

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería
Metalúrgica

Profesor Patrocinante:
Ramón Díaz Noriega

**MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN Y CONTROL DE
METANO CON EL SIMULADOR VENTSIM™ EN LA MINA
SUBTERRÁNEA DE CARBÓN FEZMINE, POLONIA**



Nicolás Alexander Ramírez González
Claudio Fernando Fuentes Ortega

Informe de Memoria de Título para optar al título de
Ingeniero Civil de Minas

Enero, 2019

AGRADECIMIENTOS

Como equipo de trabajo nos gustaría agradecer a los académicos de la Universidad AGH de Ciencias y Tecnología de Polonia, Dariusz Obracaj y Marek Korzec, por proporcionarnos este proyecto como punto de partida para el desarrollo de nuestra memoria de título. Además, destacar el apoyo, consejos y energía del profesor Ramón Díaz, quien nos acompañó durante 6 meses en el desarrollo de este estudio (“Ya lo tenéis, y chicos, ¡ser rigurosos y cuantificar!”). Destacar también a nuestros colegas Daniel Sepúlveda (Howden) y Rigoberto Casanova (VenTop), quienes nos brindaron apoyo técnico y consejos en lo que se refiere a ventilación de minas subterráneas.

Personalmente, quiero expresar mis enormes agradecimientos a mi familia por brindarme el apoyo durante estos 6 años y darme la oportunidad de estudiar en la que ERA la universidad más bohemia del sur de Chile, la gloriosa Universidad de Concepción. Mencionar a mis amigos “Fuica, Hipster, Ahirton, Felipein, Ariel, Musiet, Lavanchy, Chico Pino, Chichan, Posai, Grode, Jason, Minion, Edu Aldea, Daniel, Piedra, Vicho, Carlos, Samu, disculpando a los que se me olvidaron en estos momentos, quienes durante estos largos 6 años, hicieron de mi vida universitaria, una etapa inolvidable.

Claudio Fernando Fuentes Ortega

Quiero agradecer a todos los cabros que conocí en la carrera: Chico Pino, Lavanchy, Musiet, Ricardo, Posay, Chichan, Casquiolo, Felipein, Berkel, Aldito (gracias por tus cuadernos xD), Fuica, Jasón, Claudio, Hector, Victor, etc. Perdón si se me olvido alguno, pero la memoria es frágil. Y para seguir con la “cortá eh vena” y siguiendo el formato trillado, quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo brindado durante todos estos años.

Nicolás Alexander Ramírez González

RESUMEN

El desarrollo de esta memoria se llevó a cabo en los departamentos de Ingeniería de Minas en la Universidad AGH de Ciencia y Tecnología de Polonia y en la Universidad de Concepción de Chile durante el periodo 2018-2019.

La problemática del estudio está centrada en el sistema de ventilación de la mina subterránea de carbón más grande del sur de Polonia llamada FezMine, que actualmente está siendo operada por la compañía JSW S.A. Históricamente, la mina ha tenido diversos problemas en relación a las concentraciones de metano emitidas desde los paneles de explotación de carbón, siendo una amenaza latente para la operación.

En esta investigación se diseña y analiza un sistema de ventilación que permita mantener los índices de emisión de metano inocuos para la operación, considerando la reprofundización de la mina con un nuevo nivel denominado 1290, que dará viabilidad a la mina hasta el año 2070. Para ello se analiza la información disponible y se formula un modelo conceptual que simplifique la problemática abordada en el estudio y que sirva como base para los modelos de simulación posteriores.

En el desarrollo de esta memoria se optó por el uso del software de simulación VentSim™ para modelar el problema, dado el respaldo que tiene por diversos proyectos realizados alrededor del mundo.

Utilizando el simulador y la información disponible se define un modelo de simulación de flujo de aire, con el que se diseña el sistema de ventilación de la mina que, una vez ajustado al utilizar reguladores y ventiladores auxiliares, cumple con los requerimientos de caudal del personal y las velocidades del flujo establecidos por la legislación polaca.

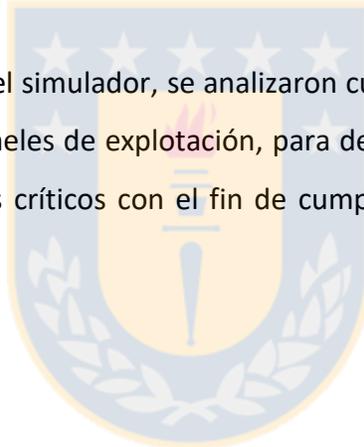
Posteriormente, usando como base el modelo de simulación para el flujo de aire, se define un modelo de simulación de flujo de aire considerando las emisiones de metano desde los seis paneles

de explotación de carbón, el cual sirve para estudiar el comportamiento del aire viciado que fluye a través de las labores mineras.

Los resultados obtenidos en VentSim™ muestran el comportamiento de las emisiones de metano a través de todas las galerías de la mina, y permiten distinguir los paneles de explotación en los que el metano se pudo diluir por la acción del flujo de aire de la ventilación y aquellos en donde no es posible alcanzar diluciones adecuadas.

Se propone el uso de la técnica minera de desgasificación, como un método accesorio a la ventilación, para cumplir con las concentraciones máximas permisibles de metano en la atmósfera de mina.

Finalmente, con la ayuda del simulador, se analizaron cuatro escenarios con respecto al nivel de emisión de metano en los paneles de explotación, para definir el porcentaje de desgasificación mínimo necesario en los paneles críticos con el fin de cumplir con las concentraciones máximas estipuladas en la ley.



ABSTRACT

The work described in this thesis was carried out in the departments of mining engineering at AGH University of Science and Technology of Poland and University of Concepción of Chile during the period 2018-2019.

The problem addressed in this study focuses on the ventilation system of the largest coal mine in southern Poland named FezMine, that is currently being managed by the company JSW S.A. Historically, the mine has had problems with regard to methane concentrations released from coal seams, being a latent threat within the mining operation.

The main objective of this research is to define a safe mine ventilation system maintain the rate of methane emissions innocuous within the operation, considering the mine-deepening project to the new level named 1290.

In this thesis the simulation software VentSim™ was used, which is widely recognized in the underground mine ventilation sector.

An airflow simulation model is defined for the mine ventilation system which must be able to achieve the required airflow for workers and other requirements according to the current Polish law. Then, an airflow simulation model considering the methane emissions is defined and the behavior of return air throughout the airways is studied.

The results obtained in VentSim™ allow to differentiate the coal seams in which the methane is diluted as a result of the airflow in the ventilation system and the other ones where is not possible to achieve appropriate dilutions, therefore prior degasification methods are required to accomplish with the maximum allowable concentrations (MAC) of methane in the mine atmosphere.

Finally, four scenarios are analyzed to define the rate of degasification necessary in the critical coal seams, establishing the percentage of degasification between 25 to 74%.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo general	1
1.3 Objetivos específicos.....	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Bases teóricas de la ventilación en minas subterráneas.....	3
2.1.1 Definición y composición del aire	3
2.1.2 Atmósfera de mina.....	4
2.1.3 El gas metano y sus peligros asociados.....	4
2.1.4 Legislación polaca aplicada a ventilación en minería subterránea.....	6
2.1.5 Movimiento del aire	8
2.1.5.1 Energía total del sistema y ecuación de Bernoulli.....	8
2.1.5.2 Presión dinámica	9
2.1.5.3 Presión estática.....	10
2.1.6 Ley fundamental de la ventilación	10
2.1.7 Pérdidas de presión en el sistema	11
2.1.7.1 Pérdida de presión por fricción	11
2.1.7.2 Pérdida de presión por choque	13
2.2 Circuitos de ventilación	14
2.2.1 Tipos de conexiones	14
2.2.2 Regulación de circuitos	16
2.3 Ventilación en minas subterráneas.....	19
2.3.1 Curva característica de la mina	20
2.3.2 Ventilación principal.....	21
2.3.3 Ventilación auxiliar	22
2.3.4 Ventiladores	24
2.4 Ventilación en minas subterráneas de carbón.....	27
2.4.1 Clasificación polaca para el carbón	27
2.4.2 Método de explotación longwall	28
2.4.3 Ventilación del método longwall	31
2.4.4 Manejo del metano.....	32
2.4.4.1 Dilución del metano.....	32
2.4.4.2 Desgasificación del metano	33
2.5 Resolución de circuitos de ventilación	35
2.5.1 Leyes de Kirchhoff	35
2.5.2 Métodos computacionales.....	35
2.6 Modelos de simulación: VentSim™	36
2.6.1 Método de Hardy Cross	37
2.6.2 Funcionamiento del modelo computacional VentSim™.....	40
2.6.3 Aplicación de VentSim™ en casos reales	41
3. CASO DE ESTUDIO	45
3.1 Antecedentes	45
3.2 Equipos de ventilación	47

3.3 Descripción general de la mina	49
3.3.1 Piques	49
3.3.2 Niveles de operación	50
3.3.3 Niveles de explotación	51
3.3.4 Profundización al nuevo nivel mina 1290	52
3.4 Problemática del metano	53
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	55
4.1 Descripción del problema y metodología general	55
4.1.1 Recopilación de información	56
4.1.2 Análisis e interpretación de la información	59
4.1.3 Procesado de información	61
4.1.3.1 Procesamiento de los planos de labores 2D	61
4.1.3.2 Procesamiento para el caudal requerido por el personal	62
4.1.3.3 Procesamiento de las emisiones de metano en los niveles de explotación	67
4.2 Modelo conceptual	69
4.2.1 Modelo conceptual de flujo de aire	70
4.2.1.1 Hipótesis conceptual	70
4.2.1.2 Dominio espacial del problema	71
4.2.1.3 Características del circuito de ventilación de la mina	73
4.2.2 Modelo conceptual de flujo de aire con metano	74
4.2.2.1 Hipótesis conceptuales	74
4.2.2.2 Características del circuito de ventilación considerando emisiones de metano	75
4.3 Modelo de simulación de flujo de aire	76
4.3.1 Introducción	76
4.3.2 Configuración de la simulación	78
4.3.3 Diseño espacial del circuito de ventilación de la mina	79
4.3.4 Caracterización del circuito de ventilación	80
4.3.5 Control de la simulación	83
4.3.6 Calibración del modelo de simulación de flujo de aire	83
4.3.7 Comprobación del modelo calibrado	86
4.3.8 Resultados de la calibración y comprobación del modelo	87
4.4 Modelo de simulación de flujo de aire y metano	90
4.4.1 Configuración de la simulación	91
4.4.2 Distribución espacial de las fuentes de emisión de metano	92
4.4.3 Control de la simulación	93
4.4.4 Escenarios de simulación: Análisis de las emisiones de metano en los paneles	94
4.4.4.1 Motivación	94
4.4.4.2 Objetivo	95
4.4.4.3 Procedimiento	95
5. RESULTADOS	101
5.1 Resultados del modelo de simulación de flujo de aire	101
5.2 Resultados del modelo de simulación de flujo de aire con metano	103
6. CONCLUSIONES	109
7. RECOMENDACIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	113
8. REFERENCIAS	115

9. ANEXOS	121
Anexo A. Concentraciones de metano permisibles en la atmósfera de mina	121
Anexo B. Velocidades de aire críticas según las regulaciones polacas para minas de carbón ..	122
Anexo C. Factores típicos k en minería	123
Anexo D. Factores de pérdidas por choque (desde la experiencia)	124
Anexo E. Clasificación polaca para los tipos de carbón	125
Anexo F. Curvas características de los ventiladores modelo WPK	126
Anexo G. Curva característica del ventilador modelo WL-SIGMA 1000/1	127
Anexo H. Área y resistencias de las labores	128
Anexo I. Layout con leyenda de niveles en VentSim™	133
Anexo J. Ejemplo ilustrativo de la división sectorial.	134
Anexo K. Excel procedimiento para el cálculo del personal	136
Anexo L. Reguladores utilizados en los distintos niveles	137
Anexo M. Ventiladores auxiliares utilizados en los distintos niveles	138
Anexo N. Labores cumpliendo con los requerimientos de caudal y rangos de velocidad	139
Anexo O. Resultados de las simulaciones modelo flujo de aire con metano, escenario 1.....	140
Anexo P. Resultados de las simulaciones modelo flujo de aire con metano, escenario 2	142
Anexo Q. Resultados de las simulaciones modelo flujo de aire con metano, escenario 3	144
Anexo R. Resultados de las simulaciones modelo flujo de aire con metano, escenario 4	146
Anexo S. Plano global de FezMine	148



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Flujo a través de los puntos 1 y 2 (modificada).....	8
Figura 2.2. Sistema en serie	14
Figura 2.3. Sistema en paralelo	15
Figura 2.4. Distintos tipos de reguladores pasivos.....	19
Figura 2.5. Curva genérica de resistencia total de la mina	20
Figura 2.6. Ducto de ventilación liso	23
Figura 2.7. Sistema impelente.....	23
Figura 2.8. Ducto ventilación con anillos	24
Figura 2.9. Sistema aspirante	24
Figura 2.10. Tipos de ventiladores	26
Figura 2.11. Curva característica para un ventilador genérico	26
Figura 2.12. Estructura típica del método longwall (modificada).....	29
Figura 2.13. Variantes del método de explotación longwall	30
Figura 2.14. Sistema tipo U (modificada).....	31
Figura 2.15. Sistema tipo Y o Z (modificada).....	32
Figura 2.16. Sistema tipo R (modificada)	32
Figura 2.17. Configuración típica de pozos desde la superficie (modificada).....	34
Figura 2.18. Método del tiro inclinado (modificada)	34
Figura 2.19. Leyes de Kirchhoff	35
Figura 2.20. Estructura básica del funcionamiento de un software de simulación (modificada)	41
Figura 2.21. Comparación entre caudales medidos y los obtenidos en VentSim™ (modificada)	43
Figura 2.22. Correlación modelo VentSim™ v/s aforo completo (137 estaciones)	44
Figura 2.23. Correlación modelo VentSim™ v/s aforo (entradas y salidas de aire).....	44
Figura 3.1. Ventilador centrífugo tipo WPK 5.0	48
Figura 3.2. Ventilador centrífugo tipo WPK 3.9	48
Figura 3.3. Ubicación de los piques en FezMine (modificada).....	50
Figura 3.4. Diagrama de flujo para el sistema de ventilación principal (modificada).....	50
Figura 3.5. Proyección de la producción sin el nuevo nivel mina (modificada).....	53
Figura 3.6. Proyección de la producción con el nuevo nivel mina (modificada)	53
Figura 4.1. Metodología genérica para definir un modelo de simulación (modificada)	56
Figura 4.2. Ubicación de los aforos	58
Figura 4.3. Procesamiento de la información recopilada	61
Figura 4.4. Líneas centrales (en rojo) en galerías del nivel 900	62
Figura 4.5. Diagrama del método para el cálculo del caudal requerido por el personal.....	67
Figura 4.6. Elaboración del modelo conceptual.....	69
Figura 4.7. Vista en planta simplificada del diseño de FezMine	72
Figura 4.8. Vista isométrica simplificada del diseño de FezMine	72
Figura 4.9. Geometrías de las labores.....	73
Figura 4.10. Características de los paneles de explotación en el sistema de ventilación.....	76
Figura 4.11. Etapas del proceso del modelo de simulación.....	78
Figura 4.12. Diseño estructural de la mina	80
Figura 4.13. Ventana de introducción de parámetros en las galerías	81
Figura 4.14. Ventana de introducción de ventiladores.....	82

Figura 4.15. Proceso de calibración para el modelo de simulación de flujo de aire	84
Figura 4.16. Relación entre las entradas de flujo en los piques	85
Figura 4.17. Diagrama para obtener la comprobación del modelo calibrado	86
Figura 4.18. Comparación entre los aforos y los datos obtenidos de la simulación (14 puntos)	87
Figura 4.19. Comparación entre los aforos y los datos obtenidos de la simulación (15 puntos)	89
Figura 4.20. Gráfico de dispersión de los datos simulados en ambos modelos	90
Figura 4.21. Ventana de ingreso de las concentraciones del contaminante en las labores	91
Figura 4.22. Vista en planta de la distribución espacial de los paneles de explotación	93
Figura 4.23. Concentraciones máximas de metano en las labores definidas	94
Figura 4.24. Secuencia de análisis para el panel 341 y 401	97
Figura 4.25. Secuencia de análisis para los paneles 364/1 y 364/2	98
Figura 4.26. Flujo de metano en los paneles de explotación 401, 364/1 y 364/2	99
Figura 4.27. Diagrama del procedimiento para la desgasificación	100
Figura 5.1. Curvas de resistencia de la mina	101
Figura 5.2. Curva de los ventiladores usados en FezMine	101
Figura 5.3. Concentraciones [%] de metano de los paneles de explotación 341 y 401	104
Figura 5.4. Región de solución para el escenario 1 y 2	105
Figura 5.5. Región de solución para el escenario 3 y 4	106
Figura 5.6. Región de solución global de los escenarios planteados	107



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Composición química del aire	3
Tabla 2.2. Clasificación de peligrosidad por contenido de metano en minas de carbón polacas	7
Tabla 2.3. Límites de la velocidad del aire en minas subterráneas de carbón	8
Tabla 2.4. Relaciones entre pérdidas de presión y caudal.....	39
Tabla 2.5. Cantidad de aire simulada y medida de los ventiladores principales	42
Tabla 3.1. Número de empleados durante el periodo 2008-2012	46
Tabla 3.2. Turnos de trabajo en FezMine.....	46
Tabla 3.3. Tipos de carbón explotados en FezMine en el año 2012	46
Tabla 3.4. Características según la clase de carbón	47
Tabla 3.5. Parámetros técnicos de los ventiladores WPK 3,9 y WPK 5,0.....	48
Tabla 3.6. Características ventilador WL-SIGMA 1000/1	49
Tabla 3.7. Funcionalidad de cada pique.....	49
Tabla 3.8. Especificaciones por nivel.....	51
Tabla 3.9. Emisiones totales de metano en FezMine en Mm ³ /año	54
Tabla 4.1. Aforos en terreno por nivel	58
Tabla 4.2. Distribución de personal por tipo de galería	63
Tabla 4.3. Ejemplo del cálculo de personas para galerías de ventilación en el nivel 358	64
Tabla 4.4. Ejemplo de la definición de sectores de trabajo para el nivel 358	64
Tabla 4.5. Ejemplo cálculo número de personas por sector de trabajo para nivel 358	65
Tabla 4.6. Número de trabajadores de acuerdo al tipo de galería en cada nivel	66
Tabla 4.7. Emisiones de metano en los niveles de explotación en FezMine	67
Tabla 4.8. Escenarios según las emisiones de metano en los paneles de explotación.....	69
Tabla 4.9. Configuración de VentSim™ previo a las simulaciones	79
Tabla 4.10. Cantidad de nodos y galerías en el diseño	80
Tabla 4.11. Configuración de VentSim™ previo a las simulaciones del contaminante	91
Tabla 4.12. Emisiones de metano en los paneles de explotación para el escenario 1	95
Tabla 4.13. Concentraciones máximas permisibles según el tipo de labor	96
Tabla 5.1. Concentraciones en los frentes de explotación para los escenarios analizados	105

NOMENCLATURA

- AGH: Akademia Górniczo-Hutnicza
- ANFO: ammonium nitrate-fuel oil (mezcla de nitrato de amonio más combustible)
- CFD: computational fluid mechanics (dinámica de fluidos computacional)
- CH₄: metano
- EMA: Error medio absoluto
- EP: Entrada al panel
- F: Frente del panel de explotación
- GPS: Galería post salida del panel de explotación
- JSW S.A: Jastrzębska Spółka Węglowa S.A
- MAC: concentración máxima permisible de metano
- m.b.n.m: metros bajo el nivel del mar
- rpm: revoluciones por minuto
- SP: Salida del panel de explotación



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En la minería polaca la explotación de carbón está acompañada por cantidades considerables de metano emitido desde los paneles de explotación. Además de ser un gas anóxico, el metano puede formar una mezcla potencialmente explosiva al entrar en contacto con el aire en las labores mineras, al ser un gas inflamable y explosivo. Por esta razón, la problemática del metano es reconocida como una de las mayores amenazas en la ventilación en la minería del carbón.

Las explosiones de metano son responsables de muchos accidentes mineros. En Polonia, entre el periodo 2009-2014, ocurrieron 18 accidentes relacionados a explosiones de metano donde 25 mineros perdieron la vida. Es por esto que un control apropiado del contenido de metano, incrementa la seguridad del personal y mejora la efectividad de la producción minera.

La universidad AGH de Cracovia tiene colaboraciones con 300 compañías para la investigación y desarrollo de proyectos mineros. Uno de estos tiene relación con la mina de carbón más profunda del sur de Polonia llamada FezMine, ubicada en la región de Ornontowice, Polonia.

El desarrollo de esta memoria consiste en analizar el sistema de ventilación de FezMine considerando las emisiones de metano desde los paneles de explotación, mediante el uso del software de simulación de ventilación minera VentSim™, con información proporcionada por la casa de estudios anteriormente mencionada. El modelamiento del sistema de ventilación tendrá en cuenta las labores existentes y el desarrollo de un nuevo nivel de reprofundización de la mina.

1.2 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es diseñar un sistema de ventilación adecuado para la mina subterránea de carbón FezMine, que permita cumplir con los requerimientos para diluir adecuadamente el metano en sus paneles de explotación, teniendo en cuenta la reprofundización de la mina a un nuevo nivel llamado 1290, que dará viabilidad al proyecto hasta el año 2070.

Para alcanzar este objetivo general, se define una serie de objetivos específicos que se enumeran a continuación.

1.3 Objetivos específicos

1. Recopilar y analizar la información disponible para definir el alcance, las limitaciones y las necesidades que se presentan.
2. Definir el modelo conceptual del sistema de ventilación empleando la información recopilada.
3. Seleccionar la herramienta de simulación más adecuada para el desarrollo de la modelización del problema y el diseño del circuito de ventilación.
4. Definir un modelo de simulación de flujo de aire en función de los datos disponibles que permita evaluar un sistema de ventilación adecuado para toda la mina y la profundización del nuevo nivel 1290, mediante la implementación de elementos de regulación y ventilación auxiliar apropiados.
5. Acoplar al modelo de simulación de flujo de aire definido la problemática del metano y evaluar el sistema de ventilación más adecuado para diluir el contaminante a niveles inocuos para la operación.
6. Utilizar la herramienta de simulación para evaluar el impacto de utilizar la técnica de desgasificación en los paneles de explotación, para facilitar el diseño del sistema de ventilación, disminuyendo las concentraciones de metano en las capas de carbón con mayor emisión de gas.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la teoría básica de ventilación en minas. Se explica que es un circuito de ventilación y como el aire fluye a través de este. Además se exponen los cambios que sufre la atmósfera de mina por la acción del metano emitido desde las capas de carbón y como este debe controlarse bajo la legislación polaca actual.

2.1 Bases teóricas de la ventilación en minas subterráneas

En este apartado se presentan los conceptos de aire fresco y viciado, las propiedades y características de los gases que aparecen en la atmósfera de mina y cómo estos afectan a la composición inicial del aire.

2.1.1 Definición y composición del aire

El aire es una mezcla homogénea de gases que constituye la atmósfera terrestre, no posee forma ni volumen definido y su peso origina la presión atmosférica [1].

En términos termodinámicos el aire se puede considerar una mezcla mecánica de aire seco y vapor de agua [2]. Químicamente, la composición ideal de aire seco considerada a nivel del mar se describe en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química del aire [2].

Gas	Volumen %	Peso %
Nitrógeno	78.09	75.55
Oxígeno	20.95	23.13
Dióxido de carbono	0.03	0.05
Argón y otros gases	0.93	1.27

Para efecto de los cálculos relacionados con flujo de aire es usual trabajar con aire seco y tomar una composición química de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno y gases inertes [3].

El aire es incoloro, inodoro e insípido y permite la vida, estas características son importantes en el control de calidad del aire al interior de la mina.

2.1.2 Atmósfera de mina

El aire de mina es una mezcla de gases con polvo en suspensión, que fluye a través de las labores mineras. Esta mezcla proviene del aire atmosférico y durante su circulación por la mina sufre cambios en su composición, temperatura y contenido en polvo debido a las operaciones mineras, la presencia de personas y maquinaria; y puede ser clasificada en dos tipos:

- 1. Aire fresco:** corresponde al fluido que entra en la mina y presenta pequeñas alteraciones en su composición respecto al aire atmosférico teórico.
- 2. Aire viciado:** corresponde al fluido que ha circulado por el interior de las labores mineras y presenta fuertes cambios en su composición. Dependiendo de los niveles de los contaminantes presentes, este aire viciado puede ser o no respirable.

El aire posee una composición inicial que al circular por el interior de la mina sufre modificaciones en su temperatura, humedad y contenido de gases, tales como: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), metano (CH₄) y otros en concentraciones más bajas [4], convirtiéndose así en aire viciado. Este estudio se centrará específicamente en la influencia del metano en la atmósfera de mina.

2.1.3 El gas metano y sus peligros asociados

El metano (CH₄) es un gas anóxico y explosivo formado como parte del proceso de la génesis del carbón y cuando este es explotado, el metano es liberado desde el panel de explotación y puede producir la muerte por desplazamiento de oxígeno y no por un daño directo sobre el organismo [5].

El contenido de metano aumenta con la profundidad de la veta de carbón, dado que se tiene un incremento en los niveles de presión y se reduce la permeabilidad de la roca circundante, teniendo como consecuencia niveles de metano más altos y con mayor adherencia al carbón en la roca [5].

El gas metano es altamente combustible por lo que tiene implicaciones directas en la seguridad del personal y de las operaciones mineras, además es un gas con potente efecto invernadero cuando es liberado a la atmósfera.

El metano al ser menos denso que el aire (0.656 kg/m^3) tiende a migrar hacia los puntos más altos de las labores mineras formando "capas". Estas capas no son de gran potencia (orden de centímetros) pero sí representan una fuente potencial de riesgo, ya que al tener el gas confinado en el techo de la labor se inducen acumulaciones de metano en sitios o cavidades no previstas y puede producirse una explosión en el lugar [6].

Cabe mencionar que la velocidad del aire a través de una galería no se distribuye uniformemente, esto se comprueba al medir la velocidad del aire en los bordes de la galería la cual es cercana a cero y no genera la turbulencia necesaria para evitar algún confinamiento imprevisto de gas [6], es por esta razón que se recomienda mantener velocidades de aire altas en zonas donde el metano podría acumularse formando "capas".

Para contextualizar el peligro que representa el metano en cuanto a su explosividad se puede mencionar que [6]:

- 0.3 m^3 de metano pueden producir una explosión equivalente a 4 kg de explosivo comercial tipo ANFO.
- La temperatura de ignición del metano es de $650 \text{ }^\circ\text{C}$.
- La energía mínima de ignición del metano es de 0.29 mJ y a modo de ejemplo, una chispa de estática producida por la ropa de las personas genera 10 mJ .

Los riesgos para la salud del metano están relacionados principalmente al desplazamiento del oxígeno cuando este gas está presente en el entorno, convirtiéndose así en un gas asfixiante. Los principales problemas debidos a este fenómeno cuando las concentraciones de metano son altas y se está en un entorno cerrado son [2,3]:

- Sofocación
- Pérdida de conciencia
- Dolores de cabeza y mareos
- Náuseas y vómitos
- Debilidad
- Pérdida de coordinación
- Incremento en el ritmo de respiración

Es de vital importancia tener un control en las concentraciones de los distintos gases presentes en el ambiente. Uno de los más importantes a considerar es el oxígeno ya que con niveles menores al 19.5% puede resultar en asfixia y si es inferior al 10% puede ser fatal [3].

Otro aspecto importante a mencionar es que el metano por sí solo no es tóxico, pero puede producir gases tóxicos durante su combustión.

2.1.4 Legislación polaca aplicada a ventilación en minería subterránea

Cada país ha desarrollado su propia legislación para asegurar una buena calidad de la atmósfera de minas subterráneas, poniendo límites a los distintos factores que la afectan.

Polonia tiene sus propias categorías para clasificar los peligros debido al metano en las minas de carbón, determinadas en base al contenido de este en las capas (ver tabla 2.2).

Las capas de carbón que pertenecen a la categoría III y IV constituyen una zona de alto contenido en metano, lo que implica el uso de métodos de desgasificación (ver apartado 2.4.4.2) en el sistema de ventilación como la forma más efectiva para combatir el peligro existente [7].

Tabla 2.2. Clasificación de peligrosidad por contenido de metano en minas de carbón polacas [8].

Categoría	Contenido de metano en las capas de carbón [m ³ /t carbón]
Capa de carbón sin metano	Inferior a 0.1
I	0.1 – 2.5
II	2.5 – 4.5
III	4.5 – 8.0
IV	Mayor a 8.0

La ley polaca establece que el contenido de metano en ningún momento debe exceder el 2% de la concentración en la atmósfera de mina [9]. Si esto no se cumple, inmediatamente se debe [9]:

1. Retirar a las personas de su lugar de trabajo.
2. Apagar la red eléctrica.
3. Inmovilizar máquinas y dispositivos.
4. Obstruir el acceso a estas excavaciones.
5. Notificar a los supervisores más cercanos.

En el Anexo A se presentan las concentraciones máximas de metano que exige la legislación polaca para las distintas labores mineras presentes en la operación que se deseen ventilar.

La evaluación de riesgos en la minería polaca está determinada por una regulación que define los valores límites de los parámetros físicos y químicos para el aire que componen la atmósfera de mina.

Un parámetro crítico para la operación es la concentración del oxígeno, la legislación actual exige que el contenido mínimo en volumen debe ser a lo menos 19% [9].

La normativa especifica los límites de la velocidad del aire (mínimo y máximo) para cada tipo de excavación (ver tabla 2.3). Para una descripción ampliada de estos rangos, revisar el Anexo B.

Tabla 2.3. Límites de la velocidad del aire en minas subterráneas de carbón [9].

Tipos de excavaciones	Velocidad del aire [m/s]	
	Mínima	Máxima
Piques o chimeneas	-	12.0
Zonas con presencia metano (excepto cámaras)	0.3	8.0 a 10.0
Otras excavaciones	No especificado*	8.0
Entradas al frente de explotación con presencia de metano	0.3	5.0
Entradas al frente de explotación sin presencia de metano	0.15	5.0

* La regulación no especifica un valor, sólo menciona asegurar una adecuada composición del aire.

2.1.5 Movimiento del aire

El movimiento de un fluido se produce por una diferencia de presiones y se puede expresar mediante la ecuación de Bernoulli, que relaciona estas diferencias con la altura y las velocidades del fluido a lo largo de una línea de corriente, este movimiento siempre va desde un punto de alta presión a uno de baja presión y sigue el camino con menor resistencia al paso del aire. El principio básico de esta relación es la conservación de energía en todo el sistema.

2.1.5.1 Energía total del sistema y ecuación de Bernoulli

La energía total del sistema de un fluido en movimiento consiste en la suma de cinco componentes: energía estática, energía cinética, energía potencial, energía interna y calor. La figura 2.1 muestra el flujo del aire entre dos puntos (1-2) con las distintas componentes de energía anteriormente mencionadas.

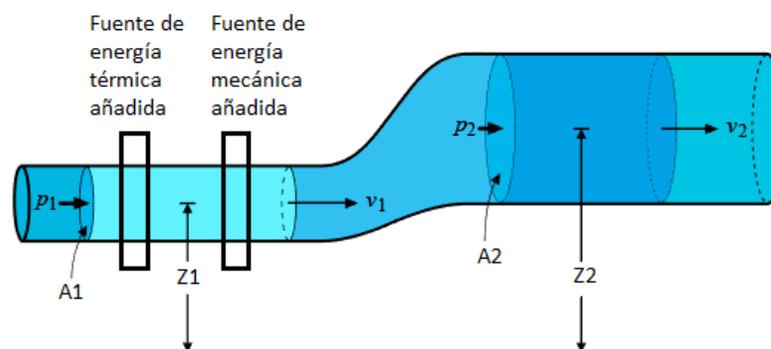


Figura 2.1. Flujo a través de los puntos 1 y 2 (modificada) [10].

Así, la energía total del sistema entre los puntos 1 y 2 es:

$$\text{Energía total (1)} = \text{Energía total (2)} + \text{Pérdidas de energía (1} \rightarrow \text{2)} \quad (1)$$

Ahora, sustituyendo las expresiones de energía por la ecuación de Bernoulli aplicable a un fluido, la ecuación queda redefinida como [2]:

$$\frac{P_1}{w} + \frac{v^2_1}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{w} + \frac{v^2_2}{2g} + Z_2 + H_l \quad (2)$$

Donde:

$\frac{P}{w}$: Energía estática

$\frac{v^2}{2g}$: Energía cinética

Z: Energía potencial

H_l : Pérdidas de energía debido al flujo

P: Presión absoluta en el punto

w: Peso específico

v: Velocidad

g: Aceleración de gravedad

Reescribiendo la ecuación (2) se obtiene la siguiente expresión que permite calcular la caída de presión entre dos puntos de referencia (1-2) en un sistema dado:

$$H_{t1} = H_{t2} + H_l \quad (3)$$

En donde H_t corresponde a la suma de las presiones de velocidad, estática y potencial, las cuales se tendrán en cuenta en la ventilación de minas:

$$H_t = H_s + H_v + Z \quad (4)$$

2.1.5.2 Presión dinámica

La presión dinámica es la presión del fluido debido a su velocidad. Algunas veces se le llama presión de estancamiento, ya que es la presión generada por un fluido en movimiento cuando

repentinamente es llevado al reposo. A diferencia de la presión estática que actúa igualmente en toda dirección, la presión dinámica es direccional, y solo alcanza su valor máximo cuando es medida en la dirección del flujo [3]. La presión dinámica está definida como:

$$H_v = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (5)$$

Donde:

H_v : Presión dinámica [Pa]

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]

v : Velocidad del fluido [m/s]

2.1.5.3 Presión estática

La presión estática corresponde a la presión ejercida por el aire en todas las direcciones sobre las paredes del ducto o labor minera que lo contiene. Esta actúa con la misma magnitud y dirección sin importar la dirección del flujo de aire, y es medida perpendicularmente a este [3].

Este tipo de presión en específico, corresponde a la cantidad de energía necesaria para vencer las pérdidas de presión a través de un ducto y se expresa de la siguiente manera [11]:

$$H_s = H_f + H_x \quad (6)$$

Donde:

H_s : Presión estática [Pa]

H_f : Pérdidas de presión por fricción [Pa]

H_x : Pérdidas de presión por choque [Pa]

2.1.6 Ley fundamental de la ventilación

La diferencia de presión es la que permite el flujo de aire desde un punto A a un punto B de la mina y depende de la resistencia de los conductos de ventilación y del caudal de aire que viaja a través del sistema. La ley fundamental de ventilación aplicada en minería para fluidos turbulentos viene dada por la ecuación (7).

$$H_l = R \cdot Q^2 \quad (7)$$

Donde:

H_l : Pérdida de presión entre dos puntos [Pa]

R: Resistencia del ducto y/o labor minera por donde circula el aire [Ns^2/m^8]

Q: Caudal o flujo de aire [m^3/s]

Hay muchas razones por la cual la presión del aire puede cambiar en una mina subterránea, destacándose [11]:

- Cambios o fallas en los ventiladores
- Cambios de presiones en la ventilación natural
- Recirculación de aire
- Cambios en la temperatura y humedad del ambiente
- Explosiones o incendios dentro de la mina

2.1.7 Pérdidas de presión en el sistema

Las pérdidas de presión total en el sistema están conformadas por la suma de dos componentes: pérdida de presión por fricción y pérdida de presión por choque, las que serán definidas a continuación.

2.1.7.1 Pérdida de presión por fricción

Las pérdidas de presión por fricción en un flujo que viaja a través de labores mineras constituyen entre el 70% y 90% de las pérdidas de presión total del sistema de ventilación [11]. Por esta razón, las pérdidas por fricción requieren una mayor atención que las pérdidas de presión por choque durante el análisis del sistema.

La caída de presión que ocurre en un flujo es el resultado del contacto de este con las paredes del conducto de ventilación y de la fricción interna existente en el propio fluido.

Atkinson define estas pérdidas como una función que depende del caudal, densidad del fluido, características superficiales y dimensiones del conducto, según la siguiente ecuación [3]:

$$H_f = \frac{f \cdot L \cdot C \cdot \rho \cdot Q^2}{2A^3} \quad (8)$$

Donde:

H_f : Pérdida de presión por fricción [Pa]

C: Perímetro [m]

L: Longitud del ducto o labor [m]

A: Área [m²]

Q: Caudal del fluido [m³/s]

f: Coeficiente de fricción, adimensional

ρ : Densidad del aire [kg/m³]

El coeficiente de fricción adimensional está dado por la siguiente expresión [3]:

$$f = \frac{1}{4 \left[2 \left(\frac{D}{e} \right) + 1.14 \right]^2} \quad (9)$$

Donde:

e: Altura de rugosidad promedio [m].

D: Diámetro del ducto de ventilación [m].

El factor de fricción f puede ser sustituido por un nuevo factor denominado factor de fricción de Atkinson (k), que se define como [3]:

$$k = \frac{f \cdot \rho}{2} \quad (10)$$

Donde:

f = factor de fricción

ρ = Densidad del aire [kg/m³].

