim, GAMBIT, FLUENT.

Previo al desarrollo de la simulación se observa y analiza el cálculo de requerimientos de aire y el tipo de extractor para la extracción del aire viciado, de la mina subterránea, así como los cálculos a través de los cuales se obtuvieron los requerimientos necesarios para llevar a cabo la simulación. El esquema de trabajo que se utilizó para el análisis de la simulación como se muestra en la Figura 5. El cual se desarrollara posteriormente explicando cada una de las partes que lo conforman.

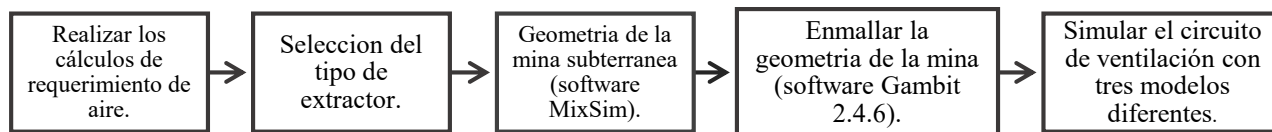


Figura 5. Esquema de trabajo.

### 2.1 Requerimiento de aire necesario para la ventilación.

En el diseño de un sistema de ventilación es necesario evaluar el requerimiento de aire necesario para una zona de trabajo, específicamente en minas subterráneas generando un circuito de aire fresco en el cual se debe considerar la cantidad de personal que labora en interior mina, la cantidad de equipos diésel, así como un factor de seguridad, etc. Para lo cual se debe dar prioridad en las zonas donde la ventilación es muy escasa como lo es en los topes de mina.

### 2.1.1 Requerimiento de aire por personal en interior mina.

Basándonos en lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-121-STPS-1996, la cual establece que el requerimiento de ventilación para el personal que labora en interior mina es de 1.5 m<sup>3</sup>/min. Para determinar el caudal necesario se consideró una cantidad total de 8 personas laborando en interior mina.

$$Q_1 = (1.5 \text{ m}^3/\text{min})(8)$$

$$Q_1 = 12 \text{ m}^3/\text{min} = 423.7 \text{ ft}^3/\text{min}$$

### 2.1.2 Requerimiento de aire por equipos diésel de combustión interna.

Para calcular el requerimiento de aire fresco necesario para el equipo diésel se debe tomar en cuenta la potencia y capacidad de cada uno de los equipos que están en funcionamiento (rezagado y acarreo del mineral).

Para el Scoop:

- Potencia 278.94HP
- Capacidad 12m<sup>3</sup>

Para el Camión:

- Camión de bajo perfil.
- Potencia 409.01HP

El total de HP por equipo de combustión diésel es de:

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

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

Utilizando la Ecuación 2 para el calcular el requerimiento de aire fresco en base a los  $HP_t$  para el equipo de combustión interna tenemos:

$$Q_2 = K \times R \quad \text{Ec. (2)}$$

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

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

Se realiza el ajuste en base a la normatividad peruana, la cual establece las siguientes 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 m<sup>3</sup>/min.
- De 3,000 a 4,000 metros aumentará en 70%; será igual a 5 m<sup>3</sup>/min.
- Sobre los 4,000 metros aumentará en 100%; será igual a 6 m<sup>3</sup>/min.

La mina subterránea que se está analizando se encuentra localizada en el estado de Guanajuato, la cual cuenta con una altitud de 2012 m.s.n.m. Debido a la altura en la que esta se encuentra se tiene que realizar el ajuste de altitud mediante la escala antes mencionada, por lo que se aumentara el 40% al requerimiento de aire para el personal (calculado); la cantidad de aire necesario es de **16 m<sup>3</sup>/min.**

### 2.1.3 Requerimiento de aire Final:

Para calcular el caudal final requerido solo se realiza la sumatoria del caudal por el número de personal que labora en interior mina, así como de la cantidad de equipos de combustión diésel, mediante la ecuación 3.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 \quad \text{Ec. (3)}$$

$$Q_t = 16.8 \text{ m}^3/\text{min} + 1465 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_t = 1482.13 \text{ m}^3/\text{min} = 24 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 2.1.4 Requerimiento de aire generado por el Ventilador Axial.

Para calcular la cantidad de caudal generado por el ventilador axial se debe estimar la longitud equivalente de la mina considerando las diferentes formas que presenta la obra minera de desarrollo (analizada), de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2. Consideraciones para el cálculo de la 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               |

Quevedo. C. Manuel (2013). Máxima presión de trabajo de la ductería a utiliza. [Tabla 4.3]. Sistema de ventilación de diez kilómetros del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Huanza.

Los metros que se adicionarán a la longitud real se determinan mediante las formas que presenta la obra de desarrollo de la mina subterránea, las cuales son: ángulo recto quebrado, marco para puerta y una entrada de la mina dando un valor de 223ft, dándonos como resultado una longitud equivalente (utilizando la información de la tabla 2).

$$L_{eq} = L_{real} + L_{formas\ presentes\ en\ la\ mina\ y\ tuneria}$$

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

Para la ventilación se utilizará una tubería flexible que presenta las siguientes características:

- Tubería de poliéster reversible con PVC (100% sellada).
- Con un diámetro de 1m.
- Factor de seguridad de 5 (Tabla 3).

Las características de la tubería a utilizar 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 3. Presión máxima de trabajo para ductos de ventilación.

| <u>Material</u>                              | <u>Máxima presión de trabajo permitido para ductos nuevos</u> |   |
|--|---|---|
|  | <u>Presión de Ruptura ( Burst Press )</u>                     | <u>Factor de seguridad 5 x SF ( Security Factor )</u> |
| Peso 600 g/m <sup>2</sup><br>Espesor 0.75 mm | 167.44" de c.a.<br>41,709.00 Pa<br>4,251.68 mm de c.a.        | 33.48" de c.a.<br>8,341.00 Pa<br>850.25 mm de c.a.    |

La información antes mencionada se remplazará en la ecuación 4 para obtener el requerimiento de aire fresco (al final de la tubería) el cual ventilará la mina.

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

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

$$Q_f = 25.2 \text{ m}^3/\text{s} = 53480.53 \text{ ft}^3/\text{min}$$

## 2.1.5 Pérdidas de carga en 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.

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

Para calcular la pérdida de presión por fricción se deben cambiar las unidades al sistema inglés, es decir: P (pulgadas c.a), C (ft), L (ft), Q (ft<sup>3</sup>), A (ft<sup>2</sup>). El factor de fricción (K) de la tubería es proporcionado por el fabricante 2x10<sup>-9</sup>.

1. Para Q se debe tomar el promedio del caudal requerido por el número de personal y el equipo de combustión diésel (Q<sub>t</sub>), así como del caudal final que saldrá por la tubería (Q<sub>f</sub>) utilizada para la ventilación de la mina.

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

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

$$Q_{Pro} = 24.97 \text{ m}^3/s = 52908.44 \text{ ft}^3/min$$

2. Se debe calcular el perímetro de la tubería (C) a utilizar para la ventilación de la mina, empleando la ecuación 7.

$$C = (\pi)(d) \quad \text{Ec. (7)}$$

$$C = (\pi)(1m)$$

$$C = 3.1416m = 10.307ft.$$

3. Para “L” se utiliza la longitud equivalente de la mina, ya antes calculada, cambiando las unidades el sistema ingles tenemos.

$$L = 217.97m = 715.125ft$$

4. Se debe calcular el área de la tubería en base a su figura geométrica (cilindro).

$$A = (\pi)(r)^2 \quad \text{Ec. (8)}$$

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

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

Al tener calculadas todas las variables que intervienen en la fórmula para estimar la pérdida de presión por fricción, sustituimos en la ecuación 5.



$$P = \frac{(2 \times 10^{-9})(10.307 \text{ m})(715.125 \text{ ft})(52908.44 \text{ ft}^3/\text{min})^2}{(8.45 \text{ ft}^2)^3}$$

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

**c.a:** 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 debe considerar un porcentaje de pérdida de presión en la entrada y salida del ventilador.

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

$$P_e = (\% \text{considerado entrada})(P) \quad \text{Ec. (9)}$$

$$P_e = (0.005)(68.39 \text{ c. a})$$

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

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

$$P_s = (\% \text{considerado salida})(P) \quad \text{Ec. (10)}$$

$$P_s = (0.00277)(68.39 \text{ c. a})$$

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

La pérdida de presión por fricción total está dada por la ecuación 11:

$$P_t = P + P_e + P_s \quad \text{Ec. (11)}$$

$$P_t = 68.39 \text{ c.a} + 3.76 \text{ c.a} + 1.99 \text{ c. a}$$

$$P_t = 74.14 \text{ c. a}$$

### 2.1.5.2 Pérdidas por presión dinámica.

Para determinar la pérdida de presión dinámica, se deben considerar todas las variantes que intervienen en la formula, por lo que se debe calcular la velocidad promedio del requerimiento de aire en la tubería aplicando la ecuación de continuidad  $U = Vx A$ , tenemos:

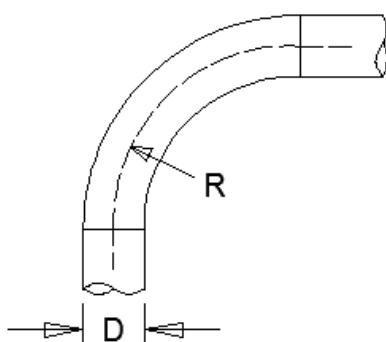
$$U = \frac{4 \times Q}{\pi (d)^2} \quad (13).$$

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

$$U = 31.79 \text{ m}^3/\text{s} = 104.29 \text{ ft}^3/\text{s}$$

Se utilizó la tabla 4 para determinar el coeficiente de la pérdida del elemento en tuberías en forma de conos. Donde  $R/D = 1.25$  y la pérdida  $\zeta = 0.55$  (datos obtenidos de la Tabla 4).

Tabla 4. Coeficiente de pérdidas en tuberías de codos.



| <i>R/D</i> | <i>Coficiente de pérdida de carga</i> |
|------------|---------------------------------------|
| 2.75       | 0.26                                  |
| 2.5        | 0.22                                  |
| 2.25       | 0.26                                  |
| 2.00       | 0.27                                  |
| 1.75       | 0.32                                  |
| 1.5        | 0.39                                  |
| 1.25       | 0.55                                  |

Quevedo. C. Manuel (2013). Coeficiente de pérdidas en codos. [Tabla 4.4]. Sistema de ventilación de diez kilómetros del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Huanza.

Sustituyendo los datos en la Ecuación 14, tenemos:

$$\Delta P_{din} = \left( \frac{\rho \times U^2}{2 \times g} \right) \quad \text{Ec. (14)}$$

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

$$\Delta P_{din} = 1.98" \text{ c. a}$$

### 2.1.5.3 Perdidas Singulares.

Para calcular las perdidas singulares solo se multiplica el coeficiente de pérdida del elemento determinado en base a la Tabla 4 por la pérdida de presión por fricción.

$$\Delta P_{sin} = (\zeta)(P_s)$$

$$\Delta P_{sin} = (0.55)(1.98" \text{ c. a})$$

$$\Delta P_{sin} = 1.089" \text{ c. a}$$

Teniendo calculadas cada una de las pérdidas de presión que intervienen en la tubería, se puede determinar la pérdida de presión total del sistema mediante:

$$P_t = P_f + \Delta P_{din} \quad \text{Ec. (15)}$$

$$P_t = 74.14" \text{ c. a} + 1.98" \text{ c. a}$$

$$P_t = 76.12" \text{ c. a}$$

Al analizar los cálculos obtenidos se estima que:

- El caudal final es de 53480.53 ft<sup>3</sup>/min.
- Una presión total de sistema de 76.12" 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.

$$P_r = \frac{76.12 \text{ c. a}}{3} = 25.37 \text{ c. a}$$

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

## 2.2. Selección del extractor.

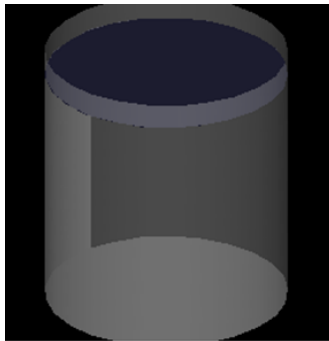
El extractor propuesto para el sistema de ventilación es un Aéreo extractor- Inyector de tubo axial ATC con hélice de aluminio inyectado y/o polipropileno reforzado con fibra de vidrio de 7 alabes en ángulo de 45°, las especificaciones técnicas se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5. Especificaciones técnicas del extractor.**

| Modelo         | Caudal |       | Amperaje |       | Potencia (PH) | RPM  | Peso Aprox. |    |
|----------------|--------|-------|----------|-------|---------------|------|-------------|----|
|                | CFM    | m3/hr | 220 V    | 440 V |               |      | Lb          | Kg |
| XDP/A'6-24/45° | 9200   | 15631 | 6.2      | 3.1   | 2             | 1160 | 92          | 42 |

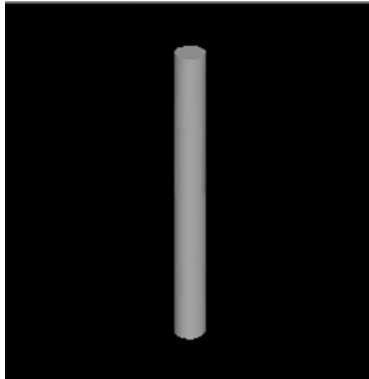
Teniendo el modelo del extractor se procedió a construir la geometría de los elementos a trabajar mediante el uso del software MixSim 2.1.10. Los pasos que se llevaron a cabo son:

1. Se genera un tanque cilíndrico, el cual tendrá la función de recubrimiento del extractor propuesto. Las dimensiones y características establecidas para la geometría del cilindro son: 1m de diámetro, altura de 1.1m, el fondo plano y la parte superior abierta, ver la Figura 6.



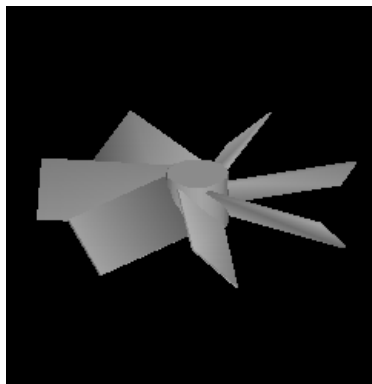
**Figura 6. Recubrimiento del extractor.**

2. Se procede a dibujar el soporte de las aspas del extractor (eje). Geométricamente se trata de un cilindro con un diámetro menor al anterior (0.08m) con una altura de 0.9m, dicho cilindro se encuentra ubicado en el centro del recubrimiento del extractor (Figura 7).



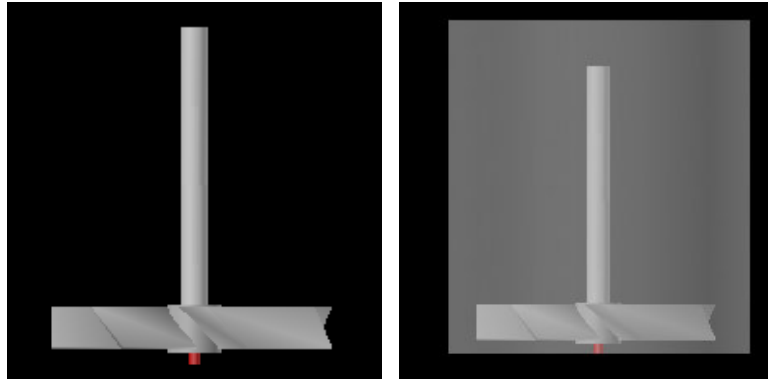
**Figura 7. Eje de las aspas del extractor.**

3. Posterior al dibujo del eje del extractor se continua con la construcción geométrica de las aspas (7 alabes con un ángulo de 45°) localizadas a 0.1m de la parte inferior del eje ver figura 8.



**Figura 8. Aspas del extractor con un ángulo de 45°.**

4. La geometría generada en el software MixSim contiene las características del modelo del extractor propuesto para la ventilación de la mina subterránea, las cuales se muestran en la figura 9.



**Figura 9. Diseño del extractor propuesto.**

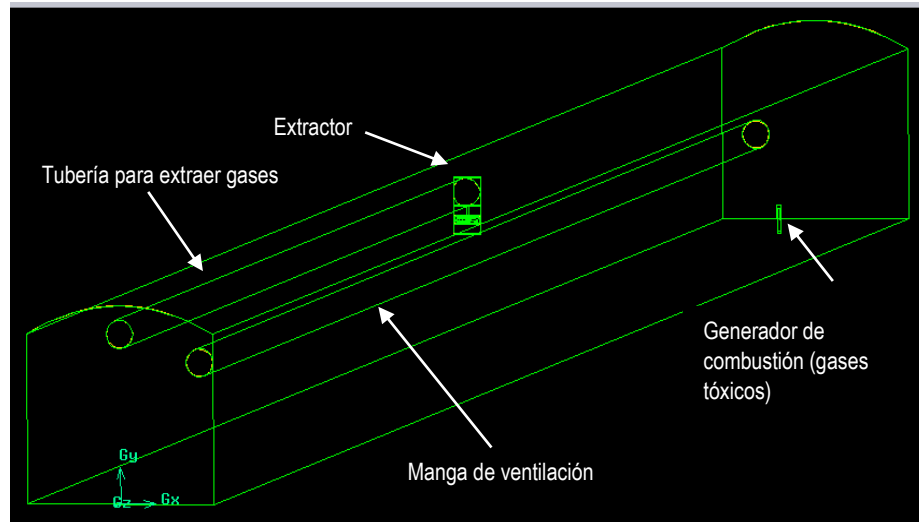
5. Como último paso para el diseño del extractor se realiza el mallado de su geometría en el software Gambit 2.4.6 de Inc. A través de la malla se solucionarán las ecuaciones que se generarán en la extracción de los gases tóxicos (simulación).

### **2.3. Geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea.**

Para la elaboración geométrica de la mina subterránea, así como de la tubería para el circuito de ventilación (suministro de aire fresco y extracción de aire viciado) se utilizó un método geométrico, por medio del software GAMBIT el cual crea volúmenes usando sólidos como se muestra en la Figura 10. Para la geometría de la mina subterránea se establecieron las siguientes dimensiones: 7m x 7m con una longitud de 150m. La estructura interna de la mina está conformada por una serie de tuberías que simulan las condiciones de ventilación y contaminación generada por los equipos de combustión interna, la cual se describe a continuación:

- Manga de ventilación: Tubería concéntrica con un radio de 0.5m y una longitud de 120m. Dicha tubería se colocó en la parte superior derecha a una altura de 5m.
- Tubería de extracción: Tubería con un diámetro de 1m, una longitud de 75m, ubicada a una altura de 6m en el centro de la obra minera.
- Generador de Combustión diésel: Conformado por un tubo concéntrico con un diámetro de 0.08m con una altura de 1m, ubicado a 5m del tope de mina. Es un

inyector que simula la combustión incompleta generada por los equipos diésel (gases tóxicos). La combustión es constante, ya que los quipos de combustión diésel, ScoopTram está en constante movimiento (hasta el término de la tarea asignada).



**Figura 10.** Estructura interna de la obra de desarrollo de la mina subterránea de 7x7m con una longitud de 150m. Tubería para la extracción de gases tóxicos (entrada de la obra de desarrollo a 6m del piso), manga de ventilación (20m del tope de mina), extractor (75m).

## 2.4. Mallado de la geometría de la obra de desarrollo de la mina subterránea.

Al tener la geometría completa se realizó el mallado de cada una de las estructuras (se utilizó el mismo Software). Para el volumen de la mina subterránea se utilizó un tipo de celda Hexaédrica con fisuras de 0.05m debido a sus características geométricas, en el caso de la tubería el mallado fue construido con celdas del tipo tetraédrico con una abertura de 0.03m (para que los espacios entre la cuadrícula sea considerablemente menor), esto con la finalidad de tener una mejor resolución en cada uno de los métodos utilizados para la simulación (en las ecuaciones generadas por el comportamiento de los fluidos que conforman el circuito de ventilación). En el mallado final de la geometría de la mina se generaron 250000 celdas (ver figura 11).

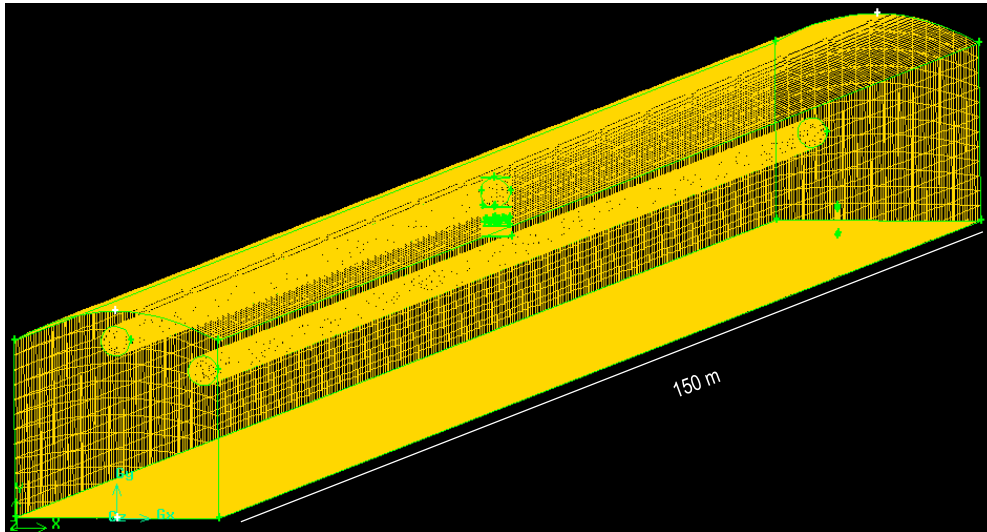


Figura 11. Geometría de la mina subterránea con enmallado.