Reemplazando la ecuación (10) en la ecuación (8) se tiene que la pérdida de presión por fricción definida por Atkinson puede ser escrita en términos del caudal como:

$$H_f = \frac{k \cdot C \cdot L \cdot Q^2}{A^3} \quad (11)$$

El Anexo C muestra los valores típicos de los factores k usados en los estudios de ventilación subterránea. Notar que estos valores del factor de fricción de Atkinson “ k ” son válidos únicamente cuando la densidad del aire toma el valor de 1.2 kg/m^3 , para unas condiciones ideales de aire seco a una presión de 101.325 kPa y una temperatura de $21 \text{ }^\circ\text{C}$ [11]. En otras condiciones, dicho factor debe ser corregido teniendo en cuenta la densidad del fluido según la siguiente expresión [11]:

$$k_{\text{corregido}} = \frac{\rho_{\text{fluido}}}{1.2} \times k_{1.2} \quad (12)$$

2.1.7.2 Pérdida de presión por choque

Las pérdidas de presión por choque son originadas por el cambio repentino en la dirección del flujo, expansiones, contracciones y obstrucciones en los conductos de ventilación [2].

La caída de presión debido a las pérdidas por choque está definida por la siguiente fórmula [2]:

$$H_x = \frac{X \cdot \rho \cdot v^2}{2} = X \cdot H_v \quad (13)$$

Donde:

X : Factor de choque (adimensional)

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]

v : Velocidad del flujo [m/s]

H_v : Presión dinámica [Pa]

Generalmente, las pérdidas por choque corresponden entre el 10% al 30% de las pérdidas totales en la mina, dejando el resto ligado a las pérdidas de presión por fricción [11]. Estas pérdidas son imprescindibles de calcular para conocer y estudiar el circuito de ventilación de la mina.

Existen dos métodos para evaluar las pérdidas por choque. El primero de ellos es el factor de pérdida por choque y el segundo es la metodología del largo equivalente. Ambos métodos mencionados son aptos a la hora de realizar cálculos, pero el primero de ellos posee registros validados desde la experiencia que permiten hacer un análisis con menos sesgo [11].

Para simplificar los cálculos del factor de pérdida por choque se tienen valores tabulados para diferentes situaciones en ventilación minera obtenidos desde casos reales, las cuales corresponden al 99% de los escenarios presentes en la mina [11]. Para mayor información remitirse al Anexo D.

2.2 Circuitos de ventilación

Un circuito de ventilación corresponde a un conjunto de ramales conectados entre sí permitiendo el flujo de aire. Este sistema debe ser eficiente y a su vez cumplir con los requerimientos de la faena minera que proporcione un ambiente seguro para los trabajadores.

2.2.1 Tipos de conexiones

En ventilación de minas existen principalmente dos tipos de conexiones de galerías para definir el circuito de ventilación, las conexiones en serie y en paralelo.

- 1. Conexión en serie:** Se caracterizan por que el flujo de aire se mueve a través de conductos conectados uno tras otro, vale decir, si no existen fugas, el caudal permanece constante a lo largo de todo el sistema [3] (ver figura 2.2).

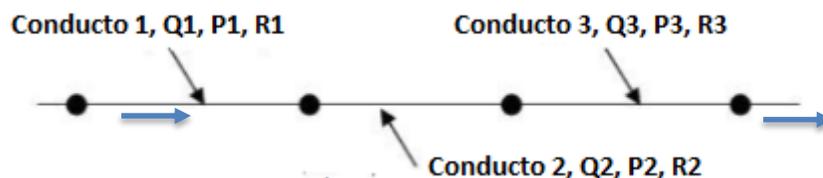


Figura 2.2. Sistema en serie.

Donde:

Q_i : Caudal i [m^3/s], con $i=\{1, 2, 3\}$

P_i : Presión i [Pa], con $i=\{1, 2, 3\}$

R_i : Resistencia del ducto i [Ns^2/m^8], con $i=\{1, 2, 3\}$

Como fue descrito anteriormente, el caudal que fluye a través del sistema queda expresado como:

$$Q_t = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n \quad (14)$$

Para el caso particular, la diferencia de presión total del sistema corresponde a la suma de cada una de las presiones a lo largo de este, tal como lo expresa la siguiente fórmula:

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (15)$$

Finalmente, la resistencia equivalente, R_{eq} , para un sistema en serie queda definida como:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (16)$$

- 2. Conexión en paralelo:** Está definido como aquel flujo de aire que fluye a través de una red de conductos de ventilación que están conectados en los mismos nodos de entrada y salida [3] (ver figura 2.3).

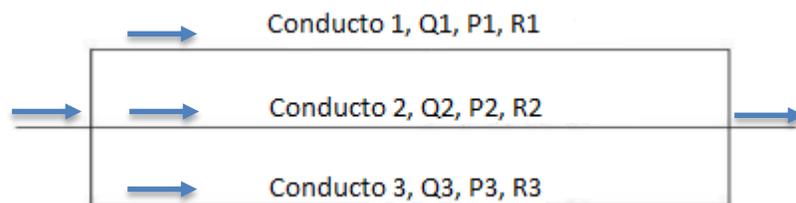


Figura 2.3. Sistema en paralelo.

Donde:

Q_i : Caudal i [m^3/s], con $i=\{1, 2, 3\}$

P_i : Presión i [Pa], con $i=\{1, 2, 3\}$

R_i : Resistencia del ducto i [Ns^2/m^8], con $i=\{1, 2, 3\}$

En esta configuración, el caudal que fluye en cada uno de los ductos de ventilación es distinto uno del otro, haciendo que el caudal total, Q_t , entregado al sistema sea:

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (17)$$

La caída de presión a través de cualquier número de conductos conectados entre sí en paralelo, independientemente del largo, dimensiones, factor de fricción k , siempre será la misma. La razón de este fenómeno es que el aire se redistribuye por sí mismo entre cada uno de los ductos, por esto la caída de presión a lo largo de cada ducto será idéntica. Si existiese cualquier diferencia "residual" en la caída de presión entre los conductos, el aire buscará el camino más fácil para viajar a través de él, y así, más aire fluiría hacia dicho conducto hasta que su caída de presión sea igual a la de los otros conductos de ventilación. Lo anterior se resume en la siguiente expresión:

$$P_t = P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_n \quad (18)$$

La resistencia equivalente de un sistema en paralelo está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{R_{eq}}} = \left(\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{R_n}} \right) \quad (19)$$

Para regular el flujo que circula en determinada labor, deberá ser ajustado ya sea por la resistencia de esta o por medio de un regulador.

2.2.2 Regulación de circuitos

El éxito de proveer una adecuada ventilación a los niveles de la mina para cualquier método de extracción dependerá de las capacidades de los ventiladores instalados y de una buena distribución y control del aire en las diferentes labores mineras.

Los reguladores son elementos que se utilizan para el control y la redistribución del flujo en cada conducto de ventilación mediante la adición de una resistencia artificial que reduce el volumen de aire que fluye por un determinado conducto de ventilación.

La fórmula experimental utilizada para dimensionar el área de un regulador depende de la densidad del aire y de los requerimientos de caudal y presión que se desean en un determinado conducto [11] (ver ecuación 20).

$$A \approx 1.2 \cdot Q \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (20)$$

Donde:

ΔP : Diferencia de presión [Pa]

Q: Caudal [m³/s]

P: Densidad [kg/m³]

Una clasificación general de los reguladores basada en el objetivo a lograr define dos tipos de reguladores generales: pasivos y activos [3].

Un **regulador pasivo** consiste en una puerta equipada con uno o más orificios ajustables. Su función es reducir el flujo de aire en un valor concreto para un conducto dado. El regulador más elemental es un orificio rectangular en una puerta el cual puede ser parcialmente cerrado por un panel corredizo [3].

Un **regulador activo** implica el uso de ventiladores booster y permiten generar un flujo de aire mayor del obtenible desde el sistema abierto [3].

Los reguladores ubicados en los circuitos de aire de la mina pueden variar desde un dispositivo bien diseñado de larga vida útil hasta un arreglo provisorio construido de forma tosca para lograr un propósito específico temporal.

Algunos tipos de reguladores pasivos son [12]:

1. **Persianas:** Son una forma de reguladores de resistencia variable. Están hechos usualmente de acero y son similares a las persianas de una ventana doméstica. Las pérdidas por choque se relacionan con el ángulo al cual las persianas están abiertas. La figura 2.4a muestra el diseño de este tipo de reguladores.
2. **Regulador por placas:** Reguladores de resistencia variable que consisten en dos rieles de acero verticales ubicados uno a cada lado de la galería en los cuales se apilan placas de madera o acero desde abajo hacia arriba. El acceso de personal o equipos a través de estos reguladores es usualmente muy difícil. La figura 2.4b muestra el diseño de este tipo de reguladores.
3. **Solapas de goma:** Pueden ser usadas donde se requiere el acceso de equipos a través del regulador y no se requiere un buen sellado. Las solapas son colgadas desde el techo, usualmente desde una viga, de manera que se superpongan. Los equipos pueden pasar a través de ellas sin que el conductor detenga el equipo o se abran las solapas. La figura 2.4c muestra el diseño de este tipo de reguladores.
4. **Tela o material flexible:** Estos reguladores pueden consistir en telas o materiales flexibles estirados por medio de barras metálicas. La altura del material puede ser ajustada para variar la pérdida de choque requerida. Alternativamente, el material estirado puede formar una puerta corrediza que puede ser abierta completamente para el paso de equipos. La figura 2.4d muestra el diseño de este tipo de reguladores.
5. **Puertas de ventilación:** Permiten el paso de personal, equipos y materiales. Estas se pueden bloquear completamente (puertas sólidas) o parcialmente incorporando una abertura que usualmente está cubierta por un panel corredizo. La figura 2.4e muestra el diseño de este tipo de reguladores.

6. Muro de contención: En casos en que se requiera una pequeña cantidad de aire, un orificio puede ser ubicado en el muro. Una puerta corrediza puede ser usada para controlar el flujo de aire a través de la abertura. La figura 2.4f muestra el diseño de este tipo de reguladores.



Figura 2.4. Distintos tipos de reguladores pasivos [12-17].

2.3 Ventilación en minas subterráneas

La ventilación de minas subterráneas tiene por objetivo proveer un flujo de aire fresco suficiente a las labores mineras en cantidad y calidad para:

- Diluir y remover los diferentes gases nocivos
- Permitir la respiración de las personas
- Abastecer el oxígeno que permita la combustión de máquinas diésel
- Remover el material particulado

- Regular la temperatura al interior de la mina

El aire ingresa a la mina desde la superficie por medio de piques, chimeneas y rampas. Este es distribuido en los diferentes niveles de explotación y es controlado principalmente por reguladores que ayudan a mantener un flujo de aire apto para la operación.

A lo largo de la historia de la minería se han evidenciado accidentes y desastres relacionados con el sistema de ventilación subterránea. También, varias de las enfermedades laborales más graves se ven ligadas con la ventilación, como por ejemplo la silicosis, neumoconiosis y otras enfermedades pulmonares degenerativas [2].

2.3.1 Curva característica de la mina

La resistencia de la mina es la suma total de la resistencias de todos los flujos de aire en el sistema, y al expresarse en término de la ley fundamental de la ventilación ($P=R \cdot Q^2$) sirve para calcular la presión necesaria para lograr un cierto caudal de aire a través de la mina. Con esta relación se puede graficar la curva característica de la mina que representa la resistencia total de esta bajo condiciones específicas de presión y caudal (ver figura 2.5).

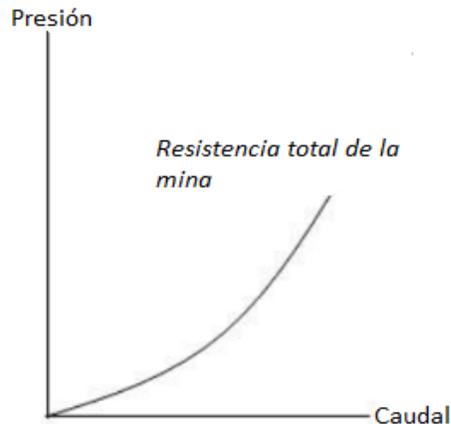


Figura 2.5. Curva genérica de resistencia total de la mina.

Para obtener la resistencia total de la mina, la aplicación de las leyes de Kirchhoff a todo el sistema resultará en un gran número de ecuaciones a resolverse simultáneamente, esto requiere asistencia computacional, dado que las soluciones manuales son limitadas a sistemas pequeños o a secciones dentro del sistema total de la mina [3]. Por esta razón, el sistema de ventilación debe ser modelado en un simulador para determinar la resistencia total de la mina, y así, obtener la curva característica de esta, que es indispensable al momento de seleccionar el o los ventiladores acoplados al sistema de ventilación principal, pues representa la única forma práctica para encontrar el punto de operación de un ventilador cuando se interseca con la curva característica de este [11].

Es aconsejable definir curvas de resistencia total para cada etapa de la vida útil de la mina, dado que el requerimiento de aire y la resistencia total aumentarán conforme avanza la explotación [11].

2.3.2 Ventilación principal

La ventilación principal corresponde al aire que fluye a través de la mina de forma natural o forzada por un sistema mecánico (ventiladores principales).

- Ventilación natural:

Para que exista un flujo natural de aire debe existir una diferencia en la densidad entre dos puntos ubicados en el mismo plano horizontal. Como resultado de dicha diferencia, la columna más densa produce un desequilibrio en el sistema y finalmente se obtiene un flujo de aire continuo.

Con el objetivo de mantener un sistema de ventilación natural, se deben cumplir dos condiciones [1]:

1. La entrada y salida de la mina deben estar ubicadas a diferentes alturas.
2. Debe existir una diferencia de temperatura y por ende en la densidad entre las dos columnas de aire presentes en los piques de inyección y extracción del flujo.

- **Ventilación forzada:**

También conocida como ventilación mecánica, corresponde aquel flujo de aire inducido por uno o más ventiladores cuando la ventilación natural no es suficiente para controlar las concentraciones de gases, material particulado, altas temperaturas y suministrar el caudal de aire requerido por el personal de la mina.

2.3.3 Ventilación auxiliar

La ventilación auxiliar o secundaria es aquella que suministra aire en los lugares donde el sistema principal de ventilación no es suficiente para proporcionar el flujo requerido. Esta configuración se relaciona con la ventilación dedicada a zonas de avance y frentes ciegos. De esta manera, cualquier ventilador el cual induce un flujo desde el circuito de ventilación principal hacia un frente de trabajo será un ventilador auxiliar.

Idealmente, los sistemas de ventilación no deberían tener impacto sobre la distribución de los flujos de aire alrededor de la infraestructura principal, permitiendo que la ventilación auxiliar sea planeada independientemente de la red de ventilación principal [18].

La ventilación auxiliar se caracteriza por el uso de dispositivos que permiten el paso del aire ya sea para inyectar o extraer flujo desde o hacia el frente de explotación y/o avance. Estos dispositivos se conocen en minería como mangas o ductos de ventilación y pueden ser de dos tipos [18]:

- 1. Ductos flexibles:** Son más baratos, fáciles de transportar, almacenar e instalar que los ductos rígidos. El material flexible se expande en términos de su diámetro y largo después de su instalación.
- 2. Ductos rígidos:** Son utilizados para instalaciones permanentes o en áreas de avance debido a su gran solidez y durabilidad, pero a su vez poseen un costo más alto.

Los sistemas de ventilación auxiliar se clasifican en:

1. **Sistemas impelentes:** Estos sistemas forzados inducen un flujo de aire tomado desde el circuito principal por medio de un ventilador auxiliar hacia el frente de trabajo usando ductos lisos de ventilación rígidos o flexibles (ver figura 2.6), y el flujo de aire viciado retorna al sistema por la galería. Así, todos los gases y partículas presentes son removidos por la acción del flujo inducido en el frente de explotación (ver figura 2.7).



Figura 2.6. Ducto de ventilación liso [19].

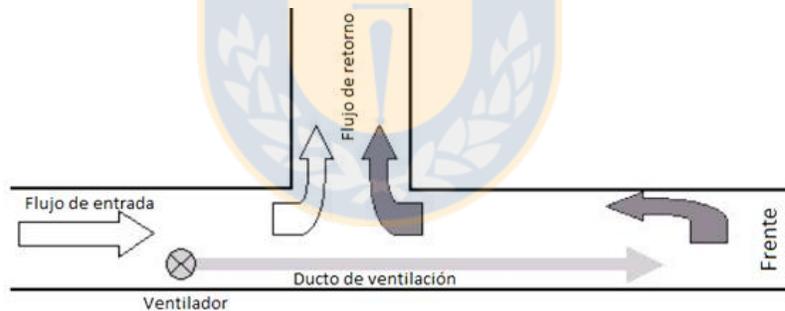


Figura 2.7. Sistema impelente.

2. **Sistemas aspirantes:** Estos sistemas forzados inducen un flujo de aire tomado desde el frente de explotación por medio de un ventilador auxiliar hacia el circuito de ventilación principal usando ductos anillados que evitan su compresión con el paso del aire (ver figura 2.8). El flujo de aire entra por la galería y retorna al sistema por el ducto de ventilación. Así, todos los gases y partículas presentes son removidos por la acción del flujo inducido en la salida del ducto (ver figura 2.9).



Figura 2.8. Ducto ventilación con anillos [19].

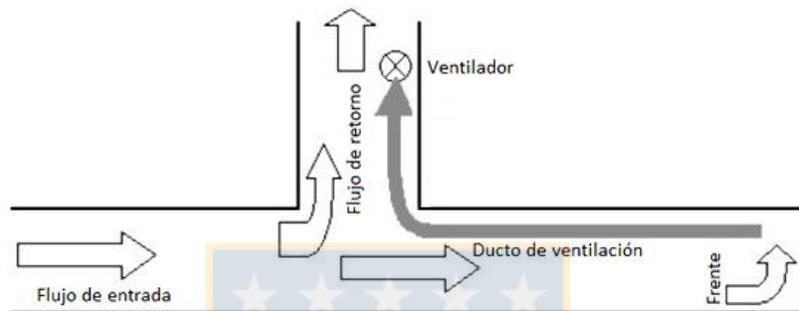


Figura 2.9. Sistema aspirante.

2.3.4 Ventiladores

La ventilación mecánica incluye todo aparato motorizado creado para inducir un flujo de aire a través de labores mineras. Los ventiladores son los mecanismos más importantes y comunes para llevar a cabo este fin.

Los ventiladores son dispositivos que utilizan la energía mecánica de un rotor para producir el movimiento del aire y un incremento en la presión total de este [2]. La gran mayoría de los ventiladores usados en minería son operados por motores eléctricos. Adicionalmente, se pueden usar turbinas de agua o aire comprimido para operar pequeños ventiladores en sectores donde existan condiciones anormales de temperatura o gases, o donde no haya suministro eléctrico disponible [11].

Existen dos categorías principales de ventiladores: axiales y centrífugos. Ambos tipos son usados como ventiladores principales, pero los de tipo axial son preferidos para labores subterráneas

debido a que ofrecen mayor flexibilidad operacional al poder ser fácilmente usados en serie, paralelo o en combinación [11].

1. Ventilador Axial: Su funcionamiento se asemeja a la forma de operar de la hélice de un avión, pero a diferencia de estas, los ventiladores mineros poseen una cantidad mayor de aspas [1].

Las características particulares de un ventilador axial dependen ampliamente del diseño aerodinámico y del número de aspas del rotor junto con el ángulo que presentan. Algunos diseños de rotores axiales permiten que los ángulos de las aspas puedan ser ajustados ya sea en modo estacionario o en movimiento [3].

El principio básico de acción de un ventilador axial en la generación de presión es impartir una aceleración tangencial al aire a medida que este pasa a través del rotor del ventilador [20]. El flujo de aire viaja a través del ventilador en dirección ortogonal al plano de las aspas de este (ver figura 2.10a).

Los parámetros de diseños más importantes para un ventilador axial son los siguientes:

- Ángulo de las aspas
- Número de aspas
- Entrada y salida del ventilador (Pérdidas por choque)
- Diámetro del rotor

2. Ventilador centrífugo: El principio se basa en el ingreso del aire hacia el rotor con un ángulo recto siendo descargado o liberado de manera tangencial desde las aspas (acción centrífuga) del equipo hacia el exterior [20] (ver figura 2.10b). Estas aspas pueden ser rectas o curvas y pueden ser ajustadas para obtener el rendimiento deseado.

Los parámetros de diseños más importantes a la hora de fabricar un ventilador centrífugo son los siguientes [11]:

- Curvatura de las aspas
- Número de aspas
- Entrada y salida del ventilador (pérdidas por choque)
- Diámetro del rotor
- Ancho del ventilador

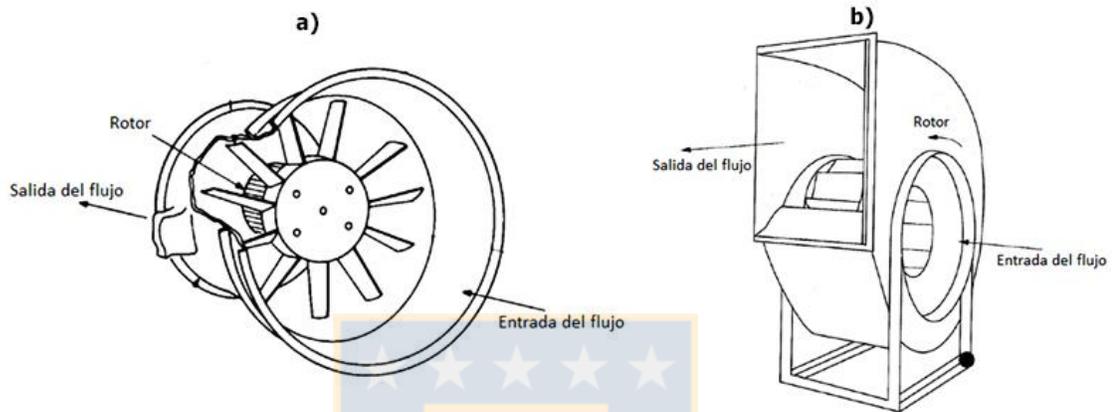


Figura 2.10. Tipos de ventiladores [20,21].

La curva característica es la forma más conveniente y satisfactoria para seleccionar un ventilador. Con ella es posible encontrar el ventilador que proveerá una cierta presión y caudal y así determinar cómo los cambios en las condiciones afectarán el rendimiento de este.

En esta curva es posible determinar el punto de operación del o los ventiladores acoplados al sistema de ventilación, que se obtiene al intersectar la curva de resistencia total de la mina con la curva característica del o los ventiladores (ver figura 2.11).

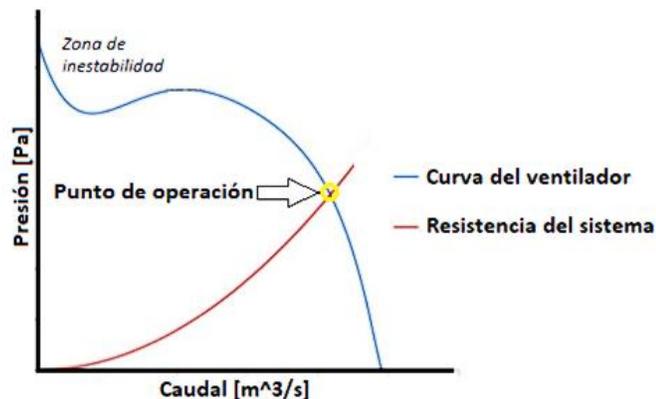


Figura 2.11. Curva característica para un ventilador genérico.

La zona de inestabilidad corresponde al flujo máximo estable de la presión de un ventilador. Este no debe operar en la zona de inestabilidad, debido a que sus aspas comienzan a vibrar, generando un incremento notorio en los niveles de sonido; si esta situación se prolonga en el tiempo, puede producir la ruptura de las aspas, dejando de funcionar y desencadenando en accidentes en la mina por la falla en el sistema de ventilación principal [11].

Un ventilador no puede salir de la zona de inestabilidad al cambiar su velocidad ni al cambiar el ángulo de las aspas. Se requiere cambiar la solidez de las aspas o usar otros métodos para que el ventilador pase a la zona de estabilidad [2].

Se recomienda tener un margen del 15-20% de presión adicional sobre el punto de operación del ventilador para evitar una posible situación de emergencia [11].

2.4 Ventilación en minas subterráneas de carbón

El carbón es un combustible fósil que proviene de los restos alterados de vegetación mediante el proceso de sedimentación junto con el movimiento tectónico de placas que dio paso al enterramiento de los restos de vegetación a grandes profundidades lo que implica altas temperaturas y grandes presiones, transformando así el material vegetal en carbón [5].

Comercialmente se distinguen dos tipos de carbón [5]:

- 1. Steam coal o carbón térmico:** principalmente usado para la generación de electricidad.
- 2. Coking coal o carbón siderúrgico:** principalmente usado para la producción de acero.

2.4.1 Clasificación polaca para el carbón

El conocimiento de las características del carbón es indispensable en todas las etapas del diseño de la mina. La calidad del carbón es monitoreada durante toda la operación de la mina para controlar y ajustar los parámetros de calidad del producto comercial final, es por esta razón que una clasificación es necesaria.

La clasificación polaca del carbón fue desarrollada por T. Laskowski y B. Roga, quienes creían que los principios de clasificación deberían ser lo más simple posible, no sólo para propósitos técnicos y científicos sino que también para los consumidores ordinarios de carbón [22].

En Polonia los distintos tipos de carbón se clasifican de acuerdo a sus propiedades físicas y químicas que determinan si es apto para su utilización tecnológica y está definido por los siguientes índices que se pueden obtener en laboratorio [22,23]:

- Contenido de materia volátil en el carbón
- Coking power (Índice Roga)
- Dilatación
- Índice de hinchamiento libre
- Calor de combustión

En el Anexo E se muestra la clasificación polaca completa para todos los tipos de carbón donde se mencionan sus propiedades y utilización tecnológica.

2.4.2 Método de explotación longwall

Existen varios métodos explotación subterránea para el carbón que dependen de las condiciones geológicas del área, potencia de las estructuras, profundidad y ángulo de las vetas, entre otros [24]. En este estudio el método a desarrollar es longwall debido a que es la técnica utilizada en el caso de estudio.

El principio básico del longwall es seleccionar una capa de carbón y trazar un panel con medidas promedios de 250 metros de ancho, 2000 metros de largo y 2 metros de alto. Un panel de este tamaño contiene más de 1 millón de toneladas de carbón, las que se extraen casi en su totalidad [25].

La extracción por longwall es una operación casi continua que involucra el uso de soportes de techos hidráulicos móviles, una máquina cortadora de carbón sofisticada y una correa

transportadora paralela a la cara del carbón. A medida que la máquina va cortando, el material va cayendo en las correas transportadoras para sacar el material fuera de la mina. Cuando el cortador ha atravesado la longitud completa de la capa de carbón, está invierte su dirección (sin girar) y viaja de vuelta a través de la cara haciendo el siguiente corte. A medida que el cortador avanza, los soportes del techo se mueven con él [25]. La figura 2.12 muestra la configuración típica del método.

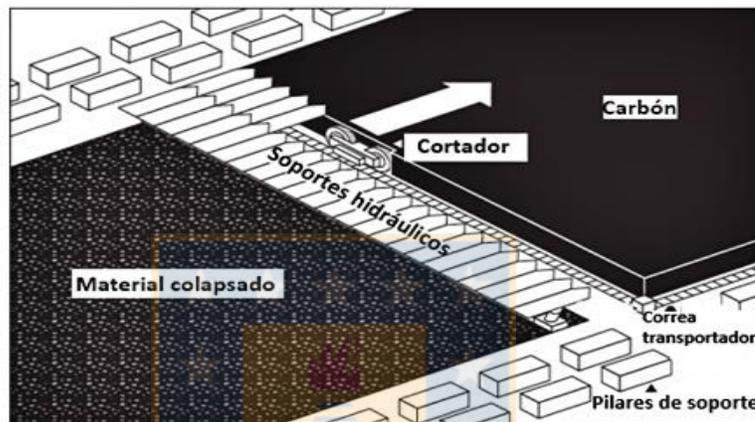


Figura 2.12. Estructura típica del método longwall (modificada) [26].

Las ventajas de usar longwall son [25,27]:

1. Es básicamente una operación sistemática, relativamente continua, requiriendo así menos trabajadores y permitiendo una alta tasa de producción sostenida en el tiempo.
2. Concentra a los mineros y equipos en un espacio de trabajo más reducido, haciendo que la mina sea más fácil de controlar.
3. No involucra tronadura, lo que reduce los peligros asociados.
4. Este método ofrece la mejor oportunidad para la automatización.
5. La recuperación del método es alta, en teoría el 100% de las reservas disponibles podrían ser extraídas, pero pensando en la práctica donde siempre hay pérdidas en los frentes, sistemas de transporte, entre otros, la recuperación fluctúa entre el 80-90%.
6. Costos operacionales relativamente bajos.

A continuación se mencionan algunas de las desventajas de usar longwall [25,27]:

1. En esta metodología los costos capitales de los equipos e instalación son altos.
2. Debido al gran capital inicial requerido sin un retorno inmediato por la producción de carbón, este método generalmente se restringe a las grandes compañías mineras.
3. Se requiere de un gran nivel de competencia profesional y de experiencia previa, dado la naturaleza del método.
4. Es un método en el cual todas las partes deben operar como un sistema integrado. La falla de una parte puede interrumpir la operación completa, por lo que existe poca flexibilidad operacional.
5. Este método requiere un sistema de ventilación complejo junto con una buena mantención debido a las grandes cantidades de polvo y metano producidas.

En este método se distinguen dos variantes principales para el proceso de explotación:

1. **Longwall en avance:** En esta variante, las galerías del longwall se van trazando a medida que avanza la explotación y deben conservarse por detrás del longwall [27] (ver figura 2.13a).
2. **Longwall en retroceso:** Consiste en realizar todas las galerías sobre el macizo rocoso aún sin explotar, abrir la pared final y avanzar en retroceso (ver figura 2.13b). Con este método el tiempo de puesta en marcha es mayor [27].

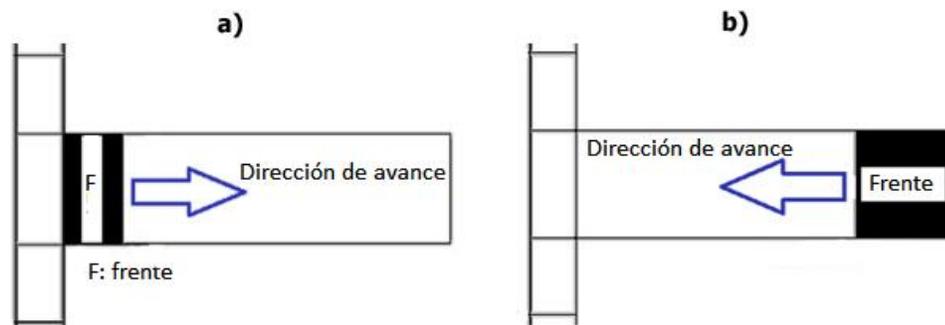


Figura 2.13. Variantes del método de explotación longwall.

2.4.3 Ventilación del método longwall

La habilidad para proveer una adecuada ventilación a cada panel puede ser uno de los mayores factores de éxito para una operación con longwall, especialmente cuando se está en presencia de gases contaminantes como el metano.

La tendencia de construir paneles de grandes dimensiones junto con la utilización de equipos de gran tamaño incrementa la resistencia de las distintas labores, por lo que es otro de los desafíos para la ventilación. En general, cuanto más baja sea la potencia del panel, más difícil será el desafío.

Para llevar a cabo esta parte de la operación existen tres tipos principales de ventilación en longwall, los cuales se detallan a continuación.

1. Sistema tipo U: En esta configuración, el aire fresco ingresa al frente de explotación a través de la *maingate* y regresa por la *tailgate* (ver figura 2.14). No existe conexión alguna entre estas galerías detrás del frente de explotación. Si la variante de longwall utilizada es en avance, esta es la única forma disponible para ventilar las labores mineras [27].

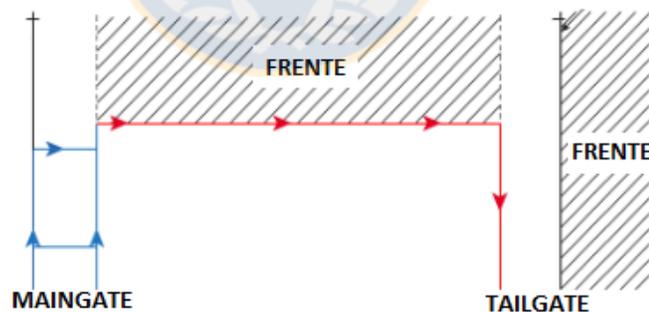


Figura 2.14. Sistema tipo U (modificada) [27].

2. Sistema tipo Y o Z: En el sistema tipo Y el aire fresco ingresa a través de la *maingate* y *tailgate* y es guiado desde el frente de explotación hacia las galerías principales de retorno de aire viciado (ver figura 2.15). Al utilizar esta configuración, usualmente se utiliza un regulador en la *maingate* para ajustar el balance de flujo entre el frente y dicha labor minera [27].

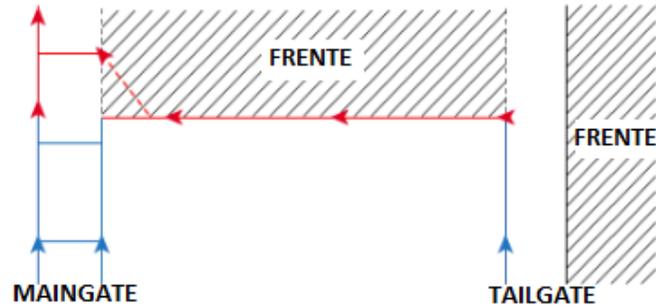


Figura 2.15. Sistema tipo Y o Z (modificada) [27].

3. Sistema tipo R: Esta configuración es similar a la tipo U, pero existe otra conexión para el retorno del aire viciado ubicada detrás del frente de explotación [27], como se ve en la figura 2.16.

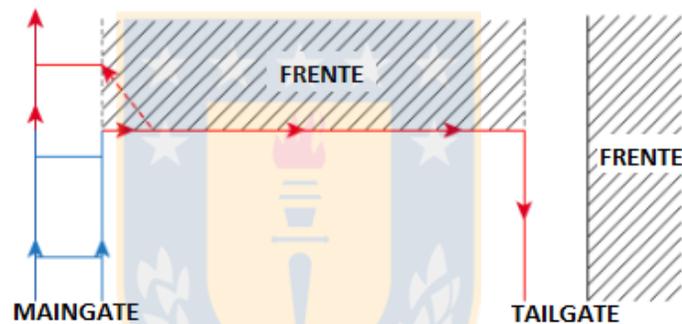


Figura 2.16. Sistema tipo R (modificada) [27].

2.4.4 Manejo del metano

2.4.4.1 Dilución del metano

El metano liberado desde los paneles de explotación de carbón puede ser diluido y removido por un sistema de ventilación diseñado para transportar grandes cantidades de aire a través de la mina. A grandes rasgos existen dos sistemas para diluir el metano, los cuales son [11]:

- Dilución por corriente de ventilación principal
- Dilución local por ventilación auxiliar

Estos sistemas diluyen el metano de la mina en concentraciones inferiores al rango explosivo del 5% al 15% [11].

Los sistemas de ventilación transportan el metano diluido fuera de las áreas de trabajo de la mina a través de los piques hacia la superficie. Este metano puede ser capturado para su posterior utilización en vez de ser liberado directamente a la atmósfera.

Una forma general para determinar el caudal de aire (Q_d) necesario para diluir un contaminante es [28]:

$$Q_d > Q_k \cdot \frac{(1 - LPP)}{(LPP - C_k)} \quad ((23))$$

Donde:

Q_d : Caudal m^3/s

Q_k : Influjos de contaminantes en m^3/s

C_k : Concentración del contaminante en la entrada de aire a la mina

LPP: Límite permisible ponderado

2.4.4.2 Desgasificación del metano

A medida que progresa la explotación del carbón se alcanzan mayores profundidades con concentraciones más altas de gas, donde la ventilación puede no ser suficiente por sí sola para mantener los niveles de metano dentro de límites permisibles que impone la ley.

Se define desgasificación como el proceso de remoción de gases presentes en el panel de explotación con la finalidad de reducir las concentraciones de metano y mantener la seguridad al interior de la mina [29].

Existen dos tipos de desgasificación [29,30]:

1. Previa a la explotación: En el caso de que se tenga acceso a los paneles previo a la explotación, se pueden hacer perforaciones verticales u horizontales en las paredes del panel que permiten la desgasificación de este.

Para el caso contrario, cuando las capas se encuentran a grandes profundidades y el acceso se dificulta, se perforan pozos desde la superficie y se interceptan con la capa de carbón que se extraerá en el futuro. En algunos casos la capa se fractura hidráulicamente para liberar el gas y en otros casos el pozo se curva para conectarse directamente con la fuente de metano (ver figura 2.17).

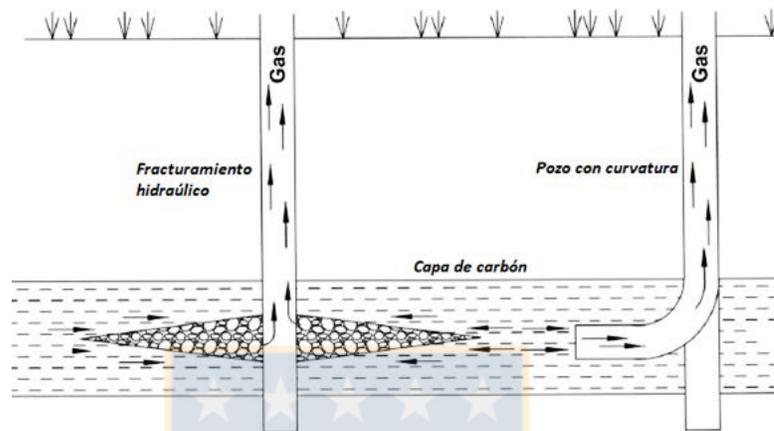


Figura 2.17. Configuración típica de pozos desde la superficie (modificada) [30].

2. Durante la explotación: Existen varios métodos para la desgasificación de metano durante la explotación de carbón. La técnica más usada para el control de gas en las minas de carbón en Europa que operan con longwall en retroceso es el método del tiro inclinado, en donde se perforan tiros en las paredes del panel que luego se conectan a una red de tuberías que extraen el metano por la acción de una bomba (ver figura 2.18).

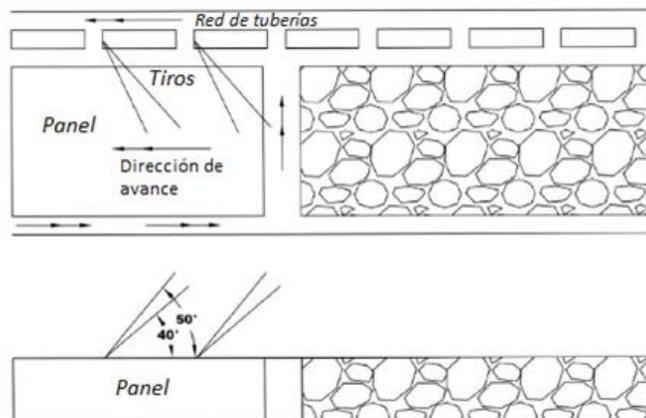


Figura 2.18. Método del tiro inclinado (modificada) [30].

Los métodos de desgasificación del metano mencionados anteriormente alcanzan niveles de captura del 20 al 80% de las concentraciones presentes en los paneles de explotación [29,30].

2.5 Resolución de circuitos de ventilación

2.5.1 Leyes de Kirchhoff

Dos leyes fundamentales regulan el funcionamiento de los circuitos eléctricos, las cuales fueron adaptadas por analogía para ser aplicadas en ventilación, donde los caudales de aire y caídas de presión corresponden a la corriente y voltaje respectivamente. Estas leyes son:

1. Primera Ley de Kirchhoff: También llamada ley de corriente o flujo, establece que la cantidad de material, flujo o energía entrante debe ser igual a la energía que sale del sistema [2] (ver figura 2.19a). Es decir, la suma total de los flujos de aire que entran y salen del sistema debe ser igual a cero.

2. Segunda Ley de Kirchhoff: Establece que la suma de las caídas de presión en un circuito cerrado es igual a cero [2] (ver figura 2.19b).

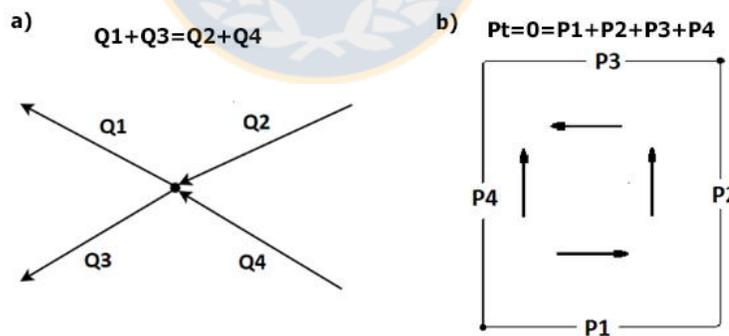


Figura 2.19. Leyes de Kirchhoff.

2.5.2 Métodos computacionales

Los sistemas de ventilación de minas reales son a menudo muy complejos y requieren de modelamientos matemáticos. Bajo esta lógica, los métodos de simulación han sido muy útiles ya que permiten el estudio de numerosas perturbaciones del flujo de aire, como por ejemplo un incendio subterráneo, estallidos de gases y rocas, la afluencia de metano, etc [31, 32].

Un primer intento de modelamiento simple pero efectivo fue realizado por el investigador estadounidense Hardy Cross en el siglo XIX al aplicar las leyes de Kirchhoff a la ventilación [31]. La introducción de computadores permitió el desarrollo de muchos programas para el diseño y análisis de redes de ventilación de minas reales como lo son VentSim™, Aeroset, Vuma 3D y Vnet. Estos simuladores están basados en métodos de cálculo que permiten resolver problemas de ventilación en condiciones normales y situaciones de emergencia [32]. Para el desarrollo de esta memoria se utilizará el software de simulación VentSim™.

2.6 Modelos de simulación: VentSim™

VentSim™ es un programa computacional comercializado por HOWDEN para la simulación de la ventilación al interior de minas subterráneas desarrollado por Craig Stewart en el año 1993 [33] y permite a los ingenieros la definición y simulación de un sistema de ventilación.

Esta herramienta computacional posee una interfaz manejable y permite desarrollar modelos complejos 3D, facilitando la implementación de bases de datos para el posterior análisis de escenarios.

VentSim™ entrega al usuario ciertas herramientas y características que se mencionan a continuación [33,34]:

- Simulación y registro de caudales y presiones presentes en una mina
- Análisis de situaciones hipotéticas
- Planificación a corto y largo plazo de los requerimientos de la ventilación
- Análisis económico de las diferentes opciones de ventilación
- Simulación de las concentraciones de contaminantes
- Permite simular flujos de aire compresible
- Verificar las posibles recirculaciones de aire viciado en la mina
- Simulaciones dinámicas con respecto al tiempo
- Construcción de hasta 30,000 conductos de ventilación en un modelo
- Capacidad de almacenamiento de hasta 1,000 tipos de ventiladores diferentes

- Importación y exportación de archivos DXF, hojas de cálculo y de otros software mineros
- Puede trabajar con mezclas de hasta 15 gases distintos

Actualmente el software es utilizado en más de 1,000 instituciones a lo largo del mundo, tales como mineras, consultoras, universidades, organismos de investigación, entre otros [34].

Los fundamentos teóricos de VentSim™ están basados en los siguientes conceptos [34]:

1. Ley fundamental de la ventilación
2. Ecuación de Atkinson
3. Leyes de Kirchhoff
4. Método iterativo de resolución: Hardy Cross

Como los tres primeros fundamentos ya fueron explicados en los apartados 2.1.6, 2.1.7.1 y 2.5.1 respectivamente, a continuación se procede a explicar qué es y cómo opera el método desarrollado por el ingeniero Hardy Cross.

2.6.1 Método de Hardy Cross

En 1930, Hardy Cross publicó el artículo "Analysis of Continuous Frames by Distributing Fixed-End Moments" donde describió el método de distribución de momentum, que cambiaría la forma en que los ingenieros realizaban los análisis estructurales [35]. En noviembre de 1936, Cross aplicó el mismo método geométrico para resolver problemas de distribución de flujos en redes de tuberías, y publicó un artículo llamado "Analysis of flow in networks of conduits or conductors" [36].

Este método fue modificado y desarrollado para sistemas de ventilación de minas por D. R. Scott y F. B. Hinsley en la universidad de Nottingham en 1951 [3]. Antes del desarrollo del método, las soluciones para sistemas complejos de redes eran extremadamente difíciles debido a las relaciones no lineales entre las caídas de presión y el caudal. Sin embargo, en los años 1960s estos métodos numéricos pudieron ser utilizados en aplicaciones reales gracias al desarrollo de la tecnología de computación.

El método Hardy Cross es un método iterativo para determinar el flujo de aire en redes de ventilación minera donde los valores de entrada (caudal y presión) y los valores de salida (caudal y presión) son conocidos pero la distribución del flujo en el interior de la red es desconocida [36].

La metodología de aproximaciones sucesivas de Hardy Cross está basado en el cumplimiento de las leyes de Kirchhoff:

1. **Ley de continuidad de flujo en los nodos:** el flujo de entrada es igual al flujo de salida en cada unión del conducto.
2. **Ley de conservación de la energía en el circuito:** la caída direccional de presión total a lo largo de cualquier circuito en el sistema es cero.

Este asume que el flujo que entra y sale del sistema es conocido y que el largo, diámetro, rugosidad y otras características de los conductos también son conocidas o pueden ser supuestos. También asume que la relación entre el caudal y las pérdidas de presión es conocida, pero no requiere ninguna relación particular para ser usado [36].

En el caso de fluidos que atraviesan conductos, se han desarrollado numerosos métodos para determinar la relación entre las pérdidas de presión y el flujo. El método de Hardy Cross permite usar cualquiera de esas relaciones.

La relación general entre las pérdidas de presión y caudal es la siguiente:

$$H_l = k \cdot Q^n \quad (24)$$

Donde:

H_l : caída de presión [Pa]

k: coeficiente de fricción

Q: caudal [m³/s]

n: exponente del caudal

En la mayoría de las situaciones los parámetros que componen k, como lo son el largo, diámetro y rugosidad de los conductos se toman como conocidos o asumidos y por lo tanto los valores de k pueden ser determinados para cada conducto en la red. Los factores que forman k y el exponente n cambian dependiendo de la relación usada para determinar las pérdidas de presión. Sin embargo, todas las relaciones son compatibles con el método de Hardy Cross, y las más utilizadas en mecánica de fluidos se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Relaciones entre pérdidas de presión y caudal [2].

Ecuación de pérdida de presión	Relación	k	n
Ecuación Hazen-Williams	$H_l = L \cdot \frac{10.67 \cdot Q^{1.85}}{C^{1.85} \cdot d^{4.87}}$	$L \cdot \frac{10.67}{C^{1.85} \cdot d^{4.87}}$	1.85
Ecuación Darcy-Weisbach	$H_l = \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d^5}$	$L \cdot \frac{8 \cdot f}{g \cdot \pi^2 \cdot d^5}$	2

Los pasos en el método Hardy Cross pueden ser enumerados de la siguiente manera [37]:

Paso 1: Asumir los flujos más razonables para cada conducto de la red de ventilación. La ley de continuidad debe ser satisfecha, es decir, $Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{salida}}$. Durante la primera iteración, el caudal inicial Q_0 debe ser asumido como un flujo supuesto.

Paso 2: aplicar la pérdida por fricción a cada conducto utilizando la siguiente expresión:

$$H_l = K \cdot Q^n \quad (25)$$

Paso 3: Calcular la suma algebraica de las pérdidas de presión alrededor de cada circuito elemental.

$$\Sigma H_l = \Sigma (K \cdot Q^n) \quad (26)$$

Paso 4: Ajustar el flujo Q_0 en cada conducto mediante una corrección ΔQ para equilibrar la presión en el circuito y alcanzar la relación mostrada en la ecuación (28).

$$\Delta Q = -\frac{\Sigma H_l}{n \Sigma |H_l| Q_o} \quad (27)$$

$$\Sigma H_l = \Sigma (K \cdot Q^n) = 0 \quad (28)$$

Paso 5: repetir hasta que ΔQ sea pequeño.

Para una explicación más detallada del método Hardy Cross, véase [2,3].

2.6.2 Funcionamiento del modelo computacional VentSim™

VentSim™ itera con un algoritmo simple el cual distribuye los distintos gases presentes en la mina a una velocidad lineal y asume que la mezcla compuesta por dichos gases es perfectamente homogénea. El balance es automático y se realiza en base al volumen con la finalidad de mantener el 100% de la concentración de la mezcla, la cual puede contener hasta 15 tipos gases [33].

La simulación dinámica omite las pequeñas turbulencias causadas por el paso del aire en conductos rugosos o en intersecciones [33]. Es por esto que se recomienda tomar los resultados la simulación como una referencia y no como “ley”, ya que en la realidad, la mezcla no se posee dicho comportamiento y esto puede subestimar algunos parámetros claves como las velocidades, flujos, presiones, etc.

La base teórica de VentSim™ está respaldada en estudios publicados a lo largo del mundo y que fueron realizados por distintas instituciones del área [38]. La figura 2.20 muestra la estructura básica que los software de simulación utilizan para realizar los modelamientos.

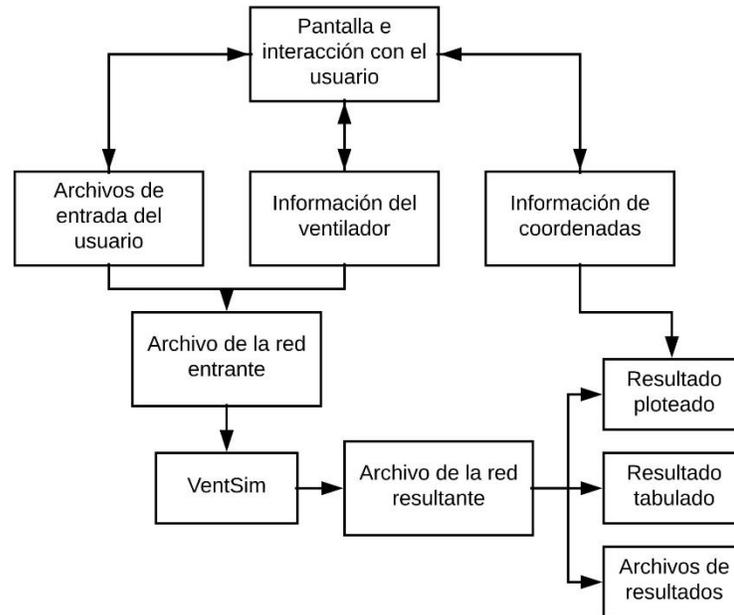


Figura 2.20. Estructura básica del funcionamiento de un software de simulación (modificada) [3].

2.6.3 Aplicación de VentSim™ en casos reales

En este apartado se describen algunas situaciones reales donde han sido aplicados modelos de simulación desarrollados en VentSim™, en problemas de flujo, concentraciones de gases, caídas de presión, etc.

1. **Rosh Pinah Mine (Namibia, 2014)** [39]: En el año 2014 la mina sufrió ciertos eventos en el sistema de ventilación que tenían relación a los flujos de aire requeridos para la operación, los cuales eran inferiores a los demandados. Con el fin de solucionar y mejorar el sistema actual de la mina, el equipo de profesionales decidió utilizar VentSim™ en sus operaciones para poder encontrar alternativas de solución. Los resultados de los estudios y las simulaciones se vieron reflejados en una reducción de los costos de ventilación, los cuales alcanzaron los \$137,000 dólares por año, garantizando así condiciones óptimas para el trabajo seguro al interior de la mina.
2. **Bronzewing Mine (Australia, 2001)** [40]: El sistema de ventilación de la mina fue modelado en VentSim™ para asistir en las decisiones de los ingenieros en planificación frente a los problemas del flujo de aire. Los resultados de los reportes de la ventilación se llevan a cabo cada tres meses

y son usados para comparar los flujos reales de la mina con los flujos simulados. Este proceso es utilizado para validar el modelo de simulación en VentSim™ y a su vez, para actualizar dicho modelo con la información actual. Si los valores de la simulación y los flujos reales no concuerdan, esto podría ser provocado por una mayor cantidad en las pérdidas del sistema o por alguna configuración errónea de este en el modelo de simulación.

3. Majiagou Coal Mine (China, 2016) [41]: El estudio realizado para validar el modelo de simulación consistió en hacer mediciones en 150 puntos distribuidos a lo largo de todo el sistema de ventilación de la mina. Los resultados arrojaron una relación 1:1 entre los datos obtenidos por la simulación y aquellos medidos en los aforos, lo cual entrega un alto nivel de confiabilidad en el uso del software para analizar distintos escenarios a lo que la mina se pudiese ver enfrentada en el futuro.

4. Shaqu Coal Mine (China, 2017) [42]: Para validar el modelo de simulación en la mina se realizaron mediciones en los piques en los que habían ventiladores principales. La tabla 2.5 muestra una consistencia entre los caudales medidos en terreno y los obtenidos mediante VentSim™, por lo que se concluye que el software puede verdaderamente reflejar el comportamiento del sistema de ventilación actual.

Tabla 2.5. Cantidad de aire simulada y medida de los ventiladores principales [42].

Nombre del conducto	Xialonghuayuan	Gaojiashan	Pique inclinado de extracción #1	Baijiapo
Caudal medido [m ³ /s]	144.4	251.8	107.6	136.6
Caudal simulado [m ³ /s]	140.8	249.9	105.0	136.8

5. Donghai Mine (China, 2011) [43]: Esta mina tenía una urgente necesidad de analizar su sistema de ventilación subterránea en tiempo real con gráficos e indicadores que fueran de fácil entendimiento para los trabajadores con el fin de mejorar sus requerimientos de seguridad.

Por muchos años estuvieron usando programas de simulación 2D que no cumplían sus expectativas debido a que eran muy caros para mantenerlos con una base de datos actualizada. Es por esta razón que empezaron a utilizar VentSim™, el cual hizo que las operaciones fueran extremadamente simples y que los encargados pudieran controlar con los modelos 3D en tiempo real.

Para validar sus modelos se realizaron 220 mediciones de presión con el fin de determinar las rutas principales de ventilación en cuatro sectores de la mina. Los datos obtenidos de la simulación fueron comparados con los medidos en terreno. Finalmente, se concluyó que eran confiables y que el error cumplía con las necesidades.

6. **Bulianta Colliery (China, 2013)** [44]: El modelo de simulación base fue validado a través de dos etapas. La primera consistía en comparar los flujos de aire y la segunda en chequear las pérdidas de presión en las zonas críticas del sistema. La figura 2.21 muestra la comparación entre los caudales aforados y aquellos que resultaron de la simulación, se puede ver que la diferencia es marginal.

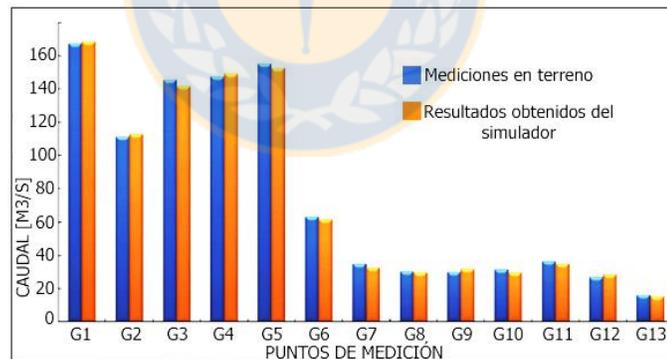


Figura 2.21. Comparación entre caudales medidos y los obtenidos en VentSim™ (modificada) [44].

7. **Mina Nechí (Colombia, 2012)** [45]: Se realizó un estudio para corroborar los datos simulados con la situación real de la mina. Para ello se llevaron a cabo mediciones de flujo bajo la norma “ASHRAE 111; Practices for measurement, testing, adjusting and balancing of building heating, ventilation, Air-conditioning and refrigeration Systems”. Los resultados arrojaron que la simulación del sistema de ventilación bajo la configuración actual de la mina se ajusta a los flujos de aire medidos en terreno.

8. **Mina El Salvador (Codelco, Chile)** [34]: Se realizaron aforos en 137 estaciones repartidas en diez zonas (ver figura 2.22) al interior de la mina para validar la simulación del sistema de ventilación existente en la mina, en donde se encontró una correlación del 4% (ver figura 2.23) entre los datos aforados y los resultados de la simulación. Este estudio fue realizado por VenTop, quienes son los representantes de la consultora HOWDEN en Chile.

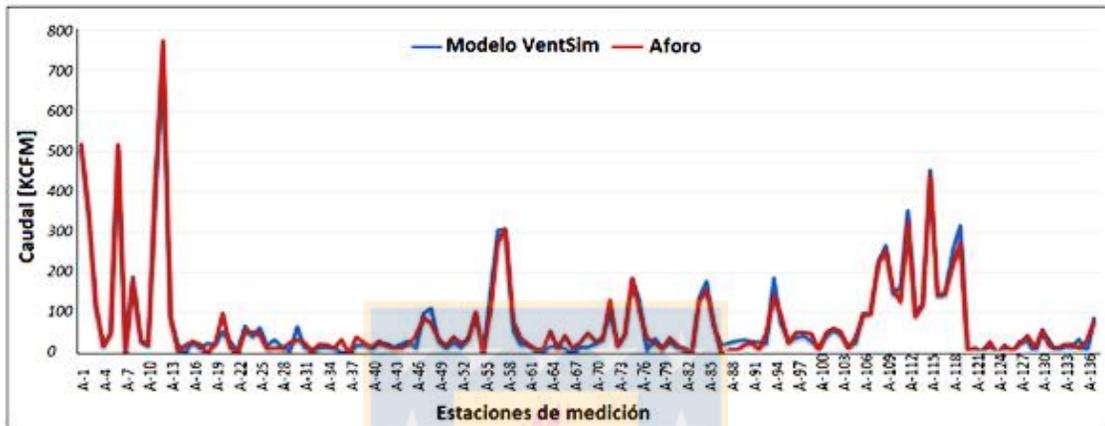


Figura 2.22. Correlación modelo VentSim™ v/s aforo completo (137 estaciones) [34].

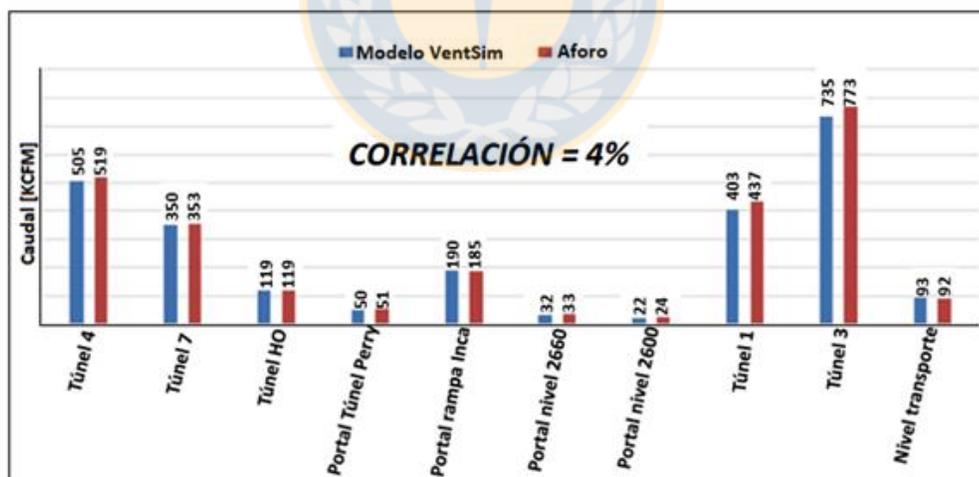


Figura 2.23. Correlación modelo VentSim™ v/s aforo (entradas y salidas de aire) [34].

Todos estos casos de análisis en VentSim™ permiten validar su uso en aplicaciones reales y determinar qué tipo de datos de entrada (coordenadas, resistencias, caudales, entre otros) son requeridos para poder definir un modelo de simulación.

3. CASO DE ESTUDIO

En el siguiente capítulo se describe la mina polaca FezMine donde se desarrolla este estudio.

3.1 Antecedentes

El 14 de noviembre de 1978 se creó en Polonia una empresa estatal bajo el nombre de “Kopalnia Węgla Kamiennego FezMine” la cual inició su producción en el año 1995 y estuvo controlada por el Estado polaco hasta finales del año 2007. A comienzos del año 2008 FezMine fue adquirida por el grupo JSW S.A (Jastrzębska Spółka Węglowa S.A.) que es el mayor productor de carbón siderúrgico de la Unión Europea [46].

En el ámbito minero el grupo JSW S.A. consta de [47]:

- Cinco minas de carbón, las cuales producen 16.8 millones de toneladas de carbón al año.
- Cuatro plantas de carbón siderúrgico, que producen 4.1 millones de toneladas por año de este material.
- Recursos de carbón por un total de 6,200 millones de toneladas, cuyas reservas son 933 millones de toneladas.

La mina FezMine está ubicada en la región de Alta Silesia en Ornontowice, Polonia, con un área superficial aproximada de 37.5 km² y alcanzará una profundidad de 1340 m.b.n.m en los próximos años [48] convirtiéndose así en la mina más profunda de Europa central.

Actualmente las labores mineras se llevan a cabo en siete niveles de operación ubicados a 164, 338, 500, 700, 900, 1050 y 1290 m.b.n.m., además cuenta con cuatro niveles de explotación denominados: 341, 358, 364, y 401 [49], que contienen seis paneles de carbón en explotación.

En el periodo 2010-2015 el ritmo de extracción en FezMine osciló entre las 4.2 a 4.6 millones de toneladas de material por año [50]. En el año 2018 la producción desciende a 3.2 millones de toneladas anuales [51]. Esta es una de las razones por lo que JSW S.A. decidió invertir fondos en el

desarrollo de un nuevo nivel mina a mayor profundidad (1290 m.b.n.m) a comienzos de en el año 2007, como será explicado en el apartado 3.3.4.

Con respecto a los niveles de empleabilidad en el periodo 2008-2012 (ver Tabla 3.1) se han mantenido casi constantes a lo largo de su operación. En este ámbito se espera una mayor demanda para el año 2019, al entrar en operación el nuevo nivel mina 1290.

Tabla 3.1. Número de empleados durante el periodo 2008-2012 [52].

Año	2008	2009	2010	2011	2012
Trabajadores	4231	4144	4007	4050	3914

Los trabajos dentro de la mina están distribuidos en cuatro turnos de 7 horas y 30 minutos como muestra la tabla 3.2:

Tabla 3.2. Turnos de trabajo en FezMine [53].

Turno	Periodo
I	06:00 – 13:30
II	12:00 – 19:30
III	18:00 – 01:30
IV	00:00 – 07:30

Las categorías de carbón explotados en FezMine son principalmente del tipo 34 y 35 con unos pequeños porcentajes del tipo 32 y 33 (según la clasificación polaca). En la tabla 3.3 se muestran las proporciones de cada clase de carbón explotado en la mina en el año 2012:

Tabla 3.3. Tipos de carbón explotados en FezMine en el año 2012 [52].

Tipo de carbón	Cantidad [%]
32.2	0.3
33	0.3
34.1	0
34.2	46.3
35.1	49.6
35.2A	3.5

En la Tabla 3.4 se detallan algunos de los parámetros principales de cada tipo de carbón basados en la clasificación polaca. Para una descripción más profunda, remitirse al Anexo E.

Tabla 3.4. Características según la clase de carbón [22,23].

Tipo de carbón	Material volátil	Valor calorífico [Mj/kg]	Uso del carbón
32.2	% > 28	Hasta 36	Hornos de parrilla, hornos de carbón pulverizado, generadores de gas.
33		Entre 33 a 36	Hornos de parrilla, hornos de carbón pulverizado, hornos industriales, generadores de gas, calderas industriales, producción de coque.
34.1		Entre 33 a 36.5	Carbón para la producción de coque, generación de gas, hornos de gas y coque.
34.2			
35.1	26 < % < 31	Entre 35 a 37	Carbón para la producción de coque.
35.2	20 < % < 26		

3.2 Equipos de ventilación

En su mayoría las minas polacas utilizan equipos de ventilación proveídos por la empresa Stalkowent de Polonia. Uno de los modelos más utilizados es el WPK [54-56], que son del tipo centrífugo y están diseñados para la ventilación principal de las minas; estos se pueden adaptar para la operación inversa, es decir, invertir la dirección del flujo de aire [57].

El diseño de los ventiladores WPK al ser simple no crea dificultades de montaje y garantiza un funcionamiento sin problemas a largo plazo, lo que asegura una alta eficiencia y encomia de trabajo [56,57]. Estos modelos de ventiladores pueden operar hasta 60,000 horas sin presentar fallas [56].

FezMine cuenta con dos piques de extracción de aire, en uno se usan dos ventiladores WPK 3.9 operando en paralelo y en el segundo se usan dos ventiladores WPK 5.0 operando en paralelo [58]. A modo de ejemplo, las figuras 3.1 y 3.2 muestran los ventiladores WPK y cómo estos están instalados en la estación de ventilación principal.



Figura 3.1. Ventilador centrífugo tipo WPK 5.0 [59].



Figura 3.2. Ventilador centrífugo tipo WPK 3.9 [54].

En cada pique de extracción solo funciona un ventilador a la vez, el cual opera de forma continuada durante un mes, dejándose el otro en reposo en caso de emergencia o mantención [58]. Los parámetros técnicos de estos ventiladores se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Parámetros técnicos de los ventiladores WPK 3,9 y WPK 5,0 [57].

Tipo y tamaño del ventilador	Diámetro [m]	Velocidad angular [RPM]	Caudal [m ³ /s]	Presión total [Pa]	Eficiencia [%]	Potencia [kW]	Peso sin contar el motor [kg]
WPK 3.9	3.9	300	150	1,550	86	270	25,770
		375	187	2,433	86	529	
		500	250	4,400	86	1,279	
WPK 5.0	5.0	300	292	2,904	85	992	48,300
		375	365	4,542	85	1,939	

La curva característica y el área de trabajo para los distintos modelos de ventiladores principales tipo WPK se muestra en el Anexo F.

En cuanto a la ventilación auxiliar, en FezMine se usan ventiladores modelo WL-SIGMA 1000/1 fabricados por la compañía polaca SIGMA S.A [60]. Las principales características técnicas de este modelo de ventiladores se muestran en la Tabla 3.6, mientras que las curvas características se muestran en el Anexo G.

Tabla 3.6. Características ventilador WL-SIGMA 1000/1 [60].

Caudal nominal	1200 m ³ /min (10 m ³ /s)
Incremento nominal de la presión total	2900 Pa
Incremento máximo de la presión total	880 Pa (1st gear) 3510 Pa (2nd gear)
Peso del ventilador	498 kg
Eficiencia del ventilador (2da marcha)	80%
Diámetro interno del ventilador	956 mm
Rangos de rendimiento	4 - 13.5 m ³ /s (1ra marcha) 11 - 26 m ³ /s (2da marcha)
Potencia nominal	20 / 82 kW
Voltaje nominal	500V
Corriente nominal	34.5 / 119 A
Velocidad angular	1482 / 2963 RPM

3.3 Descripción general de la mina

3.3.1 Piques

La mina tiene cinco piques: I, II, III, V, VI. Los piques II y V son utilizados en ventilación para la extracción de aire mientras que los piques I, III y VI son para la entrada de aire. La tabla 3.7 describe la función de cada labor minera mencionada y sus características principales:

Tabla 3.7. Funcionalidad de cada pique [52].

	Pique I	Pique II	Pique III	Pique V	Pique VI
Ventilación	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada
Uso	Extracción principal de carbón	Ventilación	Personal y materiales	Ventilación	Personal y materiales
Diámetro	9 m	9 m	9 m	9 m	9 m
Largo	976.9 m	977.5 m	1,005.3 m	1,042 m	1,287 m

Para contextualizar, la figura 3.3 muestra una vista en planta del área de FezMine y donde se ubican los piques y la figura 3.4 muestra un esquema del comportamiento del flujo de aire a través de los piques de inyección y extracción a lo largo de toda la mina.

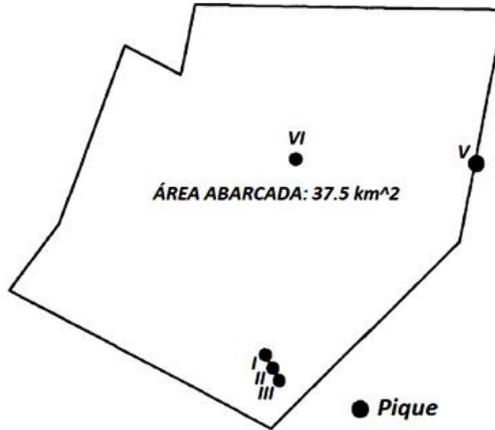


Figura 3.3. Ubicación de los piques en FezMine (modificada) [58].

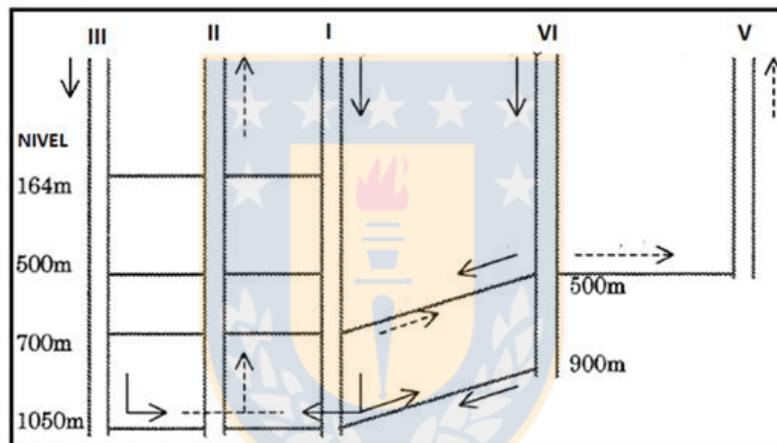


Figura 3.4. Diagrama de flujo para el sistema de ventilación principal (modificada) [58].

3.3.2 Niveles de operación

Actualmente FezMine cuenta con seis niveles de operación a distintas profundidades, cada uno con una función en específico. Para el año 2019 FezMine pasará a operar con siete niveles, ya que entrará en funcionamiento el nuevo nivel mina 1290. La tabla 3.8 especifica el largo total y la función principal de cada nivel para el año 2019.

Tabla 3.8. Especificaciones por nivel [52,58].

Nivel	Largo [m]	Función principal
164	405.7	Accesorio
338	6,298.6	Conexión entre niveles
500	2,298.3	Ventilación
700	13,280.8	Transporte
900	2,786.3	Ventilación
1050	14,722.4	Ventilación y transporte
1290	2,726.2	Ventilación y producción

3.3.3 Niveles de explotación

La explotación se lleva a cabo en cuatro niveles los que en conjunto tienen seis paneles de carbón que se explotan con el método longwall en retroceso. A continuación se describen los niveles de explotación con sus principales características:

- **341:** Este nivel cuenta con un panel de explotación con una potencia entre 1.05 a 2.51 metros y con un largo de galerías de 4,298.5 m. La sección transversal media de las galerías es de 5.2 metros. El carbón extraído es del tipo 35.2 [61] y posee uno de los niveles más altos de metano emitido en la mina.
- **358:** Este nivel cuenta con dos paneles de explotación. Sus paredes tienen alturas de 1 a 3 metros con un ancho promedio de 250 metros y cuenta con un largo de galerías de 26,022.1 m [62]. En relación al riesgo de explosión, los paneles son menos propensos a la combustión espontánea y no presentan riesgos de estallidos de roca. Según la legislación polaca el carbón explotado se clasifica como tipo 32.2 [63].
- **364:** Este nivel cuenta con dos paneles de explotación que poseen alturas de 1.1 a 2.2 metros con anchos cercanos a los 243 metros [53] y cuenta con un largo de galerías de 14,727.6 m. Según la normativa polaca el carbón explotado se clasifica como tipo 32.2 [63]. La operación de los paneles se lleva a cabo en una zona clasificada como categoría IV en relación al peligro del metano con una pequeña tendencia a la combustión espontánea del carbón.

- **401:** Este nivel cuenta con un panel de explotación que tiene el nivel más alto de metano en la mina, por lo cual está clasificado como tipo IV (según la clasificación polaca). El ancho de la pared es de 250 metros con un largo aproximado de 1,470 metros y una altura promedio de galerías de 1.74 metros [64]. El largo de galerías totales es de 7,365.1 m.

3.3.4 Profundización al nuevo nivel mina 1290

El nuevo nivel mina se encuentra 290 metros por debajo del nivel 1050 y cuenta con reservas de 159.4 millones de toneladas de carbón siderúrgico tipo 35, que serán explotadas a una tasa de 6,000 toneladas al día [52]. La inversión inicial para su desarrollo fue cercana a los 200 millones de dólares [65]. Los argumentos que justificaron la inversión fueron principalmente:

- Extender la vida útil de la mina hasta el año 2071 [66].
- Análisis técnicos-económicos mostraron la factibilidad y viabilidad del proyecto.
- Solo se debe profundizar el pique VI (290 metros aproximadamente) para acceder a los recursos minerales del nuevo nivel [67].

En el año 2007 el equipo de ingenieros de planificación de mina de JSW S.A hizo una proyección a largo plazo para la producción que tendría la compañía sin el nuevo nivel mina de FezMine y otra proyección con el desarrollo de este. Ambas gráficas (ver figuras 3.5 y 3.6) avalan la decisión tomada por la compañía en invertir fondos para el desarrollo de este proyecto.

En dichas gráficas se puede apreciar que sin contemplar el proyecto la producción de JSW comenzaría a decaer a partir del año 2021, hasta que finalmente en el año 2040 el negocio fuera insostenible. Por otro lado, al ejecutar el proyecto la producción se mantendría casi constante en el tiempo por lo menos hasta el año 2070.

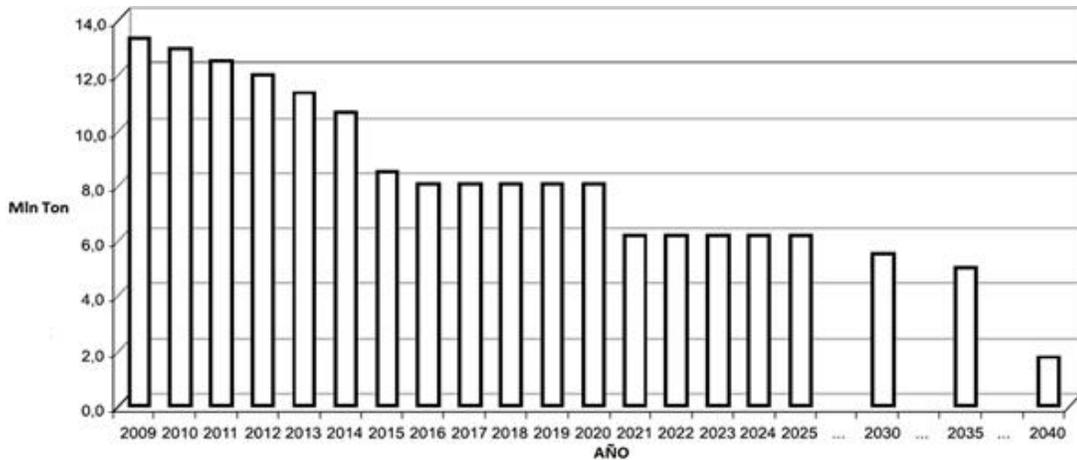


Figura 3.5. Proyección de la producción sin el nuevo nivel mina (modificada) [66].