## 2.5. Simulación de ventilación en la obra de desarrollo de mina Subterránea.

La ventilación mecánica en minas subterráneas representa sin duda uno de los métodos más efectivos para generar las condiciones adecuadas de trabajo (ambiente seguro y confiable) en el que los trabajadores pueden realizar sus actividades sin poner en peligro la salud de cada uno de estos.

La ventilación debe cumplir con ciertos requerimientos de aire y presión para satisfacer las necesidades que se presenten en cierta área (obras en desarrollo). Por lo que es importante simular la combustión de los equipos diésel los cuales generan los gases nocivos, así como la ventilación y extracción de los mismos. Para la simulación se utilizó la siguiente metodología:

Se establecen las condiciones de frontera en los límites de la zona de estudio (geometría de la mina), así como a la tubería y al extractor que se utilizara. A cada una de las zonas se aplicaron las condiciones de frontera presentadas en la Tabla 6.



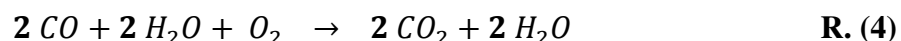
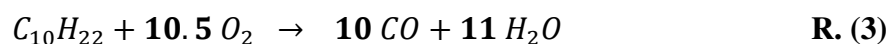
**Tabla 6. Condiciones de frontera para el análisis de la mina propuesto.**

| <b>Condición de frontera</b>        | <b>Tipo de condición</b> | <b>Valores de condición</b> |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Interior Predeterminado             | Interior                 | Interior                    |
| Iluminación_200_5_Interior_superior | Interior                 | Interior                    |
| Iluminación_200_5_pared_superior    | Pared                    | Pared estacionaria          |
| Eje_superior_3_del_eje_intermedio   | Pared                    | Pared estacionaria          |
| Pared                               | Pared                    | Pared estacionaria          |
| Presión de Salida                   | Presión de Salida        | 177,608.933 pa              |
| Tanque                              | Entrada de flujo masico  | 16.82 m/s                   |

Se eligieron los siguientes compuestos, los cuales se dan de alta en las especies consideradas para la reacción involucrada tanto en los reactivos como en los productos, las cuales se enlistan a continuación.

- C (Carbono monoatómico).
- H (Hidrogeno monoatómico).
- O<sub>2</sub> (Oxígeno).
- CO<sub>2</sub> (Bióxido de carbono).
- H<sub>2</sub>O (Agua).
- CO (Monóxido de carbono).

En estas especies se consideran los elementos que componen el combustible y el aire, así como las especies básicas obtenidas en la reacción estequiometria más las especies resultantes debido a combustión incompleta. Se llevaron a cabo dos reacciones químicas para simular la combustión incompleta que es generada por los equipos de combustión diésel (Scoop, Camión de bajo perfil), produciendo así los gases tóxicos con los que se trabaja diariamente (CO, CO<sub>2</sub>). Dichas reacciones son:



Al diésel se le agrega oxígeno para producir monóxido de carbono más agua con los productos generados se pretende producir el dióxido de carbono (Reacción 4), para que esto ocurra se le añadió más oxígeno (lo que ocurren en los motores diésel). La reacción se realiza en el interior del quemador colocado a 8m del tope de mina.

Las condiciones utilizadas para llevar a cabo la reacción se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7. Propiedades de la mezcla de compuestos de la combustión.**

| Condición de frontera | Tipo de condición       | Valores de condición |                 |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
|                       |                         | Velocidad (m/s)      | Temperatura (K) |
| Entrada de Mina       | Pesión de salida        | -                    | 298             |
| Entrada del extractor | Pesión de salida        | 15                   | 300             |
| Aire fresco           | Entrada de flujo masico | 16.82                | 298             |
| Aire del quemador     | Entrada de flujo masico | -                    | 300             |
| Aire de Combustión    | Entrada de flujo masico | -                    | 315             |
| Pared Derecha         | Pared                   | 0                    | 300             |
| Pared izquierda       | Pared                   | 0                    | 300             |
| Techo                 | Pared                   | 0                    | 300             |
| Tope Mina             | Pared                   | 0                    | 310             |

El extractor propuesto para la extracción de los gases tóxicos, así como para el circuito de ventilación, cuyas características ya fueron mencionadas anteriormente. Se le asignaron las condiciones de frontera mostradas en la tabla 8. Para el ventilador se manejó una velocidad en la zona continua de 1160 rev/min. Dicho extractor se colocó a 75 m (a la mitad de la longitud total de la geometría de mina), ya que en esta posición la concentración de los gases que se generaron por la combustión permaneces estables, sin turbulencia con un flujo contante. La medición de su extracción será más representativa y controlada.

**Tabla 8. Condiciones de frontera para el extractor.**

| <b>Reacción</b>                           | <b>Propiedades Utilizadas</b> |
|---|-------------------------------|
| Densidad ( kg/m <sup>3</sup> )            | Gas Ideal - incompresible     |
| CP (J/kg/m <sup>3</sup> )                 | 1000                          |
| Conductividad Térmica ( W/m-K)            | 0.0454                        |
| Viscosidad ( Kg/ m-s)                     | 1.72 e-05                     |
| Difusividad de Masa ( m <sup>2</sup> /s ) | 2.88 e -05                    |

Para la simulación se utilizaron tres modelos diferentes de viscosidad laminar, los cuales funcionan de diferente manera y cada uno de ellos utiliza ecuaciones diferentes para resolver las incógnitas que se presentan el comportamiento de los fluidos que intervienen en el circuito de ventilación. Los modelos utilizados son:

- K- épsilon.
- Transition K-K1-omega.
- Reynolds Stress.

Se realizó una simulación para cada uno de los modelos ya antes mencionados, cada uno con un lapso de tiempo de 500s. Este periodo se le asigno para ver el comportamiento de los fluidos y la continuidad que se tienen las ecuaciones al resolver cada una de las incógnitas presentes en los fluidos analizados.

Por lo tanto, la solución del problema consiste en seleccionar el modelo que mejor se ajuste para mantener una ventilación adecuada en la mina subterránea generando un flujo constante para mantener las condiciones adecuadas para desarrollar las diferentes actividades de los trabajadores.

### 2.5.1. Metodología empleada para el circuito de ventilación.

Generada la malla para cada proceso generación de la combustión diésel y la extracción de los gases tóxicos, se establece las condiciones de frontera, se exportará el archivo de la geometría (mina y el extractor) con todas estas características, la simulación del problema a resolver se realiza con el siguiente procedimiento.

1. Leer en el software FLUENT el archivo .msh, donde el reporte de la lectura debe contener toda la información relacionada al archivo de la malla.
2. Revisar que en el reporte de la lectura del archivo no exista ningún error o volúmenes negativos.
3. Escalar la geometría del modelo al tamaño real (en metros). Esto es necesario, ya que FLUENT toma como unidad de medida con la que se generó en GAMBIT, y en este caso para crear la geometría se realizó en milímetros.
4. Definir los parámetros de cada modelo a usar.
5. Establecer condiciones de frontera.
6. Finalmente resolver el problema, aplicando un método iterativo, iniciando con una solución asignada.

Para este punto se resolvió el problema para los tres modelos de turbulencia, los cuales se presentaron en el capítulo I.

Los valores tomados para las constantes en las ecuaciones de turbulencia son los que se determinaron para los experimentos de aire y agua en flujos turbulentos. En los materiales, para el fluido se eligió el aire cuyas propiedades se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9. Propiedades del aire.**

| <b>Propiedades de aire (Utilizadas)</b> | <b>Cantidad</b> |
|---|-----------------|
| Densidad Kg/m <sup>3</sup>              | 1.225           |
| Cp (J /kg- K )                          | 1006.43         |
| Conductividad Térmica ( W / m-K)        | 0.0242          |
| Viscosidad (Kg/m-s)                     | 1.79E-05        |
| Peso Molecular ( Kg/Kg mol )            | 28.966          |
| Entalpia de estado estándar ( J/Kgmol)  | 0               |
| Temperatura de Referencia (K)           | 298             |

Para el tipo de material sólido se utilizaron las propiedades del material estéril (Tepetate) que comúnmente se encuentra en mina subterránea al estar desarrollando una obra o al extraer el mineral, las cuales se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10. Propiedades del material estéril (tepetate).**

| <b>Propiedades del material estéril</b> | <b>Cantidad</b> |
|---|-----------------|
| Densidad ( Kg/m <sup>3</sup> )          | 2100            |
| Cp ( J/ Kg-K)                           | 871             |
| conductividad Térmica ( W/m-K)          | 202             |

Posteriormente se registra el flujo de aire y pérdida de presión (calculados). Así como la velocidad del mismo, a partir de ahí se calcula de manera iterativa la cantidad de CO, CO<sub>2</sub> que son extraídos del área de interés hasta cumplir con los criterios de convergencia establecidos, que son de 0.001 para todas las ecuaciones, excepto para la ecuación de la energía que es de  $1 \times 10^{-5}$ .

El procedimiento de solución consistió en activar todos los modelos usados desde un inicio hasta que se llegara a cumplir con todos los criterios de convergencia en cada una de las ecuaciones involucradas, en estado transitorio.

Los resultados para cada simulación son buenos según el modelo elegido y las cantidades medidas incluyen promedios de presión, velocidad y temperatura que intervienen en el proceso de la combustión incompleta. En cada simulación de CFD, es vital garantizar que los resultados obtenidos den una la solución óptima que se adapte más a la realidad y el cual demuestre la extracción necesaria de los gases nocivos para mantener un flujo de aire constante de aire fresco (la mina esté ventilada).

## **Capítulo III.**

### **Resultados**

A continuación, se muestran los perfiles y contornos obtenidos en las simulaciones con y sin la aplicación de un sistema de ventilación en la obra de desarrollo de la mina subterránea para cada modelo utilizado (Epsilon-Estandar, K-KL Omega, Reynolds Stress). En los cuales se analizó la concentración de los gases nocivos generado por los equipos de combustión y del fenómeno de transferencia de calor del sistema aire – gases de emisión (CO y CO<sub>2</sub>) así como temperatura y humedad de tal forma que se pueda sugerir el modelo que más se acerque a las condiciones reales. Los resultados obtenidos se clasifican en:

1. Perfiles y contornos de CO, CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura sin extracción.
2. Perfiles y contornos de CO, CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura con extracción.
3. Análisis comparativo de tres modelos simulados para CO, CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura.

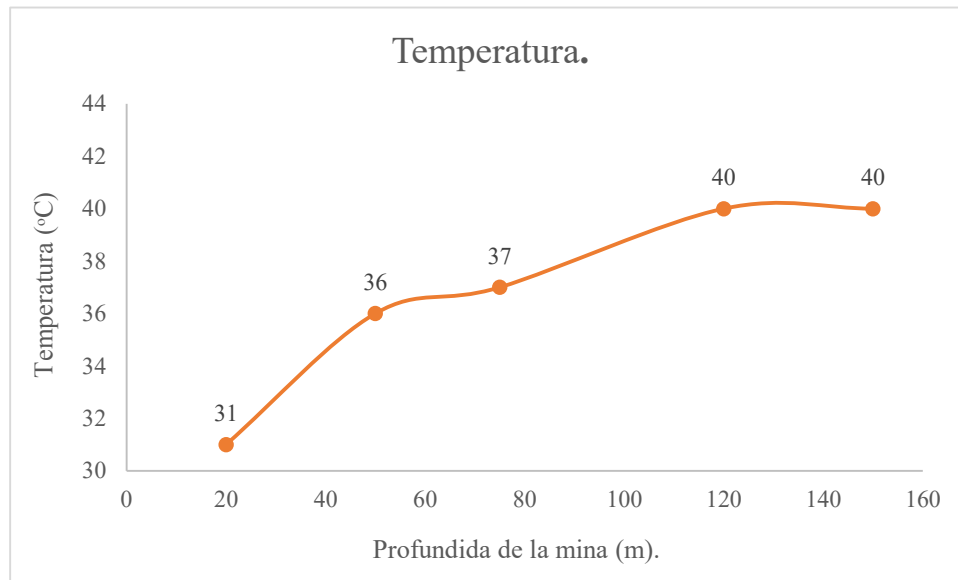
#### **3.1. Perfiles y contornos de CO, CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura sin extracción.**

##### **3.1.1. Perfiles y contornos de temperatura.**

###### **3.1.1.1. Modelo KL – Épsilon estándar.**

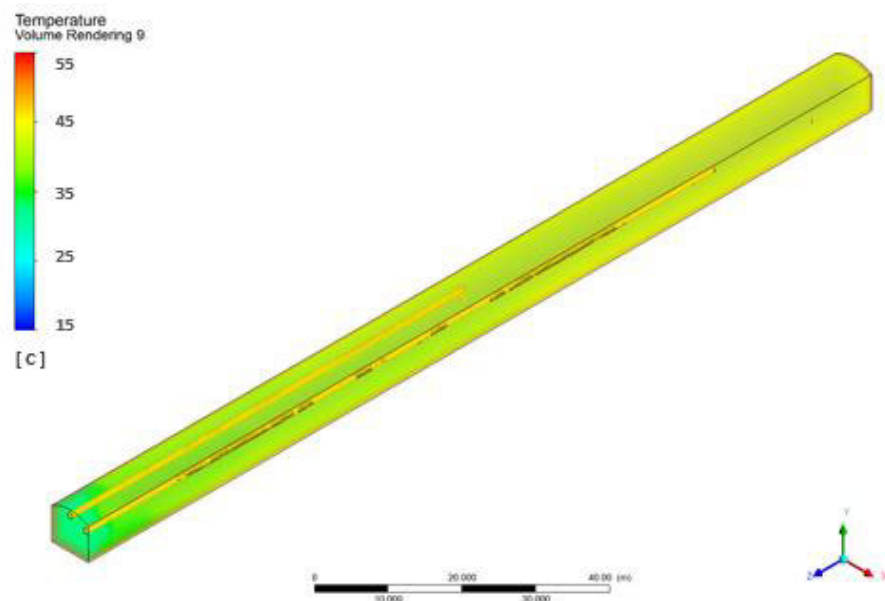
En la figura 12 se muestra el perfil de temperatura en obra de desarrollo en mina subterránea sin implementar el modelo de ventilación, en dicha figura se puede observar que se tiene a una distancia de 20m una temperatura 31°C; en lo que respecta a la distancia 50m se tienen un valor de temperatura de 36°C; correspondiendo a la distancia central (75m) se registra una temperatura de 37°C; posteriormente a la distancia 120m se observa una temperatura de 40.5°C; y finalmente para la distancia correspondiente al frente de mina (150m) se tiene una temperatura de 40°C. Estos resultados son un indicativo que conforme va aumentando la

distancia la temperatura va en aumento hasta llegar a los 120m donde se registra la temperatura máxima, esto es coincidente con la posición donde se encuentra la maquinaria de trabajo lo cual es congruente debido a que dichos equipos son una fuente considerable de calor y de gases contaminantes.



**Figura 12. Perfil de temperatura sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.**

En la figura 13 se muestra el contorno de temperatura en la obra de desarrollo de mina subterránea para la simulación realizada durante 500 segundos, esta figura muestra que en los primeros 20m de longitud la temperatura es menor (31°C) en este sentido, mientras la longitud aumenta la temperatura va en aumento, se observa que para la longitud de 50m y 75m<sup>2</sup> se tiene una diferencia de temperatura de 1°C, para la longitud de 120m y 150m la temperatura se mantiene en el mismo rango que es de 40°C.



**Figura 13. Contorno de temperatura sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.**

### **3.1.1.2. Modelo K – KL Omega.**

La figura 14 muestra el perfil de temperatura sin la aplicación del sistema de ventilación utilizando el modelo K – KL omega, en dicha figura se observa que a una distancia de 20m se tiene una temperatura 31°C; posteriormente a una distancia 50m se tienen una temperatura de 36° mientras que a una distancia de 75m se registra una temperatura de 37°C; con respecto a la distancia 120m se observa una temperatura de 40°C; a los 150m se mantiene la misma temperatura de 40°C registrada en el punto anterior. Al igual que en el caso anterior se puede observar que la mayor temperatura registrada se encuentra en el frente de la obra de desarrollo de mina, lo cual es coincidente con la combustión generada por la maquinaria de trabajo.



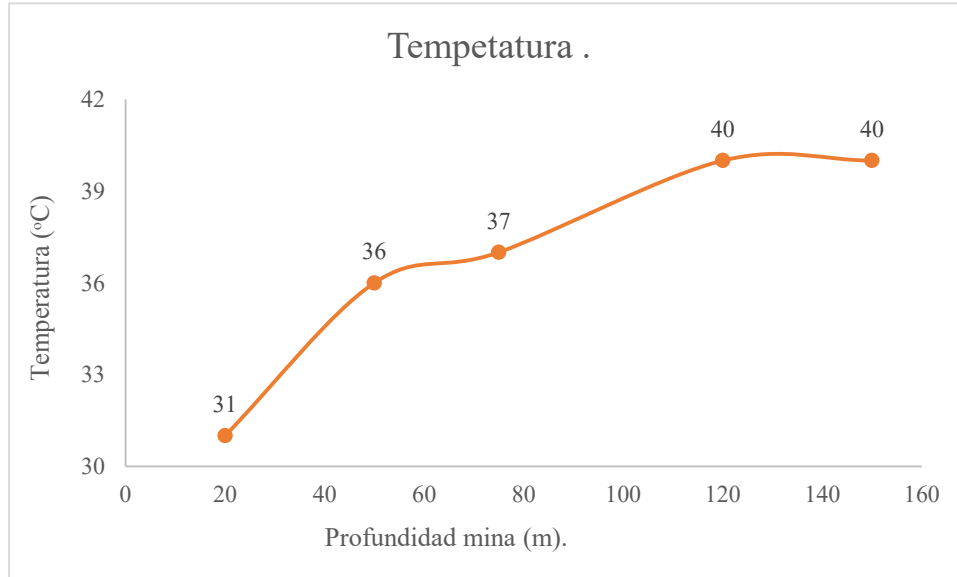


Figura 14. Perfil de temperatura sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.

En la figura 15 se observa el contorno de temperatura donde se tiene un comportamiento en aumento, la temperatura mínima registrada es de 31°C la cual se tiene en los primeros 20m, en el centro de obra de desarrollo se tiene una temperatura de 36°C, los puntos máximos que van de los 120m hasta la frente de obra de desarrollo de la mina subterránea (150m) de 40°C.

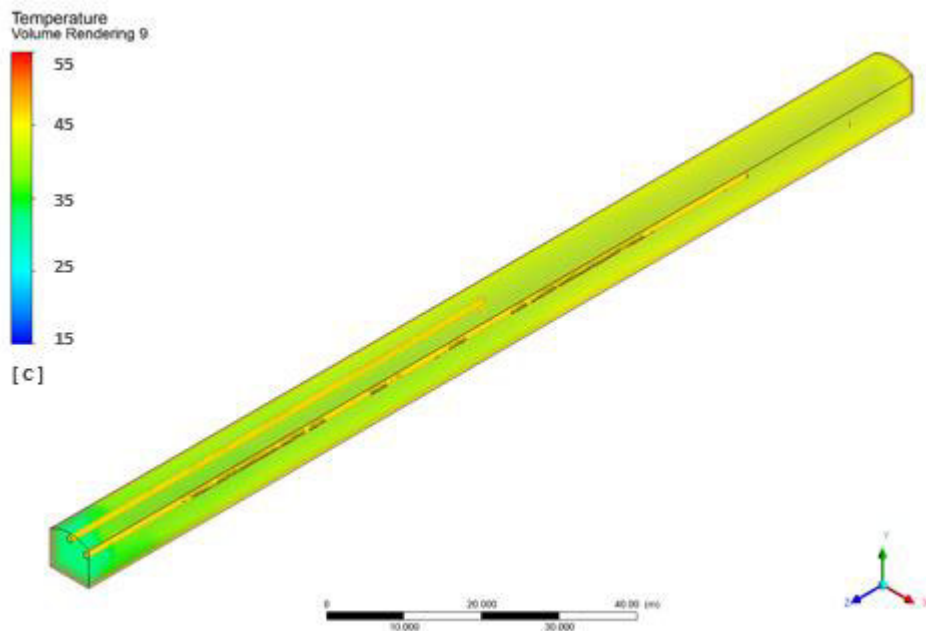


Figura 15. Contorno de temperatura sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.

### 3.1.1.3. Modelo Reynolds Stress.

La figura 16 muestra el perfil de temperatura en obra de desarrollo de mina subterránea, en la figura se puede observar que la temperatura va en aumento a medida que la longitud de la mina subterránea es mayor. Donde a una distancia de 20m se tiene una temperatura de 31°C; a la distancia 50m se tienen un valor de temperatura de 35°C; correspondiendo a la distancia de 75m (centro de la mina) se registra una temperatura de 37°C; con respecto a la distancia 120m se observa una temperatura de 39°C; a los 150m donde se localiza el frente de obra de desarrollo de mina se tiene una temperatura de 40°C. Al igual que en los casos anteriores el perfil de temperatura es congruente con el fenómeno de transferencia de calor propio de este sistema.

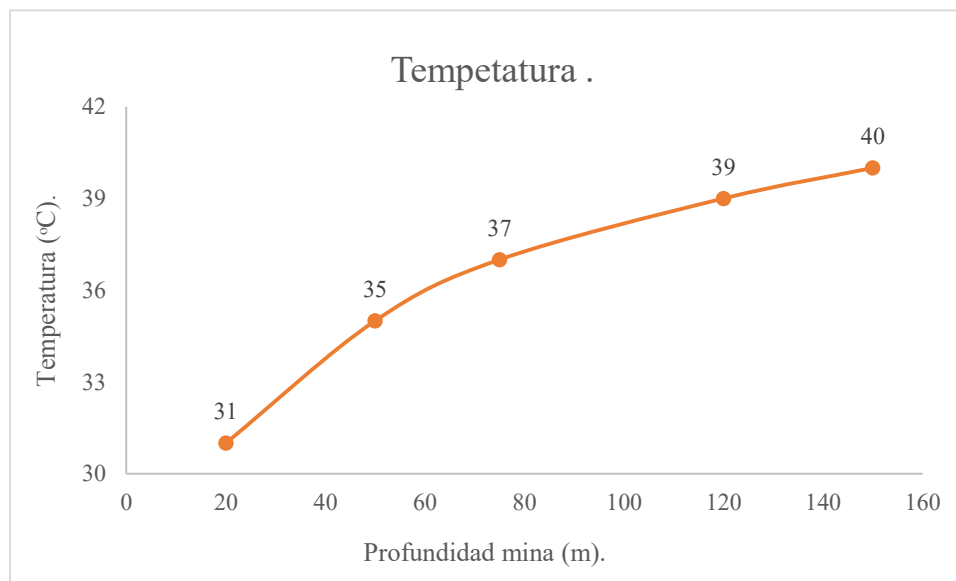


Figura 16. Perfil de temperatura sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

En la figura 17 se muestra el contorno de temperatura utilizando el método Reynolds Stress donde la temperatura registrada en la simulación oscila entre los 30 y 40°C en la longitud total de la obra de desarrollo de la mina con pequeñas variaciones de 1°C o 2°C. Teniendo una temperatura mínima de 31°C a los 20m de la entrada de la obra de desarrollo de la mina.

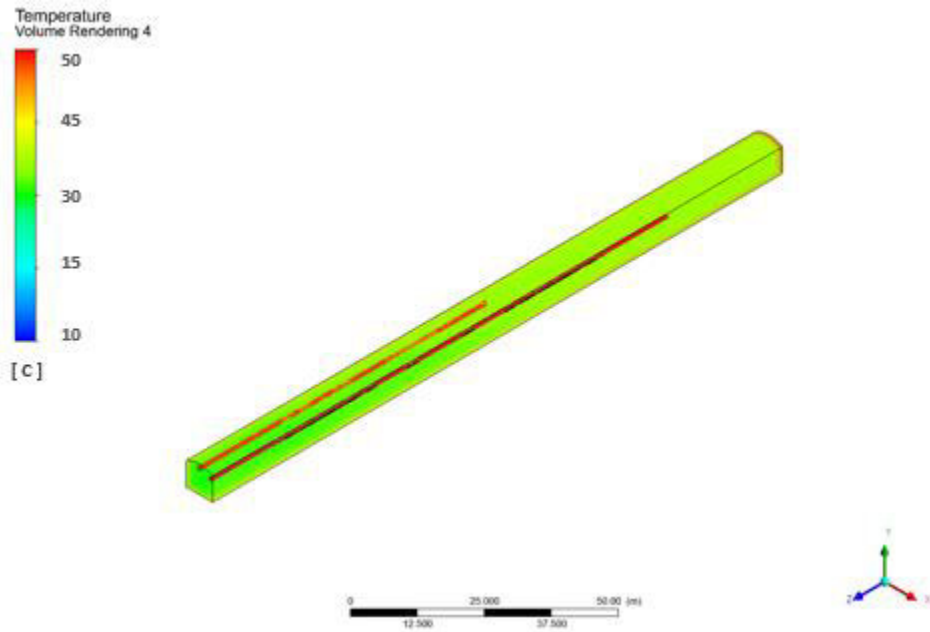
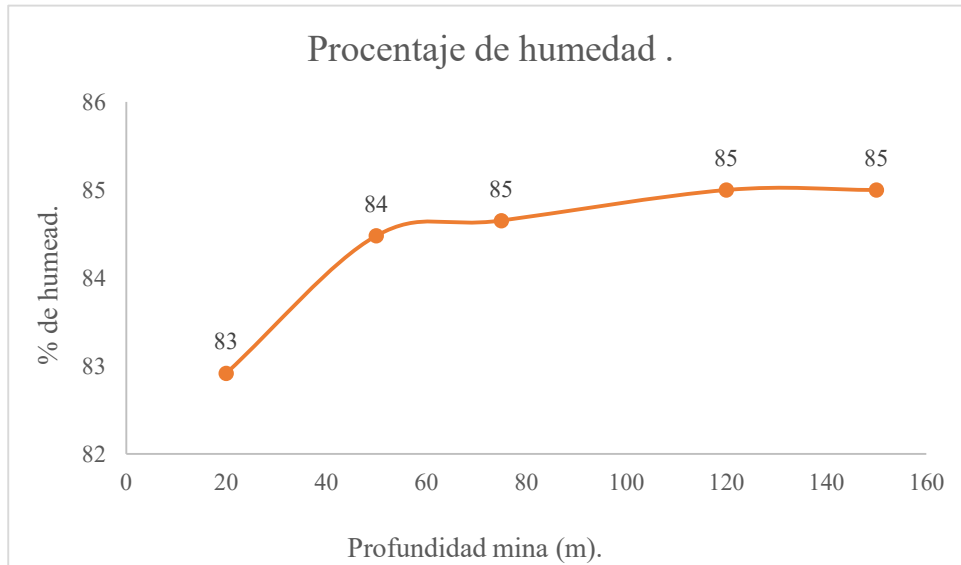


Figura 17. Contorno de temperatura sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

### 3.1.2. Perfiles y contornos de humedad.

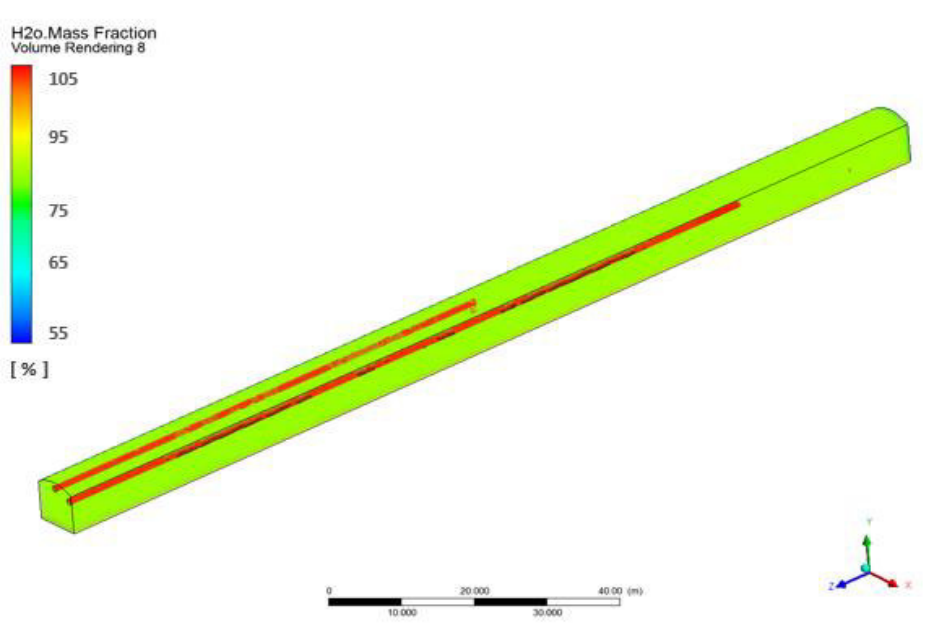
#### 3.1.2.2. Modelo KL – Épsilon estándar.

En la figura 18 se muestra el perfil de humedad a lo largo de obra de desarrollo de la mina subterránea donde se observa que el porcentaje de humedad, el cual se encuentra en el 80%. A una distancia de 20m de la entrada se tiene una humedad del 83%; con respecto a los 50m el porcentaje de humedad aumenta el 1% a comparación de los 20m. A partir de los 75m en adelante (la parte media de la obra de desarrollo de la mina subterránea) se registra el mayor porcentaje de humedad (85%) lo cual se debe a que en esa zona no cuenta con el suficiente aire fresco para su circulación.



**Figura 18. Perfil de humedad sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.**

La figura 19 muestra el contorno correspondiente al porcentaje de humedad, se puede observar que a partir del centro de la obra de desarrollo de la mina subterránea (75m) en adelante se tiene el mismo porcentaje de humedad (85%) a diferencia de los primeros metros (20m y 50m) donde la diferencia de humedad es del 1%.



**Figura 19. Contorno de humedad sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.**

### 3.1.2.3. Modelo K – KL Omega.

En la figura 20 se muestra el perfil con el porcentaje de humedad sin la implementación de un modelo de ventilación. En dicha figura se muestra que a una distancia de 20m se tiene una humedad del 82%; en relación a una distancia de 50m se registra un porcentaje de humedad del 82%; a una distancia de 75m la humedad es del 84%; posteriormente a una distancia de 120m la humedad es del 85%; finalmente con respecto al frente de la obra de desarrollo de la mina (150m) se mantiene el mismo porcentaje de humedad que en los 120m. Estos registros corresponden a la posición de la maquinaria de trabajo, ya que es donde se tiene el máximo porcentaje de humedad.

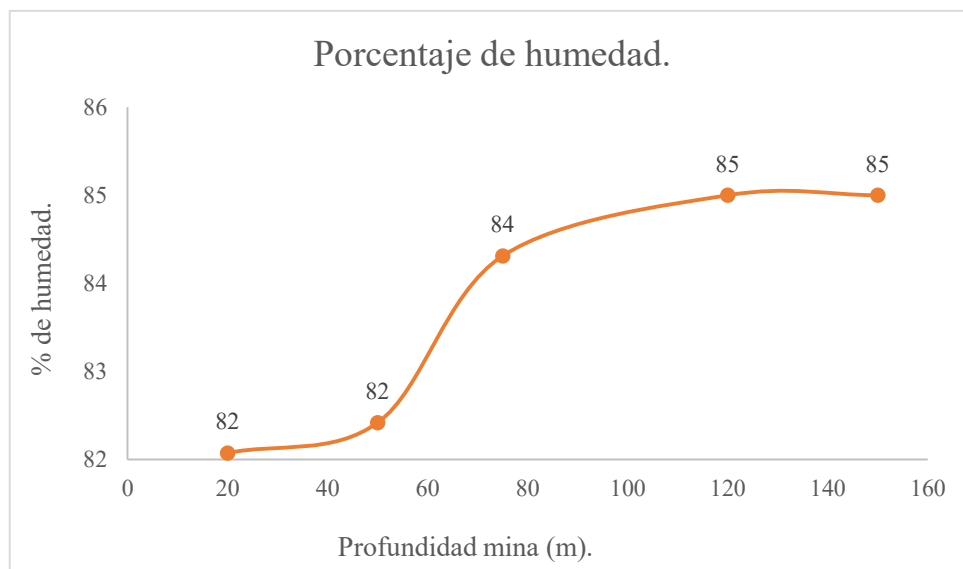


Figura 20. Perfil de humedad sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.

La figura 21 muestra el contorno de humedad sin la implementación de un circuito de ventilación, el contorno muestra el porcentaje de humedad a lo largo de la longitud total de obra de desarrollo de la mina subterránea, la cual se mantiene en el 80% con pequeñas variaciones del 1 o 2%. El porcentaje de húmedas máximo que se registra es del 84% a una distancia de 120m; el registro mínimo de humedad se ubica a una distancia de 20m.

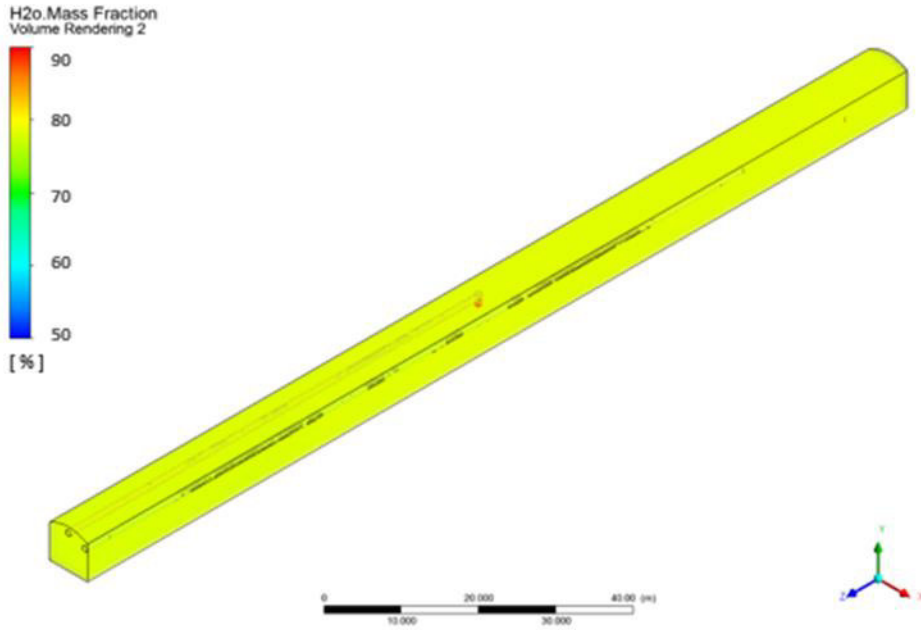
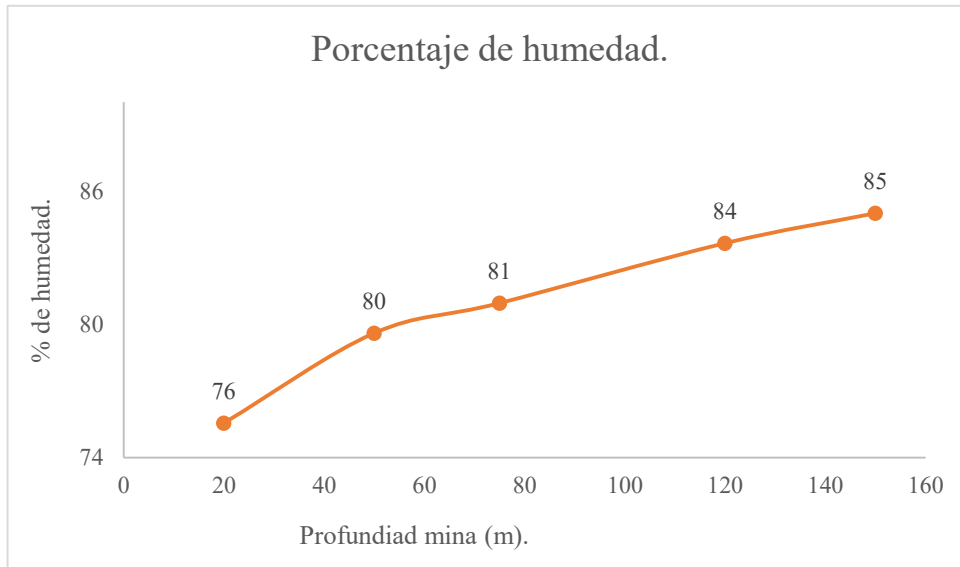


Figura 21. Contorno de humedad sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.

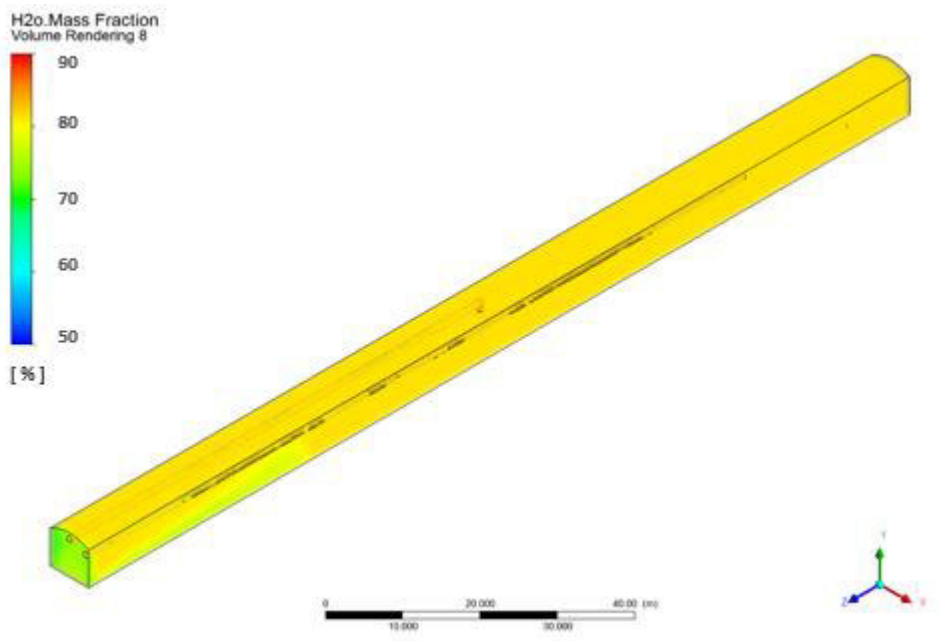
### 3.1.2.4. Modelo Reynolds Stress.

En la figura 22 se muestra el perfil correspondiente al porcentaje de humedad registrado en obra de desarrollo de la mina subterránea. A una distancia de 20m se tiene una humedad del 76%; la cual tiende a aumentar, a la distancia de 50m la humedad es del 80%, posteriormente a una distancia de 75m la humedad registrada es del 81%; en lo que respecta a la distancia de 120m, el porcentaje de humedad es del 84%; en la distancia final correspondiente a 150m se registra la humedad máxima del 85% debido a la falta de ventilación o poca ventilación en esa distancia.



**Figura 22. Perfil de humedad sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.**

La figura 23 muestra la variación de humedad en la obra de desarrollo de la mina subterránea, donde se observa la correlación que existe entre el porcentaje de humedad y la distancia de obra de desarrollo, mientras la distancia sea mayor, el porcentaje de la humedad va en aumento. La variación en la humedad se puede observar en el tramo de los 20m a los 50m donde se tiene una diferencia del 4%.



**Figura 23. Contorno de humedad sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.**

### 3.1.3. Perfiles y contornos de monóxido de carbono (CO).

#### 3.1.3.1. Modelo KL – Épsilon estándar.

En la figura 24 se muestra el perfil de monóxido de carbono en la obra de desarrollo de la mina subterránea sin implementar el modelo de ventilación, en dicha figura se puede observar que a una distancia de 20m se tiene una concentración de 68 ppm de CO; a la distancia de 50m se tienen un valor de 68.1 ppm de CO; correspondiendo a la distancia central (75m) se registra el 68.1 ppm de CO; posteriormente a la distancia 120m se observa una concentración de 68.2 ppm de CO; y finalmente para la distancia correspondiente al frente de la obra de desarrollo de la mina (150m) se tiene el 68.2 ppm de CO. Estos datos muestran que en toda la sección de la obra subterránea se obtienen valores por encima de la NOM-010-STPS-1999 los límites máximos permisibles de exposición de CO en una jornada de trabajo de 8hrs es de 50 ppm.

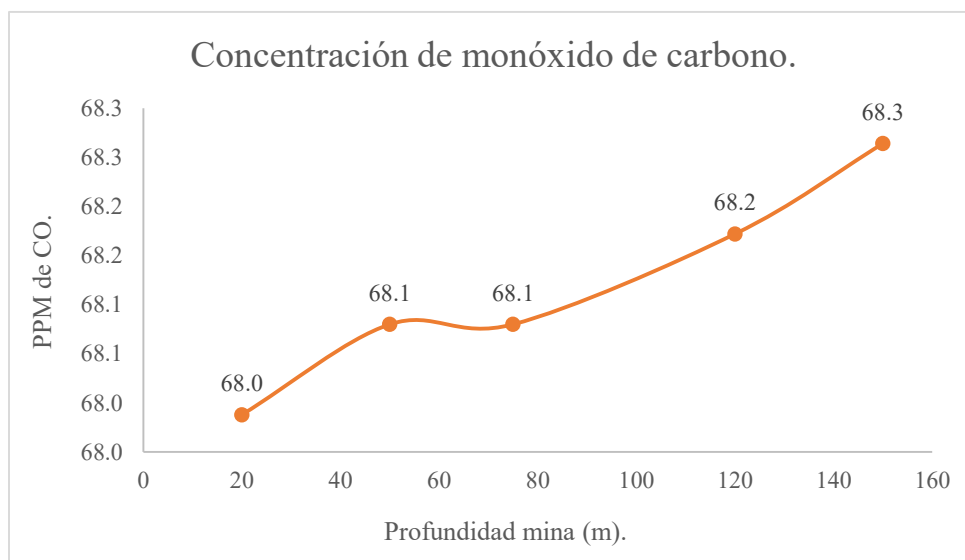


Figura 24. Perfil de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

La figura 25 muestra el contorno de distribución de CO utilizando el modelo KL – épsilon estándar. La concentración que se registran tienden a aumentar en relación a la distancia donde la concentración menor es de 68 ppm se tiene en los primeros 20, en el frente de la obra de desarrollo de la mina se registra la concentración máxima que es de 68.3 ppm.