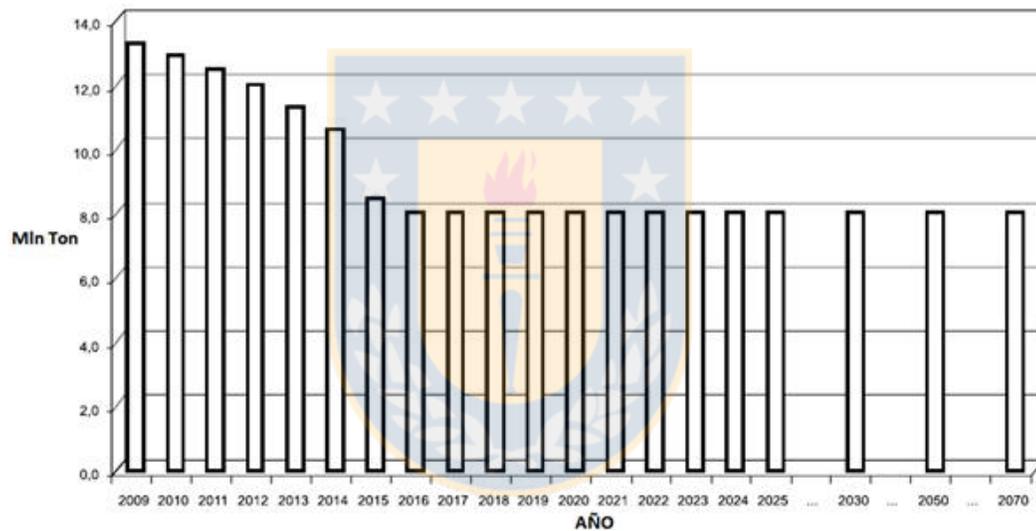


Figura 3.6. Proyección de la producción con el nuevo nivel mina (modificada) [66].

3.4 Problemática del metano

El metano representa un riesgo para la salud de los trabajadores como para la seguridad de la operación. En la minería polaca se clasifica en la escala de I a IV según el riesgo de explosión presente en el panel de explotación. Para la ventilación del gas se emplean dos métodos principales, el tipo U e Y, los cuales fueron definidos en el apartado 2.1.

En el año 1996 se realizaron estudios en terreno que concluyeron que las reservas de metano total en FezMine eran cercanas a los 9,500 millones de m^3 [68]. Las emisiones de metano en la mina

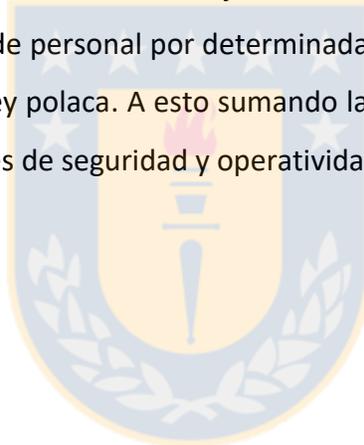
han tenido una tendencia creciente a través de los años debido al incremento en las tasas de producción de carbón, como se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Emisiones totales de metano en FezMine en Mm³/año [68].

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Emisión	74.2	85.4	90.4	99.9	114.4	108.0	104.4	136.4	145.2	151.2	160.8

Adicionalmente se tienen registros de los flujos de metano emitidos en los paneles de explotación medidos por la universidad AGH que oscilan en el rango de 0.2 a 0.9 m³/s (D. Obracaj, correo electrónico, 11 de junio, 2018).

Así, el gran desafío es poder definir un flujo de aire que proporcione la seguridad de la operación como para el tránsito de personal por determinadas labores mineras que deben cumplir los estándares regulados por la ley polaca. A esto sumando la dificultad de conectar el nuevo nivel mina manteniendo las condiciones de seguridad y operatividad anteriormente mencionadas.



4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Descripción del problema y metodología general

FezMine históricamente se ha visto enfrentada a grandes desafíos relacionados al control de las concentraciones de metano emitidas por el carbón en los paneles de explotación, causando accidentes que muchas veces son fatales [69].

Para llevar a cabo el análisis de esta problemática en función de los objetivos planteados, se diseña un modelo de simulación del sistema de ventilación de la mina, que incluye flujo de aire y metano. Los apartados siguientes exponen la metodología contemplada para definir el modelo simulación calibrado y comprobado para el análisis de las concentraciones de metano en las galerías vinculadas a los paneles de explotación.

La simulación es una herramienta que representa un conjunto de métodos y aplicaciones que intentan imitar el comportamiento de la realidad en un sistema determinado. Es utilizada para la toma de decisiones y el mejoramiento continuo de procesos claves en la operación.

La figura 4.1 muestra las etapas fundamentales para la realización de un estudio de simulación, que consiste en la definición del problema que se quiere resolver, luego se recopila información que permita definir un modelo conceptual con el que se pueda desarrollar un modelo de simulación (calibrado y comprobado) que entregue resultados aplicables a la realidad. En ciertas circunstancias es posible agregar o suprimir etapas, esto depende de la problemática a tratar y de la información disponible.

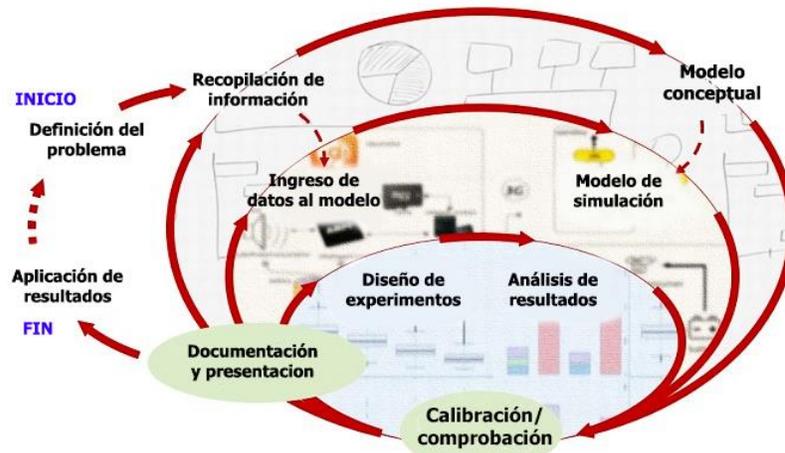


Figura 4.1. Metodología genérica para definir un modelo de simulación (modificada) [70].

4.1.1 Recopilación de información

Este estudio fue realizado en conjunto con académicos de la universidad AGH de Cracovia, quienes por años han desarrollado diferentes proyectos en la mina FezMine, por lo que cuentan con datos confidenciales no publicados que fueron dispuestos para la realización de esta memoria.

Después de la recopilación de información, se lograron reunir más de 100 artículos, 15 reportes confidenciales realizados por la AGH, 5 reportes de la mina hechos por consultoras y la legislación de minería polaca aplicable al caso de estudio.

La información recopilada consta también de:

1. **Planos de labores:** En total son 11 planos en formato DWG-2D (AutoCAD) correspondientes a los 7 niveles de operación y 4 de explotación, a escala 1:10000. Estos representan los tipos de labores existentes en cada nivel y contienen información sobre las coordenadas y diferencias de cotas de cada galería que definen espacialmente la mina. Por motivos de confidencialidad y el carácter académico de este trabajo, los planos disponibles no representan la operación en su totalidad.

- 2. Geometría de las labores:** Los piques tienen una sección transversal de 9 m^2 de forma circular y las galerías son arqueadas, pero no siguen un patrón determinado respecto a su tamaño. Para información más detallada, ver el Anexo H que muestra el área transversal de 373 labores en m^2 .

El largo total de las labores de la mina es de 100,220 m, subdivido de la siguiente forma:

- Largo total de piques: 5,288.7 [m]
- Largo total de galerías de los niveles de operación: 42,518.3 [m]
- Largo total de galerías de los niveles de explotación: 52,413.3 [m]

Para más detalle de cada nivel y pique, ver el apartado 3.3.

- 3. Resistencias aerodinámicas de labores:** Estos valores fueron obtenidos por la universidad AGH de forma experimental en función de las medidas de campo y considerando los parámetros que definen la fórmula de resistencia (ver ecuación 11, página 13). Las resistencias calculadas están disponibles para 373 labores del diseño minero (galerías y piques) en unidades de kg/m^7 . Para información más detallada, ver el Anexo H.

- 4. Características técnicas de ventiladores:** Se tienen cuatro ventiladores principales ubicados en los piques de extracción de aire viciado II y V. Se usan las curvas características de los catálogos de los ventiladores usados actualmente en FezMine (ver Anexo F y G).

Existen dos ventiladores principales en cada pique extracción, y solo se encuentra uno en operación en cada pique. Para ver los parámetros técnicos de los ventiladores principales, dirigirse a la tabla 3.6.

- 5. Aforos de caudal de aire por cada nivel:** Se dispone de 15 mediciones de caudales realizadas en las conexiones entre los piques de inyección con los niveles de operación (11), en las entradas desde la superficie en cada pique de inyección (3) y en el total de aire que fluye a través de toda la mina (1) (ver tabla 4.1). Para ver la ubicación espacial de los aforos ver la figura 4.2.

Tabla 4.1. Aforos en terreno por nivel [71].

Punto	Conexión	VentSim™ [m³/s]	Aforo [m³/s]
1	Pique I-164	4.8	5.0
2	Pique I-700	27.2	24.2
3	Pique I-1050	19.2	19.2
4	Pique III-164	8.6	8.3
5	Pique III-500	11.8	10.0
6	Pique III-700	81.0	80.0
7	Pique III-1050	68.7	70.0
8	Pique VI-500	28.8	21.7
9	Pique VI-900	141.0	208.3
10	Pique VI-1050	58.8	61.7
11	Pique I	55.0	48.4
12	Pique III	184.0	168.3
13	Pique VI	244.7	291.7
14	Global	499.0	508.4
15	Pique VI-1290	29.9	33.3

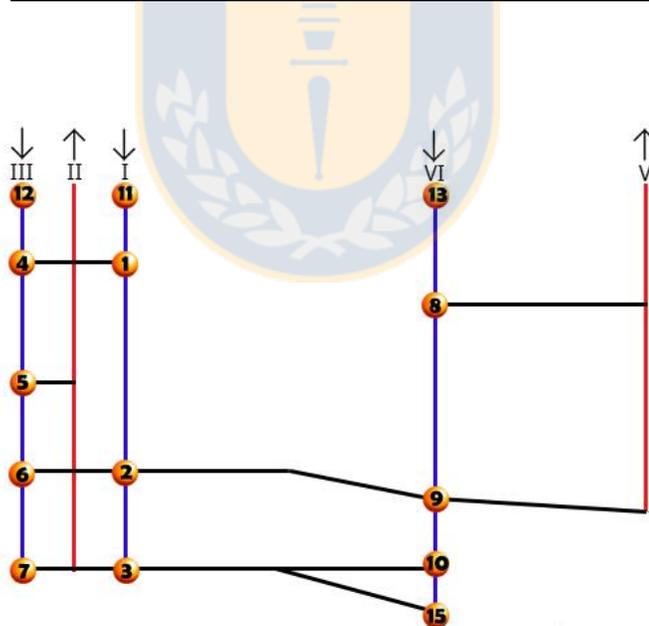


Figura 4.2. Ubicación de los aforos.

- 6. Emisiones de metano:** El rango de emisiones desde los paneles de explotación es de 0.2 a 0.9 m³/s (D. Obracaj, correo electrónico, 11 de junio, 2018). Las emisiones de metano en los niveles de explotación 358, 364 y 401 son 0.51, 0.93 y 0.4 m³/s respectivamente.

7. **Gradiente geotérmico:** En la región de la Alta Silesia, donde FezMine está ubicada, el gradiente geotérmico es aproximadamente $3.3/100$ [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$].
8. **Geología:** Se tienen 5 informes que detallan las estructuras geológicas que conforman el yacimiento, la mineralogía de la zona, el tipo de roca (cuaternarias, terciarias y triásicas), los estratos carboníferos que forman los 6 paneles de carbón y los dos planos de fallas principales existentes (Orzeskie y Rudzkie). El área está formada en su gran mayoría por: areniscas, lodolitas, arcillas, limolitas y calizas.
9. **Planta de procesamiento:** La producción neta de la planta de procesamiento en el periodo 2010-2012 osciló entre las 2.8 a 3.2 millones de toneladas por año, en la que se distinguen dos productos comercializables: carbón térmico para la generación de energía y siderúrgico para la fabricación de acero.

4.1.2 Análisis e interpretación de la información

Después de recopilar toda la información disponible acerca de FezMine, los documentos son traducidos del polaco, y analizados y clasificados en las siguientes categorías:

- Geología
- Información de los paneles de carbón
- Emisiones de metano desde los paneles de explotación
- Ventilación y sus particularidades en el método longwall
- Antecedentes y generalidades de FezMine
- Método de explotación longwall
- Geomecánica
- Planta de procesamiento
- Ley polaca para la minería
- Reportes de consultoras
- Reportes de la mina
- Medio ambiente

Una vez clasificada la información se evidencia que un total de 72 documentos tienen utilidad real para el desarrollo del estudio.

Toda la información que posee utilidad para el estudio se puede usar de forma íntegra sin necesidad de alguna modificación, a excepción de:

- 1. Los planos de las labores en 2D:** Este proyecto se fundamenta en la realización de un modelo 3D, por esto, es necesario hacer una conversión dimensional de los planos para poder usarlos en la herramienta de simulación que se dispone (VentSim™).

El proceso de conversión de planos 2D a 3D tiene su fundamento en que:

- La herramienta de simulación utilizada en este estudio requiere de coordenadas de entrada en 3D.
- La simulación 3D permite representar la complejidad estructural de los niveles de la mina de forma más cercana a la realidad.
- La representación de la geometría permite interpretar los resultados de forma directa.
- La simulación 3D es más útil que la 2D en casos donde existan parámetros que cambien con respecto a la tercera dimensión, que para este estudio es la temperatura, la que afecta en los cálculos del flujo de aire compresible.
- La visualización 3D de un modelo de simulación se hace más fácil y entendible para el receptor interesado en el proyecto a desarrollar.

- 2. Caudal requerido por el personal:** Al no conocer la distribución espacial del total de trabajadores por turno (390), se propone una metodología para estimar los requerimientos de caudal del personal presente en cada sector de la mina.

- 3. Emisiones de metano en los niveles de explotación:** Se desconocen las emisiones de metano en los paneles que conforman estos niveles (341, 358, 364). Se propone una metodología basada

en datos bibliográficos para estimar y establecer hipótesis coherentes de la emisión de metano en cada panel de explotación, para ingresar estos valores en VentSim™ y analizar las concentraciones del contaminante en las distintas galerías que componen cada nivel.

La figura 4.3 resume el desarrollo de las tareas de la primera etapa del trabajo que permite obtener los datos e información necesaria para formular el modelo conceptual del problema.

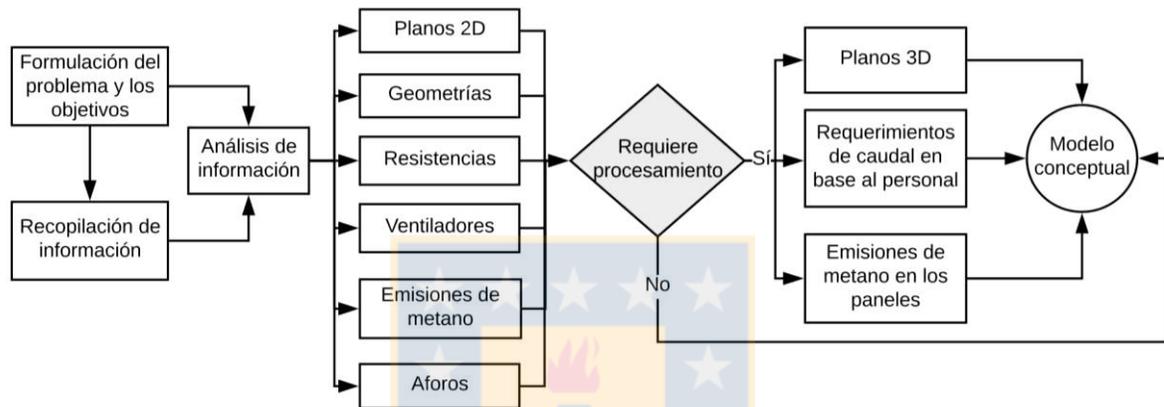


Figura 4.3. Procesamiento de la información recopilada.

4.1.3 Procesado de información

4.1.3.1 Procesamiento de los planos de labores 2D

Se reciben los planos 2D digitalizados de cada nivel de operación y explotación de la mina, esto se debe a que los proyectos de ventilación en la universidad AGH se suelen realizar en simuladores 2D, como lo son VentGraph y AGHWEN.

Para poder importar los archivos a VentSim™, se debe hacer una simplificación en los planos digitalizados, esto es, trazar una línea central a cada galería (ver figura 4.4) con sus coordenadas (x,y,z) para que el simulador la reconozca tomando en cuenta las diferencias de cotas entre los nodos que lo conforman. Esto se hace con el fin de convertir los archivos CAD 2D a 3D en VentSim™, para poder asignar un área y volumen a cada labor minera en el simulador.

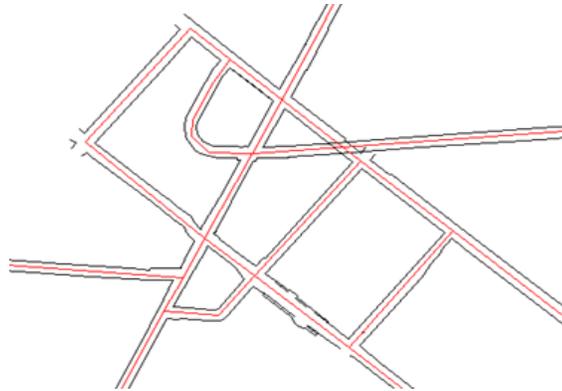


Figura 4.4. Líneas centrales (en rojo) en galerías del nivel 900.

El proceso de convertir datos 2D a 3D no es trivial, pues requiere tiempo y un análisis en detalle para que cada conexión refleje la situación que se tiene en los planos 2D.

Finalmente, se tienen los planos de las labores mineras en 3D para cada nivel de operación y explotación. Para ver los planos globales de la operación en 2D y 3D, dirigirse a los Anexos S e I respectivamente.

4.1.3.2 Procesamiento para el caudal requerido por el personal

En la información recopilada no se cuenta con el número de trabajadores por cada labor minera, se propone una metodología para calcular y establecer la cantidad de personas en cada nivel para determinar el caudal requerido que se debe enviar a cada tipo de galería en los niveles que conforman la operación.

Los parámetros para definir los requerimientos del flujo de aire fresco al interior de la mina son la cantidad de personas y las restricciones de velocidad que impone la ley.

FezMine cuenta con 1,550 trabajadores en las labores subterráneas [58]. La mina opera en cuatro turnos por día con una cantidad de trabajadores de 390 cada uno.

La regulación polaca fija un requerimiento mínimo de aire fresco por cada trabajador de 0.1 m³/s (D. Obracaj, correo electrónico, 16 de diciembre, 2018).

El método de extracción longwall requiere entre 10 a 13 trabajadores en los frentes de explotación desempeñando distintas funciones [25,72,73].

Los pasos del procedimiento adoptado para determinar la cantidad de personas en cada punto de la mina son:

- **Paso 1:** Se definen tipos de galerías de acuerdo a la función que cumplen: ventilación, explotación, desarrollo, cámaras, transporte y de tránsito de personas. [ver Anexo I]. Luego, se mide el largo de cada galería y se obtiene el largo total de estas en toda la mina.
- **Paso 2:** Se distribuye el total de los trabajadores del turno (390) entre los tipos de galerías definidos en el paso 1 de acuerdo a datos bibliográficos vistos en [25,74] y consideraciones propias (ver tabla 4.2).

Tabla 4.2. Distribución de personal por tipo de galería.

Tipo de galería	Personas por turno
Técnicas	30
Transporte	120
Ventilación	20
Frente de explotación	70
Galería	50
Desarrollos	40
Personal	50
Cámaras	10
TOTAL	390

- **Paso 3:** Se calcula en cada nivel la proporción que representa cada tipo de labor con respecto al total de galerías de ese mismo grupo en la mina. Los valores obtenidos se multiplican por el número de trabajadores presentes en ese tipo de labor definido en el paso 2 (proceso análogo para las demás categorías), con el objetivo de determinar la cantidad de trabajadores totales en cada nivel. La tabla 4.3 ejemplifica el procedimiento realizado en este paso para las galerías de ventilación del nivel 358.

Tabla 4.3. Ejemplo del cálculo de personas para galerías de ventilación en el nivel 358.

Tipo de galería	Ventilación
Largo de las galerías de ventilación en el nivel [m]	11,342
Largo total de las galerías de ventilación en la mina [m]	25,228
Proporción de las galerías de ventilación del nivel con respecto al total de las galerías de ventilación de la mina (11,342÷25,228)	0.45
Trabajadores de ventilación minera por turno (del paso 2)	20
Total de trabajadores por concepto de galería de ventilación en el nivel 358 (0.45 x 20)	9

- **Paso 4:** Se establecen sectores de trabajo en cada nivel (operación y explotación) de la mina para representar la distribución del personal, pues se asume que los trabajadores del turno no se encuentran todos juntos en un mismo punto, sino que están bien distribuidos espacialmente. Se define una distancia de 3 km con el objetivo de representar y delimitar el sector de trabajo para cada persona en el turno.

Para un mejor entendimiento del párrafo anterior, remitirse al Anexo J que contiene un ejemplo ilustrativo de la división sectorial.

- **Paso 5:** Se divide el largo total del nivel en el largo del sector de trabajo definido en el paso 4, para obtener la cantidad de sectores que conformarán el nivel. La tabla 4.4 ejemplifica este paso para el nivel de explotación 358.

Tabla 4.4. Ejemplo de la definición de sectores de trabajo para el nivel 358.

Largo total de galerías del nivel [m]	26,023
Largo del área de trabajo [m]	3,000
Cantidad de sectores	9

- **Paso 6:** El total de personas calculadas para cada nivel en el paso 3 se distribuyen en los sectores definidos en el paso 5. La tabla 4.5, muestra el ejemplo para el nivel de explotación 358.

Tabla 4.5. Ejemplo cálculo número de personas por sector de trabajo para nivel 358.

Tipo de galería	Cantidad de personas
Técnicas	0
Transporte	19
Ventilación	9
Paneles	33
Galería	11
Desarrollos	5
Personal	0
Chambers	0
Total	77
Número de sectores	9
Personas por sector	9

De esta forma, el nuevo requerimiento de caudal no será el demandado por la cantidad personas calculadas en el paso 3, sino que en cualquier punto del nivel se deberá cumplir el requerimiento de caudal necesario para el número de personas que se definen en este paso. En el ejemplo de la tabla 4.5, el requerimiento de caudal sería de $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

- **Paso 7:** Se establecen dos consideraciones para los resultados del paso 6:
 1. Las galerías que conectan al pique III y VI, donde hay flujo de personal desde y hacia la superficie, no considerarán los caudales calculados en el paso anterior, sino que deberá cumplir con el caudal de aire requerido por todos los trabajadores que conforman ese nivel en específico. Esto se debe a que la aglomeración de personas en esos sectores es altamente probable durante los cambios de turnos.
 2. Se duplicará el requerimiento de caudal aire para los frentes de explotación calculados en el paso 6, con el fin de lograr un mayor factor de seguridad para las personas en el caso de alguna emergencia.

De esta forma, se tienen tres grandes categorías de galerías:

1. Conexiones hacia los piques de ingreso y salida de personal.
2. Frentes de explotación.
3. Galerías que conforman el resto del nivel.

La tabla 4.6 muestra el caudal mínimo requerido para el número de trabajadores en las labores mineras anteriormente mencionadas una vez aplicada la metodología.

Tabla 4.6. Número de trabajadores de acuerdo al tipo de galería en cada nivel.

Nivel	Galerías en los piques		Galerías en los frentes de explotación		Galerías en el resto del nivel	
	Personas	Caudal [m ³ /s]	Personas	Caudal [m ³ /s]	Personas	Caudal [m ³ /s]
164	2	0.2	-	-	2	0.2
338	-	-	-	-	13	1.3
341	-	-	21	2.1	11	1.1
358	-	-	17	1.7	9	0.9
364	-	-	18	1.8	9	0.9
401	-	-	19	1.9	10	1.0
500	12	1.2	-	-	12	1.2
700	73	7.3	-	-	15	1.5
900	17	1.7	-	-	17	1.7
1050	76	7.6	-	-	13	1.3
1290	11	1.1	-	-	11	1.1

El caudal de aire obtenido se basa en que la mina cuenta con un sistema seguro y ordenado para la entrada y salida de los trabajadores en los cambios de turnos a través del pique III y VI. Esto quiere decir, que primero salen las personas de un turno para que puedan ingresar los trabajadores del siguiente, con el propósito de evitar grandes aglomeraciones y generar un potencial déficit del flujo de aire requerido.

La figura 4.5 muestra el diagrama del procedimiento descrito. Para una información más detallada remitirse al Anexo K que contiene los pasos y resultados para todos los niveles de la mina.

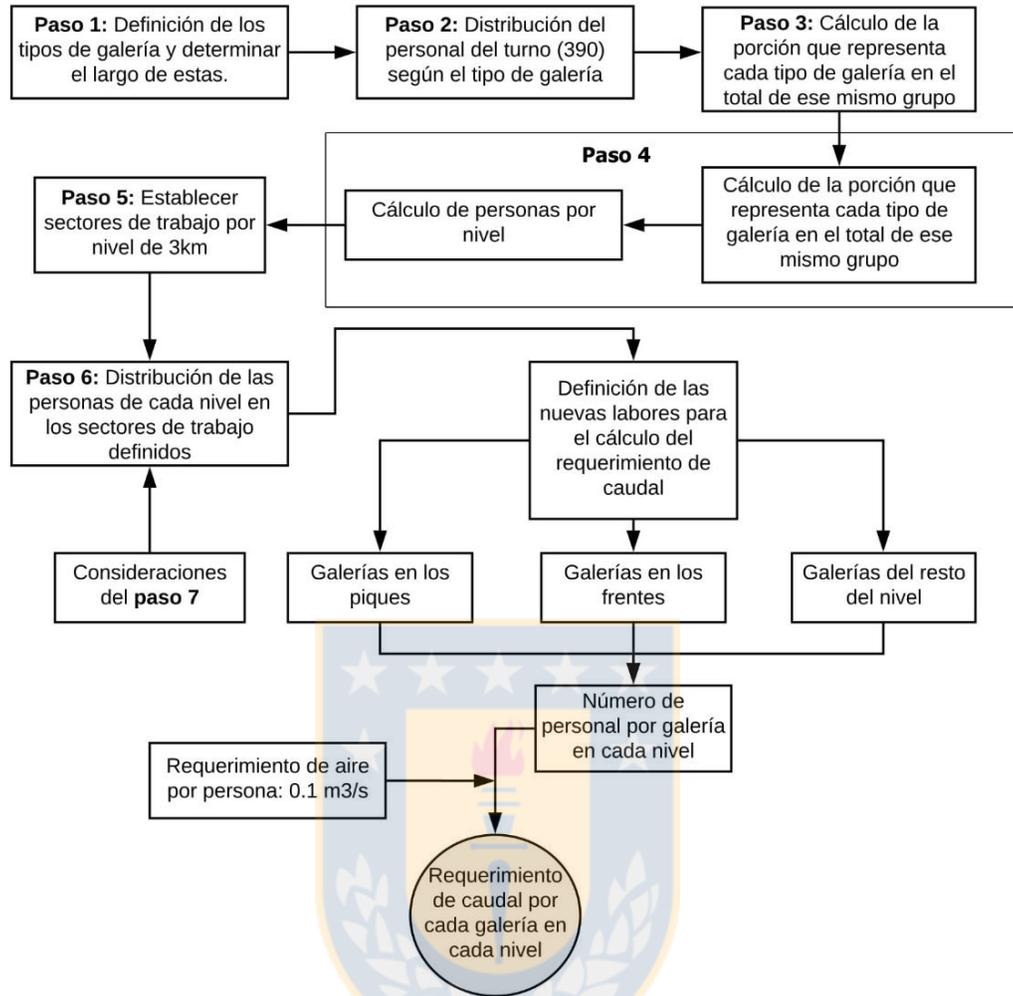


Figura 4.5. Diagrama del método para el cálculo del caudal requerido por el personal.

4.1.3.3 Procesamiento de las emisiones de metano en los niveles de explotación

FezMine cuenta con cuatro niveles de explotación cuyas emisiones totales de metano se muestran en la tabla 4.7. Estas emisiones se consideran constantes a lo largo del tiempo en los seis paneles de explotación.

Tabla 4.7. Emisiones de metano en los niveles de explotación en FezMine.

Nivel de explotación	Emisión de metano por nivel [m ³ /s]	Referencia
358	0.51	[49,75]
364	0.93	[76]
401	0.40	[64,75]
341	-	-

El rango de emisiones de metano en FezMine va de los 0.2 a 0.9 m³/s en los paneles de explotación de carbón, es decir, al menos un panel debe tener una emisión de metano de 0.2 m³/s, y al menos otro panel debe emitir 0.9 m³/s.

Al no contar con datos bibliográficos de las emisiones del panel 341, se asume que este tendrá una emisión de metano desde el panel de explotación de 0.9 m³/s, pues en la mina debe existir un panel emitiendo dicha cantidad dado el rango de emisión de metano en FezMine anteriormente expuesto.

Los niveles de explotación 358 y 364 tienen dos paneles ventilados en configuración tipo Y cuya proporción de emisión de metano se desconoce, solo se tienen los valores totales de cada nivel. Por esta razón, se establecen las siguientes consideraciones que representan los casos extremos que delimitan la región de soluciones.

1. La suma total de emisiones de metano en el nivel de explotación 358 es 0.51 m³/s, que es inferior al límite superior de 0.9 m³/s registrado en la mina. Es por esto que la restricción de emisiones se verá con respecto al límite inferior de 0.2 m³/s, lo que implica que uno de los paneles quedará con una emisión de 0.31 m³/s y el otro con 0.2 m³/s.
2. La suma total de emisiones de metano en el nivel de explotación 364 es 0.93 m³/s, por lo que podría considerarse 0.9 m³/s como límite de emisión para un panel y 0.03 m³/s para el otro, pero esto se ve restringido con el límite inferior que indica que la emisión de metano no puede ser menor de 0.2 m³/s; esto implica que uno de los paneles quedará con una emisión de 0.2 m³/s y el otro con 0.73 m³/s.

En función de estas consideraciones, se formulan los escenarios que se describen en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Escenarios según las emisiones de metano en los paneles de explotación.

Escenario	Flujos de metano en los frentes [m ³ /s]					
	341	401	358/1	358/2	364/1	364/2
1	0.9	0.4	0.2	0.31	0.2	0.73
2	0.9	0.4	0.31	0.2	0.2	0.73
3	0.9	0.4	0.2	0.31	0.73	0.2
4	0.9	0.4	0.31	0.2	0.73	0.2

4.2 Modelo conceptual

El modelo conceptual es una simplificación de la realidad y se utiliza como base para conseguir componentes del sistema real de la mina que son relevantes para abordar el estudio. Corresponde a la generalización de un modelo de simulación que permite establecer lo que se quiere modelar. En este estudio, se busca definir un modelo de simulación de flujo de aire y metano

La figura 4.6 presenta un cuadro resumen que muestra la confección del modelo conceptual de este estudio, cuyas entradas se describen en los apartados siguientes.

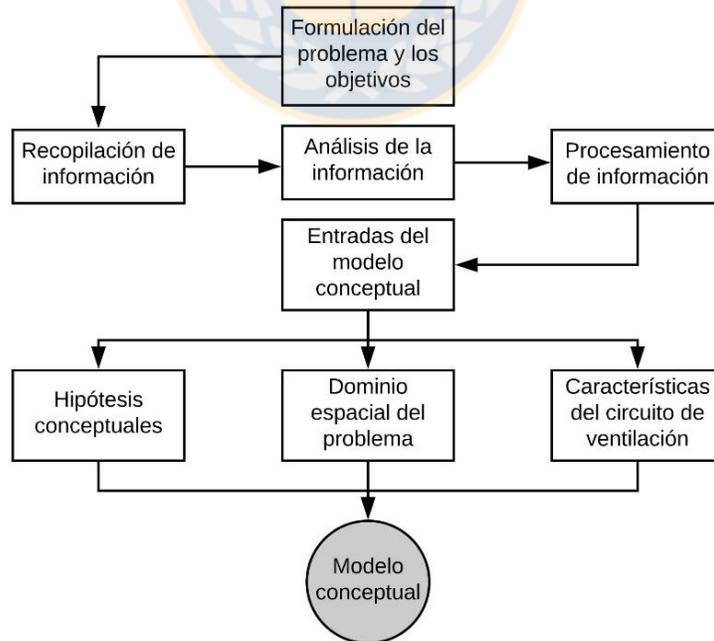


Figura 4.6. Elaboración del modelo conceptual.

Las entradas al modelo conceptual representan el pilar fundamental del estudio, porque si existe algún concepto mal definido en el modelo, este podría no reflejar lo que está ocurriendo en la realidad, haciendo que cualquier propuesta no tenga validez alguna.

4.2.1 Modelo conceptual de flujo de aire

En este apartado se describen las entradas que permiten definir el modelo conceptual de flujo de aire, las que fueron expuestas en la figura 4.6.

4.2.1.1 Hipótesis conceptual

Para definir el modelo conceptual de flujo de aire se establecen las siguientes hipótesis conceptuales a emplear en el desarrollo del estudio:

1. El caudal de aire al interior de la mina se considera un flujo de aire turbulento, regido por la ecuación fundamental de ventilación (ver apartado 2.1.6).
2. El aire que fluye al interior de la mina se considera como un fluido compresible (densidad variable con la profundidad y temperatura).
3. La presión del aire en la superficie se considera como la presión que ejerce la atmósfera terrestre a nivel del mar, es decir, 101.3 kPa.
4. Las variables para la ecuación fundamental de la ventilación son la presión y el caudal.
5. El gradiente geotérmico es de 3.3 °C cada 100 metros de profundidad.
6. Se considera un modelo tridimensional dado que la geometría de la mina es estructuralmente compleja, por esta razón, hacer simplificaciones en 2D puede no ser adecuado para el análisis posterior.

7. La distribución del personal de un turno en cada tipo de labor mostrada en la tabla 4.2, se define en base a bibliografía y estimaciones realizadas.
8. En aquellas labores intermedias que conforman un nivel donde no se disponen valores de caudal medidos en terreno, este se define en base a las estimaciones realizadas en el apartado 4.1.3.2. El caudal debe estar en el rango que define la normativa polaca. Para ver los resultados finales, ver tabla 4.6.
9. Las velocidades del aire máximas y mínimas al interior de la mina son definidas en función de lo establecido en la ley de minería polaca actual.
10. Se asume que los flujos y velocidades de aire en la mina real están cumpliendo la legislación polaca.
11. El flujo de aire que entra en la mina es de $508.3 \text{ m}^3/\text{s}$, que es inducido por la acción de los dos ventiladores principales ubicados en los piques de extracción de aire viciado (WPK 5.0 y 3.9). Se desconoce la cantidad exacta de flujo de aire que extraen los ventiladores principales. La dirección de los flujos de aire en los cinco piques se mostró en la figura 3.4, página 50.
12. Se considera la utilización de distintas categorías de reguladores según el tipo labor, con el fin de redirigir los flujos de aire hacia los paneles de explotación y zonas de la mina con déficit de caudal.
13. La cantidad de aire que ingresa a cada nivel está basada en los aforos realizados en la mina (15), los valores y la ubicación de estos se pueden ver en la tabla 4.1 y figura 4.2 respectivamente.

4.2.1.2 Dominio espacial del problema

A continuación, se establece la distribución espacial y longitudinal de las labores de la mina:

1. FezMine cuenta con siete niveles de operación y cuatro de explotación, abarcando un área superficial de 37.5 km² y una profundidad máxima de 1,340 m.b.n.m (ver figura 4.7 y 4.8).

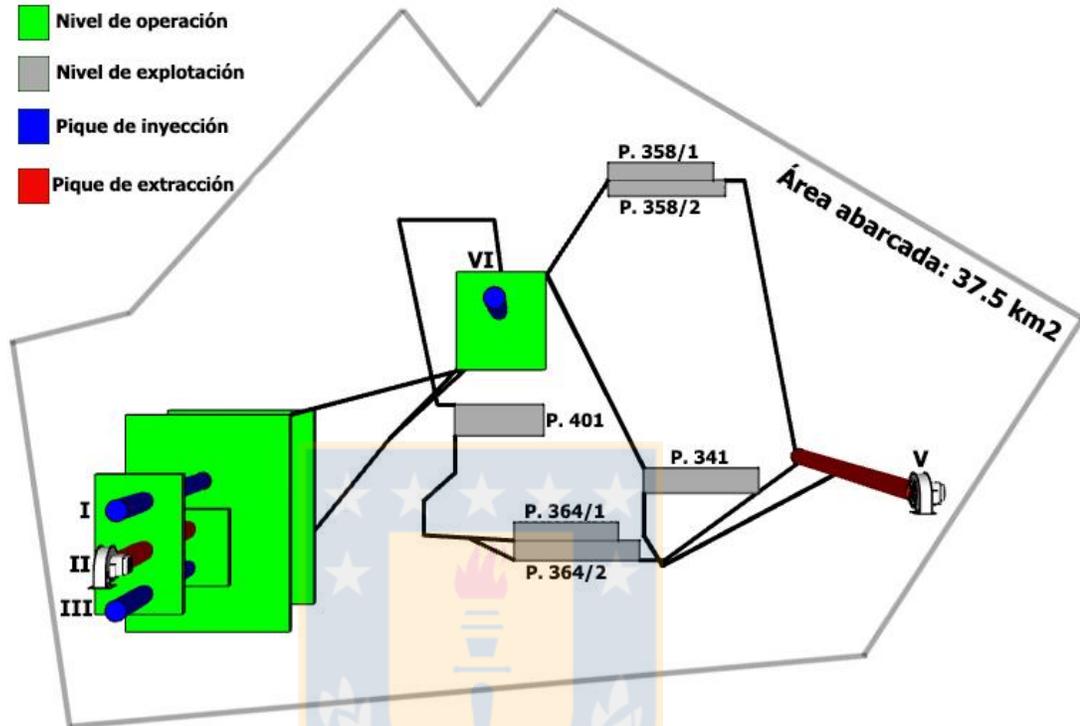


Figura 4.7. Vista en planta simplificada del diseño de FezMine.