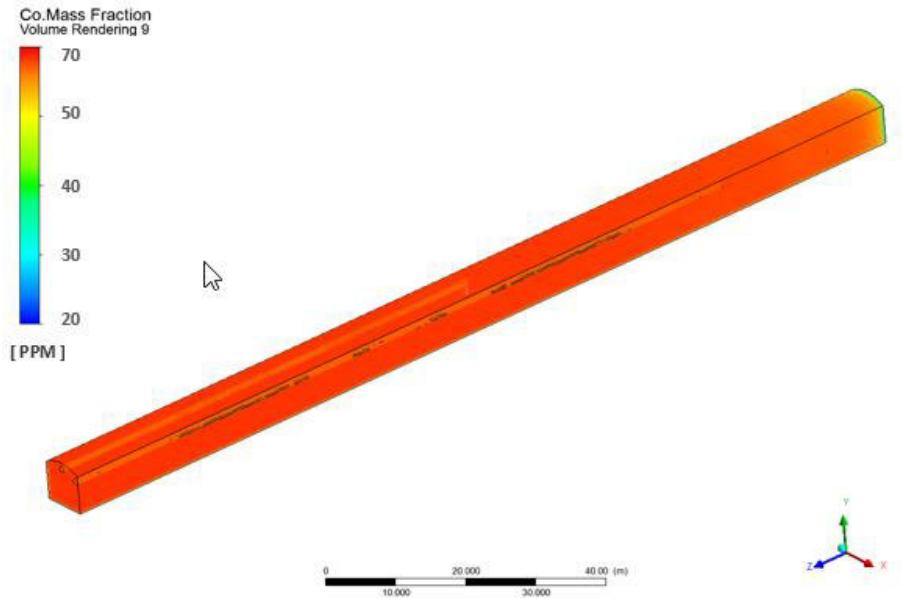


Figura 25. Contorno de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

### 3.1.3.2. Modelo K – KL Omega.

En la figura 26 se muestra el perfil de monóxido de carbono a lo largo de la obra de desarrollo de la mina subterránea, en dicha figura se observar a una distancia de 20m una concentración de 68 ppm de CO; en lo que respecta a la distancia 50m se tienen un valor de 68 ppm de CO; correspondiendo a la distancia central (75m) se registra el 68.1 ppm de CO; posteriormente a la distancia 120m se observa una concentración de 68.1 ppm de CO; y finalmente para la distancia correspondiente al frente de la obra de desarrollo de la mina (150m) se registra la concentración máxima de 68.2 ppm de CO.

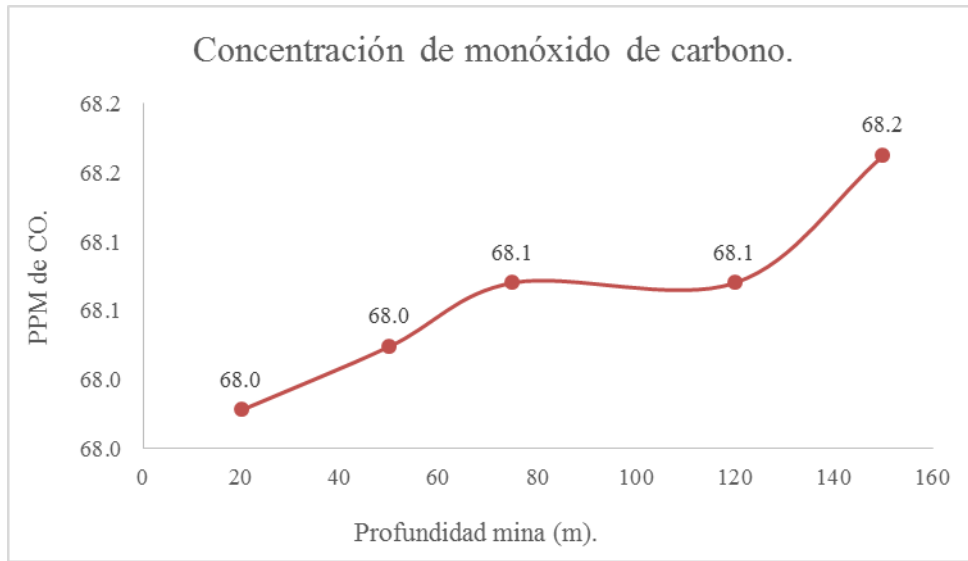


Figura 26. Perfil de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.

La figura 27 muestra el contorno de monóxido de carbono, en la figura se observa la distribución de CO registrada a lo largo de la mina sin la aplicación de un sistema de ventilación. La concentración mínima se tiene en la entrada de la obra de desarrollo de la mina, posteriormente esta va en aumento hasta registrar la concentración máxima en la frente la obra de desarrollo de la mina (150m).

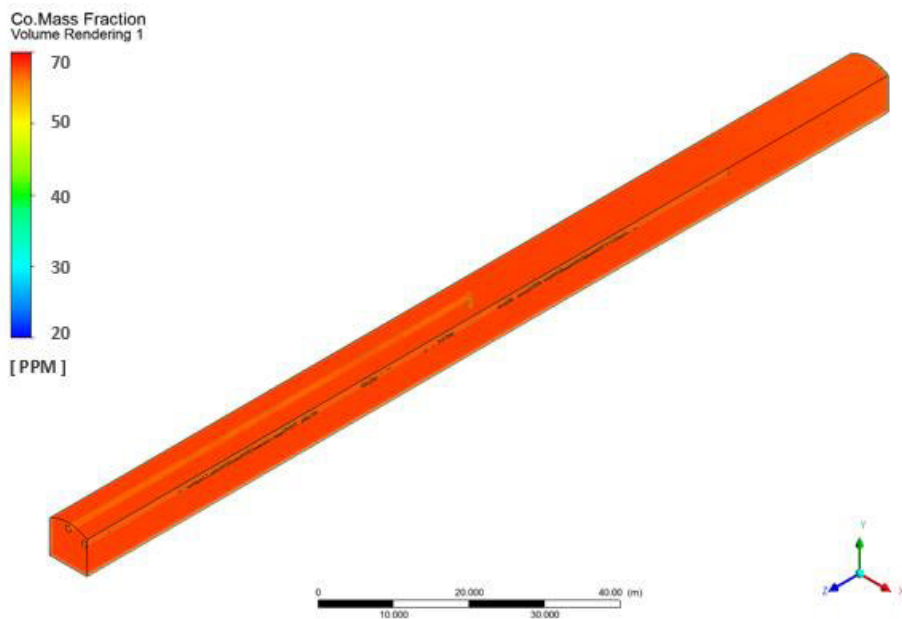


Figura 27. Contorno de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.

### 3.1.3.3. Modelo Reynolds Stress.

En la figura 28 se muestra el perfil de concentración de CO en el interior de la obra de desarrollo de la mina subterránea, en dicha figura se observa que la concentración de 68 ppm se mantiene constante desde la entrada de la mina hasta los 75m que es la parte central de la misma. A partir de los 75m se un ligero aumento en la concentración del CO; correspondiendo a una distancia de 120m se tiene una concentración de 68.1 ppm de CO, finalmente en la frente de la mina se tiene la concentración mayor de CO que es de 68.2 ppm. Estos resultados indican que a mayor profundidad de la obra de desarrollo de la mina la concentración del CO ira en aumento, lo que se relaciona con la ubicación de la maquinaria de trabajo.

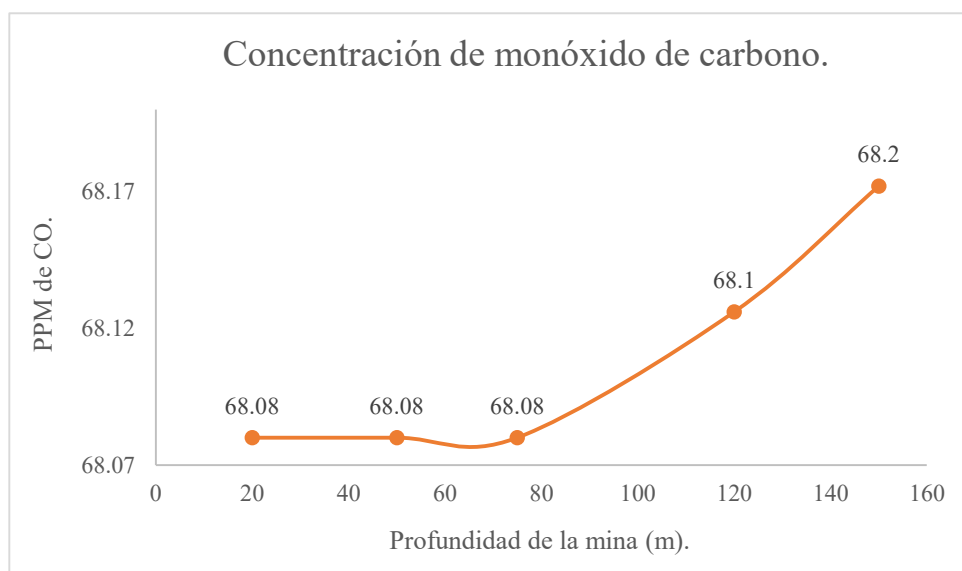


Figura 28. Perfil de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

En la figura 29 se muestra el contorno de monóxido de carbono donde el comportamiento del CO en la obra de desarrollo de la mina subterránea, en los primeros metros (20m, 50m, y 75m) las ppm de CO se mantienen constantes, registrando la concentración mínima de 68 ppm. A partir de los 75m la concentración va en aumento hasta la distancia de 150m donde la concentración máxima es de 68.2 ppm.

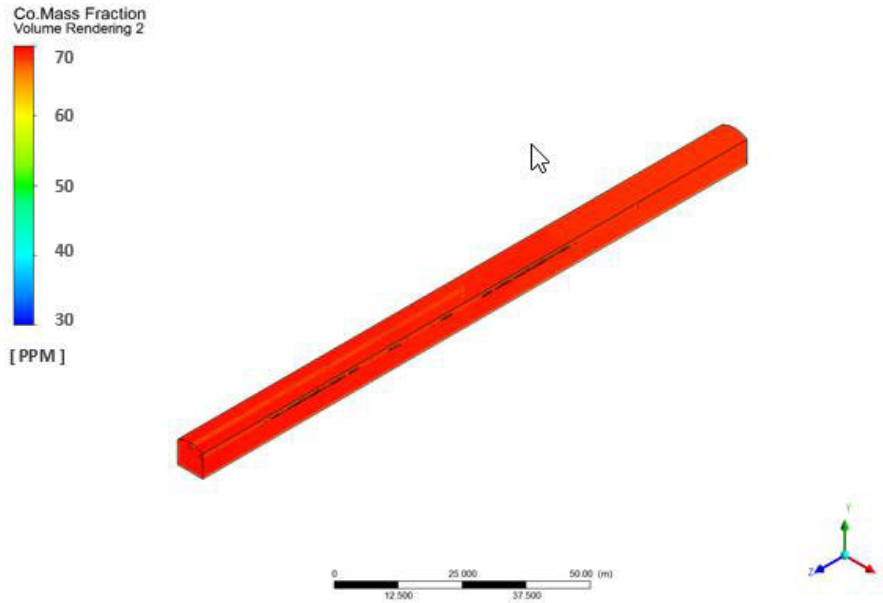
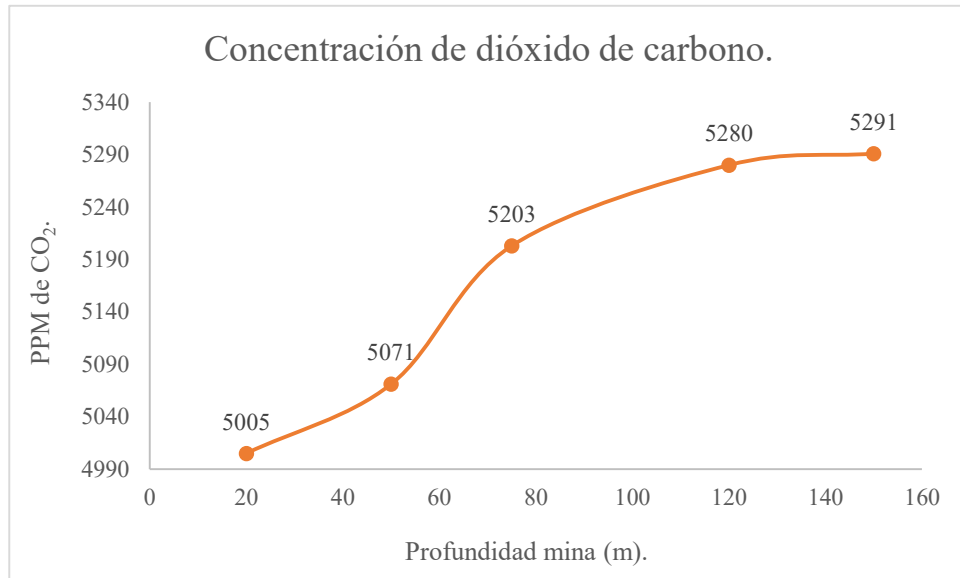


Figura 29. Contorno de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

### 3.1.4. Perfiles y contornos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

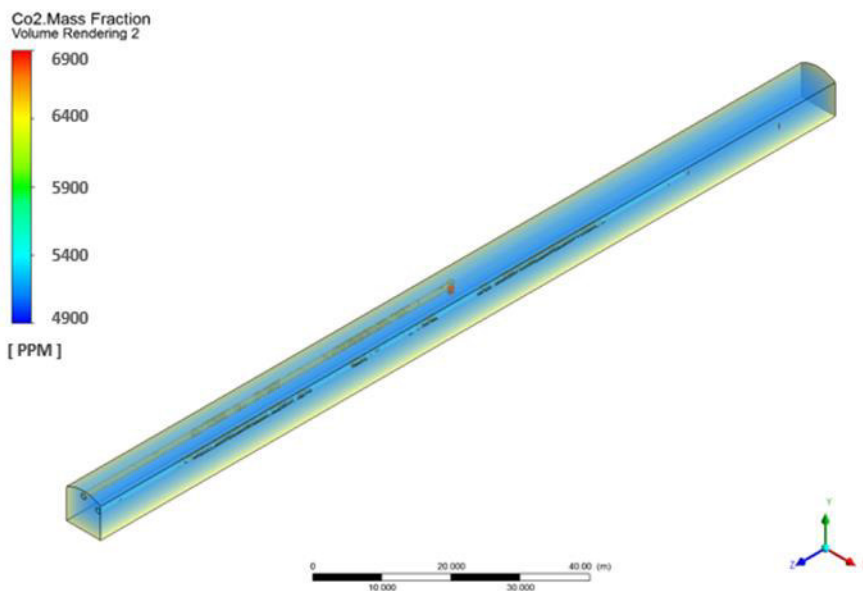
#### 3.1.4.1. Modelo KL – Épsilon estándar.

En la figura 30 se muestra el perfil de dióxido de carbono sin la implementación de un circuito de ventilación. En dicha figura se puede observar que a una distancia de 20m se tienen una concentración de CO<sub>2</sub> de 5005 ppm; con respecto a la distancia de 50m se tiene una concentración de 5071 ppm de CO<sub>2</sub>, mientras que a los 75m de distancia la concentración es mayor (5203 ppm); correspondiendo a la distancia de 120m se tienen una concentración de 5280 ppm. La máxima concentración de CO<sub>2</sub> registrada es en el frente de la obra de desarrollo de la mina, el cual corresponde 5291 ppm.



**Figura 30. Perfil de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.**

La figura 31 muestra el contorno de dióxido de carbono a lo largo de la obra de desarrollo de la mina subterránea con una simulación de 500s, en la cual se puede observar una concentración en un rango de 5000 y 5300 ppm. En este contorno se muestra que la mayor concentración de CO<sub>2</sub> se presenta a los 150m debido a la maquinaria que se encuentra en operación.



**Figura 31. Contorno de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.**

### 3.1.4.2. Modelo K – KL Omega.

En la figura 32 se muestra el comportamiento del dióxido de carbono en la obra de desarrollo de la mina subterránea generado por la maquinaria de combustión diésel. Donde la concentración menor del CO<sub>2</sub> se encuentra a los 20m de la entrada de la mina: a una distancia de 50m se tiene una concentración de 5233 ppm; con relación a la parte media de la longitud total (75m) se tiene una concentración de 5239 ppm; para la distancia de 120m la concentración aumenta 2 ppm (5241 ppm); a los 150m que corresponden a la frente de la obra de desarrollo de la mina se tienen la concentración mayor de CO<sub>2</sub> de 5243 ppm. Estos registros no indican que la circulación de aire fresco no está presente o es mínima a lo largo de toda la obra de desarrollo de la mina.

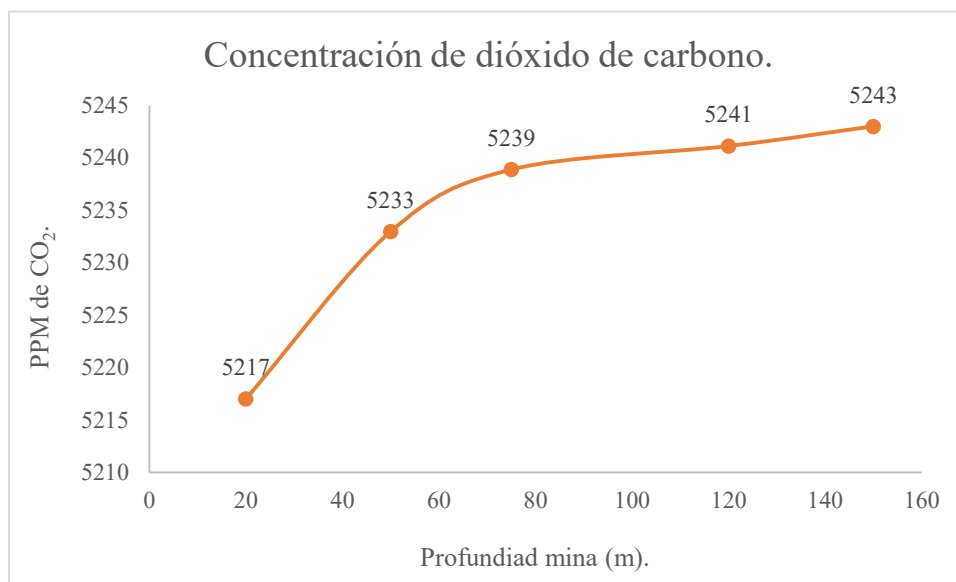


Figura 32. Perfil de concentración de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.

La figura 33 muestra el contorno de dióxido de carbono en la obra de desarrollo de la mina subterránea utilizando el modelo K – KL omega. La simulación muestra la variación que se tiene en la concentración de CO<sub>2</sub> en diferentes puntos de la longitud total de la obra de desarrollo de la mina; la concentración mínima es de 5217 ppm de CO<sub>2</sub>, la máxima concentración es de 5243 ppm correspondiente a los 150m de distancia

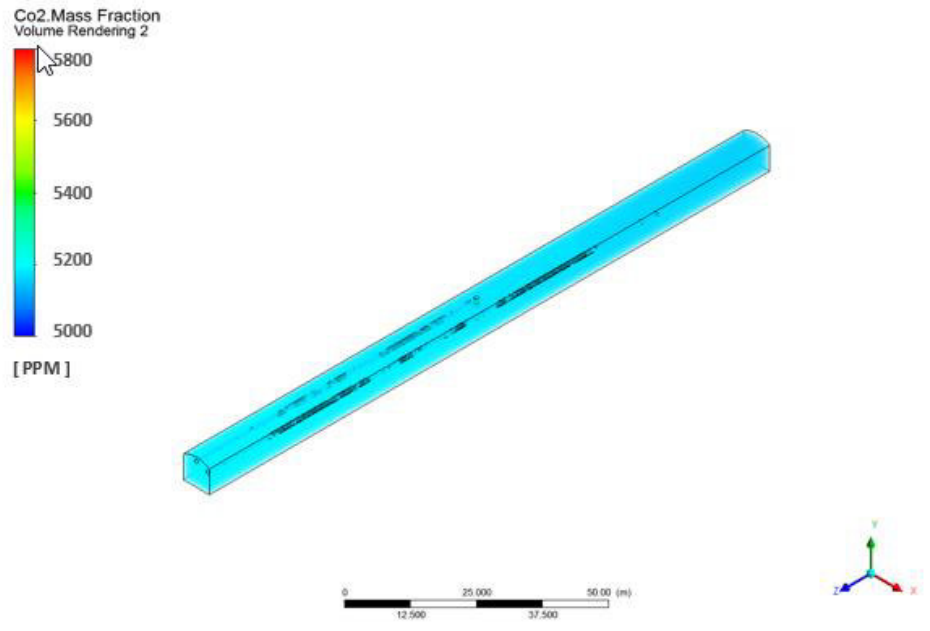


Figura 33. Contorno de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.