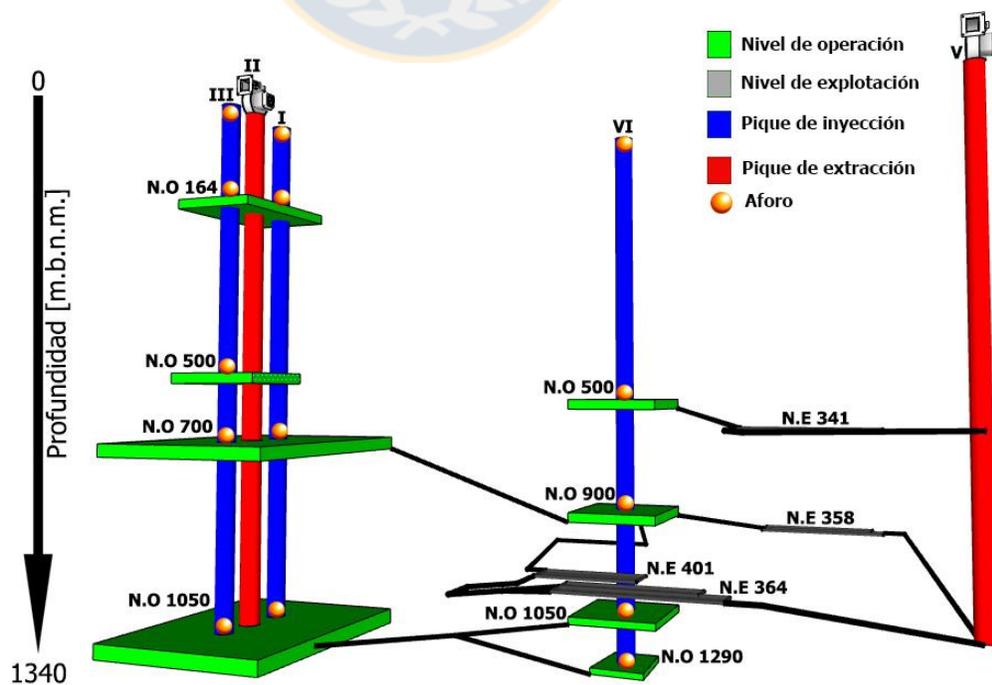


Figura 4.8. Vista isométrica simplificada del diseño de FezMine.

2. Cada uno de los cinco piques tiene forma circular con un diámetro de 9 m (ver figura 4.9a). Las galerías tienen forma arqueada y el rango de sus secciones transversales va desde los 9.1 a 21.8 m² (ver figura 4.9b). Los valores exactos del área de cada labor minera se pueden ver en el Anexo H.

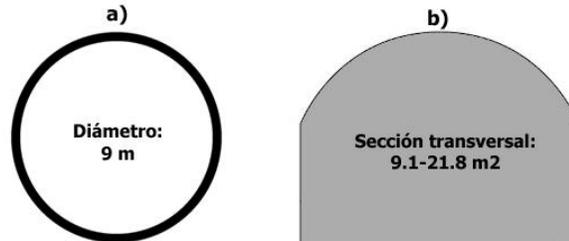


Figura 4.9. Geometrías de las labores.

3. El largo de cada pique se muestra en la tabla 3.10, La extensión de cada nivel de operación y explotación se muestra en la tabla 3.8, página 51.

4.2.1.3 Características del circuito de ventilación de la mina

En este apartado se detallan las características del circuito de ventilación del modelo de simulación de flujo de aire en función de los datos disponibles analizados en el apartado 4.1.3.

1. El aire ingresa por 3 piques de inyección y sale por 2 piques de extracción (ver figura 3.4).
2. Los ductos de ventilación tienen un diámetro de 0.95 metros dado el diámetro ventilador auxiliar SIGMA 1000, y se considera una distancia de seguridad desde el frente de explotación hasta el ducto de 1 a 2 metros.
3. Las curvas características de los ventiladores están en función de las presiones totales del ventilador.
4. Las resistencias aerodinámicas fueron medidas en terreno por la universidad AGH para ciertas labores que componen el diseño minero. Para ver los valores y ubicación de estas, dirigirse a Anexo H utilizando el plano del Anexo S.

5. Ventilación principal: consta de un ventilador (operativo) WPK 5.0 ubicado en el Pique V y otro ventilador (operativo) WPK 3.9 situado en el Pique II.
6. Ventilación auxiliar: es necesaria implementarla en los 12 frentes ciegos o de avance para no dejar zonas aisladas en el circuito de ventilación y en aquellos frentes de explotación que lo requieran. Para ver la ubicación de los frentes de avance, ver Anexo S.
7. Los 15 aforos de caudal de aire fueron medidos en las conexiones de los piques de inyección de aire fresco con los niveles de operación (ver figura 4.2, página 58).
8. No se conoce la distribución de los reguladores al interior de la mina, dejando abierta la elección y el porcentaje de apertura de estos en la calibración del modelo.

4.2.2 Modelo conceptual de flujo de aire con metano

En este apartado se describe el modelo conceptual de flujo de aire con metano, que tiene sus bases en el modelo conceptual de flujo de aire, esto implica que las entradas que del modelo conceptual de flujo de aire se mantienen para el modelo conceptual de flujo contaminado.

A continuación, se nombran las características **específicas** que permiten diferenciar este modelo con el de flujo de aire.

4.2.2.1 Hipótesis conceptuales

El modelo de simulación para el flujo de aire con metano requiere algunas hipótesis específicas que permitan simplificar y desarrollar el estudio, estas son:

1. FezMine se considera una mina con presencia de metano en todas sus capas de carbón, esto implica que todos los paneles emiten un flujo de metano.
2. El rango de emisión de metano de 0.2 a 0.9 m³/s se cumple en todas las capas de carbón de FezMine.

3. Los paneles de explotación están siendo explotados simultáneamente.
4. Las concentraciones de metano en las distintas labores de la mina (galerías y piques) deben estar dentro del rango permisible que establece la ley de minería polaca (ver Anexo A).
5. Al no contar con fuentes bibliográficas que respalden las emisiones del nivel de explotación 341, se asume que estas corresponden al límite superior del rango de emisiones presentes en la mina ($0.9 \text{ m}^3/\text{s}$), que representa el escenario de análisis más desfavorable.
6. Las emisiones de metano desde los seis frentes de explotación se analizarán en cuatro escenarios, los que fueron expuestos en la tabla 4.8, página 69.

4.2.2.2 Características del circuito de ventilación considerando emisiones de metano

En conjunción al modelo conceptual de flujo de aire, además se tendrá en cuenta:

1. Las fuentes de las emisiones de metano tienen su origen en los seis frentes de los niveles de explotación (341, 358/1, 358/2, 364/1, 364/2, 401).
2. Se definen tipos de galerías en los paneles de explotación que permitan simplificar el análisis de la distribución de las concentraciones de metano que fluyen a través las labores de estos dado las direcciones del flujo de aire presente (ver figura 4.10).

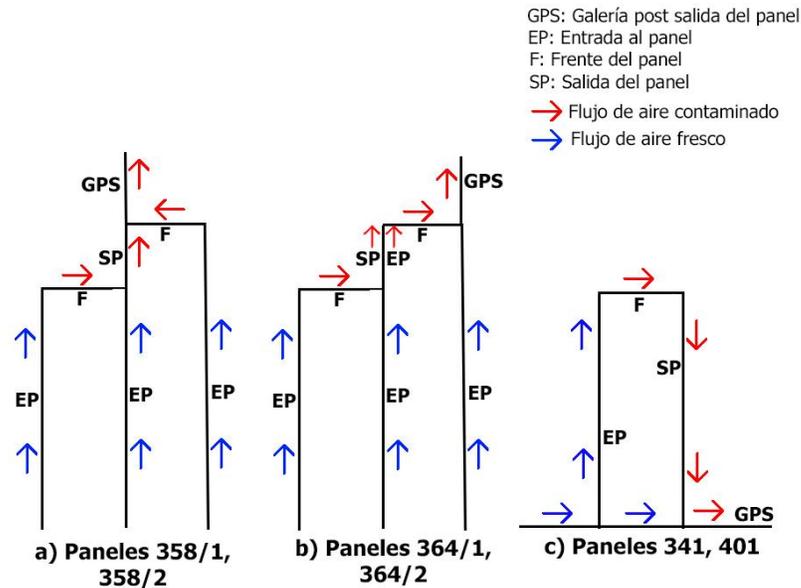


Figura 4.10. Características de los paneles de explotación en el sistema de ventilación.

4.3 Modelo de simulación de flujo de aire

4.3.1 Introducción

Una vez formulado el modelo conceptual de flujo de aire, se selecciona un software de simulación de circuitos de ventilación.

En este estudio se cuenta con licencias de dos software de ventilación minera subterránea más conocidos a nivel mundial, VentSim™ y VUMA3D. Se testean ambos simuladores con el objetivo de determinar cuál posee las características y capacidades idóneas para el trabajo a desarrollar.

Al momento de trabajar con los simuladores, se detectan ciertos **problemas claves**, los que permiten dilucidar cuál software es más idóneo para el estudio.

- VUMA3D presenta problemas al importar archivos en formato DWG (AutoCAD), habiendo ocasiones en donde el software no importa todos los datos adecuadamente.
- VUMA3D posee una interfaz poco amigable al usuario, mientras que la de VentSim™ es mucho más clara e intuitiva.

- Existe poco material que respalde la confiabilidad de VUMA3D, mientras que VentSim™ cuenta con una variedad de estudios que avalan su certeza y aplicabilidad en modelos de simulación reales.
- El cambio de geometrías, dimensiones e ingreso de reguladores en VUMA3D es un proceso más engorroso y lento que en VentSim™.
- El recurso computacional que requiere VentSim™ es menor al demandado por VUMA3D.

En este estudio se trabaja con el simulador VentSim™, pues cuenta con un gran respaldo desde la industria minera, sumado a esto, los problemas que presenta VUMA3D son determinantes para esta elección.

La etapa previa al ingreso de datos es aquella en la que se establece la configuración de la simulación, esto es, definir el tipo de simulación y los valores base que el software utiliza para llevar a cabo las simulaciones.

Luego, se implementa la geometría y las características del circuito de ventilación de acuerdo al modelo conceptual definido.

Posteriormente, se ejecuta la simulación y se comparan los resultados del simulador con los medidos en 14 puntos de control definidos previamente en función de los datos disponibles para calibrar el modelo.

El modelo calibrado de flujo de aire se comprueba utilizando un punto de control adicional y luego se simulan escenarios de predicción. La figura 4.11 muestra el proceso contemplado en este estudio para el modelo de simulación de flujo de aire.

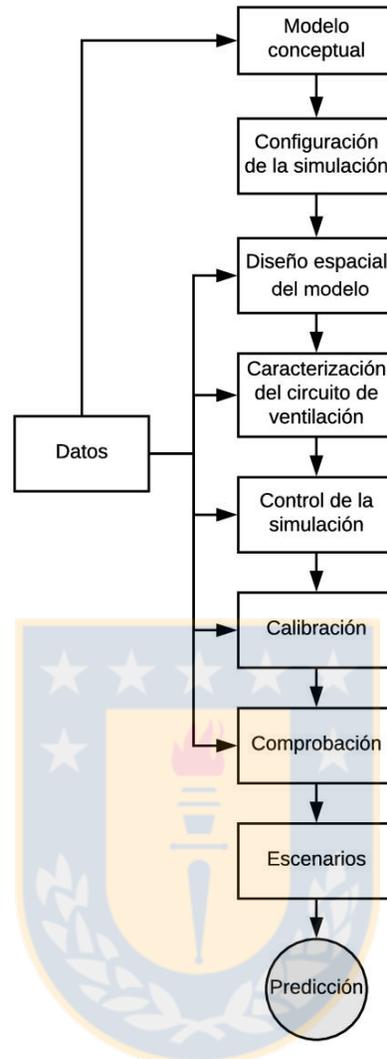


Figura 4.11. Etapas del proceso del modelo de simulación.

4.3.2 Configuración de la simulación

VentSim™ utiliza el método iterativo Hardy Cross (ver apartado 2.6.1) que considera los cambios en la densidad del aire, el balance de flujo de masas y flujos compresibles. Este método ajusta los caudales en el modelo hasta que los errores de estimación estén dentro de los límites admisibles [38]. Se recomienda ajustar el error a $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ o menos, ya que mientras más bajo sea este valor, más precisa es la simulación, pero tardará más tiempo en converger.

La tabla 4.9 muestra los valores que son utilizados en las simulaciones de este estudio. Estos pueden ser configurados por el usuario en la sección “Ajustes” en VentSim™.

Tabla 4.9. Configuración de VentSim™ previo a las simulaciones.

Parámetro	Valor	Descripción [38]
Flujo de aire		
Error admisible	0.010 [m ³ /s]	Define el nivel de precisión con el cual VentSim™ debe resolver un problema antes de entregar en pantalla una solución aceptable.
Iteraciones	500	Define el número de intentos que VentSim™ ejecutará para alcanzar un error aceptable antes de terminar el proceso de simulación.
Tolerancia de unión	0.01 [m]	Distancia mínima bajo la cual el nodo final se asumirá unido a otro.
Máxima presión en la simulación en las galerías	75000 [Pa]	Presión simulada sobre la cual VentSim™ mostrará un error de simulación.
Usar matriz de solución	Sí	Usar la matriz de solución para calcular el flujo de aire.
Usar presiones de ventilación natural	Sí	Fuerza a VentSim™ a calcular las presiones por ventilación natural en el modelo subterráneo a partir del calor y la densidad del aire.
Ambiente		
Densidad del flujo de aire compresible	1.16 [kg/m ³]	Densidad del aire a usar para la simulación de flujo compresible. Esta será calculada a diferentes alturas automáticamente durante la simulación.
Gradiente geotérmico	3.3 °C / 100m	Representa el cambio de temperatura con respecto a la profundidad.
Presión barométrica en superficie	101.3 kPa	Valor de la presión barométrica del aire en la superficie.
Recirculación		
Límites de conductos con recirculación	500	Número máximo de conductos de ventilación con recirculación en el cual VentSim™ solicitará permiso para intentar calcular debido a calculaciones excesivas.
Volumen de recirculación límite	1 m ³ /s	Cantidad de volumen aceptable de recirculación antes de que VentSim™ arroje una advertencia.

4.3.3 Diseño espacial del circuito de ventilación de la mina

Una vez establecida la configuración global de la simulación, se procede a importar los planos 3D a VentSim™. Luego, se revisa cada galería (reemplazada por una línea) y las conexiones con los distintos niveles para evitar que queden labores mal conectadas.

VentSim™ reconoce cada línea central o *string* proveniente de los archivos CAD como un cuerpo con área y volumen a definir con coordenadas espaciales (x,y,z), que permiten obtener la

forma tridimensional de las labores de la mina (circuito de ventilación) requerida para las simulaciones de flujo de aire (ver figura 4.12).

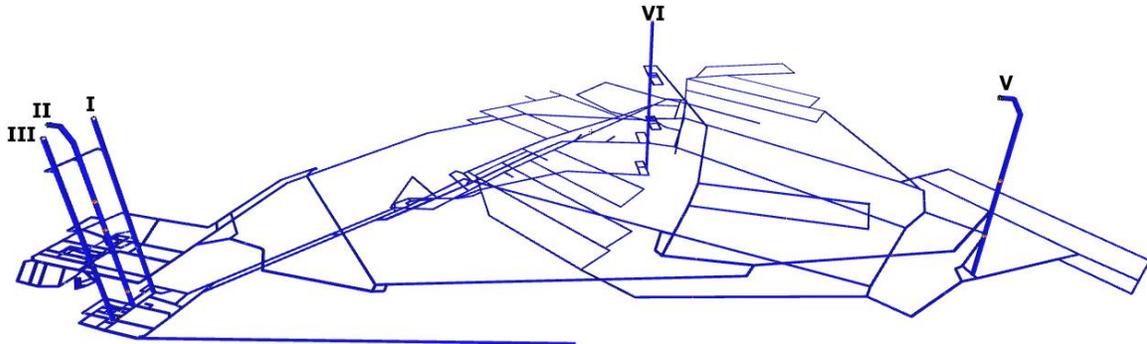


Figura 4.12. Diseño estructural de la mina.

La tabla 4.10 presenta la cantidad de galerías por cada nivel de operación y explotación junto con la cantidad de nodos totales que conforman el modelo de simulación de flujo de aire hecho en VentSim™.

Tabla 4.10. Cantidad de nodos y galerías en el diseño.

Nivel	Cantidad de galerías	Nodos totales
164	5	440
338	17	
341	57	
358	91	
364	156	
401	73	
500	17	
700	123	
900	36	
1050	238	
1290	28	

4.3.4 Caracterización del circuito de ventilación

Posteriormente, se configuran los parámetros para el modelo de simulación de flujo de aire definidos en el apartado 4.2.1.2. La figura 4.13 muestra la ventana de edición en donde se ingresan los valores que definen a cada tipo de labor minera.

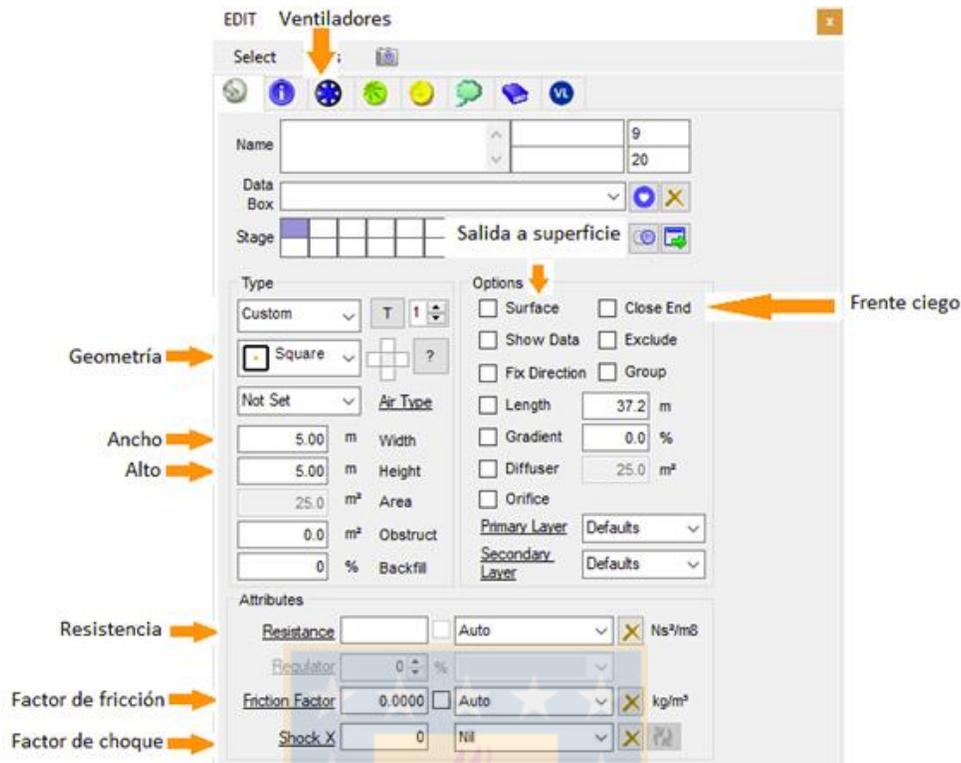


Figura 4.13. Ventana de introducción de parámetros en las galerías.

Con las labores importadas en el simulador, se sigue una secuencia de pasos para definir el modelo de simulación de flujo de aire:

1. Se deben ingresar los parámetros técnicos y de diseño en cada galería:
 - Resistencias aerodinámicas (ver Anexo H)
 - Geometría y secciones transversales (ver Anexo H)
 - Características de los ventiladores principales y auxiliares (ver apartado 3.2)
2. Se le debe indicar al simulador cuales galerías conectan con la superficie (5 piques) y aquellas que corresponden a frentes ciegos (12 galerías) para evitar errores al momento de la simulación.
3. Se configura la posición y características de los ventiladores principales con sus curvas respectivas y se ubican en los piques de extracción de aire viciado II y V.

4. Se seleccionan ductos de ventilación según las características de diseño del ventilador auxiliar (ver tabla 3.6, página 49) y de acuerdo a los peligros asociados a la operación, tales como temperaturas altas, chispas, amenazas constantes de explosiones, entre otros.
5. Se controla el flujo de aire mediante el uso de reguladores y ventiladores auxiliares para luego ser implementados en las galerías donde se necesiten. La cantidad de reguladores y ventiladores se define en la etapa de calibración del modelo de simulación de flujo de aire.

Para que la simulación sea acorde a lo que se tiene en la realidad, se deben usar los mismos ventiladores utilizados en la mina. La importación de los ventiladores se realiza en la ventana dedicada para este fin, donde se pueden ingresar sus curvas características, velocidad de funcionamiento y parámetros geométricos, como muestra la figura 4.14. Estos ventiladores deben designarse en las galerías o piques que correspondan.

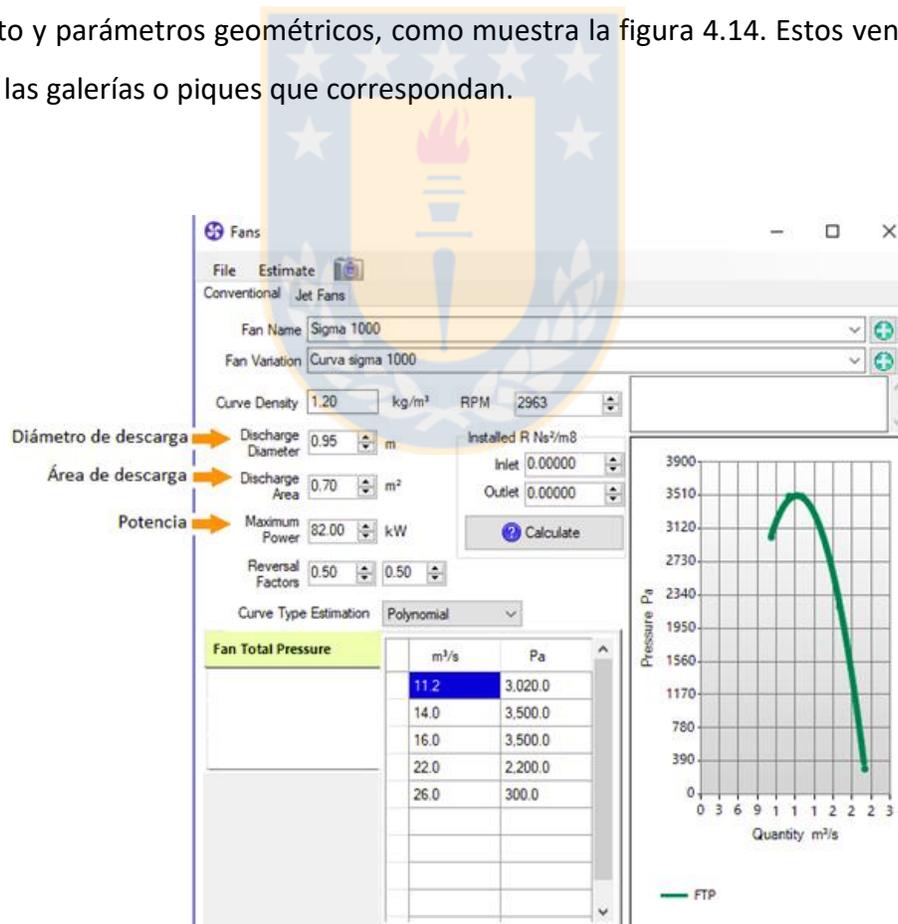


Figura 4.14. Ventana de introducción de ventiladores.

4.3.5 Control de la simulación

El control de la simulación se lleva a cabo por medio de 15 puntos de monitoreo (ver tabla 4.1) fijados en las conexiones de los piques de inyección de aire fresco con las entradas a cada nivel de operación (ubicación de los aforos disponibles) como se muestra en la figura 4.8, página 72.

Por otro lado, la legislación define un requerimiento de caudal mínimo por persona de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y rangos para establecer las velocidades mínimas y máximas permitidas según el tipo de labor minera (ver Anexo B). Estos valores se usan para el control adicional en las simulaciones de flujo de aire en cada una de las labores.

Finalmente, después de llevar a cabo todo el proceso descrito, se ejecuta la simulación y se tiene un modelo de simulación de flujo de aire que permite la circulación del aire, y se procede a la etapa de calibración.

4.3.6 Calibración del modelo de simulación de flujo de aire

La calibración del modelo de simulación de flujo de aire consiste en ajustar los caudales de simulación en las labores en donde se cuenta con valores reales medidos en la mina (15 aforos disponibles).

Un aspecto fundamental en este procedimiento es redirigir el máximo flujo de aire posible a los paneles de explotación para facilitar la siguiente etapa de simulación en la cual se implementará al modelo de ventilación el gas metano.

Para llevar a cabo este proceso se fijan los objetivos, criterios de calibración y se definen los parámetros a modificar. La figura 4.15 representa la metodología adoptada.

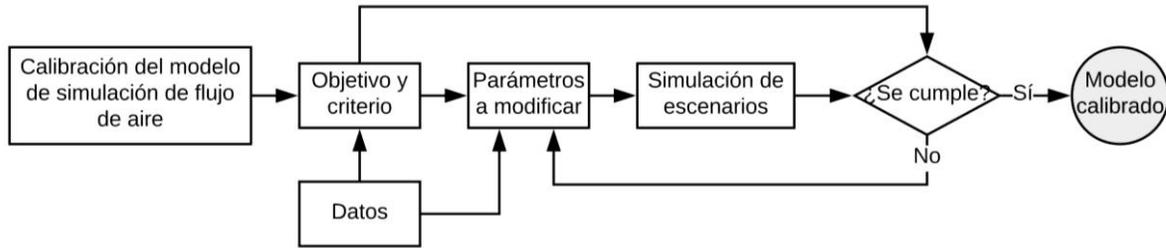


Figura 4.15. Proceso de calibración para el modelo de simulación de flujo de aire.

El **objetivo** de la calibración es replicar los valores de caudal medidos en terreno (15 aforos) en los valores de caudal obtenidos del simulador.

Esto se logra al regular los flujos que circulan desde los piques de inyección de aire fresco hacia los distintos niveles de operación.

El **criterio** utilizado para evaluar la calibración del modelo de simulación es el error medio absoluto entre los datos aforados y aquellos obtenidos desde el software de simulación. Este se expresa de la siguiente manera:

$$EMA = \sum \frac{|Flujo\ de\ aire\ medido - Flujo\ de\ aire\ del\ modelo|}{Flujo\ medido\ total} \quad (29)$$

Esta fórmula muestra el error medio de los datos y se usa para evaluar que tan buena es la calibración. Corresponde a la suma de los valores absolutos de los residuos entre los flujos medidos con los simulados en cada punto y se obtiene el porcentaje de error de la calibración al dividirlo por el flujo total de aire medido. Este parámetro fija el valor permisible de ajuste global de la calibración.

Entre menor sea el valor obtenido de la ecuación anterior, menor será la diferencia entre los valores modelados con los medidos y más confiable es el análisis realizado bajo el modelo definido. Un valor de error medio absoluto aceptable para trabajar sobre un modelo de simulación es aproximadamente el $\pm 10\%$ [3]. Cuando se alcanza un valor cercano a este, se dice que el modelo está **calibrado**.

La calibración del modelo de simulación se realiza por medio de la instalación de reguladores y no ejerciendo un cambio directo en la resistencia aerodinámica natural de las galerías. El **parámetro a modificar o calibrar** será el grado de apertura de los reguladores instalados en ciertas galerías para regular los flujos de entrada en cada nivel de operación; esto se debe a que todas las labores ya están construidas y modificar algún parámetro de sus geometrías no es posible, por esta razón, se decide hacer uso de estos dispositivos.

La ubicación de los reguladores no se puede determinar sin antes simular y ver el comportamiento del flujo de aire en las distintas labores mineras, debido a que se desconocen sus ubicaciones en la mina real, por esta razón, el posicionamiento de los dispositivos se hará en función de los requerimientos de aire por nivel y por tipo de labor.

En este estudio la calibración del modelo de simulación de flujo de aire tiene su foco en conseguir redirigir la mayor cantidad de aire posible a los sectores de la mina con presencia de metano (paneles de explotación). Por esta razón, se regula el flujo de aire que ingresa desde los piques I y III hacia los niveles de operación 164, 500, 700 y 1050, generando una diferencia de presión en el pique VI (ver figura 4.16), logrando un mayor caudal de ingreso ($244.7 \text{ m}^3/\text{s}$) en este sector de la mina. Esto ocurre debido a que los ventiladores están extrayendo una cantidad fija de aire, y al aumentar la resistencia en las conexiones de los niveles de operación (164, 500, 700 y 1050) con los piques de inyección I y III, se logra inducir el ingreso de aire por el pique VI, donde se encuentran las conexiones hacia los seis frentes de explotación, 12 frentes de avance y el nivel 1290.

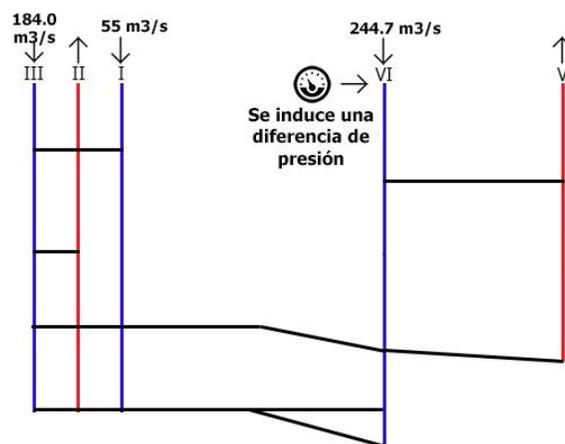


Figura 4.16. Relación entre las entradas de flujo en los piques.

La calibración del modelo de simulación de flujo de aire toma en consideración el requerimiento de caudal por persona de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$, cumpliendo con las velocidades mínimas y máximas del aire en la mina establecidas por la ley (ver tabla 2.3).

4.3.7 Comprobación del modelo calibrado

Para comprobar la calibración del modelo se analiza el modelo de simulación de flujo de aire con la profundización del nuevo nivel mina 1290 en el sistema. Este nivel entrará en operación a mediados del año 2019 y tendrá un requerimiento de aire que oscila entre los 33.3 a $116.7 \text{ m}^3/\text{s}$, dependiendo en qué etapa de avance y desarrollo se encuentre el proyecto [48]. Para conectar el nivel 1290 al sistema de la mina, se profundiza el pique VI en 290 metros y se considera el dato de requerimiento de aire de $33.3 \text{ m}^3/\text{s}$ que se registra como el punto de aforo número 15 en la tabla 4.1.

El criterio para analizar la comprobación del modelo calibrado será el mismo utilizado que en la calibración del modelo de flujo de aire y metano. Se evalúa el error medio absoluto de los datos aforados con los obtenidos de la simulación del modelo calibrado con la profundización del nivel 1290. La figura 4.17 muestra la metodología a seguir.

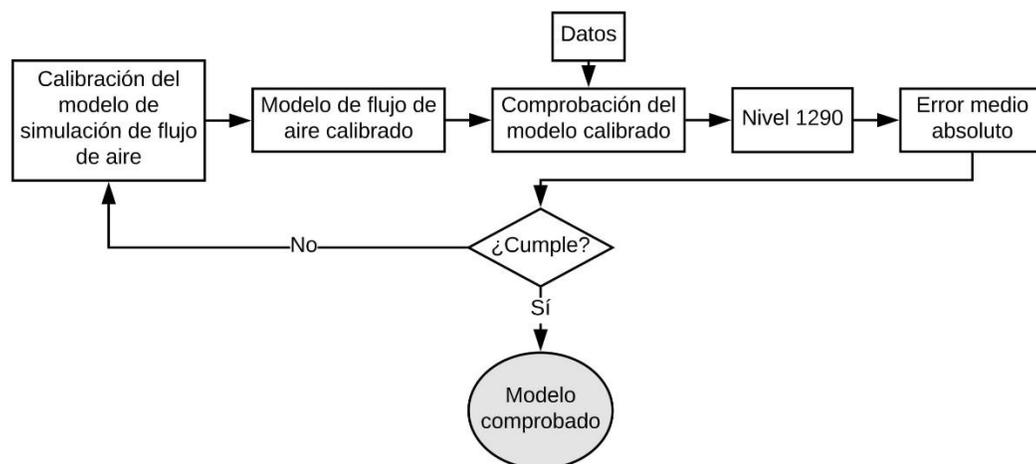


Figura 4.17. Diagrama para obtener la comprobación del modelo calibrado.

4.3.8 Resultados de la calibración y comprobación del modelo

- Resultados de la calibración del modelo de simulación:

La figura 4.18 muestra la diferencia entre los caudales obtenidos del modelo de simulación de flujo de aire y aquellos medidos en terreno sin considerar el punto de aforo número 15, que corresponde al nuevo nivel mina 1290, obteniendo un error medio absoluto aproximado del 10.73%, que está dentro del rango de confiabilidad para poder realizar estudios basados sobre el modelo de simulación definido en VentSim™.

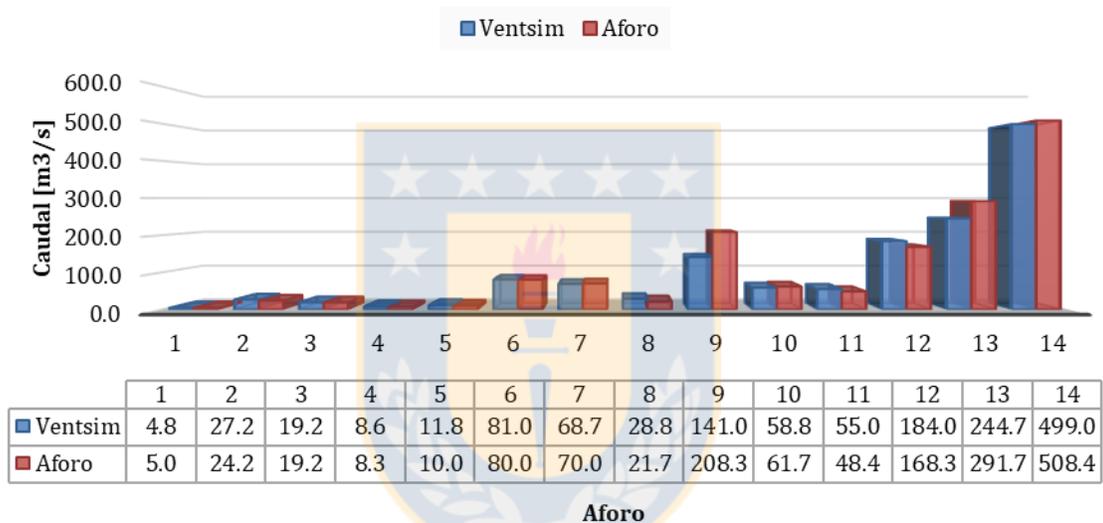


Figura 4.18. Comparación entre los aforos y los datos obtenidos de la simulación (14 puntos).

Este valor se obtuvo regulando el flujo utilizando 49 reguladores de diferentes categorías y aperturas. Además, se instalaron un total de 15 ventiladores auxiliares, 12 en los frentes ciegos para no tener labores aisladas en el circuito de ventilación y 3 en los paneles de explotación 341, 364 y 401 para entregar mayor caudal de aire en los frentes de explotación de dichos paneles.

Las ubicaciones y características de los reguladores y ventiladores auxiliares usados en el modelo se pueden ver en el Anexo L y M respectivamente al usar el plano proporcionado en el Anexo S.

Los requerimientos de caudal por el personal y los rangos de velocidades establecidos por la ley se cumplen en cada una de las galerías que componen el diseño minero. En el Anexo N se presentan labores de la mina cumpliendo con los requerimientos descritos.

De la figura 4.18 se aprecia que hay 4 puntos de control en donde el modelo no se ajusta bien, estas situaciones se explican a continuación:

- El punto 13 corresponde al pique VI: Los aforos en terreno toman en cuenta toda la operación, por ende, al no contar con el 100% de los planos, es altamente probable tener incongruencias en los flujos de aire en los piques de inyección. A pesar de esto, se intenta inducir el máximo flujo posible en el pique VI, logrando el valor de $244.7 \text{ m}^3/\text{s}$.
- El punto 9 corresponde a la conexión entre el pique VI con el nivel de operación 900: El nivel 900 requiere casi el 70% del caudal de aire que ingresa por este pique, provocando que cualquier déficit en el pique VI tenga un impacto directo sobre este nivel de operación.
- El punto 12 corresponde al pique III: Al contrario de los dos casos anteriores, el pique de inyección III presenta un exceso de caudal de $15.7 \text{ m}^3/\text{s}$, este valor no se puede bajar más, pues en los niveles 700 y 1050 las restricciones de caudal y velocidades no permiten reducir el flujo de aire entrante. Otra razón, es el no contar con todos los planos del diseño de la mina y la ubicación exacta de los reguladores, lo que dificulta el proceso de ajuste.
- El punto 8 corresponde a la conexión entre el pique VI y el nivel de operación 500: Este nivel presenta un exceso de flujo de aire de $7.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Regular el caudal de aire en este nivel (instalando como mínimo 2 reguladores) no se justifica, pues el exceso de caudal se repartiría entre los niveles de operación 900 y 1050, lo que no provocaría un cambio significativo en la situación actual del nivel 900, que presenta un déficit de caudal de aire ($67.3 \text{ m}^3/\text{s}$), pues recibiría sólo una porción de los $7.1 \text{ m}^3/\text{s}$, haciendo que el aumento del flujo de aire en el nivel de operación 900 sea casi despreciable, más aún, considerando que se debe profundizar el nuevo nivel mina 1290 desde la parte inferior del pique VI.

El error medio absoluto de los datos (10.73%) se considera aceptable bajo fundamentos teóricos y se establece que el modelo de simulación de flujo de aire está calibrado, para continuar con el proceso de definición del modelo de simulación de flujo de aire hacia la etapa de comprobación del modelo calibrado.

- Resultados de la comprobación del modelo calibrado:

El error medio absoluto de los datos aforados con los obtenidos de la simulación del modelo calibrado considerando la profundización del nivel 1290 es aproximadamente 10.48%, lo que está dentro del rango aceptable según bibliografía.

La figura 4.19 muestra la diferencia entre los caudales obtenidos del modelo de simulación de flujo de aire y aquellos medidos en terreno considerando el nuevo nivel mina.

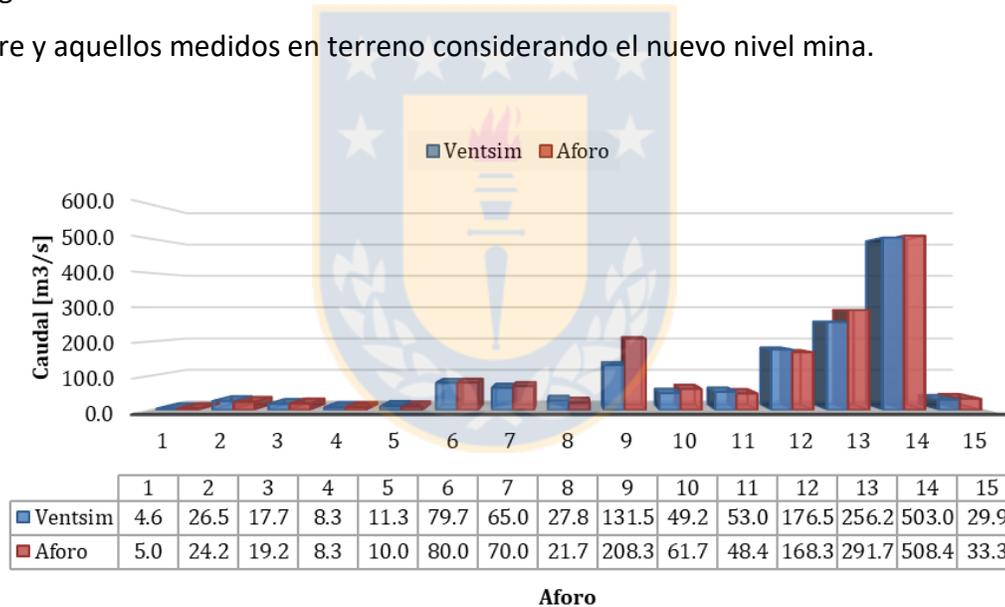


Figura 4.19. Comparación entre los aforos y los datos obtenidos de la simulación (15 puntos).

Se puede apreciar que los flujos de los otros niveles de operación no se vieron fuertemente afectados por este nuevo régimen, dado que las variaciones entre los caudales simulados en el modelo calibrado sin el nuevo nivel mina y el modelo de comprobación con este nuevo nivel poseen un coeficiente de correlación de 0.99 (ver figura 4.20), en otras palabras, el sistema no sufre grandes perturbaciones al tener el nuevo nivel de operación. Esto entrega una confiabilidad mayor a la calibración realizada.

Los requerimientos de caudal por el personal y los rangos de velocidades se siguen cumpliendo en base a la normativa una vez realizada la profundización del nuevo nivel operacional en cada una de las galerías de la mina (ver Anexo N).

Finalmente, se concluye que el modelo de simulación calibrado está comprobado y puede ser utilizado para analizar escenarios de predicción del sistema de ventilación de la mina.

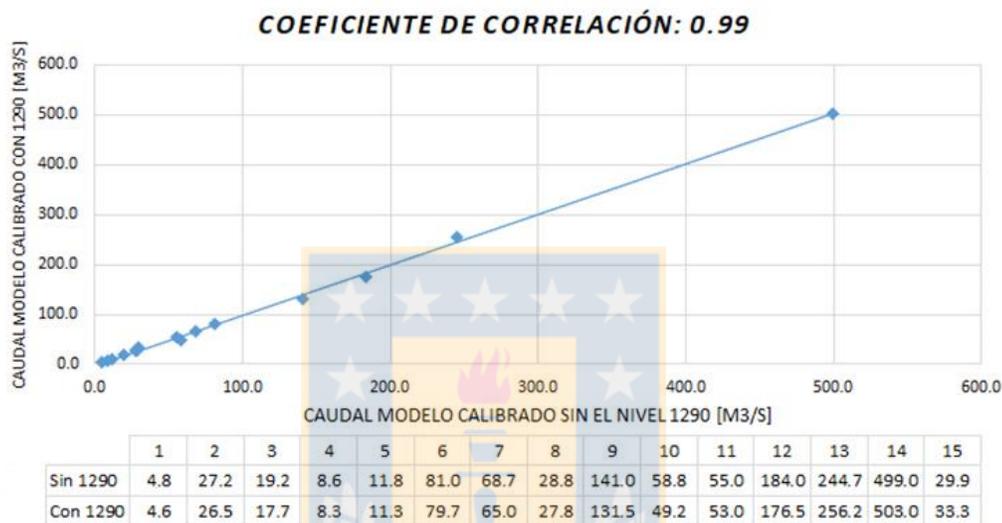


Figura 4.20. Gráfico de dispersión de los datos simulados en ambos modelos.

4.4 Modelo de simulación de flujo de aire y metano

Para analizar la problemática del metano, se trabaja sobre el modelo de simulación de flujo de aire calibrado y comprobado definido en la etapa de análisis previa.

El objetivo principal de esta etapa del estudio es controlar el metano mediante la dilución por medio del flujo de aire, y en aquellos casos en que el flujo no sea suficiente para reducir las concentraciones de metano bajo los límites que se establecen en la ley polaca, se plantea evaluar la aplicación de desgasificación en los paneles de explotación mediante el análisis de las concentraciones del contaminante con la ayuda de VentSim™ en el modelo de simulación de flujo de aire, para mantener los niveles de metano inocuos en la operación.

El desarrollo del estudio se realiza bajo los cuatro escenarios mencionados en la tabla 4.8.

4.4.1 Configuración de la simulación

La configuración global de la simulación (*Ajustes*) para el modelo de flujo de aire con metano está basada en la configuración realizada en el modelo de simulación de flujo de aire. La tabla 4.11 muestra las configuraciones específicas para la simulación del contaminante a tratar.

Tabla 4.11. Configuración de VentSim™ previo a las simulaciones del contaminante.

Contaminante		
Tiempo de dispersión predeterminado para el contaminante	3600 [s]	Tiempo de liberación predeterminado para contaminantes durante una simulación dinámica.
Simulación Dinámica		
Cantidad máxima de celdas	10	Número máximo de celdas que dividen los conductos de ventilación. Mientras mayor sea el número, más tiempo toma la simulación.
Tiempo total de simulación	06:00:00 horas	-
Presión barométrica en superficie	101.3 kPa	Valor de la presión barométrica del aire en la superficie.

VentSim™ incorpora un módulo de simulación dinámica para evaluar el comportamiento de las concentraciones de un gas a través del tiempo. Este proceso se lleva a cabo dividiendo el modelo en celdas independientes que se mueven libremente en direcciones y velocidades determinadas por la simulación global de caudal de aire [38].

Los datos necesarios para la simulación son la concentración del contaminante y localización de origen de la emisión de este (ver figura 4.21).

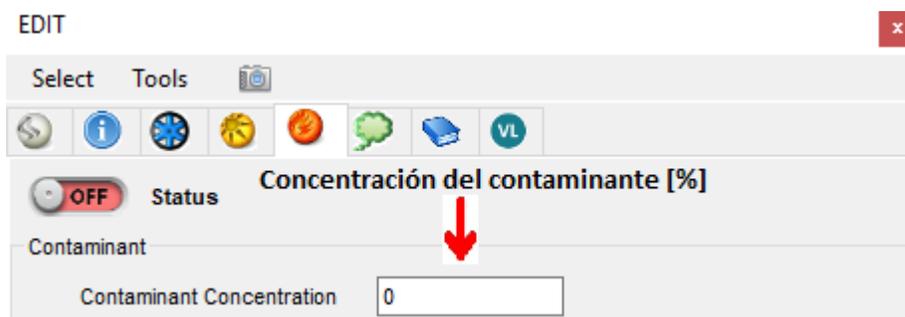


Figura 4.21. Ventana de ingreso de las concentraciones del contaminante en las labores.

La información disponible está referida al desprendimiento de metano está en m³/s y para poder ingresar estos valores a VentSim™, es necesario convertirlos a un porcentaje, pues el software solo acepta este formato. Este desprendimiento se considera constante en el tiempo desde los paneles de explotación.

La conversión es realizada según la ecuación (30) desde un flujo constante de metano hacia un valor porcentual respecto al flujo de aire que pasa por la fuente de emisión [77].

$$C = C_1 + \frac{100 \times E_x}{Q_v} \quad (30)$$

Donde:

- C : Concentración de metano en el frente de explotación [%]
- C_1 : Concentración de metano en el flujo de entrada al frente de explotación [%]
- Q_v : Caudal que fluye a través del frente de explotación [m³/s]
- E_x : Cantidad emitida de metano [m³/s]

Una vez realizada la conversión a porcentaje, se implementa en el modelo de flujo de aire con metano.

4.4.2 Distribución espacial de las fuentes de emisión de metano

El diseño espacial del circuito de ventilación para el modelo de simulación de flujo de aire con metano es el mismo que se define en el apartado 4.3.3. A continuación, se detallan los niveles de explotación presentes en la mina en los cuales se definen las fuentes de origen de emisión del gas:

- Nivel de explotación 341: 1 panel de explotación (341)
- Nivel de explotación 358: 2 paneles de explotación (358/1, 358/2)
- Nivel de explotación 364: 2 paneles de explotación (364/1, 364/2)
- Nivel de explotación 401: 1 paneles de explotación (401)

La figura 4.22 presenta la distribución espacial de los paneles de explotación en FezMine, además, se muestra como los desprendimientos de metano emitidos desde el panel de explotación

401 influyen en las concentraciones de entrada y salida de los paneles 364/1 y 361/2. Por otro lado, los desprendimientos de metano del panel 364/1 afectan las concentraciones de entrada del panel 364/2.

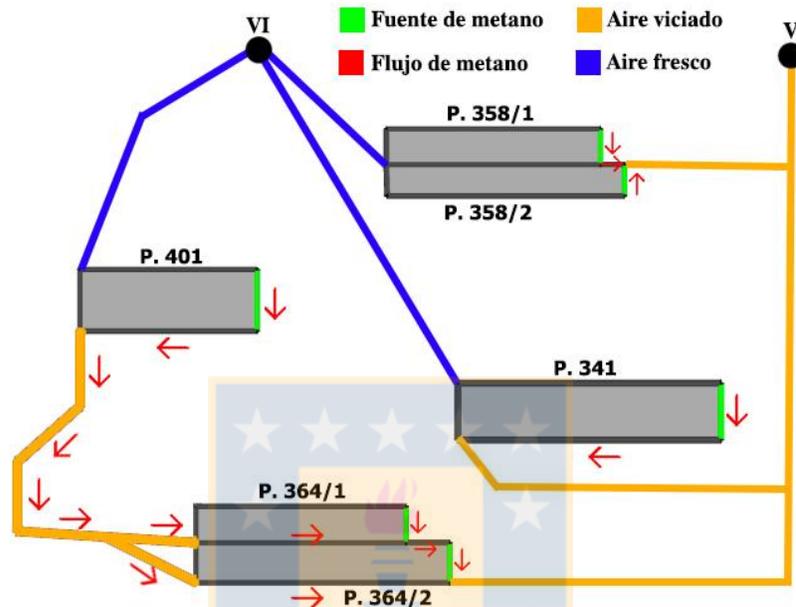


Figura 4.22. Vista en planta de la distribución espacial de los paneles de explotación.

En FezMine los paneles de explotación son ventilados mediante dos configuraciones: tipo U y tipo Y. De acuerdo al diseño minero, los paneles de carbón pertenecientes al nivel de explotación 364 se ven afectados por las emisiones de metano del panel 401, mientras que el resto de los niveles no recibe aire viciado como flujo de entrada en sus paneles de explotación.

4.4.3 Control de la simulación

El control de la simulación se realiza con los requerimientos de caudal para el personal ($0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ por persona) y los rangos de velocidades de aire permitidos en cada labor de la mina, estos valores se pueden ver en el Anexo B. También se lleva a cabo en los 15 puntos de control (aforos) que se establecieron en el control de la simulación de flujo de aire y cualquier labor con presencia de metano en la operación se considera como punto de control con respecto a las concentraciones del contaminante.

La legislación establece valores máximos para las concentraciones de metano al interior de la mina, que son parte del control de la simulación del modelo. Los rangos se pueden ver en la figura 4.23 indicados según el tipo de labor en el panel de explotación. Estas labores fueron descritas en el modelo conceptual del flujo de aire con metano con el fin de simplificar el control y análisis de las concentraciones del contaminante. Además, la normativa exige una concentración máxima de metano del 0.75% en los piques de extracción.

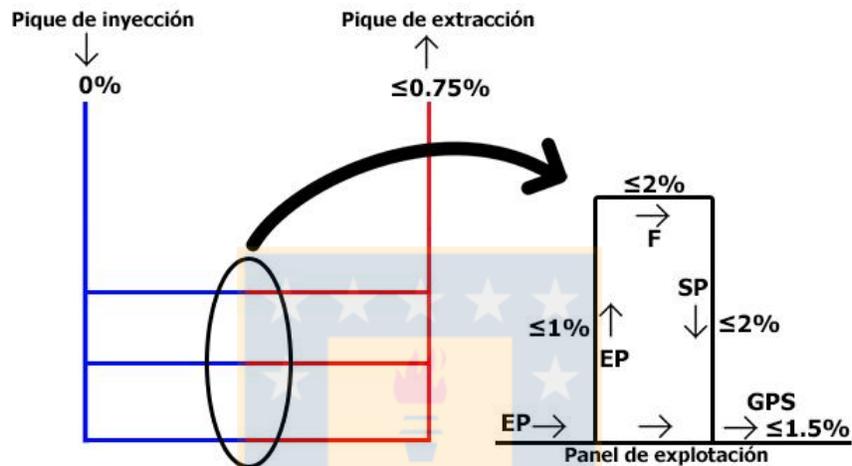


Figura 4.23. Concentraciones máximas de metano en las labores definidas.

Para información más detallada sobre las concentraciones máximas de metano y los tipos de labor, remitirse al Anexo A.

Una vez establecidos los puntos de control, se ejecuta la simulación para comenzar con el análisis de los escenarios planteados en la tabla 4.8.

4.4.4 Escenarios de simulación: Análisis de las emisiones de metano en los paneles de explotación

4.4.4.1 Motivación

Los flujos de aire no siempre son capaces de diluir las concentraciones de metano a niveles inocuos en las labores mineras. En minas subterráneas de carbón es probable que los desprendimientos de metano desde los paneles de explotación sean muy altos, e intentar diluirlos solo mediante la ventilación principal y auxiliar puede ser bastante complicado o incluso imposible.

Es acá donde la desgasificación toma un rol fundamental para mantener la viabilidad de la operación, pues, si no fuera por los métodos de drenaje de metano, existe la posibilidad de que ciertas capas de carbón no se puedan explotar o incluso faenas mineras que deban cerrar sus operaciones debido a las altas concentraciones de metano.

Es por esta razón que los simuladores son una herramienta de gran utilidad para estudiar el comportamiento del metano en las labores, y de esta forma, definir los niveles de desgasificación necesarios en los paneles para mantener la seguridad en la operación.

4.4.4.2 Objetivo

El objetivo es determinar qué paneles de explotación logran diluir las emisiones de metano con el flujo de aire y cuales necesitan evaluar la desgasificación para cumplir con las concentraciones máximas de metano, y adicionalmente determinar el porcentaje mínimo de desgasificación para alcanzar dichos valores.

Para cumplir esto, se plantea un escenario que permita el análisis de las concentraciones presentes en las labores mineras mediante el uso de la herramienta de simulación para contaminantes que VentSim™ tiene disponible. La tabla 4.12 muestra las concentraciones de metano para el escenario 1 desde los paneles de explotación en FezMine.

Tabla 4.12. Emisiones de metano en los paneles de explotación para el escenario 1.

Flujos de metano en los paneles [m ³ /s]					
341	401	358/1	358/2	364/1	364/2
0.90	0.40	0.20	0.31	0.20	0.73

4.4.4.3 Procedimiento

A continuación, se explica el procedimiento adoptado para el estudio de las concentraciones de metano en los seis paneles de explotación.

Paso 1: Se ingresan las concentraciones de metano de la tabla 4.12 en VentSim™ en cada panel de explotación (341, 401, 358/1, 358/2, 364/1, 364/2).

Paso 2: Se simula el flujo de aire considerando las emisiones de metano en los seis paneles de explotación con el objetivo de diluir el contaminante en cada tipo de labor definida en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Concentraciones máximas permisibles según el tipo de labor.

Tipo de labor	Límite permisible de la concentración del metano [%]
EP: Entrada al panel	≤ 1
F: Frente del panel	≤ 2
SP: Salida del panel	≤ 2
GPS: Galerías post salida del panel	≤ 1.5
Pique de extracción de aire viciado	≤ 0.75

Paso 3: Se revisan los resultados obtenidos en el paso 2 para cada tipo de labor para determinar qué paneles logran la dilución del metano por debajo de las concentraciones máximas establecidas con el flujo de aire presente.

En caso contrario, se evalúa la aplicación de desgasificación en aquellos paneles de explotación que no cumplen con la normativa con el fin de reducir las concentraciones de metano bajo de los límites permisibles.

Paso 4: Se aumenta progresivamente el porcentaje de desgasificación en los paneles de explotación que presentan concentraciones de metano sobre los rangos permitidos. La desgasificación se puede llevar a cabo con alguna de las técnicas mencionadas en el apartado 2.4.4.2, lo que implica una planificación para la implementación de estas en el sistema de ventilación de la mina.

El proceso de desgasificación dependerá si el panel se ventila bajo la configuración tipo U o tipo Y. El porcentaje mínimo y máximo de desgasificación es del 20 y 80% respectivamente.

- **Configuración tipo U (paneles 341, 401):** El proceso para determinar el grado de desgasificación en los paneles de explotación sigue una secuencia (ver figura 4.24) en base a la dirección del flujo de aire definida como:

1. Entrada al panel de explotación
2. Frente de explotación
3. Salida del panel de explotación
4. Galería post salida del panel de explotación

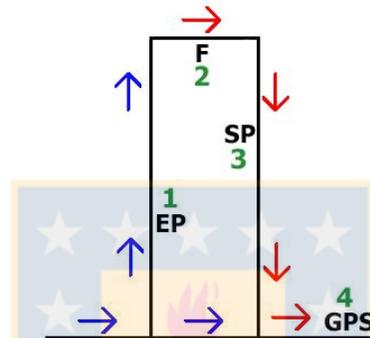


Figura 4.24. Secuencia de análisis para el panel 341 y 401.

Se comienza analizando la concentración del metano en la entrada al panel de explotación, cuando esta cumple con la normativa, se prosigue a revisar la concentración del frente de explotación y así sucesivamente hasta que todas las galerías cumplan con los límites que indica la ley.

- **Configuración tipo Y (nivel 364):** El proceso de desgasificación se lleva a cabo en dos paneles de explotación ventilados en configuración tipo Y. La secuencia para determinar el grado de desgasificación en los paneles basada en la dirección del flujo de aire es la siguiente (ver figura 4.25):

1. Entrada al panel de explotación 364/1
2. Frente de explotación 364/1
3. Salida del panel de explotación 364/1
4. Entrada al panel de explotación 364/2

5. Frente de explotación 364/2
6. Galería post salida del panel de explotación 364/2

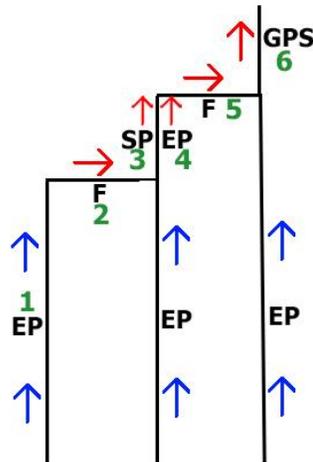


Figura 4.25. Secuencia de análisis para los paneles 364/1 y 364/2.

Se comienza analizando la concentración de metano en la entrada al panel de explotación 364/1 y se compara con el valor que exige la ley. Una vez que esta labor cumple con la norma, se revisa la concentración del frente de explotación 364/1 y así sucesivamente hasta que todas las galerías cumplan con los contenidos permisibles.

Para hacer un correcto análisis del escenario, se plantean tres consideraciones:

1. La salida del panel 364/1 corresponde también a la entrada del panel 364/2, lo que implica considerar el porcentaje más restrictivo como limitación. Es decir, la concentración de metano en la galería de entrada al panel 364/2 debe ser menor o igual al 1%.
2. Se debe considerar el panel 401 ya desgasificado para comenzar el análisis de los paneles del nivel de explotación 364.
3. Las desgasificaciones en los paneles de explotación 364/1 y 364/2 se ven afectadas por las acumulaciones de metano proveniente del panel 401, debido a las direcciones del flujo de aire (ver figura 4.26).

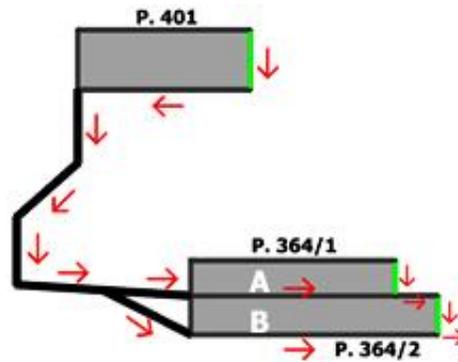


Figura 4.26. Flujo de metano en los paneles de explotación 401, 364/1 y 364/2.

La relación entre los paneles dificulta el análisis para determinar el porcentaje óptimo de la desgasificación de los paneles 364/1 y 364/2, pues, dos de las tres entradas de aire hacia los paneles de explotación tienen una concentración importante de metano (A: 0.36% y B: 0.30% en la figura 4.26).

Paso 5: Finalmente, se determina el porcentaje de desgasificación **mínimo** para cada uno de los paneles de explotación, que alcanzan la concentración de metano **máxima** que permite la ley.

En la figura 4.27 se presenta el algoritmo empleado para el análisis de las concentraciones de metano con respecto al escenario 1.

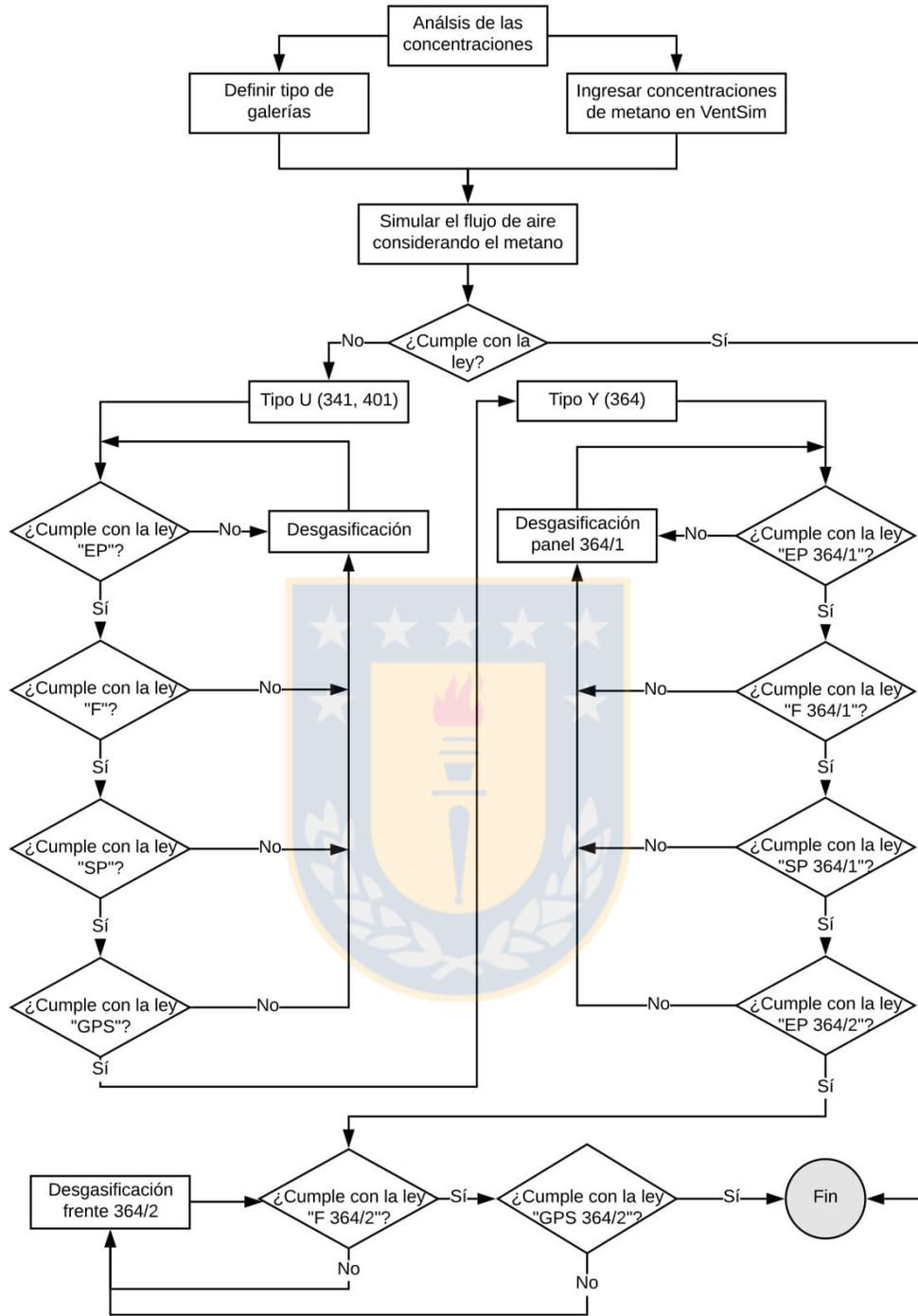


Figura 4.27. Diagrama del procedimiento para la desgasificación.

Este procedimiento se realiza de forma análoga para los tres escenarios restantes expuestos en este estudio.

5. RESULTADOS

5.1 Resultados del modelo de simulación de flujo de aire

1. La curva de resistencia total de la mina calculada con VentSim™ se presenta en la figura 5.1. La resistencia total de la mina excluyendo los ductos de ventilación a vencer es de $0.01642 \text{ N s}^2/\text{m}^8$ para mover los $503 \text{ m}^3/\text{s}$ requeridos en la operación.

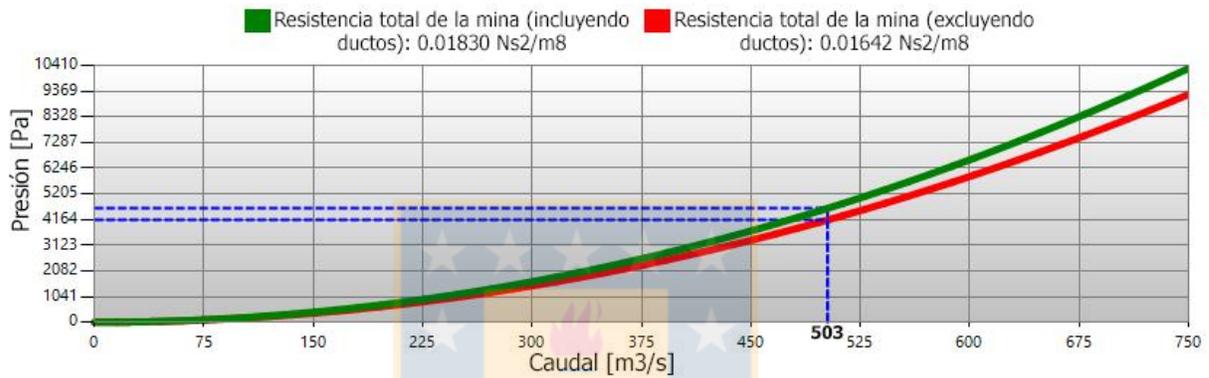


Figura 5.1. Curvas de resistencia de la mina.

2. El segundo resultado obtenido concierne a los puntos de operación de los ventiladores principales WPK 5.0 y WPK 3.9 (ver figura 5.2). Se observa que el ventilador WPK 5.0 está operando en un sector de su curva característica cercano a la zona de estancamiento y no tiene una presión de seguridad adecuada sobre el punto de operación (20% adicional), a diferencia de lo que ocurre en el ventilador WPK 3.9.

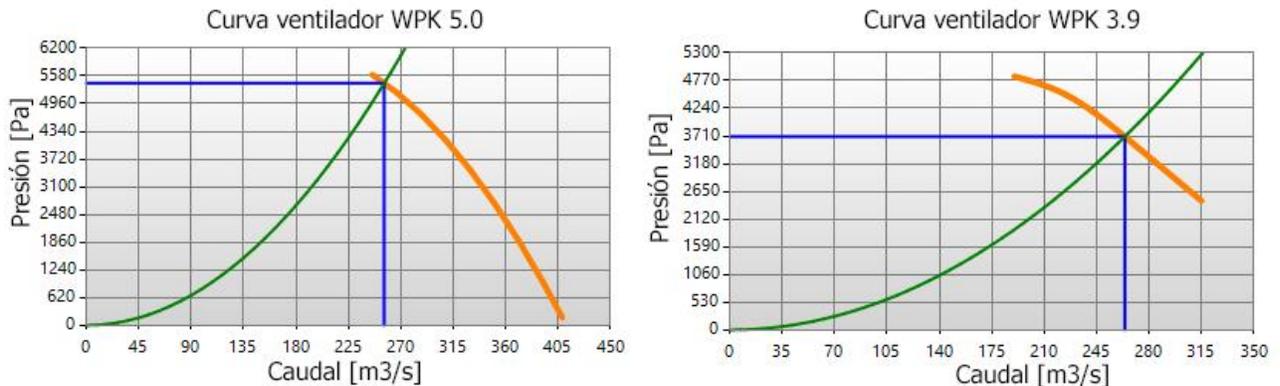


Figura 5.2. Curva de los ventiladores usados en FezMine.

El ventilador WPK 5.0 no está siendo sobre exigido, pero es recomendable tomar precauciones ante un aumento de la resistencia global de la mina o una baja en el caudal de aire movido por el ventilador, puesto que, expone al ventilador a sufrir daños estructurales y puede causar problemas en la operación debido a la falla en la ventilación principal de la mina ante un posible estado de estancamiento. Este se reconoce principalmente por: vibraciones periódicas, ruido inusual e incrementos o decrementos periódicos en el caudal de aire del ventilador.

En caso de caer en la zona de estancamiento, se recomienda en primera instancia detener el funcionamiento del ventilador, lo que implica una pausa de las operaciones de la mina, para luego pedir asesoría a los proveedores y ver cuál es la mejor alternativa de solución, que pueden ser:

- Cambio del ángulo de las aspas del ventilador
 - Cambio en el material de fabricación de las aspas del ventilador
 - Cambio de ventilador por uno más grande que pueda mover el mismo caudal de aire a una presión más estable.
3. Respecto al nuevo nivel mina, el modelo muestra que no tiene un gran impacto en el régimen de flujos existentes previos a su implementación (ver apartado 4.3.8), el error medio absoluto de la comprobación se mantiene en el orden del 10% y el coeficiente de correlación entre los valores simulados en el modelo con el nivel 1290 y el modelo sin este nivel es de 0.99.
4. El modelo de simulación de flujo de aire que se plantea, requiere en el circuito de ventilación el uso de 49 reguladores dispuestos en distintas zonas de la mina y cada uno tiene un porcentaje de apertura determinado según el requerimiento de caudal por galería y la redirección de flujos realizada en la calibración del modelo de simulación de flujo de aire.

Para ver las características de los reguladores y sus ubicaciones, remitirse al Anexo L con el plano proporcionado en el Anexo S.

5.2 Resultados del modelo de simulación de flujo de aire con metano

1. El circuito de ventilación simulado cumple con la legislación polaca respecto a: caudales requeridos por el personal, rangos de velocidad y concentraciones de metano máximas permisibles en cada una de las labores que componen la mina. Para ver algunas labores cumpliendo con la normativa, dirigirse al Anexo N.
2. Se diseña un sistema de ventilación auxiliar en los paneles de explotación debido a que se necesita aumentar el flujo de aire en los frentes de explotación y en los frentes de avance para no dejar zonas aisladas en el sistema de ventilación de la mina. Se usan configuraciones de tipo impelente y aspirante, con la implementación de 15 ventiladores auxiliares dispuestos en dichas zonas (ver distribución espacial en el Anexo S).

Para la instalación de los ductos de la ventilación auxiliar se fija una distancia de separación entre el frente y el ducto en un rango de 1 a 2 metros [18]. El largo total de los ductos utilizados es de 7.8 km.

En el diseño de ventilación auxiliar son seleccionados ductos flexibles para la configuración de tipo impelente y ductos flexibles con anillos para la configuración tipo aspirante, por las siguientes razones:

- Alta resistencia a presiones negativas (sistema aspirante) [18]
- Mayor tolerancia a las altas temperaturas y chispas espontáneas [78]
- Preferentemente usados en minería con presencia de gases [78]
- Mayor flexibilidad operacional
- Fácil instalación [19]

El diámetro de los ductos fue seleccionado en base al diámetro del ventilador auxiliar SIGMA 1000 que es de 0.95 metros.

3. Como se muestra en la tabla 4.8, las emisiones de metano de los paneles de explotación 341 y 401 ($0.9\text{m}^3/\text{s}$ y $0.4\text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente) son iguales para los escenarios 1, 2, 3 y 4, por esta razón, el resultado de las simulaciones es el mismo para cada escenario con respecto a estos paneles, considerando además, que ambos paneles de explotación no reciben un flujo entrante de aire contaminado en ninguno de los escenarios propuestos.

Los resultados de las simulaciones con respecto a las concentraciones finales de metano de los paneles de explotación 341 y 401 se muestran en la figura 5.3a y 5.3.b respectivamente. Todos los contenidos de metano están cumpliendo con la legislación polaca.

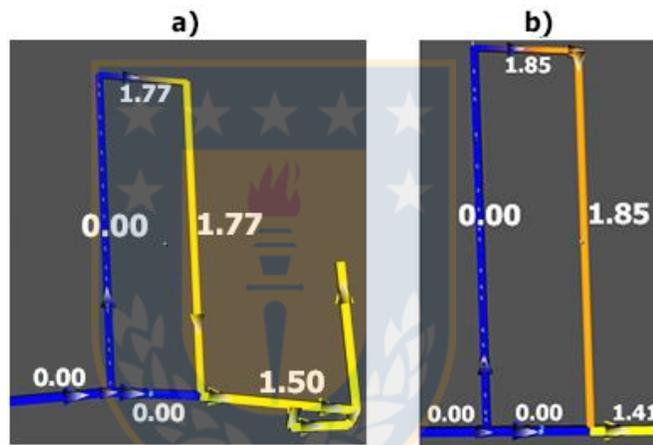


Figura 5.3. Concentraciones [%] de metano de los paneles de explotación 341 y 401.

Para ver el desarrollo y el detalle de las simulaciones realizadas en los paneles 341 y 401, remitirse al apartado 4.4.4.3.

4. La tabla 5.1 presenta los resultados de las simulaciones de las concentraciones de metano en los frentes de explotación posteriores al análisis de la desgasificación mínima requerida para los cuatro escenarios planteados en este estudio. Se observa que los niveles de desgasificación en los paneles de explotación de los niveles 341, 401 y 364 están dentro del margen teórico y que las concentraciones en los frentes están por debajo del 2% que impone la ley. Además, los paneles de explotación 358/1 y 358/2 no requieren analizar la desgasificación, pues el metano se diluye con el flujo de aire en ambos paneles.

Tabla 5.1. Concentraciones en los frentes de explotación para los escenarios analizados.