### 3.1.4.3. Modelo Reynolds Stress.

En la figura 34 se muestra el perfil del dióxido de carbono en la obra de desarrollo de la mina subterránea sin la implementación de un modelo de ventilación. En la figura se puede observar que el comportamiento de CO<sub>2</sub> oscila entre 5200 ppm a lo largo de la profundidad de la obra de desarrollo de la mina, a los 20m se tiene una concentración de 5226 ppm; con respecto a la distancia de 50m la concentración es de 5233 ppm; con respecto a la distancia de 75m se registra una concentración de 5235 ppm de CO<sub>2</sub>; a los 120m de longitud la concentración de dióxido de carbono aumenta 3 ppm; en la frente de la obra de desarrollo de la mina que corresponde a una distancia de 1501m se conserva la concentración de 5238 ppm que en los 120m.

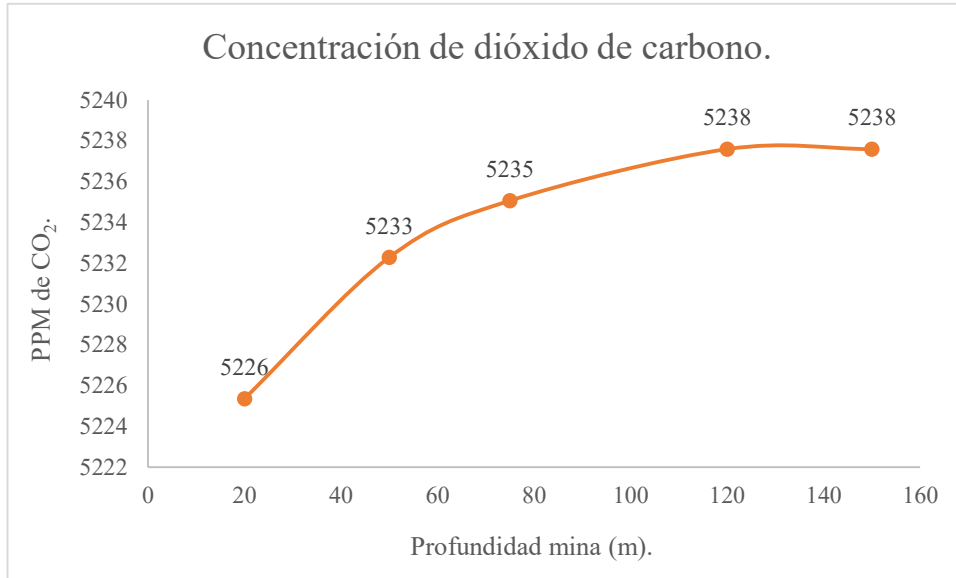


Figura 34. Perfil de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

La figura 35 se muestra el comportamiento del dióxido de carbono en diferentes puntos de la longitud total de la obra de desarrollo de la mina subterránea. La variación en la concentración del CO<sub>2</sub> de los diferentes puntos de la mina es mínima debido a que esta aumenta 2 ppm o 3 ppm a partir de los 50m de la entrada de la mina. En el tramo de los 20m - 50m la concentración tiene una variación mayor (alrededor de 7 ppm) comparada con las demás distancias.

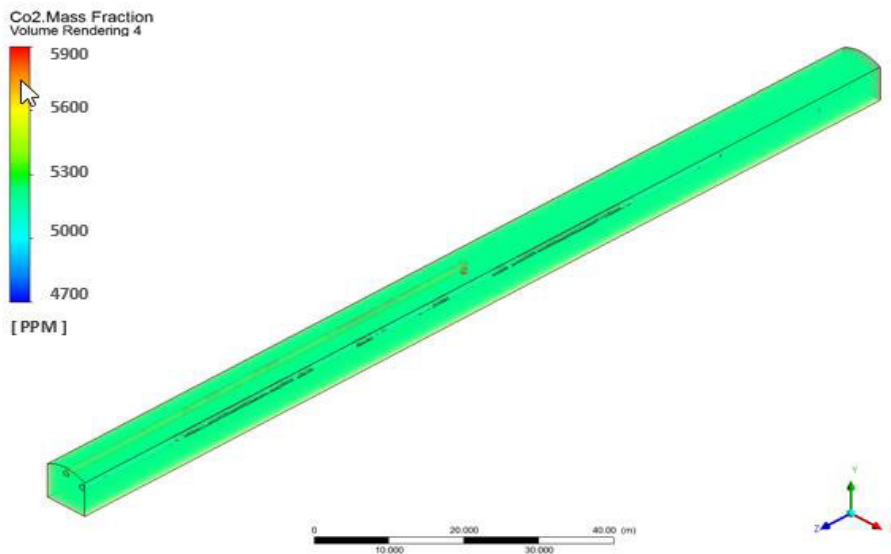


Figura 35. Contorno de dióxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynolds Strees.



## 3.2. Perfiles y contornos de CO, CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura con sistema de extracción.

### 3.2.1. Perfiles y contornos de temperatura.

#### 3.2.1.1. Modelo KL – Épsilon estándar.

En la figura 36 se muestra el perfil de temperatura en mina subterránea con la implementación de un modelo de ventilación. En la figura se puede observar que a una distancia de 20m se tienen una temperatura de 30°C; la cual tiende en aumento, en lo que respecta a una distancia de 50m la temperatura es de 35°C, a una distancia de 75m la temperatura disminuyó 2° C debido que a esta distancia se encuentra el extractor; posteriormente a una distancia de 120m la temperatura registrada es de 39°C en la distancia final que se tiene a lo largo de la mina (150m) la temperatura es de 38°C.

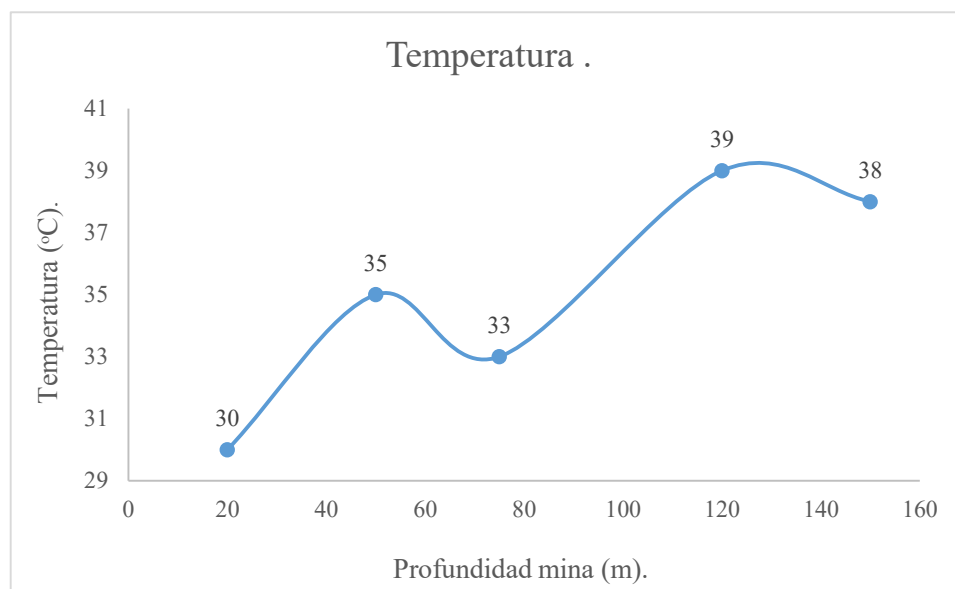


Figura 36. Perfil de temperatura con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

La figura 37 se muestra el contorno de temperatura utilizando con aplicación de un sistema de ventilación. En la figura se observa la distribución y el comportamiento de la temperatura en el interior de la mina, ya que se tiene un registro de temperatura mínima de 30°C a una distancia de 20m, así como una temperatura máxima de 39°C a una distancia de 120m (donde se encuentra la maquinaria de combustión diésel).

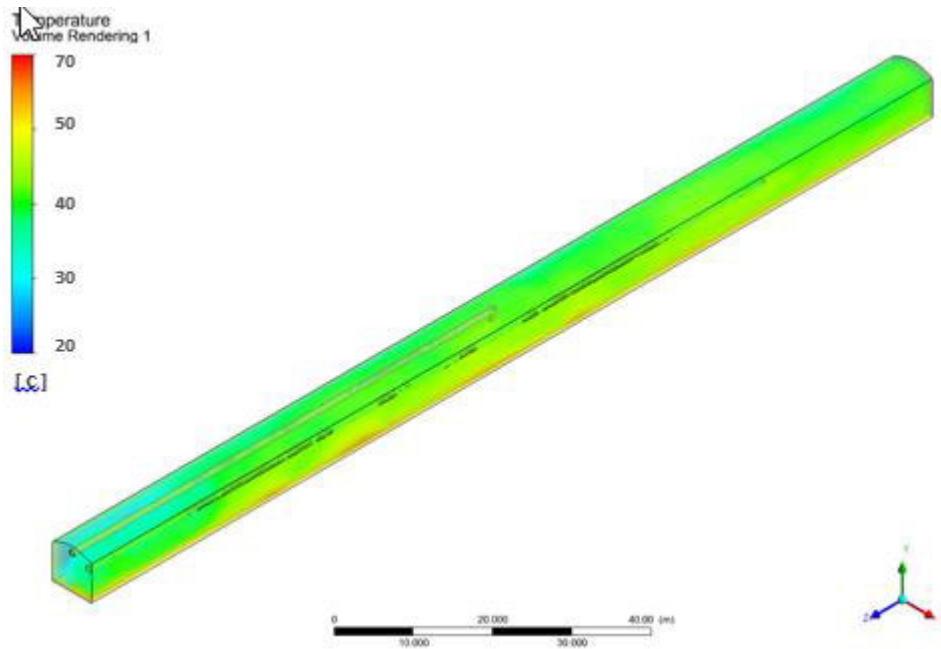


Figura 37. Contorno de temperatura con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

### 3.2.1.2. Modelo K – KL Omega.

En la figura 38 se muestra la temperatura registrada con la aplicación de un circuito de ventilación. En la cual se observa que a una distancia de 20m se tiene una temperatura de 29°C; con respecto a la distancia de 50m la temperatura es de 30°C; a una distancia de 75m la parte media de la longitud total de la mina (encuentra el extractor) la temperatura registrada es de 27°C; correspondiendo a la distancia de 120m la temperatura aumenta 10°C; para el frente de la mina (150m) se tiene la misma temperatura que en los 120m de 37°C.

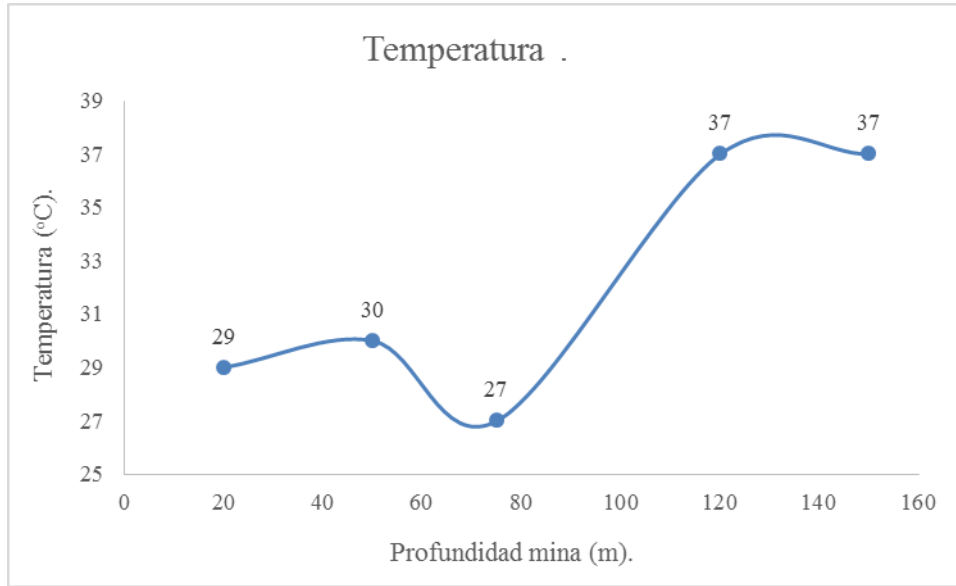


Figura 38. Perfil de temperatura con extracción utilizando el modelo K – KL omega.

El comportamiento de la temperatura con la implementación de un modelo de ventilación tiende a disminuir, lo cual se puede observar con las diferentes tonalidades que presenta. En dicho contorno (figura 39) se puede apreciar la temperatura máxima (29°C) la cual se registra a los 20m de la entrada de la mina, así como la temperatura máxima (37°C) a 120m donde se genera la combustión de los equipos de trabajo.

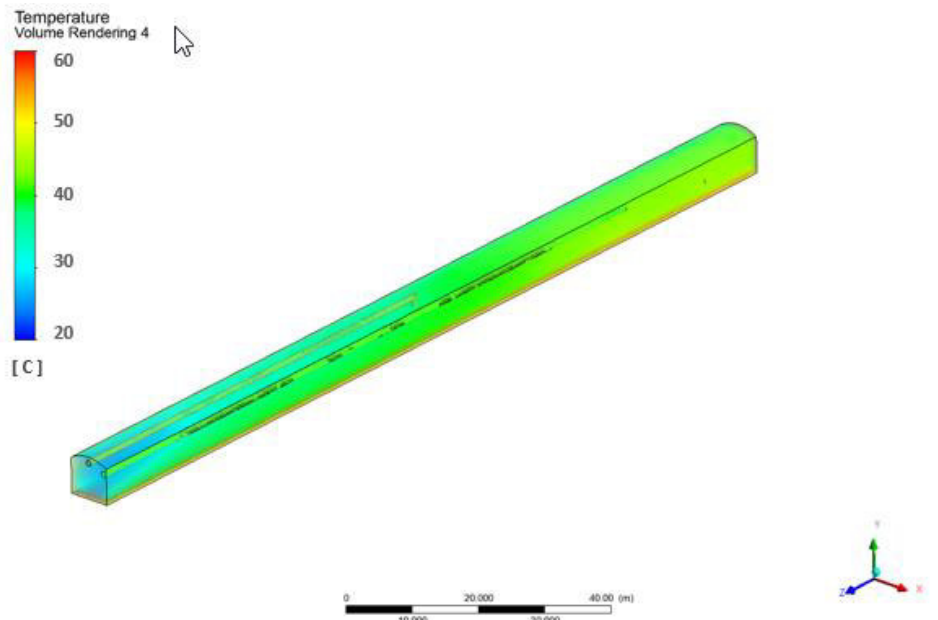
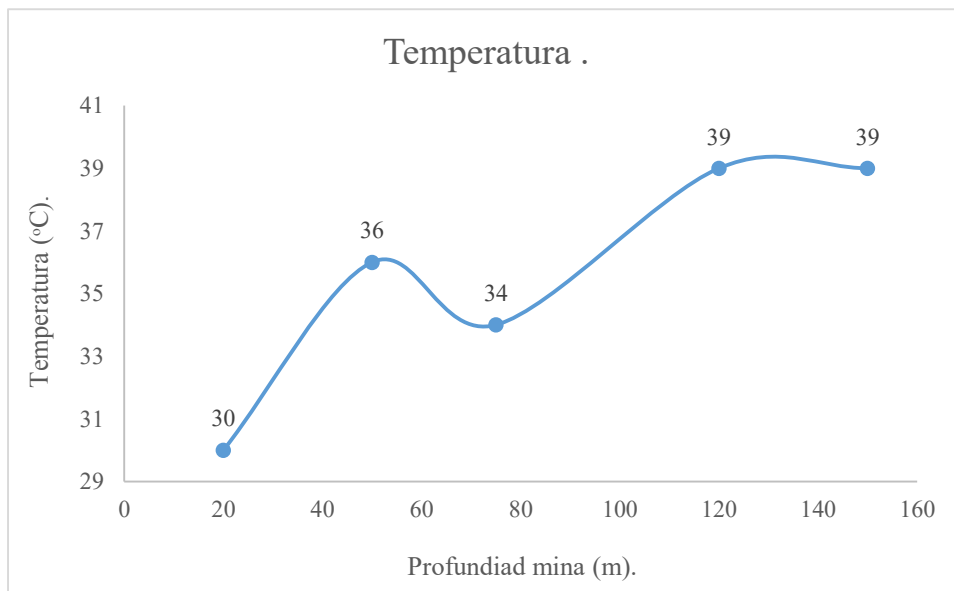


Figura 39. Contorno de temperatura con extracción utilizando el modelo K – KL omega.

### 3.2.1.3. Modelo Reynolds Stress.

En la figura 40 se muestra el perfil de temperatura total en diferentes puntos de la mina subterránea. En la figura se puede observar los cambios de temperatura como lo es a una distancia de 20m donde se tienen una temperatura de 30°C; a los 50m la temperatura aumenta dando un valor de 36°C; con relación a una distancia de 75m la temperatura disminuye 2°C; posteriormente a los 120m el comportamiento de la temperatura tiende a subir (39°C); con respecto a la distancia de 150m se mantiene la misma temperatura que en los 120m.



**Figura 40. Perfil temperatura con extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.**

En la figura 41 se muestra el contorno de temperatura utilizando el método Reynolds Stress donde se observa los cambios de temperatura en la mina subterránea. Las tres distancias donde se ve la diferencia de temperaturas son: a los 20m donde se tiene la temperatura menor de 30°C, a los 50m la temperatura es de 34°C y finalmente a una distancia de 150 la temperatura registrada es de 39°C.

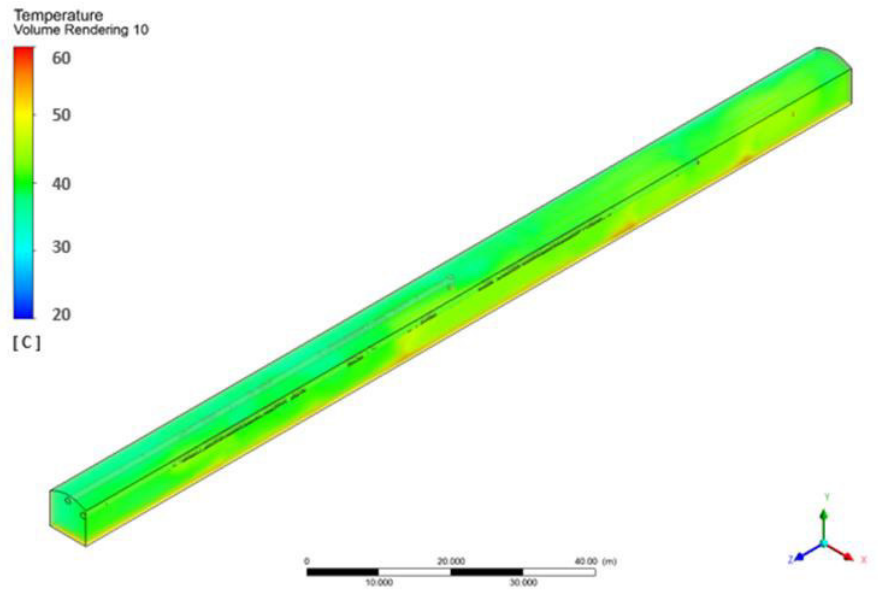
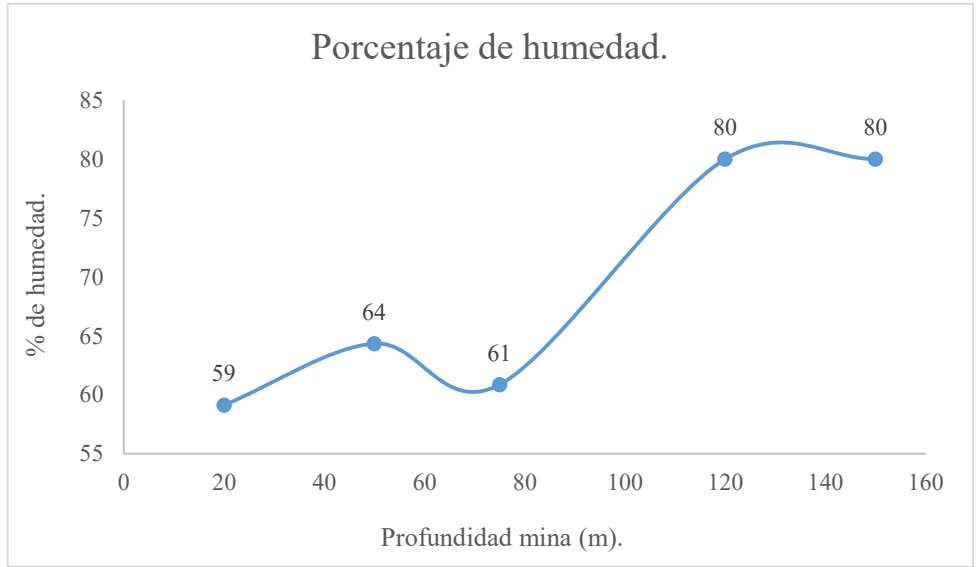


Figura 41. Contorno de temperatura con extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

### 3.2.2. Perfiles y contornos de humedad.

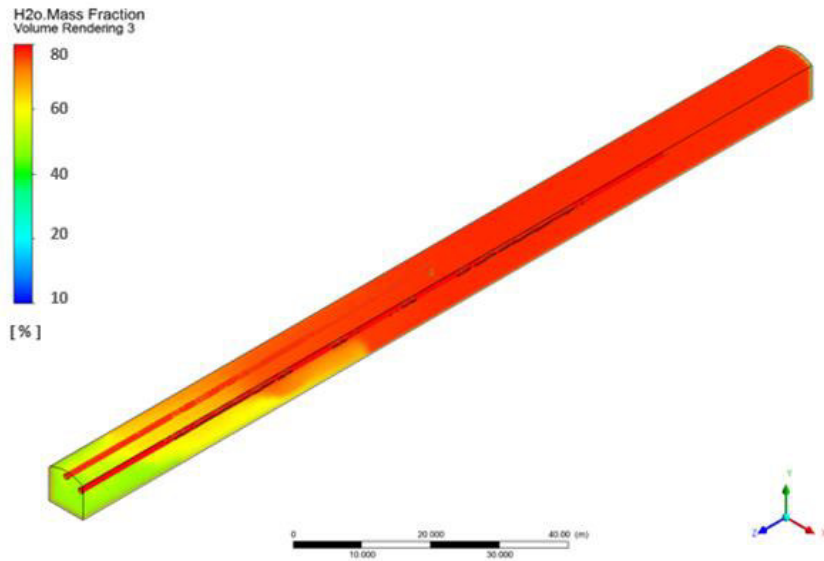
#### 3.2.2.1. Modelo KL – Épsilon estándar.

En la figura 42 se muestra el perfil de humedad en la mina subterránea implementando un sistema de ventilación, donde se observa los cambios de humedad, así como su comportamiento. El porcentaje de humedad mínimo que se tiene (59%) es a una distancia de 20m; posterior la humedad aumenta al 64% a una distancia de 50m de la entrada de la mina; con relación a una distancia de 75m la humedad disminuye el 3%; a una distancia de 150m la humedad es del 80%; en la frente de la mina, correspondiente a los 150m el porcentaje de humedad se mantienen constante.



**Figura 42.** Perfil de humedad con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

En la figura 43 se observa la variación en el porcentaje de humedad mediante la implementación de un circuito de ventilación, donde se muestra que la humedad tiende a disminuir considerablemente a partir de los 75m donde se encuentra el extractor. Al ver este contorno se puede deducir que el extractor está realizando la función (generando un circuito de ventilación) y por consiguiente disminuyendo la cantidad de humedad en la mina.



**Figura 43.** Contorno de humedad con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

### 3.2.2.2. Modelo K – KL Omega.

La figura 44 presenta la variación en el porcentaje de humedad utilizando en el modelo K – KL Omega, donde se muestra la relación que existe entre la longitud de la mina y el porcentaje de humedad, ya que, entre más distancia se tiene la humedad es mayor. A una distancia de 20m se tienen una humedad del 57%; la cual aumenta 2% a 50m; posteriormente a una distancia de 75m la humedad disminuye dando un valor de 56%; para la distancia de 120m la temperatura aumenta considerablemente (77%); el último cambio en el porcentaje de humedad se presenta a los 150m (79%).



Figura 44. Perfil de humead con extracción utilizando el modelo K – KL omega.

En la figura 45 se muestra el contorno de humedad con la implementación de un sistema de ventilación, en él se observa que a partir del centro de la mina subterránea (75m) los cambios de humedad son más notorios, ya que estos disminuyen considerablemente de tener 77% de humedad esta baja al 57%

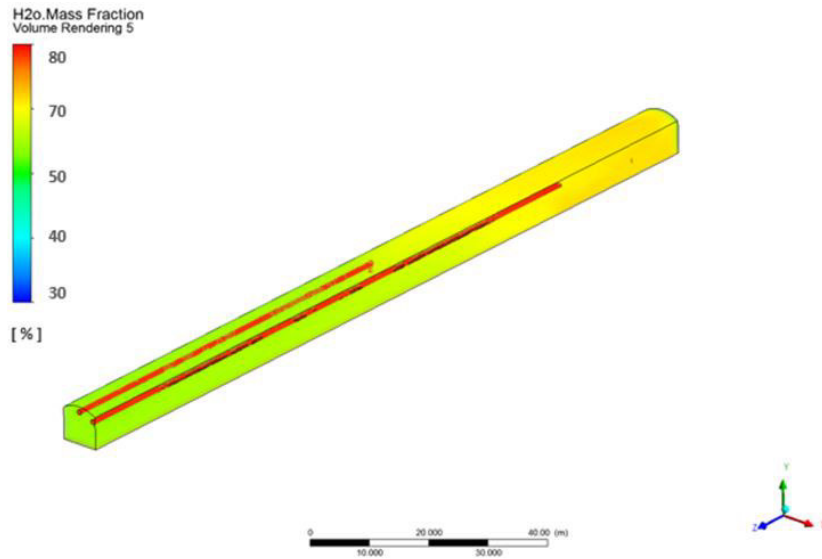
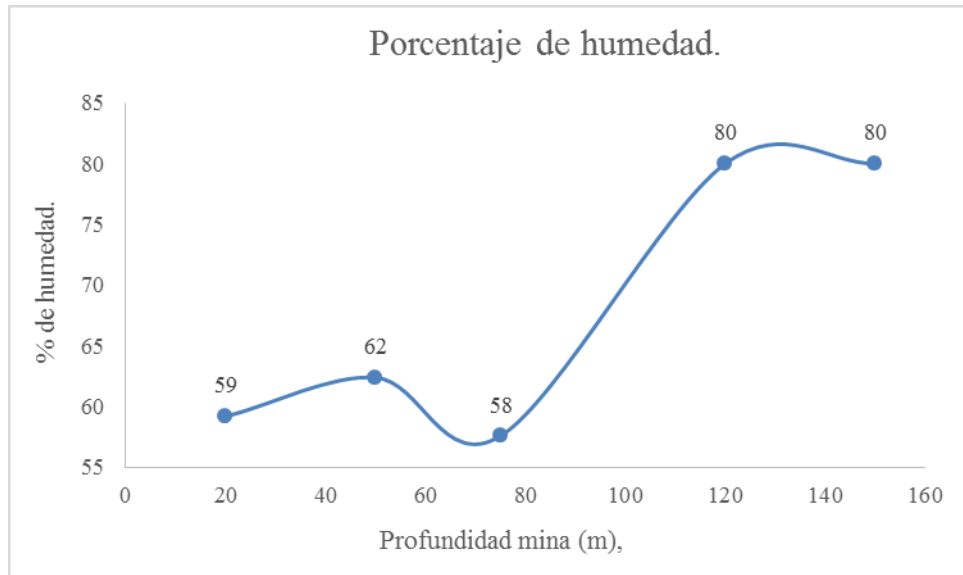


Figura 45. Contorno de humedad con extracción utilizando el modelo K – KL omega.

### 3.2.2.3. Modelo Reynolds Stress.

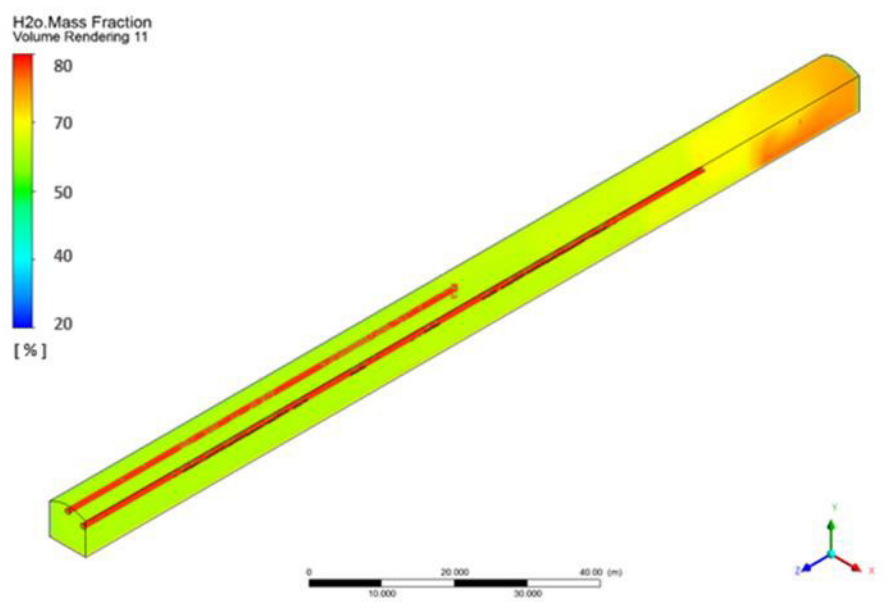
La figura 46 muestra el perfil de humedad mediante la aplicación de un circuito de ventilación. En la figura se puede observar los diferentes porcentajes que se presentan en la mina, tales como: a los 20m se tiene una humedad de 59%; en relación a la distancia de 50m el porcentaje de humedad aumenta al 62%; en la parte media de la longitud total de la mina la humedad tiende a disminuir (58%) debido al sistema de ventilación que se está llevando a cabo; a una distancia de 120m la humedad presenta un valor del 80% el cual se mantiene constante hasta los 150m.





**Figura 46. Perfil de humedad con extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.**

El contorno muestra los cambios de humedad generados en la simulación, los cuales van desde el 59% (entrada de la mina) tonalidad verdosa hasta el 80% de humedad el cual se observa mediante el color anaranjado. La variación que se tiene en el contenido de humedad en las diferentes distancias como (figura 47).



**Figura 47. Contorno de humedad con extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.**

### 3.2.3. Perfiles y contornos de monóxido de carbono (CO).

#### 3.2.3.1. Modelo KL – Épsilon estándar.

En la figura 48 se muestra el perfil de monóxido de carbono, en el cual se puede observar el comportamiento que tienen a lo largo de mina subterránea (150m) cuando se le aplica un circuito de ventilación, en los primeros 20m se registra una concentración de CO de 49.4 ppm, la cual se mantiene hasta los 50m; a la distancia de 75m la concentración tiende a disminuir considerablemente hasta las 48.8 ppm; dicha concentración tiende a subir a una distancia de 120m la cual se mantiene constante hasta los 150m dando un valor de 49.6 ppm. Estos registros indican al suministrar la cantidad de aire fresco manteniendo el flujo constante, la concentración del CO será menor. Como se puede observar que al aplicar este modelo de masa y energía se tiene que la concentración de CO llega a niveles por debajo de la NOM-010-STPS-1999 la cual indica que los límites máximos permisibles de exposición de CO en una jornada de trabajo de 8hrs es de 50 ppm.

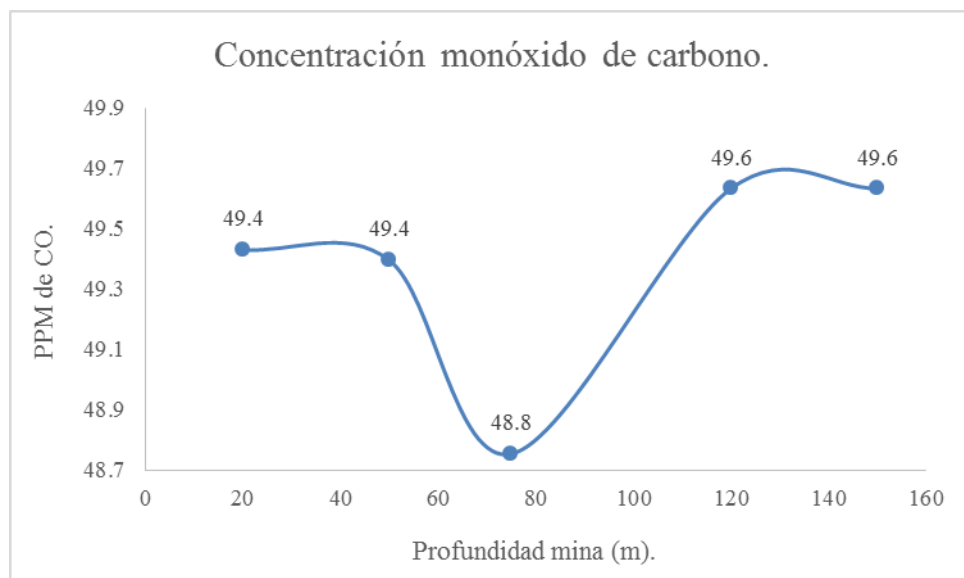


Figura 48. Perfil de monóxido de carbono con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

El contorno muestra la concentración de monóxido de carbono generado durante la simulación en un periodo de durante 500s con la aplicación de un modelo de ventilación, esta figura muestra que a partir de la entrada de la mina hasta los 50m se mantiene la misma concentración de CO, la cual tiende a disminuir en la parte media de la longitud total de la

mina (48.8 ppm). En los últimos metros la longitud la concentración aumenta a 49.6 ppm lo cual se puede observar con la tonalidad que presenta la figura 49.

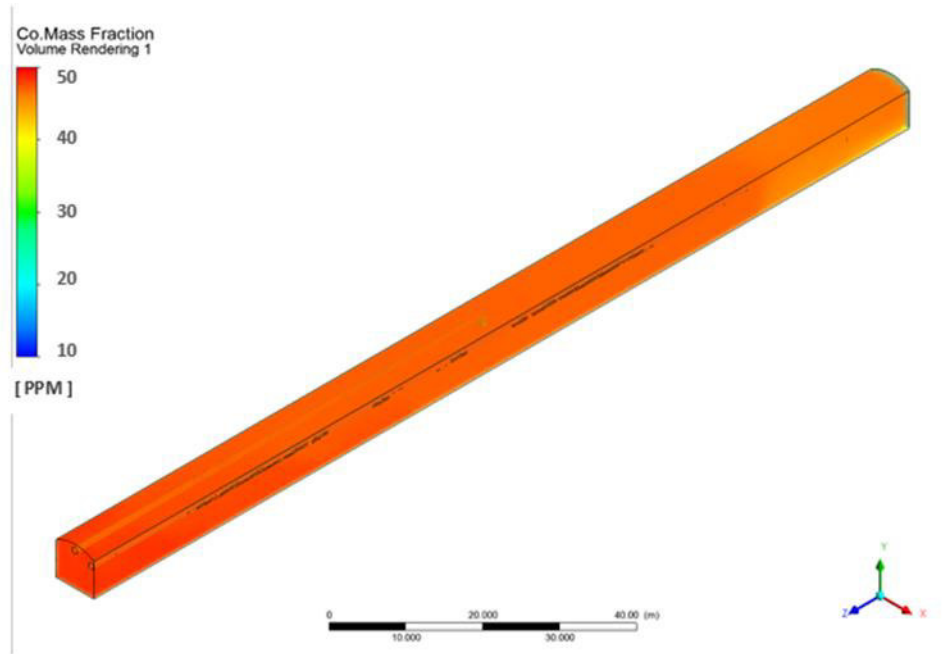
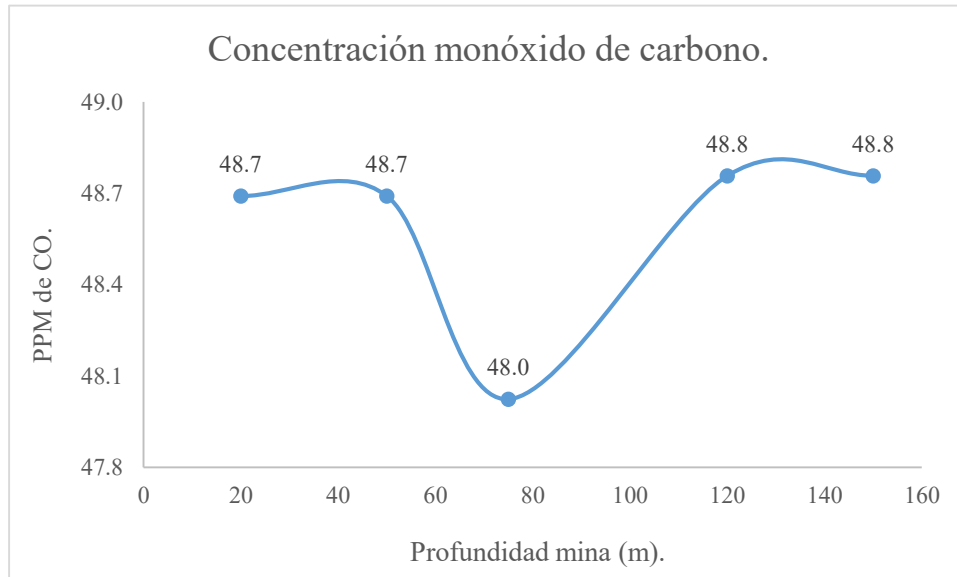


Figura 49. Contorno de monóxido de carbono con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

### 3.2.3.2. Modelo K – KL Omega.

La figura 50 muestra el perfil de monóxido de carbono, en el cual se puede observar la concentración de mismo, así como su comportamiento. En dicha figura se puede notar que a una distancia de 20m la concentración de CO es de 48.7 ppm y esta se mantiene hasta los 50m ; correspondiendo a la distancia central (75m) se registra una concentración de 48 ppm debido a la extracción que se está llevando a cabo; posteriormente a la distancia 120m se observa una concentración de 48.8 ppm; y finalmente para la distancia correspondiente al frente de mina (150m) la concentración se mantiene constante, ya que ahí es donde se encuentra la maquinaria de trabajo ( generación de los gases de combustión incompleta).

Del mismo modo que en el sistema anterior se puede observar que las concentraciones de CO registradas están por debajo de los límites permisibles en la NOM-010-STPS-1990.



**Figura 50. Perfil de monóxido de carbono con extracción utilizando el modelo K – KL omega.**

En la figura 51 se puede percibir el comportamiento del monóxido de carbono durante la simulación de 500s, el cual tiende a descender a partir del frente de mina hacia la entrada de. En la parte media de la longitud total donde se encuentra el extractor, es el punto donde se presenta una menor concentración de CO (48 ppm), por lo que se puede deducir que la implementación de un circuito de ventilación disminuye las concentraciones del gas, en el frente de mina la concentración es mayor que en los otros puntos (20m, 50m y 75m).

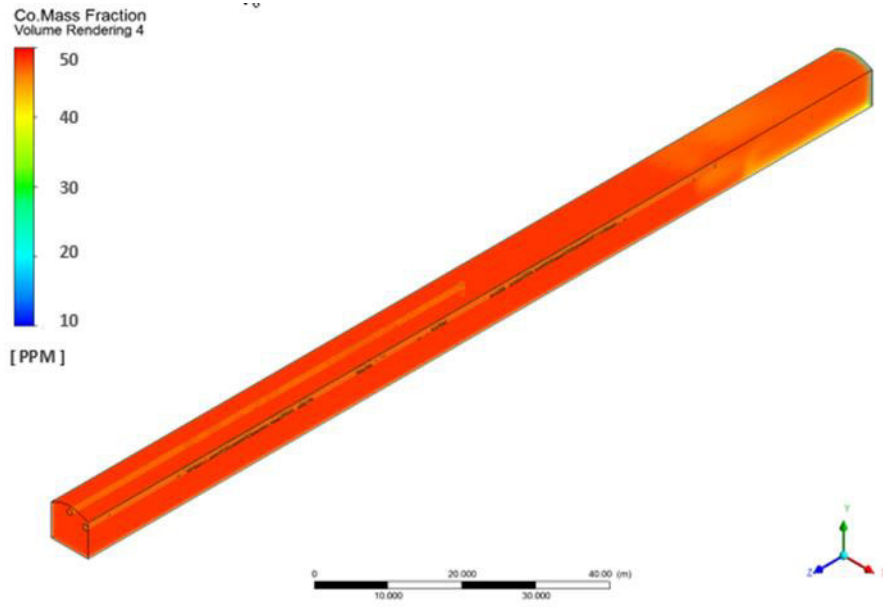


Figura 51. Contorno de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo K – KL omega.

### 3.2.3.3. Modelo Reynolds Stress.

En la figura 52 se muestra el perfil de monóxido de carbono en mina subterránea con la aplicación del sistema de ventilación, en la figura se observa que en los primeros 20m de la concentración de CO es de 48.8 ppm y esta aumenta 0.1 ppm a los 50m de distancia; a la distancia de 75m la concentración disminuye dando un registro de 48 PPM; con respecto a la distancia 120m se observa que la concentración de CO aumenta a 49.4 ppm; lo que respecta a los 150m la concentración se mantiene. Al igual que en los modelos anteriores se observa que las concentraciones registradas a lo largo de la obra de desarrollo en mina subterránea están por debajo de lo establecido en la NOM-010-STPS-199.