Escenario	Desgasificación [%]						Concentración final de metano [%]							
	Panel 341	Panel 401	Panel 364/1	Panel 364/2	Panel 358/1	Panel 358/2	F 341	F 401	F 358/1	F 358/2	F 364/1	F 364/2	Pique II	Pique V
1	56	20	20	72	0	0	1.77	1.85	1.17	1.20	1.05	1.07	0.11	0.68
2	56	20	20	72	0	0	1.77	1.85	1.81	0.77	1.05	1.07	0.11	0.67
3	56	20	76	20	0	0	1.77	1.85	1.17	1.20	1.15	0.83	0.11	0.66
4	56	20	76	20	0	0	1.77	1.85	1.81	0.77	1.15	0.83	0.11	0.66

5. El detalle de las simulaciones y resultados para las concentraciones de metano y porcentajes de desgasificación propuestos en cada panel de explotación para los escenarios 1, 2, 3 y 4 se presentan en los Anexos O, P, Q y R respectivamente.
6. En relación al porcentaje de desgasificación propuesto para cada panel de explotación en el escenario 1 y 2 (ver tabla 5.1), la región de soluciones que incluye todas las combinaciones de las emisiones de metano entre los cuatro paneles de explotación está representada por la figura 5.4 considerando las hipótesis conceptuales del modelo conceptual para el flujo de aire con metano presentadas en el apartado 4.2.2.1. Estos escenarios poseen la misma región de solución dado que los cuatro paneles de explotación (en ambos casos) tienen el mismo grado de desgasificación.

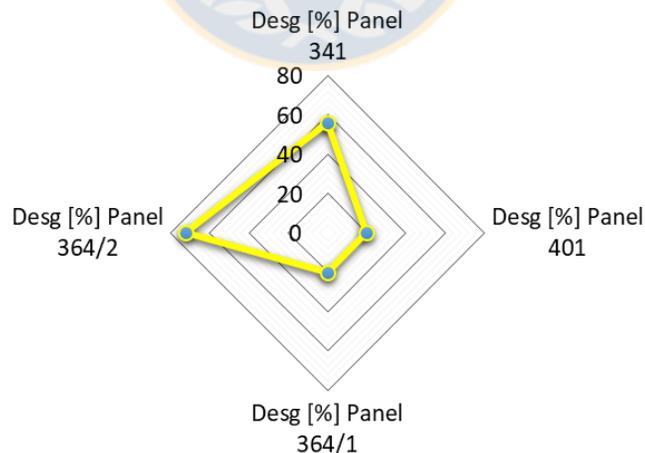


Figura 5.4. Región de solución para el escenario 1 y 2.

7. Con respecto al porcentaje de desgasificación evaluada para cada panel de explotación en el escenario 3 y 4 (ver tabla 5.1), la región de soluciones que incluye todas las combinaciones

posibles de las emisiones de metano entre los cuatro paneles de explotación está representada por la figura 5.5, esto considerando las hipótesis conceptuales del modelo conceptual para el flujo de aire con metano presentadas en el apartado 4.2.2.1. Los escenarios tienen la misma región de solución dado que los cuatro paneles de explotación (en ambos casos) tienen el mismo porcentaje de desgasificación.

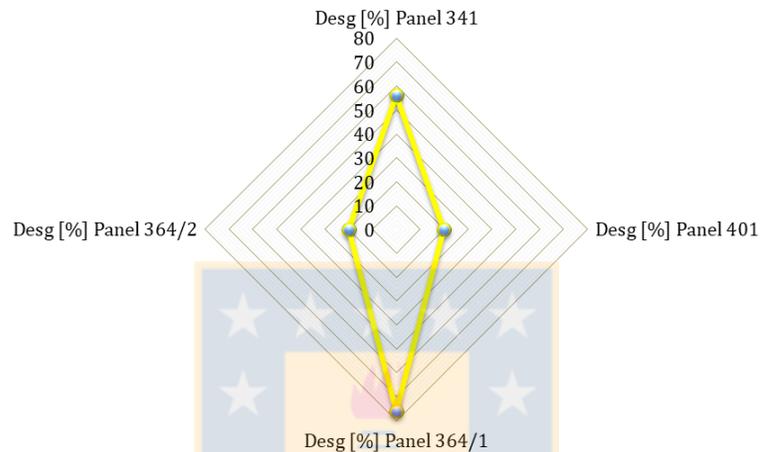


Figura 5.5. Región de solución para el escenario 3 y 4.

8. Los porcentajes obtenidos de la evaluación de desgasificar los paneles de explotación para cada escenario planteado (ver tabla 5.1), dan origen a los límites de la región de soluciones para todo el sistema con respecto a las desgasificaciones necesarias en los paneles. Los casos extremos se originan al considerar las siguientes restricciones:

- El rango de emisión de metano de cada panel de 0.20 a 0.90 m³/s.
- La emisión de metano del nivel 341 es de 0.90 m³/s
- La emisión de metano del nivel 401 0.40 m³/s
- La emisión de metano del nivel 364 es de 0.93 m³/s, y uno de sus paneles debe emitir 0.73 m³/s y el otro 0.2 m³/s
- La emisión de metano del nivel 358 es de 0.51 m³/s, y uno de sus paneles debe emitir 0.31 m³/s y el otro 0.2 m³/s

De esta forma, los puntos de desgasificaciones reales para cada panel de explotación de FezMine están en la región delimitada por las soluciones de los escenarios 1, 2, 3 y 4, que se ven

en la figura 5.6. Si se conocieran los valores reales de las emisiones de metano en todos los paneles, se podría asegurar que la desgasificación necesaria en cada uno de ellos se encontraría dentro la zona delimitada por los casos extremos.

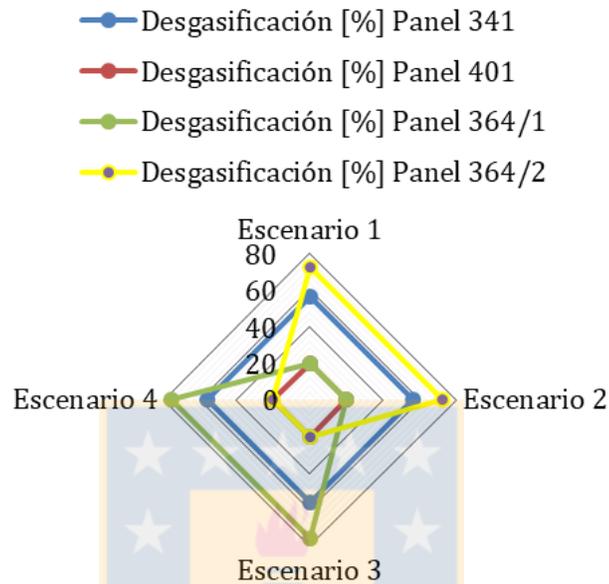


Figura 5.6. Región de solución global de los escenarios planteados.

Analizando la región de soluciones delimitada por los resultados de desgasificación de los cuatro escenarios planteados, se puede concluir:

- El rango de la desgasificación para cualquier panel de explotación en FezMine queda delimitado por el rango del 20% al 76%, como se ve en la figura 5.6, considerando el rango de emisiones de metano de 0.2 a 0.9 m³/s en cada panel.
- Los paneles de explotación 358/1 y 358/2 no requieren desgasificación en ninguno de los escenarios planteados, por ende, para cualquier combinación de las emisiones de metano entre estos, dentro del rango de 0.2 a 0.31 m³/s sumando 0.51 m³/s, el contenido de metano se logra diluir por la acción del flujo de aire del sistema de ventilación principal.
- Los paneles 364/1 y 364/2 requieren desgasificación para cualquier emisión de metano que se encuentre en el rango de 0.2 a 0.73 m³/s, que va desde el 20 al 76% para el primer y desde 20 al

72% para el segundo panel. Como estos rangos de emisión fueron los valores límites, se infiere que para cualquier caso que se pueda presentar en la realidad, se tendrá que aplicar desgasificación en estos paneles.

- Sin importar emisión de metano que tengan los paneles 358/1, 358/2, 364/1 y 364/2, los porcentajes de desgasificaciones mínimas requeridas para los paneles de explotación 401 y 341 serán de 20 y 56% respectivamente. Esto se debe a que estos paneles son independientes del resto y sus entradas no se ven afectadas por aire viciado, además, las emisiones de metano en estos paneles son conocidas y fijas para cualquier escenario planteado.



6. CONCLUSIONES

A continuación, se describen las conclusiones finales del trabajo realizado desde el punto de vista del grado de consecución de cada uno de los objetivos planteados.

Respecto al objetivo 1: *Recopilar y analizar la información disponible para definir el alcance, las limitaciones y las necesidades que se presentan, las conclusiones son:*

1. El objetivo se ha cumplido con la recopilación de más de 120 documentos, obteniendo 72 documentos con utilidad real para el estudio.
2. El modelo de simulación de flujo de aire con metano tiene ciertas limitaciones que le impiden representar la realidad en su totalidad. Estas definen el alcance del modelo de simulación y restringen su aplicabilidad a situaciones específicas según la información disponible.

Las limitaciones del modelo de simulación realizado en este estudio son:

a) Disponibilidad de información:

La información recopilada, analizada y utilizada en esta memoria es de carácter confidencial y no se cuenta con el 100% de los datos de la mina (resistencias, caudales, planos de las labores, ubicación de los reguladores y aforos en labores intermedias), por lo tanto, pueden existir incongruencias entre los valores simulados y los valores reales de caudal de aire por galería. Además, no se sabe la cantidad los datos faltantes ni cómo estos afectan al modelo de simulación propuesto.

Esto se resume en que no se puede comprobar ningún dato de caudal entregado por el simulador dentro de los niveles de operación y explotación (labores intermedias) con los valores reales en la mina.

b) Distribución espacial del personal:

No se dispone de datos reales de la distribución del personal y se propone una metodología para estimar la cantidad de personas presentes por tipo de labor minera para determinar el caudal

necesario por cada galería. Esta estimación realizada puede no representar la distribución espacial real del personal al interior de la mina, por ende, es otra limitación clara que se debe considerar antes de realizar cualquier tipo de análisis cuando se quiere aplicar el modelo de simulación a la realidad de la mina estudiada.

Respecto al objetivo 2: *Definir el modelo conceptual del sistema de ventilación empleando la información recopilada.*, las conclusiones son:

1. El objetivo se cumple después de una exhaustiva labor de recopilación y análisis de información. De acuerdo a la información disponible, es posible definir un modelo conceptual del sistema de ventilación, cuyo grado de representatividad de la realidad dependerá de la calidad y cantidad de datos con los que se cuenta.
2. En el diagrama de la figura 4.6 de la página 69 se puede ver la estructura adoptada en el estudio para definir el modelo conceptual del sistema de ventilación.
3. Dado su carácter académico, no se ha profundizado en elementos importantes de la ventilación de la mina, como por ejemplo, la humedad y la temperatura de la atmósfera. Por otro lado, las estimaciones realizadas en el modelo de simulación pueden no ser representativa de lo que ocurre al interior de la mina real.

Respecto al objetivo 3: *Seleccionar la herramienta de simulación más adecuada para el desarrollo de la modelización del problema y el diseño del circuito de ventilación*, las conclusiones son:

1. Antes de comenzar a definir el modelo de simulación, se debe seleccionar la herramienta de simulación a utilizar en el desarrollo del estudio. Se hizo uso de los dos simuladores de circuitos ventilación de minas subterráneas más importantes del mundo (VentSim™ y VUMA3D), y luego de comparar sus características ofrecidas, se concluyó que VentSim™ es el más apto para el desarrollo de este estudio, por sus capacidades, facilidad de uso y estabilidad.

2. El modelamiento del sistema en 3D ayuda a representar de mejor manera la complejidad dimensional de una mina de gran tamaño y complejidad estructural, lo que es beneficioso cuando se tienen parámetros que varían de acuerdo a la profundidad.
3. Se comprueba que VentSim™ es efectivamente una herramienta de simulación útil para el diseño e implementación de circuitos de ventilación considerando emisiones de metano y se diseña un sistema de ventilación de flujo de aire y metano que permite evaluar desgasificaciones con la ley.

Respecto al objetivo 4: *Definir un modelo de simulación de flujo de aire en función de los datos disponibles que permita evaluar un sistema de ventilación adecuado para toda la mina y la profundización del nuevo nivel 1290, mediante la implementación de elementos de regulación y ventilación auxiliar apropiados.* Las conclusiones son:

1. Se parte del modelo conceptual de flujo de aire formulado, se hace uso del software de simulación VentSim™ y se rediseña el modelo de simulación de flujo de aire de la mina; una vez implementado se calibra y comprueba con el error medio absoluto aproximado al 10%.
2. El modelo de simulación implementado permite obtener un sistema de ventilación adecuado para la mina, con la instalación de 15 ventiladores auxiliares y 49 reguladores distribuidos por toda la mina (ver Anexo S).
3. Considerando en el modelo la reprofundización de la mina al nuevo nivel 1290, los caudales de aire no se vieron fuertemente afectados por este nuevo régimen de flujo de aire en el circuito de ventilación en su primera etapa de desarrollo, considerando el requerimiento de caudal de aire de 33.3 m³/s para este nuevo nivel. Se debe evaluar el sistema de ventilación definido en este estudio con respecto a los requerimientos de aire que tendrá el nivel 1290 cuando se encuentre en una etapa de producción y desarrollo más avanzada, para asegurar que los requerimientos de flujo se cumplan.

Respecto al objetivo 5: *Acoplar al modelo de simulación de flujo de aire definido la problemática del metano y evaluar el sistema de ventilación más adecuado para diluir el contaminante a niveles inocuos para la operación.* Las conclusiones son:

1. Se comprueba que mediante el sistema convencional de ventilación definido, solo se es capaz de diluir 2 de los 6 paneles de explotación de la mina, debido a las altas concentraciones del contaminante consideradas en el desarrollo del estudio.
2. Por ello, se plantea una alternativa adicional para el manejo del contaminante que se aborda en el objetivo 6.

Respecto al objetivo 6: *Utilizar la herramienta de simulación para evaluar el impacto de utilizar la técnica de desgasificación en los paneles de explotación, para facilitar el diseño del sistema de ventilación, disminuyendo las concentraciones de metano en las capas de carbón con mayor emisión de gas.* Las conclusiones son:

1. La evaluación de los resultados del modelo de simulación de flujo de aire con metano con respecto a las desgasificaciones es útil al momento de realizar las planificaciones en la mina y permiten determinar, que para explotar cuatro de los seis paneles de explotación, se necesita de un sistema de desgasificación del metano en un porcentaje del 20 al 76% para cumplir con la normativa de concentraciones máxima de metano.
2. La propuesta de desgasificación corresponde a una solución teórica, que requiere de estudios geológicos de la zona y de las posibilidades de aplicación reales.

7. RECOMENDACIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

Recomendaciones:

1. Se recomienda recopilar una mayor cantidad de aforos en labores intermedias dentro de los niveles de explotación y operación que permitan elaborar un modelo de simulación más detallado del comportamiento del flujo en el interior de cada uno de los niveles.
2. Implementar un sistema de ventilación con monitoreo continuo en tiempo real, con el fin de mantener el control permanente de los flujos y cambios en la calidad del aire al interior de la mina.
3. Se recomienda aplicar desgasificación en el pre-minado, y de esta forma, reducir las concentraciones de metano emitido en los paneles de explotación, lo que tendría un impacto directo en los porcentajes de desgasificación actuales.

Líneas de trabajo futuras:

Durante el desarrollo del estudio, se identifican ciertas aristas relacionadas al objetivo general de la investigación, que debido a motivos de tiempo y del contexto de este trabajo no fueron analizadas, por lo que se presentan como alternativas de mitigación para el metano, cuyo estudio puede ser de interés para una posible implementación en el sistema de ventilación.

Luego de analizar los resultados del modelo de simulación, se concluye que el sistema de ventilación principal no es suficiente para diluir las concentraciones de metano en los paneles de explotación, por lo que se propone el uso de la técnica minera de desgasificación, que a pesar de ser efectiva, no es la única que existe, dejando abierta la posibilidad para evaluar otras alternativas de control como:

1. Evaluar la posibilidad de cambiar los ventiladores principales por otros más potentes, que entreguen un caudal de aire mayor para la operación.

2. Rediseñar el circuito de ventilación actual y evaluar distintas direcciones de flujo de entrada y salida de aire en los cinco piques existentes.
3. Estudiar la posible construcción de un nuevo pique para inducir un flujo de aire adicional en la operación, analizando las configuraciones de inyección o extracción de aire.
4. Plantear el uso simultáneo de los cuatro ventiladores principales que se tienen, 2 en cada pique de extracción de aire viciado (II y V), pues actualmente solo opera un ventilador a la vez en cada pique, es decir, 2 de los 4 ventiladores principales disponibles.

La selección de un método alternativo para el manejo del metano debe llevarse a cabo en base a un análisis de costos con respecto a la técnica de desgasificación planteada en este estudio.

Al finalizar el desarrollo de este estudio, se propuso la desgasificación como un método eficaz para el control del metano, cuyos porcentajes obtenidos están dentro del rango teórico. Para saber si se pueden alcanzar estos grados de desgasificación en FezMine, se deben hacer modelos de simulación exclusivos para la desgasificación de paneles de explotación en simuladores especializados, y de esta forma, respaldar su implementación.

8. REFERENCIAS

- [1] Mehmood, M., Mehmood, T., & Khan, R. (s.f.). *Mine Ventilation* (2da ed.). Lahore, Pakistan: Mining Development Cell.
- [2] Hartman, H., Mutmansky, J., Ramani, R., & Wang, Y. (1997). *Mine Ventilation and Air Conditioning* (3ra ed.). Estados Unidos: Wiley-Interscience.
- [3] McPherson, M. (1993). *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. Estados Unidos: Chapman & Hall.
- [4] Luque, V. (1988). *Manual de ventilación de minas*. Madrid: PEDECA, S. Coop. Ltda.
- [5] World Coal Association. (22 de Febrero de 2018). Coal. Obtenido el 10 de Noviembre de 2018, desde <https://www.worldcoal.org/coal>
- [6] Brake, R. (7 de Mayo de 2009). *Mine Ventilation 2 - Hazard Awareness* [Curso Online]. Obtenido desde <http://www.edumine.com/courses/online-courses/mine-ventilation-2-hazard-awareness/>
- [7] Szlązak N., Obracaj D., & Borowski M. (2015, November). *Methods of methane control in Polish coal mines*. Artículo presentado en The 3rd International Conference on Mining, Safety and Environmental Protection, Xi'an, China.
- [8] Musiał, A., & Kokesz, Z. (2015). Metan wiodącym zagrożeniem naturalnym w KWK "Brzeszcze". *Górnictwo Odkrywkowe*, 56(2), 62-66.
- [9] Wasilewski, S. (2012). *Analiza obowiązujących sposobów kontroli parametrów fizycznych i chemicznych przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych w oparciu o czujniki systemów telemetrycznych wynikające z przepisów Ministra Gospodarki na tle światowych rozwiązań* (3). Cracovia: INSTYTUT MECHANIKI GÓROTWORU POLSKIEJ AKADEMII NAUK.
- [10] ECUACIÓN DE BERNOULLI. (18 de Febrero de 2018). Obtenido desde https://matefiscamonteria.blogspot.com/2018/02/ecuacion-de-bernoulli_18.html
- [11] Brake, R. (5 de Junio de 2009). *Mine Ventilation 3 - Design Basics* [Curso Online]. Obtenido de <http://www.edumine.com/courses/online-courses/mine-ventilation-3-design-basics/>
- [12] Wu, H., Gillies, S., & Mayes, T. (2003). *The Measurement of Airflow Through Regulators*. Artículo presentado en Coal 2003: Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- [13] WILSHAW. (s.f.). *DROP BOARD REGULATORS* [Fotografía]. Obtenido desde <http://www.wilshaw.com.au/products/drop-board-regulators/>

- [14] Schauenburg Flexadux Corp. (s.f.). *Mine Doors* [Fotografía]. Obtenido desde <http://www.schauenburg-us.com/commercial-industrial-ducting/mining-tunneling/mine-doors/>
- [15] MINOVA. (s.f.). *AIR FLOW REGULATORS* [Fotografía]. Obtenidos desde <https://www.minovaglobal.com.au/air-flow-regulators>
- [16] WILSHAW. (s.f.). *VENTILATION DOORS* [Fotografía]. Obtenido desde <https://www.wilshaw.com.au/products/ventilation-doors/>
- [17] Deere & Ault Consultants, Inc. (s.f.). *Red and Bonita Mine – Bulkhead Evaluation* [Fotografía]. Obtenido desde <https://deereault.com/engineering-services/mine-bulkheads/red-and-bonita-mine/>
- [18] Brake, R. (20 de Agosto de 2009). *Mine Ventilation 4 - Advanced Design* [Curso Online]. Obtenido de <http://www.edumine.com/courses/online-courses/mine-ventilation-4-advanced-design/>
- [19] Schauenburg Flexadux Corp. (2014). *Flexible Ventilation for mining and tunneling applications* [Folleto]. Colorado, Estados Unidos: Autor.
- [20] Bleier, F. (1998). *Fan Handbook: Selection, Application, and Design*. Nueva York, NY: McGraw-Hill Education.
- [21] Harris, C. (2006). *Dictionary of architecture & construction* (4ta ed.). Nueva York, NY: McGraw-Hill Education.
- [22] Pazdziora, J. (1988). Evaluation of Deposit Geological Conditions for Design Requirements. En *Design of Underground Hard-Coal Mines* (pp. 26-28). Varsovia, Polonia: PWN—POLISH SCIENTIFIC PUBLISHERS.
- [23] CONSTRA. (s.f.). *parametry i rodzaje wegla*. Obtenido el 15 de Octubre de 2018, desde http://www.constra.pl/parametry_i_rodzaje_wegla.pdf
- [24] Balasubramanian, A. (2016). *Coal mining methods*. Mysore: Centre for Advanced Studies in Earth Science, University of Mysore.
- [25] Energy Information Administration. (1995). *Longwall Mining*. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- [26] Saki, S. (2016). *GOB VENTILATION BOREHOLE DESIGN AND PERFORMANCE OPTIMIZATION FOR LONGWALL COAL MINING USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (Tesis Doctoral). Colorado School of Mines, Golden, CO.

- [27] Underground COAL. (s.f.). FUNDAMENTALS. Obtenido el 16 de Octubre de 2018, desde <http://undergroundcoal.com.au/fundamentals/>
- [28] Castro, R. (2007). *Ventilación de Minas Subterráneas* [Presentación PowerPoint].
- [29] Cheremisinoff, N. P. (2014). *Dust Explosion and Fire Prevention Handbook: A Guide to Good Industry Practices*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [30] Thakur, P., Schatzel, S., & Aminian, K. (2014). *Coal Bed Methane: From Prospect to Pipeline*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- [31] Dziurzyński, W.; Krach, A.; Pałka, T. Airflow Sensitivity Assessment Based on Underground Mine Ventilation Systems Modeling. *Energies* 2017, 10, 1451.
- [32] Dziurzynski, W., Krawczyk, J., Krach, A., & Palka, T. (2012). SIMULATION OF FLOW OF FIRE GASES IN A VENTILATION NETWORK OF A MINE WITH AN APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS OF A DIFFERENT COMPLEXITY IMPLEMENTED IN THE VENTGRAPH SOFTWARE. *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, 36(3), 115-116.
- [33] Howden. (2018). *VentSimtm: User Guide*. Queensland, Australia: Autor.
- [34] Casanova, R. (2018). *CURSO VENTSIM VERSIÓN PREMIUM* [Documento PDF].
- [35] Eaton, L. (2001). Hardy Cross and the 'Moment Distribution Method'. *Nexus Network Journal*, 3(2), 15-23.
- [36] Cross, H. (1936). Analysis of flow in networks of conduits or conductors. *University of Illinois. Engineering Experiment Station*, 34(22), 1-29.
- [37] Jha, A. (2017). *Selection of Main Mechanical Ventilators for Underground Coal Mines: A Case Study*. SpringerBriefs in Environmental Science. Springer International Publishing.
- [38] Howden. (2018). *VentSimtm Guía del Usuario*. Queensland, Australia: Autor.
- [39] Develo, E., Garab, E., & Pillalamarry, M. (2016). Improving the ventilation system at Rosh Pinah zinc mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(4), 301-305.
- [40] Widzyk-Capehart, E., & Fawcett, C. (2001). *Life of mine ventilation requirements for Bronzewing mine using VentSim*. Artículo presentado en Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Cracovia, Polonia.
- [41] Zhang, J., & Suo, C. (Enero de 2016). *Study of Coal Mine Ventilation System Optimization based on Ventsim*. Artículo presentado en MATEC Web of Conferences.

- [42] Song, Y. H., Guo, X. Y., & Lv, W. (2017). A Simulation Study on the Reconstruction of Coal mine Ventilation System Based on Wind Resistance Correction. *International Journal of Simulation Modelling*, 16(1), 31-44.
- [43] Wei, F., Fangping, Z., & Huiqing, L. (2011). The Use of 3D Simulation System in Mine Ventilation Management. *Procedia Engineering*, 26, 1370-1379.
- [44] Liang, Y., Zhang, J., Ren, T., Wang, Z., & Song, S. (2018). Application of ventilation simulation to spontaneous combustion control in underground coal mine: A case study from Bulianta colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(2), 231-242.
- [45] Toro, S., Rueda, N., & Marín, G. (2012). *Estandarización del proceso de ventilación en minas de carbón- Caso Carbones del Caribe S.A.S. Colombia*. Artículo presentado en 14th United States/North American Mine Ventilation Symposium, Utah, Estados Unidos.
- [46] Chmiel, P. (2009). Historia Kopalni Węgla Kamiennego „Budryk”. *Wiadomości Górnicze*, 60(6), 346-350.
- [47] Ozon, D., & Dyczko, A. (2017). *Strategia rozwoju JSW S.A. do roku 2030 widziana przez pryzmat działań inwestycyjnych w procesie węgla - koks*. En Szczyrk coke XXV Conference (pp. 2-5). Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A.
- [48] Szlązak, N., Borowski, M., Obracaj, D., Swolkień, J., Korzec, M., & Piergies, K. (2017). *CURRENT VENTILATION PROBLEMS IN HARD COAL MINES*. Cracovia, Polonia: AGH University of Science and Technology Press.
- [49] Jaszczyk, J., Pabian, L., & Walny, B. (2009). Restrukturyzacja techniczna w kopalni „Budryk” – Jastrzębska Spółka Węglowa SA. *Wiadomości Górnicze*, 60(6), 353-361.
- [50] Prairie Mining Limited. (2017). *Scoping Study Indicates Debiensko Mine Restart Will Deliver Lowest Cost Hard Coking Coal into Europe* (8). Varsovia, Polonia: Autor.
- [51] Czornik, G., Ziomber, S., & Strzelec, G. (Octubre de 2012). *Produkcja węgla koksowego i plany rozwojowe JSW SA*. Artículo presentado en Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej, Zakopane.
- [52] Wardell Amstrong. (2013). *JASTRZĘBSKA SPÓŁKA WĘGLOWA S.A. Mineral Expert's Report* (001). Autor.
- [53] Jamróz, P., & Wasilewski, S. (2016). Badania rozkładu stężenia metanu wzdłuż ściany wydobywczej w warunkach ruchowych. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*, 18(1), 3-11.

- [54] Lewandowski, J., & Rozumek, D. (2017). Ocena Stopnia Zużycia Zespołu Wentylatora Na Podstawie Pomiaru I Analizy Drgań Łożysk. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 159, 162-163.
- [55] Lewandowski, J., & Rozumek, D. (2014). Metody nieniszczące w badaniach połączeń spawanych wirnika wentylatora; Non-destructive methods in the tests on welded joints of the rotor fan. *Przegląd Spawalnictwa - Welding Technology Review*, 86(4), 32.
- [56] Dzikowski, A., Hefczyc, M., & Zdrzałek, J. (2009). Układy regulacji wentylatorów głównego przewietrzania kopalń z silnikami asynchronicznymi zasilanymi z przekształtników częstotliwości i kaskad podsynchronicznych. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 47(11), 31-34.
- [57] Stalkowent Sp. z o.o. (s.f.). *TYP WPK*. Obtenido el 11 de Octubre de 2018, desde http://www.stalkowent.pl/typ_wpk
- [58] Toyo Engineering Corporation. (2001). *Feasibility Study on the Recovery and Utilization of Coal Mine Methane of an Upper Silesian Coal Field*. New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).
- [59] GRUPAMARAT. [Fotografía de la estación de ventilación principal]. Obtenido el 15 de octubre de 2018, desde <http://www.grupamarat.pl/wp-content/uploads/2015/05/realizacja-2.jpg>
- [60] SIGMA S.A. (s.f.). *INSTRUKCJA - WENTYLATOR LUTNIOWY WL-SIGMA 1000/1*. Jastków, Polonia: Autor.
- [61] Orszulik, E., & Dudek, W. (2016). Prevention of Dust Hazards Affecting Workers in Hard Coal Mines. *Journal of Thermodynamics & Catalysis*, 7(1), 3-5.
- [62] Orwat, J., & Mielimaka, R. (2017). Approximation of average course of measured subsidences of mining area by smooth splines. *Journal of Sustainable Mining*, 16(1), 8-13.
- [63] Iwona, J., Jelonek, Z., Kasprzyk, M., & Kondas, M. (2017). *Coal seams No. 358/1 and 364/2 in the Budryk mine – sedimentation conditions, stratigraphic position and petrographic properties*. En 34th Annual Meeting of the Society of Organic Petrology (p. 75). Calgary, Canadá: The Society for Organic Petrology.
- [64] Szkoda, A. (2017). Odmetanowanie ścian o wysokiej metanowości bezwzględnej w kopalni „Budryk”. *Wiadomości Górnicze*, 68(7-8), 362-367.
- [65] Płaczek, J. (2009). Budowa poziomu 1290 w kopalni „Budryk”. *Wiadomości Górnicze*, 60(6), 378-384.

- [66] Czornik, G., Ziomber, S., & Zagórowski, J. (Octubre de 2009). *Produkcja węgla koksowego w JSW S.A.* Artículo presentado en *Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej*, Zakopane.
- [67] Obracaj, D., & Szlask, N. (Septiembre de 2016). *Influence of ventilation and air cooling on thermal regime in the excavation at great depth.* Artículo presentado en *International conference of mining and clean coal technology*, Cracovia, Polonia.
- [68] Urban, Z., Pieczykolan, W., & Izydorczyk, E. (2009). Sposób wykorzystania metanu jako przykład inwestycji proekologicznej w kopalni "Budryk". *Wiadomości Górnicze*, 60(6), 363-368.
- [69] Przywarska, R. (2013). Analiza zagrożeń i wypadkowości w KWK „Budryk”. *Journal of Ecology and Health*, 17(3), 120-128.
- [70] Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg. (2018). *Simulation and Modeling 1*[Diagrama de simulación]. Obtenido desde <http://www7.cs.fau.de/en/teaching/sm1-2018w/>
- [71] AGH University. (s.f.). *Budryk Background*. Manuscrito inédito.
- [72] U.S. Department of Labor. (1979). *Technological change and its labor impact in five energy industries* (2005). Washington, DC: Autor.
- [73] Akdas, H., Yavus, M., & Celik, R. (2000). The transportation planning to the new panel of the longwall mechanized equipment in Tuncbilek Coal Mine. En *Mine Planning and Equipment Selection 2000* (pp. 11-14). Atenas, Grecia: A.A. Balkema.
- [74] Darling, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook, Third Edition* (3ra ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- [75] Stepniewska, Z., Pytlak, A., & Kuźniar, A. (2014). Distribution of the methanotrophic bacteria in Western part of the Upper Silesian Coal Basin (Borynia-Zofiówka and Budryk coal mines). *International Journal of Coal Geology*, 130, 70-78.
- [76] Respondek, A., & Katan, D. (2015). *Zagrożenia gazowe w polskim górnictwie*. Polonia: Wyższy Urząd Górniczy.
- [77] Zapletal, P., Prokop, P., Štemberka, M., Gibesová, B., Vavříková, E., & trčková, H. (2016). THE CALCULATION OF METHANE CONCENTRATION EMITTED FROM THE COAL FACE. *Archives of Mining Sciences*, 61(1), 83-93.
- [78] JiangSu SuLong Eco-Technologies Co., Ltd. (11 de Julio de 2016). The Choice of Mining Ventilation Ducting. Obtenido el 13 de Diciembre, desde <https://www.js-sulong.com/mining-ventilation-ducting/>

9. ANEXOS

Anexo A. Concentraciones de metano permisibles en la atmósfera de mina [9].

Contenidos de metano			
De acuerdo al lugar de ocurrencia		De acuerdo al trabajo que se está realizando	
Ubicación del lugar	CH ₄ [%]	Tipo de trabajo	CH ₄ [%]
Grupo de frentes de explotación ventilados con el mismo flujo de aire: - En el aire suministrado a cada frente, cuando se utilizan sensores automáticos para la detección del metano.	≤ 1.0	Excavaciones con máquinas cortadoras: - En toda la pared del frente - En el sector donde se encuentra la máquina	≤ 1.0 ≤ 2.0
Excavaciones con método Longwall: - Entrada del flujo de aire. - Salida del flujo de aire.	≤ 1.0 ≤ 2.0	Minería con explosivos: - Explosivos para roca y carbón con detectores de metano. - Explosivos especiales para metano.	≤ 1.0 ≤ 1.5
Flujo resultante de un distrito de la mina: - Cuando se utilizan sensores automáticos para la detección del metano	≤ 1.5	Otras labores (no de explotación)	≤ 2.0
Pique de extracción: - Flujo total de salida de la mina.	≤ 0.75	Trabajo de rescate	> 2.0

Anexo B. Velocidades de aire críticas según las regulaciones polacas para minas de carbón [9].

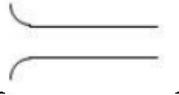
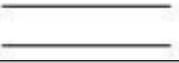
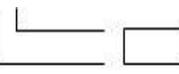
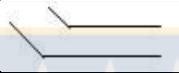
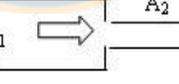
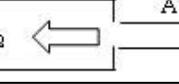
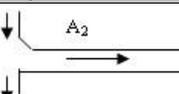
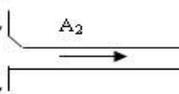
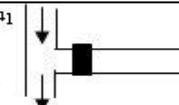
Velocidad del aire			
Mínima		Máxima	
m/s	Tipo de excavación	m/s	Tipo de excavación
No especificado para zonas sin metano	Área de explotación, excavación subterránea y otros: se debe asegurar una adecuada composición del aire.	5	Áreas de explotación.
0.3 - en zonas con metano	Área de explotación y excavación subterránea excepto: - Excavaciones con una instalación para el bloqueo de la ventilación. - Cámaras	8	Excavaciones subterráneas.
1.0 - en zonas con metano	Excavaciones con locomotoras eléctricas	10	Labores en las cuales no hay un movimiento regular de personas.
> 0.5 - en zonas con y sin metano	Movimiento de aire hacia abajo en excavaciones inclinadas desde 5° a 10°.	12	Piques y chimeneas mientras hay tránsito de personas.
0.15 - en zonas sin metano, categoría I.	- Excavaciones subterráneas (excepto para excavaciones con un área transversal de más de 20 m ² , si se asegura una composición de gases y condiciones climáticas apropiadas)	-	-
0.30 - en zonas con metano, categorías II, III y IV.	- En la parte del pique (chimenea) ventilado usando ductos de ventilación.		

Anexo C. Factores típicos k en minería [11].

Tipos de conductos	Factor de fricción de Atkinson (k) (Ns^2/m^4), k1.2
Conducto suave (poca rugosidad)	0.0028
Conducto de acero (rígido)	0.0030 a 0.0035
Conducto flexible	0.0030 a 0.0055
Conducto de concreto	0.0035 a 0.0040
Conducto perforado y tronado	0.0090 a 0.0120
Conducto desarrollado por minería continua	0.0060 a 0.0090
Conducto en mina de carbón (sin correa)	0.0060 a 0.0080
Conducto en mina de carbón (con correa)	0.0100 a 0.0200
Frente de explotación en longwall	0.0450
Conducto desarrollado por "raise boring"	0.0035 a 0.0050
Conducto con elementos de acero	0.0150
Conductos soportados c/madera	0.0400 a 0.600
Pique reforzado c/madera	0.0400 a 0.900
Pique reforzado c/concreto	0.0100 a 0.600



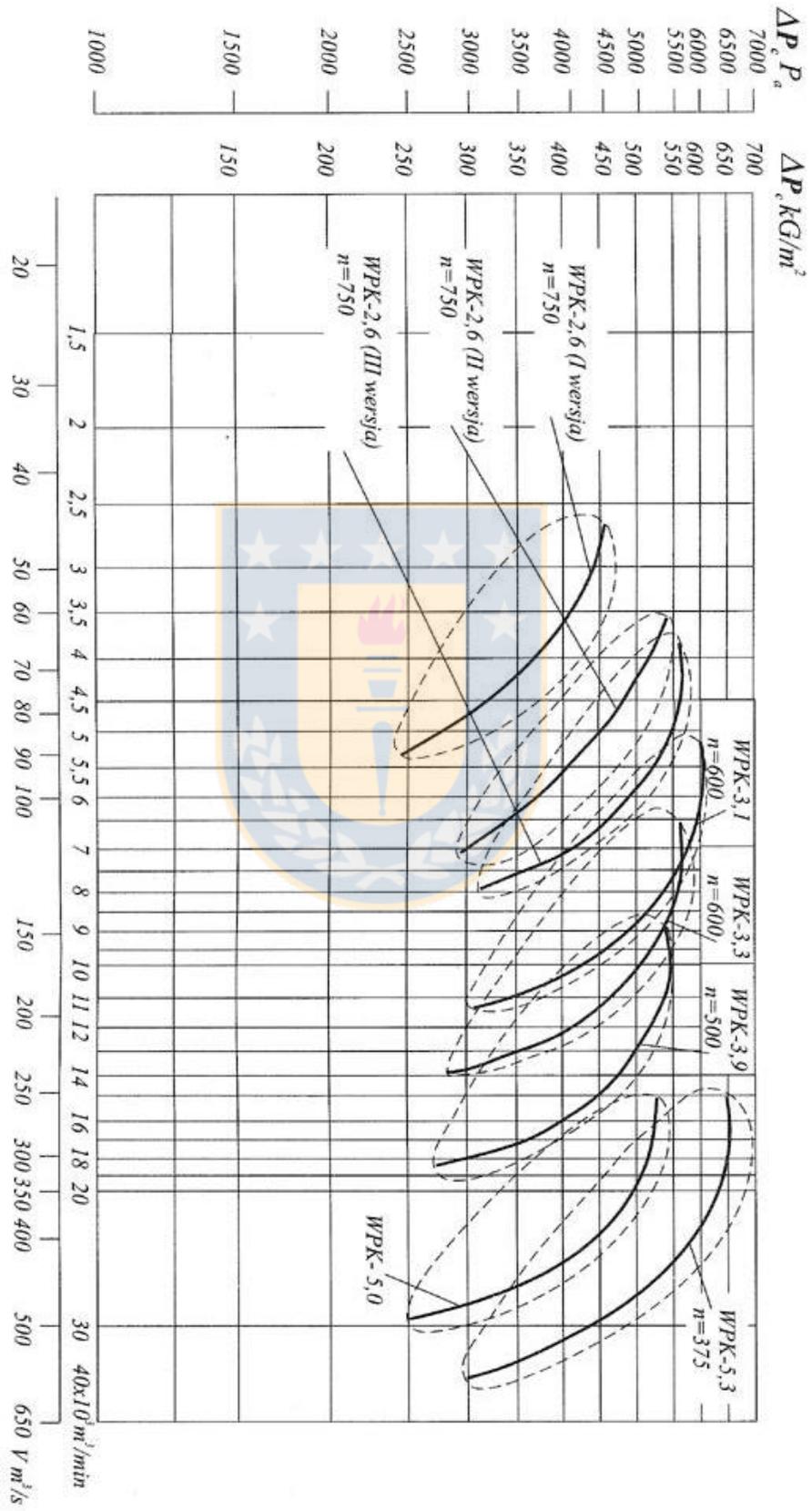
Anexo D. Factores de pérdidas por choque (desde la experiencia) [11].