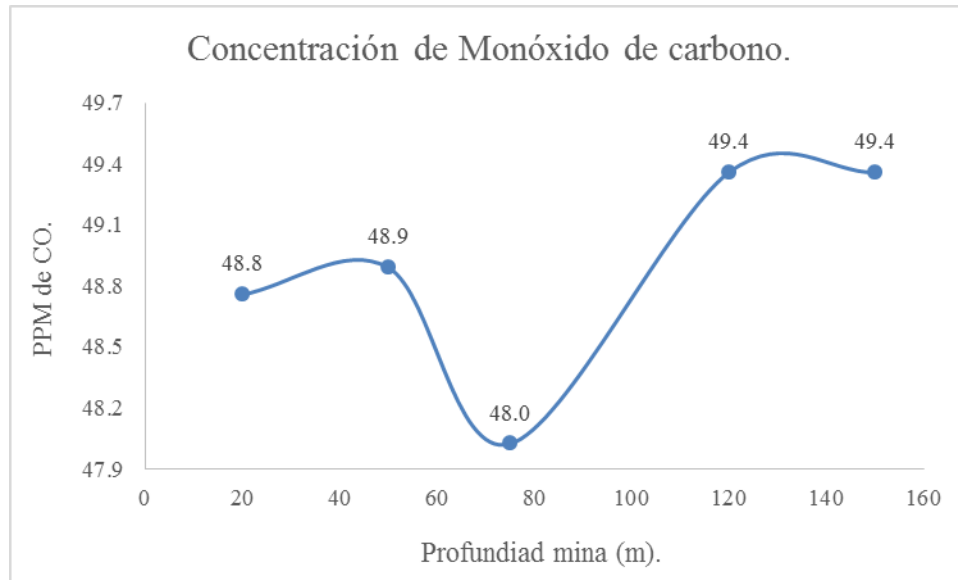


Figura 52. Perfil de monóxido de carbono sin extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

La figura 53 muestra el contorno con el comportamiento del monóxido de carbono en diferentes puntos a los de la longitud total de la mina subterránea, mediante la tonalidad del contorno se observa que la mayor concentración del CO se registra en la frente de la mina y esta tiende a disminuir hasta los 20m donde se tiene el primer registro de CO

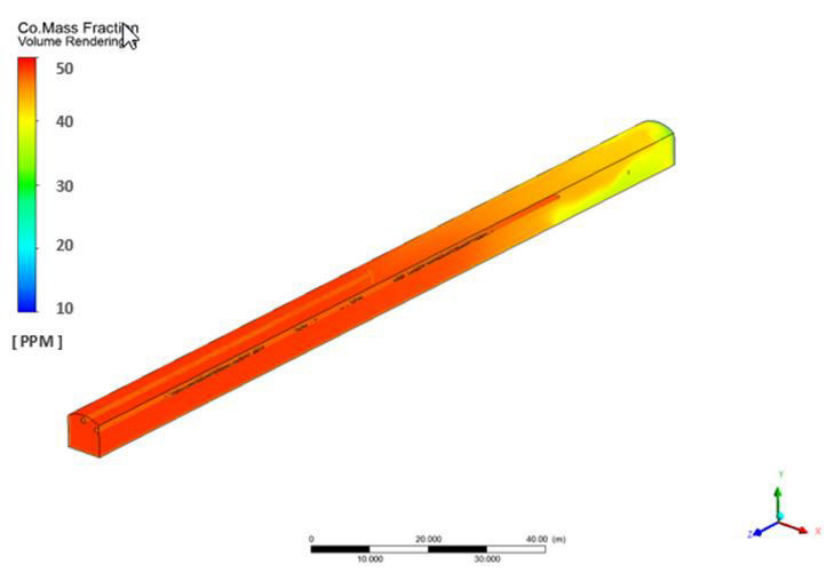


Figura 53. Contorno de monóxido de carbono con extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

### 3.2.4. Perfiles y contornos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

#### 3.2.4.1. Modelo KL – Épsilon estándar.

En la figura 54 se muestra el perfil de dióxido de carbono en mina subterránea con la implementación de un modelo de ventilación, en la cual se puede observar la tendencia y concentración del CO<sub>2</sub>, a una distancia de 20 se tiene una concentración de 4390 ppm; con relación a una distancia de 50m se tienen una concentración de 4623 ppm; en la parte central de la longitud total de la mina la concentración de disminuye 2584 ppm debido a la extracción que se está realizando en ese punto; en la distancia que corresponde a los 120m la concentración registrada es de 4759 ppm; por ultimo a los 150m se tienen un aumento en la concentración anterior a 4985 ppm. Los resultados obtenidos de CO<sub>2</sub> indican que las concentraciones se encuentran por debajo de la concentración establecidas en la NOM-010-STPS-199 correspondiente a 5000PPM.

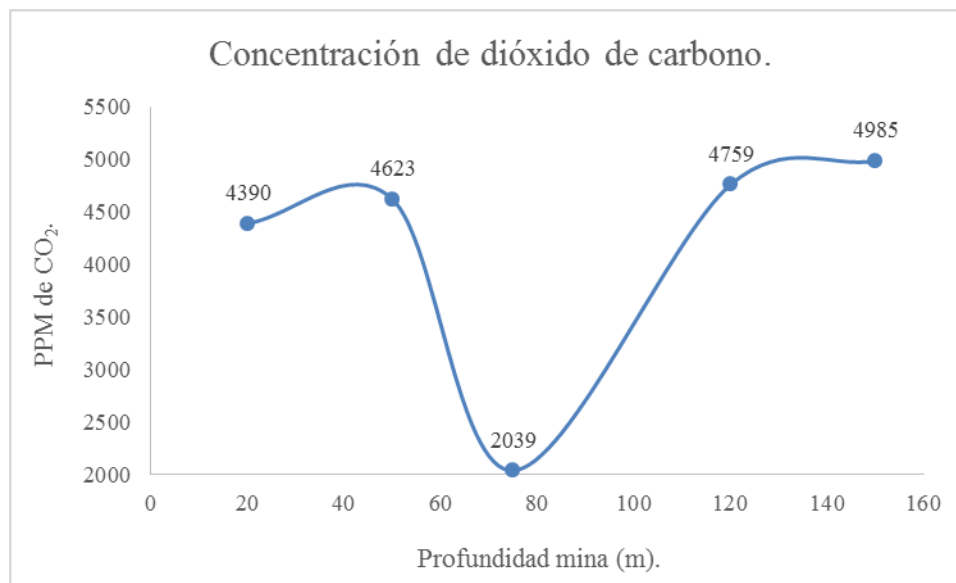


Figura 54. Perfil de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

En el siguiente contornó (figura 55) se observa la variación en la concentración del CO<sub>2</sub> en los diferentes puntos de la mina subterránea mediante la implementación del modelo KL – épsilon estándar, donde la concentración mínima es de 4390 ppm a una distancia de 20m y la concentración máxima es de 4985 ppm registrada a los 150m.

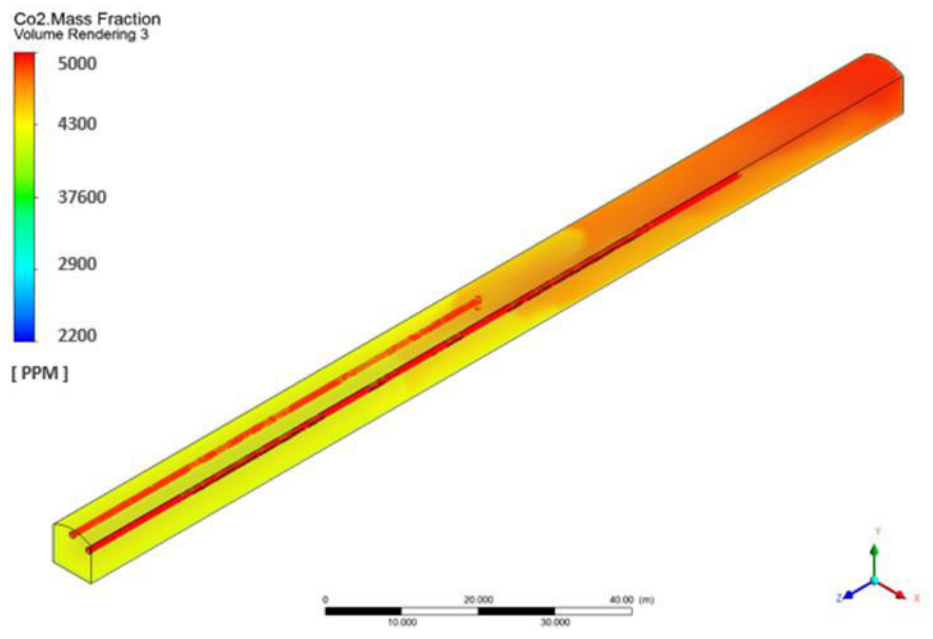


Figura 55. Contorno de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo KL – Épsilon estándar.

### 3.2.4.2. Modelo K – KL Omega.

La figura 56 muestra los resultados de concentración de dióxido de carbono obtenidos en la simulación realizada mediante la aplicación de un circuito de ventilación, En ella se observa a una distancia de 20m se tienen una concentración de 3000 ppm, mientras que a los 50m de distancia la concentración aumenta 150 ppm, esta concentración disminuye considerablemente a la distancia de 75m (1785 ppm) ya que en este punto se encuentra el extractor; con relación a la distancia de 120m la concentración es de 4200 ppm, la cual tiende en aumento hasta llegar a una concentración de 4515 ppm (frente de la mina). Así como los resultados obtenidos en el modelo anterior las concentraciones registradas con la aplicación de este modelo se encuentran por del máximo permisible de CO<sub>2</sub> establecido en la NOM-010-STPS-1999.



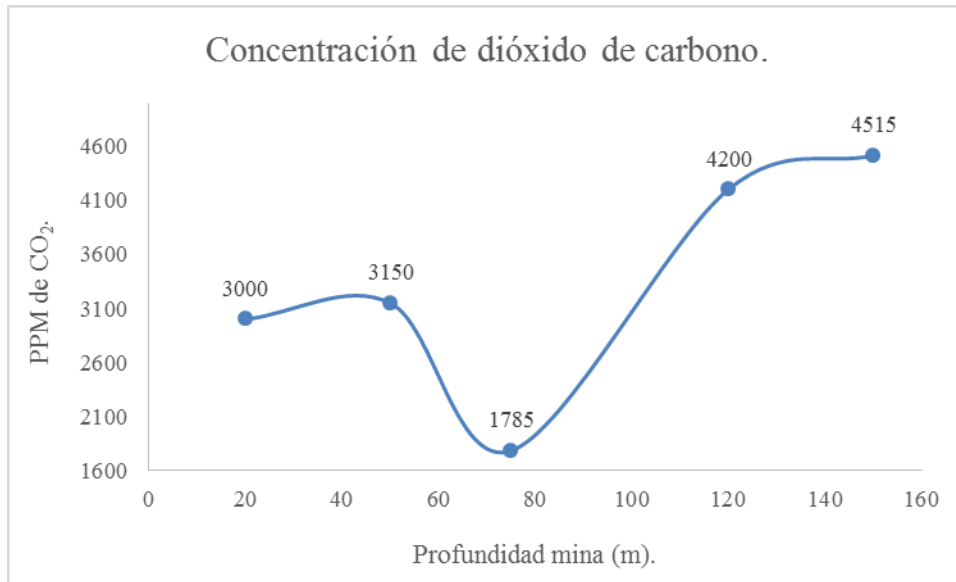


Figura 56. Perfil de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo K – KL omega.

En la figura 57 se muestra el contorno CO<sub>2</sub> donde se observa su comportamiento, así como las diferentes concentraciones del mismo. La variación en la concentración del CO<sub>2</sub> más representativa en la mina subterránea se muestra en el tramo de los 50m a los 75m donde al tener 3150 ppm esta disminuye 1365 ppm.

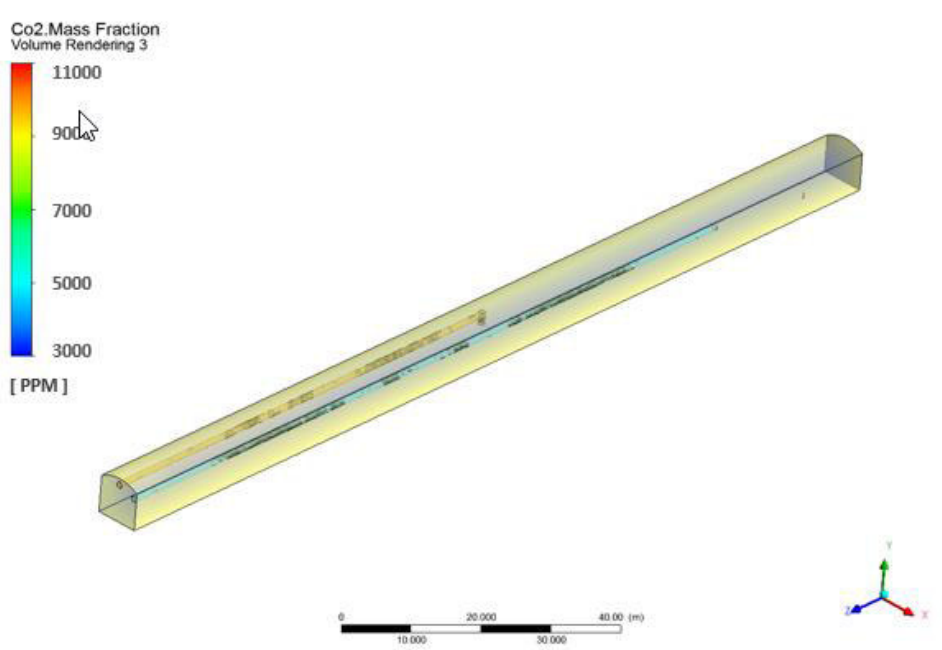


Figura 57. Contorno de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo K – KL omega.

### 3.2.4.3. Modelo Reynolds Stress.

En la figura 58 se observa el perfil de dióxido de carbono, así como su comportamiento a lo largo de la longitud total de la mina subterránea. La figura muestra que la concentración máxima de CO<sub>2</sub> se registra a una distancia de 150m, mientras que la concentración mínima de CO<sub>2</sub> se encuentra a los 75m de la entrada de la mina; en las distancias de 20m y 50m la concentración de CO<sub>2</sub> se muestra en un rango de 4800 y 4700 ppm. Los resultados registrados concuerdan con la posición del extractor (75m) así como de la maquinaria de trabajo (general los gases tóxicos). Dichos resultados muestran del mismo modo que en los modelos anteriores que las concentraciones registradas a lo largo de la obra de desarrollo en mina subterránea se encuentran por debajo de lo establecido en la NOM-010-STPS-1999.

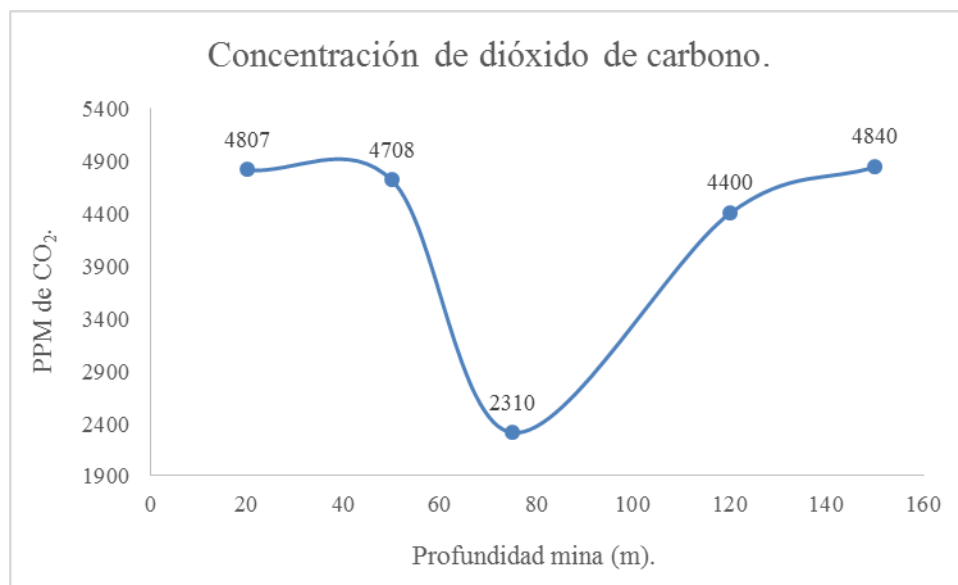


Figura 58. Perfil de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

En la figura 59 se observa la variación en los resultados que se tienen en la concentración del CO<sub>2</sub>. En contorno muestra que a partir de la distancia donde se colocó el extractor la concentración de CO<sub>2</sub> tiende a disminuir debido a que este está generando el circuito de ventilación necesario para que las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el interior de la mina subterránea disminuyan.

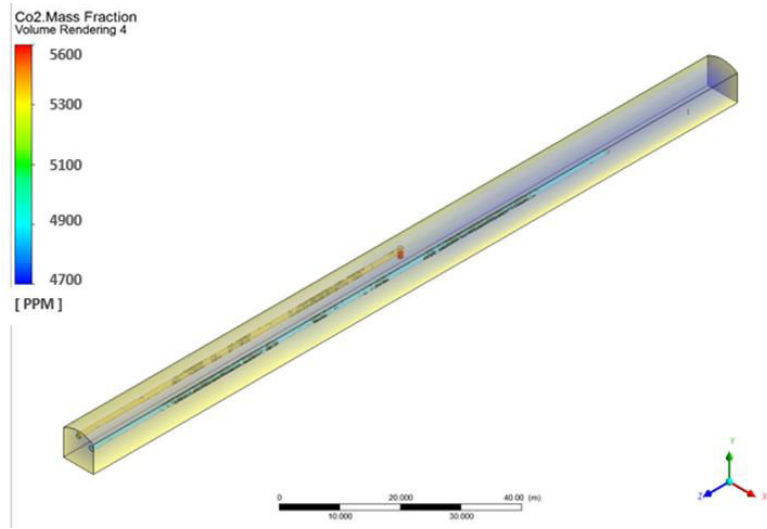


Figura 59. Contorno de dióxido de carbono con extracción utilizando el modelo Reynolds Stress.

### 3.3. Análisis comparativo de los tres modelos utilizados en la simulación para CO, CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura con la extracción.

#### 3.3.1. Análisis de los tres modelos para la temperatura.

En la figura 60 se muestra la comparación de temperatura con la implementación de un circuito de ventilación en la obra de desarrollo de la mina subterránea de los tres modelos utilizados en la simulación vs el modelo que registró mayores temperaturas sin la extracción. En la figura se puede observar que a la distancia de 20m se tiene una disminución de temperatura en 1°C, 1°C, 2°C para el modelo Reynolds Strees, Epsilon-Estandar, K-KL Omega, respectivamente con respecto al modelo sin extracción; a la distancia de 75m (posición del extractor) la temperatura disminuye 3°C, 4°C, 10°C para los modelos Reynolds Strees, Epsilon-Estandar, K-KL Omega (respectivamente); correspondiendo a la distancia de 150m donde se tiene la máxima temperatura, la cual tiende a disminuir 1°C, 2°C, 3°C respectivamente con respecto al modelo que registro la máxima temperatura sin la implementación de un circuito de ventilación. Los resultados obtenidos muestran que el modelo K-KL Omega es el que presenta menor temperatura a lo largo de la obra de desarrollo de la mina subterránea con la implementación del circuito de ventilación.

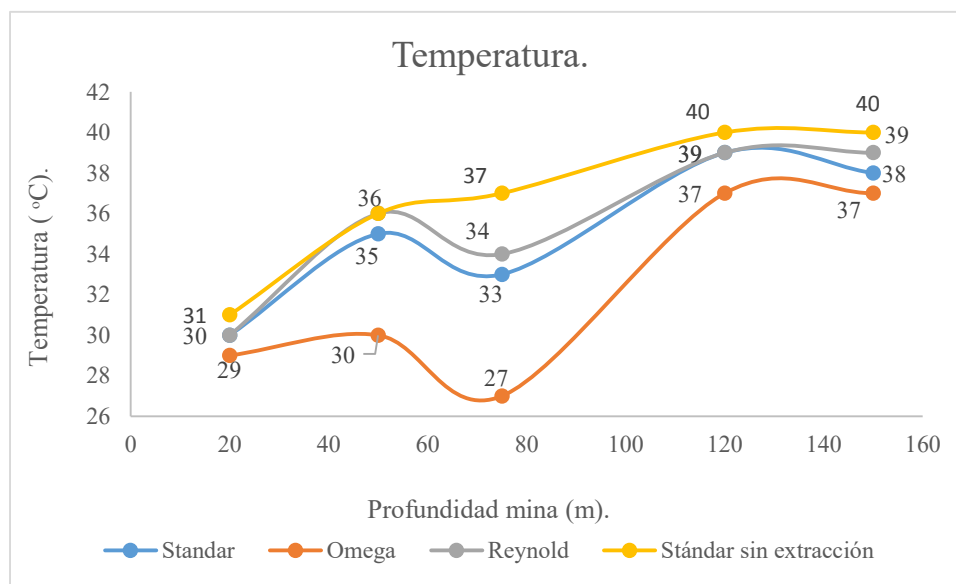


Figura 60. Análisis de los tres modelos en la simulación para la temperatura. .

### 3.3.2. Análisis de los tres modelos para la humedad.

La figura 61 muestra la comparación del porcentaje de humedad obtenida en los tres modelos utilizados en la simulación con la aplicación de un circuito de ventilación vs el modelo que registró mayores porcentajes de humedad sin la extracción. En la figura se observa que a una distancia de 20m el porcentaje de humedad disminuye 24%, 24%, 25% para el modelo Epsilon-Estandar, Reynolds Strees, K-KL Omega, respectivamente con respecto al modelo sin extracción; correspondiendo a la distancia de 75m (posición del extractor) la humedad se reduce al 61%, 58%, 56% en los modelos Epsilon-Estandar, Reynolds Strees, K-KL Omega respectivamente; con relación a la distancia de 150m donde se registra el mayor porcentaje de humedad, la cual tiende a disminuir 5%, 5%, 6% respectivamente a Epsilon-Estandar, Reynolds Strees, K-KL Omega con respecto al modelo que registro el máximo porcentaje de humedad sin la implementación de un circuito de ventilación. Los datos obtenidos indican que mediante la aplicación del modelo K-KL Omega para el circuito de ventilación los resultados obtenidos son los de menor porcentaje de humedad, debido a que la extracción realizada son las adecuadas para que el aire fresco ventile la obra de desarrollo de la mina subterránea.

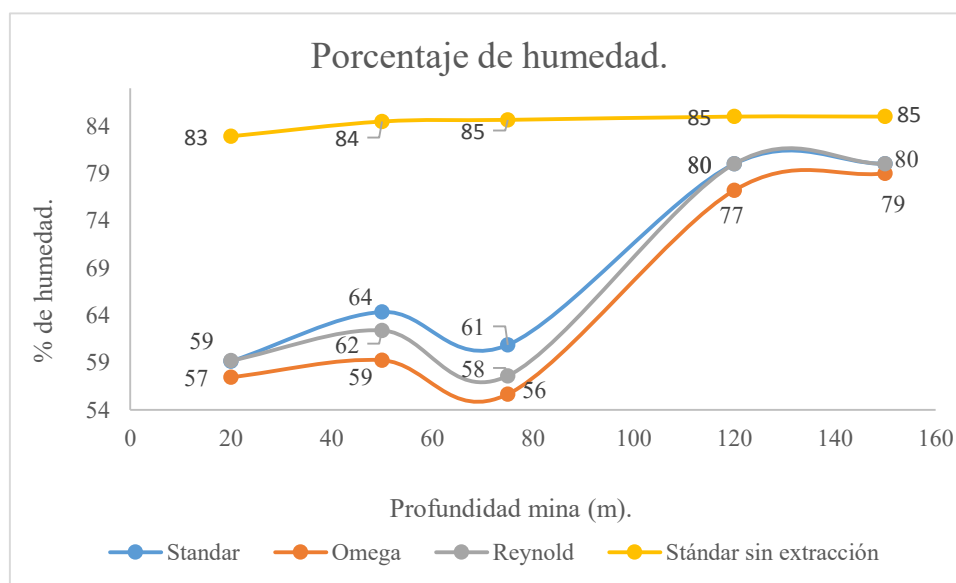


Figura 61. Análisis con los tres modelos utilizados en la simulación para la humedad.

### 3.3.3. Análisis de los tres modelos para el CO.

En la figura 62 se muestra la comparación de los resultados de concentración de monóxido de carbono obtenidos en la simulación con la implementación de un modelo de ventilación vs el modelo sin la extracción que registro la mayor concentración de CO en la obra de desarrollo de la mina subterránea. La figura muestra que la concentración de CO en los primeros 20m de distancia es 18.6 ppm, 19.2 ppm, 19.3 ppm menor respectivamente a los modelos Epsilon-Estandar, Reynolds Strees, K-KL Omega en relación al modelo que registro la mayor concentración de CO sin la extracción; a la distancia de 75m (Posición del extractor) el valor de la concentración disminuye 19.3 ppm, 20.1 ppm, 20.1 ppm respectivamente con respecto a los resultados obtenidos con el modelo sin aplicación de un circuito de ventilación; los registros máximos de concentración de CO obtenidos en el frente de la obra de desarrollo (150m) en los modelos Epsilon-Estandar, Reynolds Strees, K-KL Omega son 18.6 ppm, 18.9 ppm, 19.5 ppm menor que las obtenidas en el modelo sin la extracción. Estos resultados muestran que con el modelo K-KL Omega las concentraciones de CO son menores y por consiguiente genera las condiciones adecuadas en la ventilación de la obra de desarrollo de la mina subterránea.

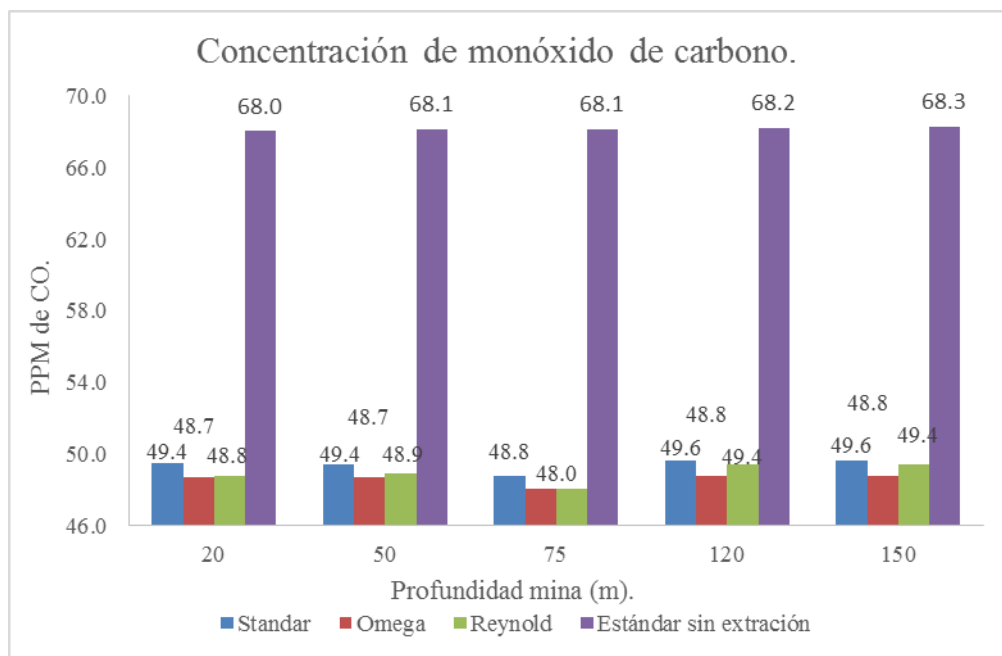


Figura 62. Análisis con los tres modelos utilizados en la simulación para la concentración de CO.

### 3.3.4. Análisis de los tres modelos para el CO<sub>2</sub>.

La figura 63 muestra la comparación de la concentración de dióxido de carbono con los tres modelos implementados para la ventilación vs los resultados del modelo que presentó las mayores concentraciones sin la extracción. A una distancia de 20m la concentración de CO<sub>2</sub> disminuye 419 ppm, 836 ppm, 2226 ppm en los modelos Reynolds Stress, Epsilon-Estandar, K-KL Omega, respectivamente con relación al modelo que genero las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> sin la extracción; correspondiendo a la distancia de 75m la concentración que se tienen es 2925 ppm, 3196 ppm, 3450 ppm respectivamente a los modelos Reynolds Stress, Epsilon-Estandar, K-KL Omega con respecto a las concentraciones obtenidas en el modelo sin la extracción; a los 150m de distancia las concentraciones disminuyen a 253 ppm, 398 ppm, 723 ppm respectivamente a los modelos Epsilon-Estandar, Reynolds Stress, K-KL Omega, con relación a las concentraciones máximas registradas en el modelo sin la extracción. Con los resultados obtenidos de la concentración de CO<sub>2</sub> en los diferentes puntos de la mina subterránea con los tres modelos aplicados; el que mostro menor presencia de CO<sub>2</sub> con la extracción es el modelo K-KL Omega.

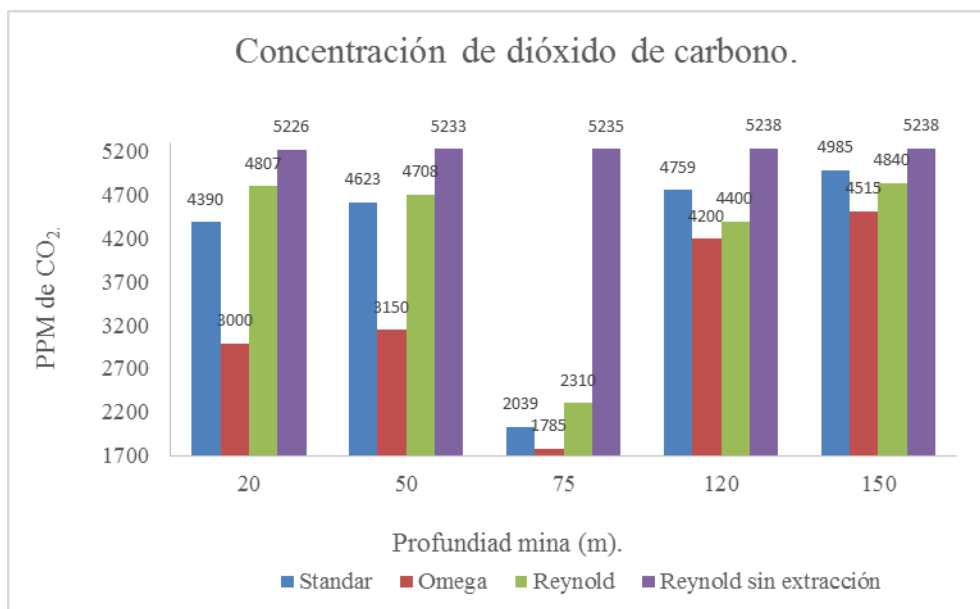


Figura 63. Análisis de los tres modelos utilizados en la simulación para la concentración de CO<sub>2</sub>.

Con la simulación de los tres modelos para el circuito de ventilación en la obra de desarrollo de la mina subterránea se obtuvieron resultados con variaciones significativas de temperatura, humedad, CO y CO<sub>2</sub> para cada uno de ellos a lo largo de la longitud total de la misma; donde los resultados más representativos en cuanto a su disminución se ven reflejada en la posición donde se encontraba el extractor, debido a que este está funcionando correctamente extrayendo los gases generados por la combustión y por consiguiente disminuyendo la cantidad de humedad y temperatura.

De los resultados obtenidos con cada uno de los modelos, los que menor cantidad de concentración (CO y CO<sub>2</sub>) así como de temperatura y humedad se presentaron después de las simulaciones fue mediante la implementación del modelo K-KL Omega. Los comportamientos en cada uno de los perfiles muestran que con este modelo en el caso de los gases estos tienden a disminuir a lo largo de la longitud total de la obra de desarrollo dando concentraciones mínimas y máximas inferiores a las obtenidas por los otros modelos, para el caso de la temperatura los resultados obtenidos por los modelos ( Epsilon-Estandar, Reynolds Stress) presentan similitudes en cada uno de los puntos en los que se tomaron registro a comparación de los resultados obtenidos con el modelo K-KL Omega los cuales son muy diferentes a los anteriores (inferiores). Para la humedad los resultados presentan pequeñas diferencias en los tres modelos, pero aun así con el modelo K-KL Omega el porcentaje de húmeda presente en el interior de la obra de desarrollo está por debajo de los otros modelos.

Por lo antes mencionado se determina que al aplicar el modelo K-KL Omega en las simulaciones para la ventilación en minas subterráneas podría generar un buen circuito de ventilación, dando como resultado las condiciones óptimas para que los trabajadores realicen sus actividades diariamente.



# Capítulo IV

## Conclusión

Con la aplicación de los tres modelos utilizados (Epsilon-Estandar, K-KL Omega, Reynolds Stress) en la simulación de ventilación de 500s para cada uno de los factores (temperatura, humedad, CO, CO<sub>2</sub>) que intervienen diariamente en los trabajos realizados en las diferentes obras de desarrollo en mina subterránea, se obtuvieron resultados por debajo de los máximos permisibles establecidos dentro de las normas (NOM-015-STPS-1993, NOM-010-STPS-1999, NOM-121-STPS-1996) con cada uno de los modelos, los cuales presentan una gran diferencia entre los registros máximos y mínimos con la simulaciones sin la implementación de un circuito de ventilación. Estos resultados muestran que los tres modelos aplicados en las simulaciones serian una buena opción para ventilar un área determinada en minas subterránea. Sin embargo, al implementar los modelos Epsilon-Estandar y Reynolds Stress 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, CO<sub>2</sub>) analizado.

En cambio, si se aplica el modelo K-KL Omega en una ventilación las concentraciones de los gases presentes en las obras de trabajo, así como la temperatura y humedad estarían por debajo de lo establecido en las normas considerando un factor de seguridad para cada una de estas, lo cual se muestra en los resultados obtenidos. Así mismo este método se podría adaptar para cualquier tipo de obra que necesite un circuito de ventilación tomando en cuenta las características del sitio (elevación, temperatura, humedad, obras de ventilación etc.). También se podría seleccionar el tipo de ventilador que se necesita para que la obra de desarrollo este ventilada, así como la posición del mismo para generar mejores condiciones de trabajo y por consiguiente determinar el tiempo que se necesita para que el área este ventilada (disminuyendo los tiempos muertos). Este modelo presenta una posibilidad de ahorro en cuanto a la energía eléctrica consumida y por consiguiente se economizarán los procesos de ventilación.

#### **4.1. Trabajo a futuro.**

Debido a la importancia que representa este trabajo en la minería subterránea se debe tener en cuenta el proseguir con el desarrollo de este tópico de la ingeniería de minas, lo anterior con la finalidad de encontrar soluciones a la problemática que presentan las empresas mineras en el área de ventilación, por lo que debemos pensar en continuar con esta investigación y posteriormente proseguir en la validación del modelo propuesto mediante mediciones de los parámetros de interés (temperatura, humedad, concentraciones de CO y CO<sub>2</sub>) en casos de estudios reales.

Y por consiguiente llevar a cabo el desarrollo de proyecciones en el modelo ya previamente validado en función del comportamiento del mismo en diversas condiciones que se puedan presentar en las diferentes obras de la minería subterránea.

Lo antes mencionado se puede lograr mediante la implementación de técnicas en el diseño de sistemas de ventilaciones a partir de proyecciones de este modelo lo que permitirá proveer sistemas de ventilación eficientes, los cuales representan una considerable reducción de consumo energético así como la disminución de tiempos muertos entre otros factores de interés para la industria minera.

# Capítulo V

## Referencias y Bibliografía

- [1] Hartman Howard L. (1961) *“Mine Ventilation and Air Conditioning”*. Vanderbilt University. The Ronald Press Company.
- [2] Environmental Engineering in South African mines (1982). *“The Mine Ventilation Society of South African”*.
- [3] Hartman Howard l. (1992) *“SME Mining Engineering Handbook”*. 2nd edition Vol2.
- [4] HUstrulid, W., and Bullock, R. (2001) *“Underground Mining Methods”*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- [5] Jack de la Vergne. (2008). *“Hard Rock Miner’s Handbook”*. Stantec Consulting. Edmonton, Alberta, Canada. (Pag. 157- 165).
- [6] James R. Amstrong, and Raji Menon. (Sin ano) *“Minas Y Canteras”*. Industrias basadas en recursos Naturales. (Pag. 74).
- [7] Estudios Mineros de Peru. *“Manual de Minería”*. Libertad 114 – 3C, Miraflores, Lima – Perú. ([http://www.estudiosmineros.com/ManualMineria/Manual\\_Mineria.pdf](http://www.estudiosmineros.com/ManualMineria/Manual_Mineria.pdf)).
- [8] UPM. (2007). *“Diseno de Explotaciones e Infraestructuras Mineras Subterranas”*. Universidad Politecnica de Madrid. (Pag. 4 -6).
- [9] Juan Herrera Herbert. (2007). *“Elementos de Minería”*. Universidad Politecnica de Madrid. Edición Actualizada 2007. (Pag. 14- 16).
- [10] S. Borisov; M. Klóvov y B. Gornovéi. (1976). *“Labores Mineras”*. La ed. en esp. Moscú.
- [11] John Wiley and Sons. (1894). *“Ventilation of Mines”*.First Edition. J.T. Beard, C.E., E.M.
- [12] Quiceno Cristian and Molina Martín. (2011). *“Characterization of Ventilation Systems In Underground Mines”*. Ciencias de la Tierra. (Pag 73-74).
- [13] Quevedo Chanamé Carlos. (2013). *“Sistema de Ventilación de diez Kilometros del Túnel de Conducción de la Central Hidroeléctrica Huanza”*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. (Pag. 28 a 29).
- [14] Salazar Reynaldo. (1987). *“Estudio General de Ventilación de la Mina La Negra”*. Guanajuato, México. (Pag. 56-57).

- [15] Zitron. (2010 ). *“Ventilación de Minas”*. Gijon.
- [16] Novitzky, Alejandro. (1962). *“Ventilación de Minas”*. Buenos Aires – Yanque.
- [17] Rodríguez Delgado Víctor. *“Diseño del Sistema de Control para la Ventilación de una Mina Subterránea usando un Controlador AC800m”*. Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Mecánica. 2010.
- [18] Montan Consultng. (1975). *“Análisis de la Ventilación Principal y Auxiliar en las Minas de acerías Paz del Rio S.A., con Propuestas y Recomendaciones para su Mejoramiento y Control”*. Essen Alemania.
- [19] R. Shell. (2010). *“Combustión”*. Industrias I. Revisit Shell. ([http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/11\\_Apunte%20Combustion.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/11_Apunte%20Combustion.pdf))
- [20] I. Martínez. (1992). *“Termodinámica Básica y Aplicada”*. Universidad de Madrid. Editorial DOSSAT, S.A. (pág. 354 a 358).
- [21] Simón. J and Figueroa S. (2005). *“El proceso de Combustión en Motores de Combustión Interna”*. Consejo de Estudios De Posgrado. Universidad De Los Andes, Mérida, Venezuela.
- [22] Felgueroso Fernández, Luque Cabal José Manuel. (1971). *“Lecciones de Ventilación de Minas”*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo.
- [23] Ontiveros Ibarra Roberto, Elorza García Jaime, Márquez Gerardo. (2006). *“Estudios de Ingeniería en Minas para Planeación y Desarrollo del túnel vial Proyectoado en el Centro Histórico de la Ciudad de Guanajuato, México”*. (Pag. 177 – 182).
- [24] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2014). *“Ley Minera”*. Estados Unidos Mexicanos.
- [25] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1994). *“Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo”*. Estados Unidos Mexicanos. (<http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/n152.pdf>).
- [26] Normas Oficiales Mexicanas STPS. (1996). *“Norma Oficial Mexicana NOM-121-STPS-1996, Seguridad e Higiene para los trabajos que se realizan en Minas “*. Estados Unidos Mexicanos.
- [27] 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. (<http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-023.pdf>)
- [28] Normas Legales. (2010). *“Decreto Supremo que Aprueba el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional y otras Medidas Complementarias en Minería”*. Perú, Lima. (<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/LEGISLACION/2010/AGOSTO/DS%20055-2010--EM.pdf>).

- [29] Secretaría de Trabajo y Previsión Social. (1993). **“NORMA Oficial Mexicana NOM-015-STPS-2001, Condiciones Térmicas Elevadas o Abatidas-Condiciones de Seguridad e Higiene”**. Estados Unidos Mexicanos.
- [30] Pérez Quispe, V Roberto. (1987). **“Ventilación Minera”**. Universidad Nacional de Ingeniería – FIGMM.
- [31] B. E. Launder and D. B. Spalding. (1972). **“Lectures in Mathematical Models of Turbulence”**. Academic Press, London, England.
- [32] H. Tennekes, J.L. Lumley. (1994). **“A First Course in Turbulence”**. The MIT press, Cambridge, MA, USA.
- [33] ANSYS, Inc. (2013), **“ANSYS Fluent User's Guide”**. Canonsburg, PA, USA.
- [34] Sahas V. Patinar. (1980). **“Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”**, Taylor & Francis.
- [35] B. E. Launder and D. B. Spalding. (1972). **“Lectures in Mathematical Models of Turbulence”**. Academic Press, London, England.
- [36] D. C. Wilcox. (1998). **“Turbulence Modeling for CFD”**. DCW Industries, Inc., La Canadá, California.
- [37] N. Peters. (2000). **“Turbulent Combustion”**. Cambridge University Press, New York, NY.
- [38] J. Warnatz. (2000). **“Gas phase Combustion Chemistry”**. Gardiner, W.C.(Ed.), Springer Verlag, Heidelberg-Berlin.
- [39] Fluent Inc. (2006). **“FLUENT 6.3 Getting Started Guide”**. Reaction Design Inc. PathScale Corporation.
- [40] Release 12.0 © ANSYS, Inc. (2009). **“Transport Equations for the  $k$ - $k\ell$ - $\omega$  Model”**. All rights reserved. (<http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node71.htm>).
- [41] Herruzo García Juan. (2015). **“Diseño, Cálculo y Fabricación de un Sistema de Escape para Motor 250cc Monocilíndrico”**. Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación Universidad de Sevilla.
- [42] S. Sarkar and L. Balakrishnan. (1990). **“Application of a Reynolds-Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer”**. ICASE Report 90-18, NASA CR 182002.
- [43] Release 17.0 - © SAS IP, Inc. (Sin año). **“The Reynolds Stress Model”**. All rights reserved. ([https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/cfx\\_mod/i1346049.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/cfx_mod/i1346049.html)).

- [44] Ambaw A, Verboven P, Delele MA, Defraeye T , Tijskens E, Schenk A, Nicolai BM. (2013). ***“CFD Modelling of The 3D Spatial and Temporal Distribution of 1-Methylcyclopropene in a Fruit”***, Food Bioprocess Technology.
- [45] Richard Román. (Sin año). ***“Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) una Herramienta Poderosa para la Solución de Problemas Complejos de Fluidos”***. Universidad Autónoma de Narino.
- [46] Torano Javier, Gent M. (2011). ***“Auxiliary Ventilation in Mining Roadways Driven with Road Headers: Validated CFD Modelling of Dust Behavior”***. Tunneling and Underground Space Technology. All rights reserved.
- [47] Torano Javier, Menendez Mario. (2009). ***“Models of Methane Behavior in Auxiliary Ventilation of Underground Coal Mining”***. International Journal Coal Geology. All rights reserved.
- [48] SHEN Yun, WANG Hsin-ning. (2011). ***“Study and Application on Simulation and Optimization System for the Mine Ventilation Network”***. Sciverse Science Direct. , Jiangxi Ganzhou 341000, China.