Situación		Factor de choque (X)
Entradas		
Entrada tipo "campana"		0.05
Entrada tipo rectangular		0.5
Entrada cónica		0.1
Entrada plana		0.9
Curvas		
Curva rectangular (X_{90})		1.0
Curva a j grados		$j/90 \times X_{90}$
Curva modificada a 45°		0.5
Curvatura a 90°		0.2
Contracciones y expansiones		
Contracción gradual		Despreciable
Contracción de 45° de A1 a A2		$X_2 = 0.33(1-A_2/A_1)^2$
Contracción aguda de A1 a A2		$X_2 = 0.50(1-A_2/A_1)^2$
Expansión aguda de A1 a A2		$X_1 = (1-A_1/A_2)^2$
Ramificaciones		
Bifurcación principal		Varía, pero toma un valor de 0.4 si el aire deja el conducto principal
Aire entrando en una conexión de forma "T" en 90° hacia el flujo principal		Toma el valor de 1 si el aire entra al flujo principal
Conexión "T" bloqueada		$X_1 = 0.25$

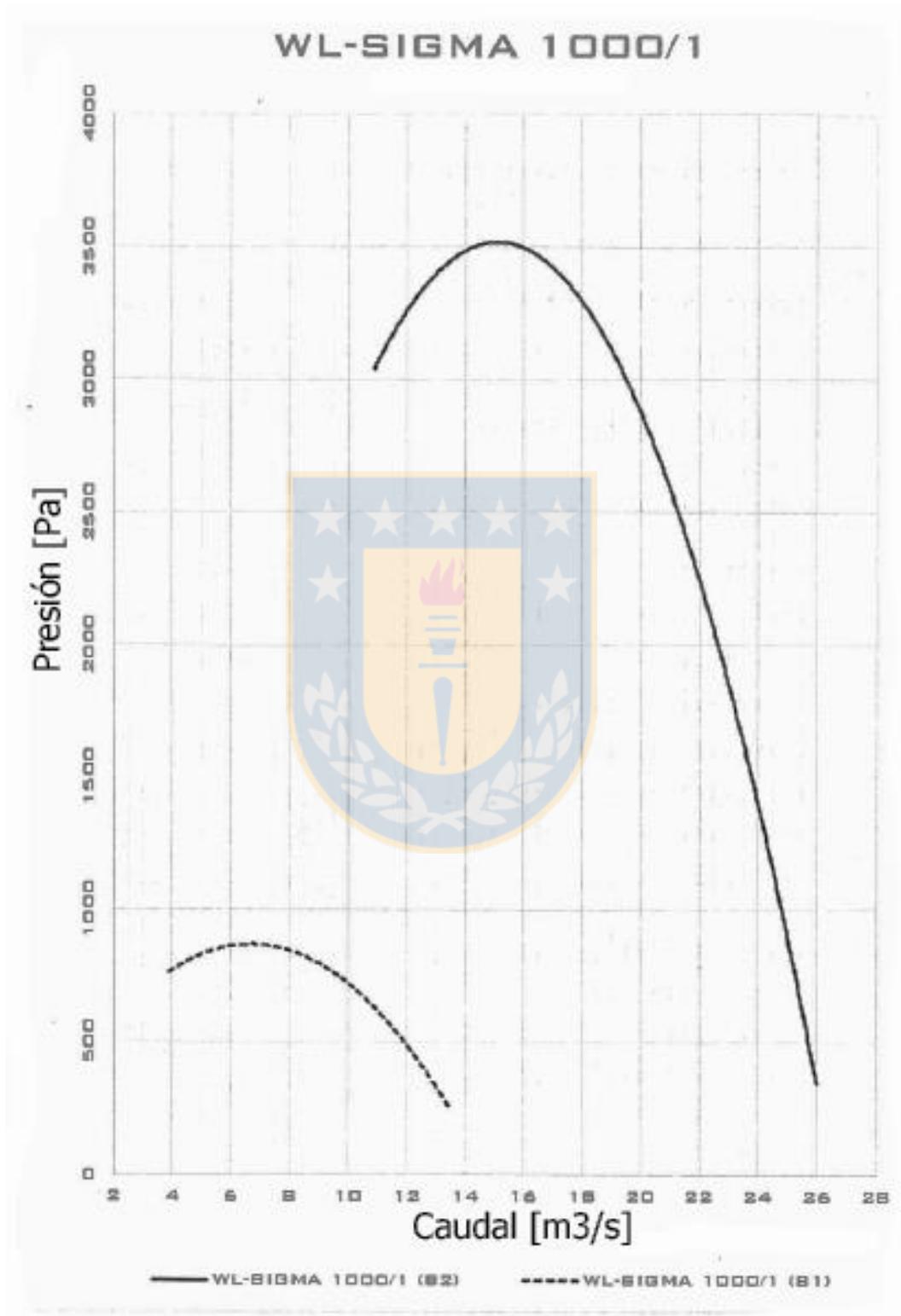
Anexo E. Clasificación polaca para los tipos de carbón [22,23].

Tipo de carbón			Parámetros de clasificación							Uso del carbón	
			Materia volátil	Coking ability (Índice Roga)	Índice dilatométrico	Índice de explosividad	Valor calorífico superior	Presión de expansión	Contracción X		Espesor de la capa plástica Y
Nombre	Índice	Subdivisión	%		%		MJ/kg	kg/cm ²	mm	mm	
Steam coal	31	31.1	Sobre 28	Entre 0 a 9	Sin estándar	Sin estándar	Hasta 31	0	Ausente	Ausente	Carbón para uso energético para cualquier tipo de hornos (hornos industriales, generadores, combustible doméstico)
		Entre 31 a 34									
Gas-Steam coal	32	32.1	Sobre 28	Entre 10 a 20	Sin estándar	Sin estándar	Hasta 36	< 0,1	Ausente	Ausente	Carbón para uso energético para cualquier tipo de hornos (hornos industriales, generadores, combustible doméstico)
		Entre 20 a 45									
Gas coal	33	33	Sobre 28	Entre 30 a 55	Sin estándar	Sin estándar	Entre 33 a 36	Aprox. 0,1	> 20	< 15	Hornos de parrilla, hornos de carbón pulverizado, hornos industriales; generadores de gas; calderas industriales, producción de coque
Gas-coking coal	34	34.1	Sobre 28	Entre 50 a 85	Sin dilatación o inferior a 0	Sin estándar	Entre 33 a 36.5	0,1 - 0,3	15 a 30	10 a 22	Carbón para la producción de coque, generación de gas, hornos de gas y coque.
		Menor o igual a 0									
Ortho-coking coal	35	35.1	Entre 26 a 31	Entre 50 a 85	Sobre 30	Sin estándar	Entre 35 a 37	0,3 - 2,0	< 25	13 a 25	Carbón para la producción de coque metalúrgico
		35.2A	Entre 20 a 26								
		35.2B									
Meta-coking coal	36	36	Entre 14 a 28	Entre 25 a 55	Sobre 0	Sin estándar	Sin estándar	0,3 - 2,5	< 16	5 a 15	Carbón para la producción de coque de fundición.
Semi-coking coal	37	37.1	Entre 20 a 28	Entre 10 a 30	Sin estándar	Sin estándar	Hasta 37	0	Ausente	Ausente	En plantas de coque como aditivo reductor y producción de combustible sin humo
		37.2	Entre 14 a 20								
Lean coal	38	38	Entre 14 a 28	Entre 0 a 9	Sin estándar	Sin estándar	Hasta 37	0	Ausente	Ausente	Chimeneas industriales, máquinas de vapor, generadores, combustible doméstico.
Anthracite coal	41	41	Entre 10 a 14	0	Sin estándar	Sin estándar	-	0	Ausente	Ausente	Carbón con fines energéticos para hornos especiales.
Anthracite	42	42	Entre 3 a 10	0	Sin estándar	Sin estándar	-	0	Ausente	Ausente	Para la generación de energía en hornos especialmente contruidos y para la producción de electrodos de carbono.
Meta-anthracite	43	43	Bajo 3	0	Sin estándar	Sin estándar	-	0	Ausente	Ausente	Para motivos especiales

Anexo F. Curvas características de los ventiladores modelo WPK [57].



Anexo G. Curva característica del ventilador modelo WL-SIGMA 1000/1 [35].



Anexo H. Área y resistencias de las labores.

Labor	Nodo entrada	Nodo salida	Resistencia	Área
	J1	J2	kg/m ⁷	m ²
1	1	2	0.001	63.6
2	1	3	0.002	63.6
3	1	990	59.897	63.6
4	1	8	0.000	63.6
5	1	9	0.000	63.6
6	2	5	29.369	7.2
7	2	500	0.002	63.6
8	3	4	0.034	9.1
9	3	731	0.004	63.6
10	4	5	23.426	9.1
11	5	6	20.110	9.1
12	6	990	0.001	63.6
13	8	506	0.003	63.6
14	9	995	16.537	63.6
15	100	101	0.002	25.7
16	100	116	0.011	17.8
17	101	102	0.002	24.0
18	101	860	0.056	17.8
19	102	105	0.011	17.8
20	102	863	0.022	14.5
21	105	107	0.011	17.8
22	107	108	157.272	15.4
23	107	1043	0.005	17.8
24	108	859	0.006	17.8
25	110	857	0.008	15.4
26	111	933	0.336	17.8
27	116	862	0.009	14.5
28	116	863	0.023	17.8
29	120	121	0.003	17.8
30	121	794	0.001	63.6
31	500	501	151.304	12.0
32	500	699	0.001	63.6
33	501	6	0.001	63.6
34	504	512	0.044	16.6
35	505	504	0.017	14.2
36	506	507	0.004	21.8

37	506	514	0.036	21.8
38	506	900	0.003	63.6
39	507	508	0.001	17.8
40	508	509	0.007	17.8
41	509	889	0.152	14.9
42	508	510	1.169	21.8
43	510	509	0.009	17.8
44	507	511	34.166	14.9
45	511	510	0.005	17.8
46	512	511	0.018	17.8
47	514	512	0.467	14.5
48	514	505	0.043	14.9
49	616	864	0.092	14.5
50	638	1116	0.051	17.8
51	652	812	0.016	17.8
52	654	658	0.022	14.3
53	657	661	50.949	13.2
54	657	864	0.024	13.2
55	658	662	0.017	13.2
56	661	665	0.050	11.2
57	662	661	0.017	11.2
58	662	666	0.021	11.2
59	665	666	0.062	11.2
60	665	669	0.149	11.2
61	666	670	0.030	11.2
62	669	670	0.031	9.6
63	670	739	0.055	14.5
64	699	700	0.000	63.6
65	699	705	7.053	11.2
66	700	100	0.003	63.6
67	700	701	0.003	21.8
68	700	728	0.002	21.8
69	701	702	0.005	19.8
70	701	709	27.750	14.9
71	701	729	0.040	13.2
72	702	704	0.009	14.9
73	702	856	1.787	14.9
74	704	705	21.462	17.8

75	704	711	0.008	14.9
76	705	706	5.310	17.8
77	706	732	0.073	11.2
78	707	706	10.794	14.9
79	707	708	0.010	14.9
80	708	709	23.269	17.8
81	709	710	0.054	14.9
82	710	793	21.416	14.9
83	711	712	0.006	17.8
84	712	713	0.023	17.8
85	712	717	0.027	17.8
86	713	714	0.008	17.8
87	713	719	0.019	17.8
88	714	773	0.032	17.8
89	717	718	0.074	14.9
90	717	856	1.088	17.8
91	718	708	0.934	14.5
92	718	719	5.872	14.5
93	719	746	0.011	17.8
94	722	711	0.014	17.8
95	722	724	30.850	14.6
96	723	722	0.007	17.8
97	723	724	31.550	17.8
98	724	726	0.051	14.9
99	725	723	0.008	17.8
100	725	726	5.905	17.8
101	726	742	0.009	14.9
102	727	725	0.007	17.8
103	727	742	294.247	14.9
104	728	729	0.019	15.6
105	728	768	0.012	14.9
106	729	730	0.027	13.2
107	730	727	0.006	17.8
108	731	732	138.078	11.2
109	731	733	0.000	63.6
110	732	744	0.049	17.8
111	733	734	0.001	63.6
112	733	802	0.021	14.9
113	734	110	0.004	63.6
114	734	735	0.022	14.9

115	735	736	3.895	14.9
116	735	738	966.317	17.8
117	736	714	0.026	17.8
118	737	738	9.388	14.9
119	738	739	0.020	15.6
120	739	874	0.023	17.8
121	742	853	0.033	14.9
122	744	745	3.293	14.9
123	745	501	0.001	63.6
124	746	737	0.038	13.5
125	746	747	0.017	14.9
126	747	710	0.290	14.9
127	768	792	0.017	17.8
128	768	851	0.014	17.6
129	773	777	0.032	17.8
130	777	778	0.037	19.8
131	777	874	5.014	17.8
132	778	800	0.005	17.8
133	780	781	0.048	17.8
134	780	788	0.849	14.9
135	781	657	1.607	14.9
136	781	787	0.032	14.9
137	782	785	0.016	15.6
138	783	782	0.029	14.9
139	783	784	0.061	17.8
140	784	658	14.854	14.9
141	785	781	0.002	17.8
142	785	787	40.992	14.9
143	787	658	0.129	14.9
144	788	871	0.083	17.8
145	791	854	0.055	17.8
146	791	874	5.742	17.8
147	792	791	1.729	17.8
148	792	852	20.036	19.8
149	793	794	0.005	21.8
150	794	745	0.000	63.6
151	800	780	0.005	17.8
152	800	801	0.046	14.9
153	801	815	0.035	17.8
154	802	737	294.952	14.9

155	802	803	1.342	14.9
156	803	736	0.004	15.6
157	803	737	0.061	14.9
158	811	782	0.007	17.8
159	812	811	0.012	17.8
160	813	812	0.377	13.2
161	813	814	0.017	17.8
162	814	783	0.059	17.8
163	814	811	0.012	13.2
164	784	815	0.040	17.8
165	815	816	0.031	15.4
166	816	891	0.022	15.4
167	817	652	0.005	17.6
168	817	813	0.026	14.5
169	850	121	0.033	14.5
170	851	730	0.017	17.8
171	851	853	24.331	14.9
172	852	793	0.194	17.6
173	853	744	0.080	11.2
174	854	788	0.054	19.8
175	854	801	0.045	17.8
176	855	873	0.042	17.6
177	856	707	0.025	14.9
178	857	850	146.881	14.9
179	857	859	66.742	17.6
180	858	108	0.004	17.6
181	858	850	0.026	14.9
182	859	120	0.011	14.9
183	860	861	0.023	17.8
184	861	873	0.020	17.8
185	862	872	0.029	14.9
186	863	105	0.043	19.8
187	864	654	0.575	14.9
188	865	855	0.695	13.2
189	865	860	0.007	17.6
190	871	891	87.716	17.8
191	871	897	3.912	14.9
192	872	890	0.028	14.9
193	872	861	0.072	14.9
194	873	120	13.065	17.8

195	874	852	0.039	17.8
196	875	865	0.062	14.9
197	862	875	0.034	14.9
198	875	890	0.901	13.2
199	876	877	0.021	13.2
200	877	616	0.062	13.2
201	889	876	0.074	13.2
202	889	1200	0.094	17.8
203	890	855	0.179	14.9
204	891	897	0.032	17.8
205	897	638	0.727	14.9
206	898	958	0.025	17.8
207	898	899	0.095	14.9
208	899	929	6.470	17.8
209	900	111	0.002	63.6
210	900	919	0.002	21.8
211	900	994	0.001	21.8
212	901	909	0.002	17.8
213	901	940	0.023	14.9
214	902	904	0.005	13.2
215	904	1038	0.030	13.2
216	905	906	0.027	17.8
217	943	905	0.046	17.8
218	906	911	0.045	14.9
219	906	982	0.060	14.9
220	909	817	0.315	16.6
221	910	937	0.006	15.6
222	911	902	0.005	14.6
223	919	909	4.626	17.8
224	919	920	0.012	17.8
225	919	992	0.007	21.8
226	920	901	0.001	17.8
227	920	998	0.007	17.8
228	921	898	0.032	17.8
229	921	961	40.889	17.8
230	922	926	0.042	16.6
231	922	943	0.008	17.8
232	923	936	0.042	13.2
233	924	999	0.021	17.8
234	925	945	1.072	17.8

235	925	944	0.032	17.8
236	926	928	0.016	16.5
237	927	930	0.041	11.2
238	928	949	0.084	16.6
239	929	931	0.008	17.8
240	930	931	0.006	17.8
241	931	1112	0.002	63.6
242	932	954	0.150	16.6
243	933	932	0.012	19.8
244	933	987	8.432	17.8
245	933	951	0.128	17.8
246	935	962	0.398	16.6
247	936	927	0.028	13.2
248	937	911	0.006	14.9
249	939	987	0.006	17.8
250	940	910	0.202	14.5
251	940	942	0.001	17.8
252	942	948	0.035	17.8
253	943	921	1.923	17.8
254	943	948	0.013	17.8
255	944	975	2.947	13.2
256	945	975	0.117	10.2
257	947	935	0.021	17.8
258	948	934	0.032	17.8
259	949	950	0.089	17.8
260	949	932	0.072	17.8
261	950	951	0.031	17.8
262	951	952	0.041	17.8
263	952	953	0.037	19.8
264	953	954	0.101	17.8
265	954	939	0.077	16.6
266	958	956	90.555	17.8
267	960	961	0.039	17.8
268	961	923	0.003	17.8
269	962	959	0.164	11
270	972	973	0.281	8
271	973	945	0.065	10
272	974	930	0.022	13.2
273	975	974	0.090	13.2
274	976	973	0.094	12

275	980	981	0.001	21.8
276	981	993	0.002	21.8
277	982	986	0.003	16.6
278	986	972	0.045	9.5
279	987	1008	0.014	21.8
280	989	920	0.009	17.8
281	989	998	0.033	17.8
282	990	991	0.007	17
283	991	1	0.000	17
284	992	997	0.002	21.8
285	993	992	0.001	17.8
286	994	980	0.002	17.8
287	994	993	0.157	17.8
288	995	996	0.002	24.3
289	996	1	0.000	24.3
290	997	922	0.010	17.8
291	997	989	0.002	17.8
292	997	998	0.009	17.8
293	998	905	0.029	17.8
294	999	925	0.902	16.8
295	1000	858	0.011	17.8
296	1001	1000	0.036	17.8
297	1002	1001	0.030	17.8
298	1003	1009	0.555	13.2
299	1004	1037	5.100	13.2
300	1005	1004	1.526	13.2
301	1006	1040	0.001	13.2
302	1007	1008	23.328	17.8
303	1007	1041	0.018	17.8
304	1008	1009	0.439	17.8
305	1009	1002	0.009	17.8
306	1036	1037	0.504	11.2
307	1037	1003	0.014	13.2
308	1038	1005	0.002	13.2
309	1038	1039	1.594	13.2
310	1039	1004	0.002	13.2
311	1036	1039	7.147	14.5
312	1040	1003	15.750	15.6
313	1040	1036	0.006	15.5
314	1041	1002	99.475	11.2

315	1041	1006	0.189	13.2
316	1042	1001	184.705	14.5
317	1042	1007	0.012	17.8
318	1043	1000	4.310	17.8
319	1043	1042	0.045	17.8
320	1100	1113	0.145	16.6
321	1108	1112	0.222	17.8
322	1112	995	0.004	63.6
323	1113	1124	0.718	16.8
324	1113	1114	11.946	17.8
325	1114	1123	0.098	17.8
326	1114	1115	0.033	17.8
327	1118	1116	2.089	17.8
328	1116	1125	0.052	17.8
329	1115	1117	0.047	17.8
330	1117	1118	0.009	17.8
331	1123	1124	2.831	17.8
332	1123	1125	0.033	17.8
333	1124	1108	0.022	17.8
334	1125	1108	0.008	17.8
335	1200	1100	0.020	17.8
336	1200	1209	0.016	17.8
337	1202	1208	0.243	8
338	1203	1204	0.008	14.9
339	1203	1210	6.319	17.8
340	1204	1202	0.064	17.8
341	1204	1207	6.704	17.8
342	1206	1207	0.017	17.8
343	1207	1210	0.021	17.8
344	1208	1206	0.063	11.2

345	1210	638	0.013	17.8
346	977	978	0.096	12
347	977	924	0.034	16.6
348	999	978	0.005	15.6
349	978	976	1.007	15.6
350	1006	983	0.002	17.6
351	983	984	1.505	17.6
352	984	985	0.145	12
353	983	977	0.022	17.6
354	982	985	1.314	14.5
355	985	976	0.002	14.5
356	1005	1010	0.031	12
357	1010	1011	0.187	8.5
358	1004	1011	0.037	11
359	1011	1012	0.002	12
360	1012	1037	0.016	12
361	1209	1201	0.060	12.8
362	1201	1205	0.186	8.5
363	1205	1199	0.060	12.8
364	1199	1203	0.064	12.8
365	1209	1199	0.013	12.8
366	947	955	1.055	14.5
367	955	956	0.004	13.5
368	959	955	0.026	8.5
369	934	938	0.067	14.5
370	938	947	0.015	14.5
371	938	941	1.109	14.5
372	956	941	0.015	14.3
373	941	960	0.004	14.3

Anexo I. Layout con leyenda de niveles en VentSim™.

Anexo J. Ejemplo ilustrativo de la división sectorial.

- a. La figura J.a muestra un nivel de operación genérico donde cada galería tiene un largo de 1 km, definiendo así un largo total para el nivel de 40 km. La cantidad de trabajadores en dicho nivel para un turno es de 200 personas. El requerimiento de caudal por cada persona es de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$.
- b. La figura J.b muestra el sector de trabajo de cada persona que corresponde a las galerías pintadas en **rojo**, por lo tanto, cada persona podrá moverse a lo largo de dicho sector. Así, todas las personas podrían desplazarse por todo el nivel de operación, por lo que el requerimiento de caudal de aire a cumplir será en base a los 200 trabajadores del turno, lo que equivale a $20 \text{ m}^3/\text{s}$, en cualquier punto del nivel, pues puede darse el caso de que en algún instante, estos estén en el mismo lugar. Dado paso al escenario más desfavorable.

- c. En la figura J.c el sector de trabajo (galerías en **rojo**) se reduce a 22 km **para cada persona** del turno. Destacar que en la figura las líneas rojas representan el sector de trabajo de UNA persona, habiendo otros 199 sectores que cumplen 22 km, no necesariamente iguales.

Por ende, el nuevo requerimiento de caudal de aire será $11 \text{ m}^3/\text{s}$ en cualquier punto de la mina, que corresponde a la proporción del sector de trabajo con respecto a todo el nivel de operación por el requerimiento de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ por persona $[(22/40)*200]*0.1$.

- d. En la figura J.d el sector de trabajo se reduce a 12 km para cada persona del turno. Así, el nuevo requerimiento de caudal de aire será de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ en cada punto del nivel.
- e. En la figura J.e el sector de trabajo se reduce a 4 km para cada persona del turno. Así, el requerimiento de caudal de aire será de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en cada punto del nivel.
- f. Finalmente, en la figura J.f el sector de trabajo se reduce a 1 km para cada persona del turno. Así, el requerimiento de caudal de aire será de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en cada punto del nivel, lo que representa el escenario más favorable pero a su vez el más irreal.

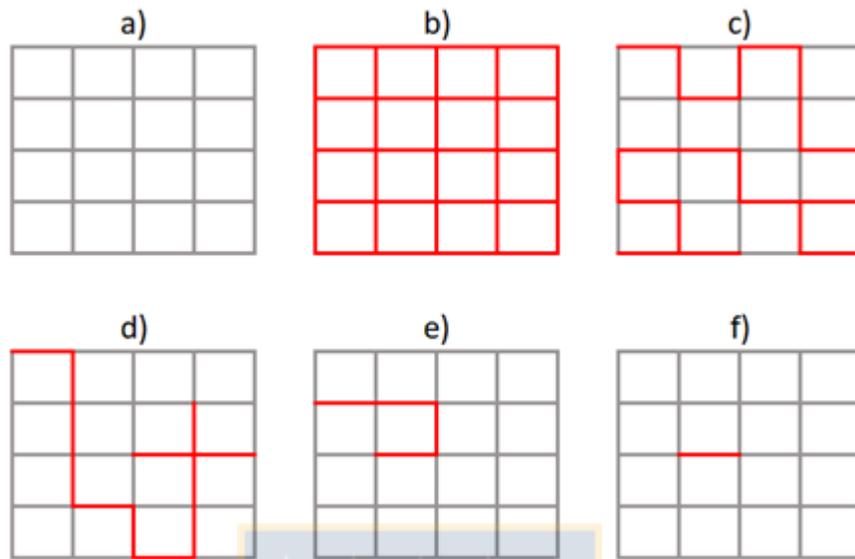


Figura J: Ejemplo del paso 5 para sectores de trabajo.

En conclusión, entre mayor sea la distancia considerada para el sector mayor será el caudal requerido, dado que se tienen menos sectores en el nivel y grandes áreas abarcadas. Así, el sector de trabajo de 3 km para este estudio representa un escenario conservativo y a su vez un mayor desafío al momento de calcular y simular el caudal de aire requerido por el circuito de ventilación de la mina con respecto a la cantidad de personas.

Anexo K. Excel procedimiento para el cálculo del personal.

Nivel	Tipos de galería presentes	Técnicas	Transporte	Ventilación	Seams	Galería	Desarrollos	Personal	Chambers
164	técnicas	406	0	0	0	0	0	0	0
338	Transporte-ventilación	0	4794	1504	0	0	0	0	0
341	Transporte-técnicas-seams	281	1910	0	2108	0	0	0	0
358	Transporte-ventilación-seams-random	0	3648	11342	6856	2698	1479	0	0
364	Transporte-desarrollos-ventilación-seams-random (posee 2 seams unidos)	0	0	4213	3162	3003	4293	0	0
401	Transporte-seams-ventilación	0	3226	1728	2176	0	215	0	0
500	Técnicas	2543	0	0	0	0	0	0	0
700	Transporte-ventilación-random-técnicas-personal	2026	3317	2295	0	4241	0	676	714
900	Transporte-ventilación-técnicas-personal	389	603	1328	0	0	0	392	0
1050	Transporte-ventilación-random-técnicas-personal-desarrollo	893	5666	2668	0	1552	4526	670	116
1290	Transporte-ventilación-random-personal-desarrollo	0	359	150	0	491	1657	69	0
TOTALES		6538	23523	25228	14302	11985	12170	1807	830

Total galerías	N° técnicas	N° transporte	N° ventilación	N° seams	N° Galería	N° desarrollos	N° personal	N° chambers	Areas secciones	secciones aproximadas	Totales personas POR NIVEL
406	1.863	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.135	1.000	2
6298	0.000	24.456	1.192	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.099	2.000	26
4299	1.289	9.744	0.000	10.317	0.000	0.000	0.000	0.000	1.433	2.000	21
26023	0.000	18.610	8.992	33.556	11.256	4.861	0.000	0.000	8.674	9.000	77
14671	0.000	0.000	3.340	15.476	12.528	14.110	0.000	0.000	4.890	5.000	45
7345	0.000	16.457	1.370	10.650	0.000	0.707	0.000	0.000	2.448	3.000	29
2543	11.669	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.848	1.000	12
13269	9.296	16.921	1.819	0.000	17.693	0.000	18.705	8.602	4.423	5.000	73
2712	1.785	3.076	1.053	0.000	0.000	0.000	10.847	0.000	0.904	1.000	17
16091	4.098	28.904	2.115	0.000	6.475	14.876	18.539	1.398	5.364	6.000	76
2726	0.000	1.831	0.119	0.000	2.048	5.446	1.909	0.000	0.909	1.000	11
										TOTAL	390

nuevas personas por "sectores"	Galerías en los piques	Galerías en los seams	Galerías en el resto del nivel
2	2	0	2
13	26	0	13
11	0	21	11
9	77	17	9
9	0	18	9
10	0	19	10
12	12	0	12
15	73	0	15
17	17	0	17
13	76	0	13
11	11	0	11
Factor de seguridad		2	

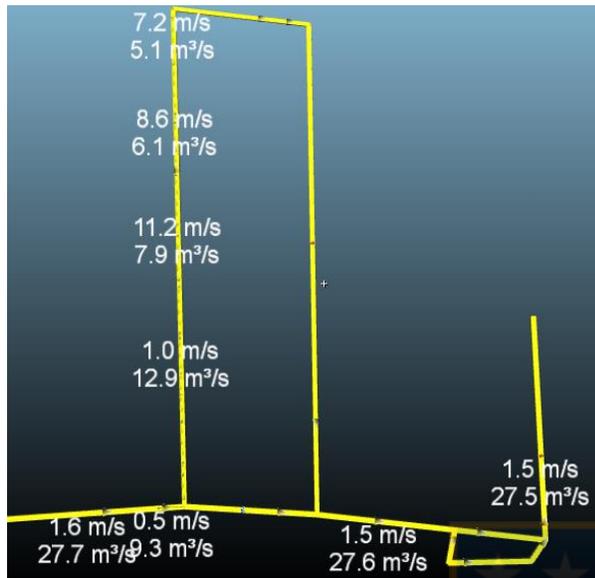
Anexo L. Reguladores utilizados en los distintos niveles.

Nivel	Nodo de entrada	Nodo de salida	Tipo	Apertura [%]
164	3	4	Puerta	8
	2	5	Puerta	9
338	788	871	Material flexible	15
341	1209	1199	Material flexible	10
358	943	921	Material flexible	12
	943	906	Solapas de goma	18
	938	956	Material flexible	10
	947	955	Material flexible	10
	921	899	Material flexible	20
	975	930	Material flexible	30
364	898	899	Persiana	16
	928	926	Material flexible	16
	939	387	Persiana	10
	949	932	Material flexible	10
	1038	1039	solapas de goma	10
401	1006	983	Material flexible	10
	926-4	926-5	Material flexible	10
700	742	853	Persiana	23
	723	725	Material flexible	33
	700	728	Puerta	11
	700	701	Puerta	15
	705	699	Persiana	9
	704	705	Material flexible	25
	701	709	Puerta	10
	732	706	Puerta	10
	852	792	Material flexible	10
	852	874	Material flexible	10
	731	732	Puerta	2
	737	738	Material flexible	10
	735	738	Puerta	0
	735	736	Puerta	10
900	998	997	Puerta	0
	998	905	Solapas de goma	34
	922	943	Solapas de goma	43
1050	1009	1008	Solapas de goma	16
	100	101	Puerta	13
	100	116	Puerta	10
	101	860	Puerta	0
	100-1	872-1	Puerta	10
	116	116-1	Solapas de goma	10
	875	865	Material flexible	22
	872	890	Material flexible	16
	861	872	Material flexible	22
	857	110	Puerta	10
	110	872-2	Puerta	10
	987	987-1	Material flexible	19
	1000	1043	Material flexible	30
107	108	Material flexible	17	
111-1	111-2	Solapas de goma	10	

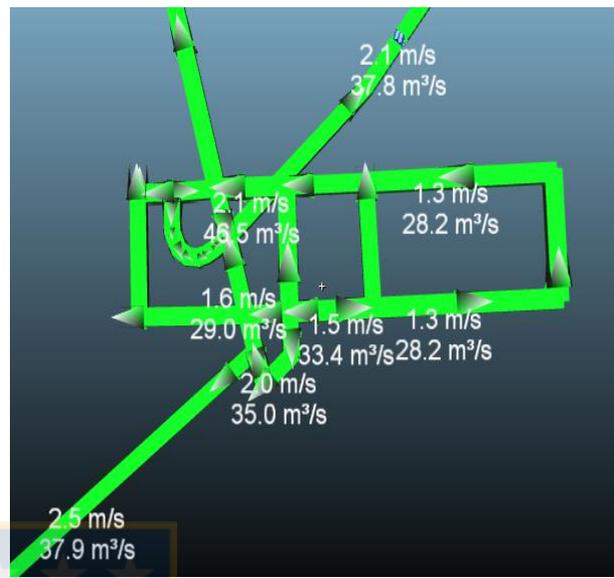
Anexo M. Ventiladores auxiliares utilizados en los distintos niveles.

Nivel	Nodo de entrada	Nodo de salida	RPM [%]
341	1113	1113-1	100
358	948	960-1	70
364	1010	1010-1	55
	1011	1011-1	50
	1012	1012-1	40
	1040	1040-1	80
364	932	954	100
401	927-1	927-2	70
	926-2	926-3	70
1050	111-2	111-3	60
	111-4	111-5	90
	111-6	111-7	90
	105-1	105-2	70
	108-1	859-1	50
1290	129-1	129-2	70

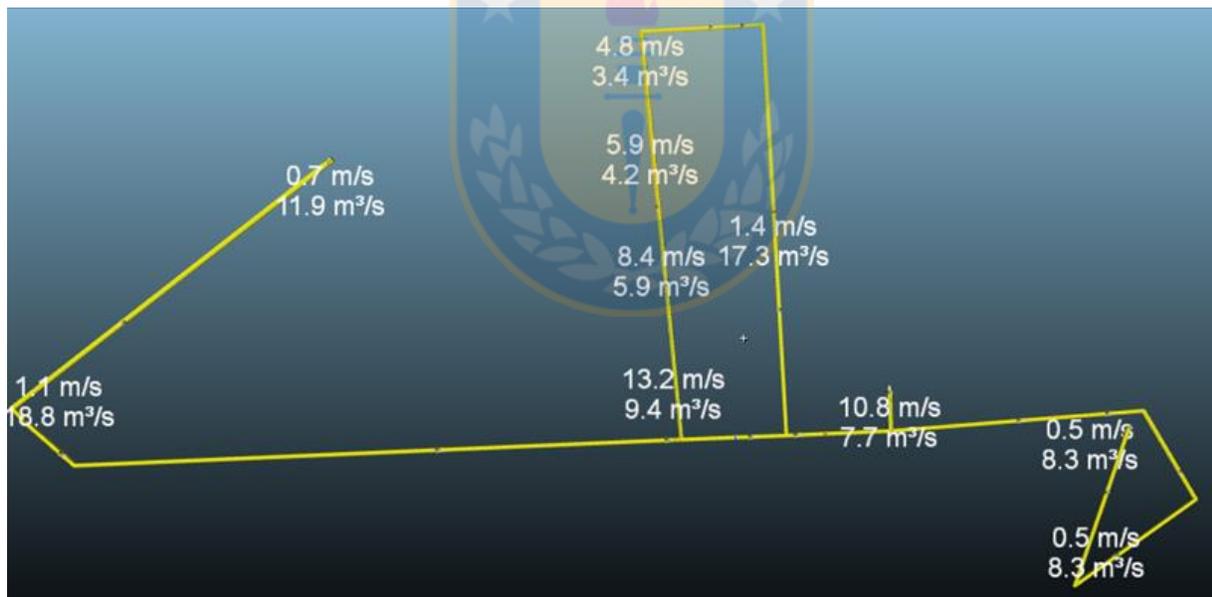
Anexo N. Labores de la mina cumpliendo con los requerimientos de caudal y rangos de velocidad.



Nivel de explotación 341



Nivel de operación 900



Nivel de explotación 401

Anexo O. Resultados de las simulaciones modelo flujo de aire con metano, escenario 1.

A. Nivel 358: Los resultados de las simulaciones muestran que cada tipo galería tiene niveles de metano seguros para la operación, considerando la dilución de este por acción del flujo de aire:

- I. Entrada al panel 358/1: $0.00\% \leq 1\%$
- II. Frente del panel 358/1: $1.17\% \leq 2\%$
- III. Salida del panel 358/1: $0.97\% \leq 2\%$
- IV. Entrada al panel 358/2: $0.00\% \leq 1\%$
- V. Frente del panel 358/2: $1.22\% \leq 2\%$
- VI. Galería post salida del panel 358/2: $1.10\% \leq 1.5\%$

La figura O1 expone las concentraciones del contaminante una vez simulado el flujo de aire en el modelo.

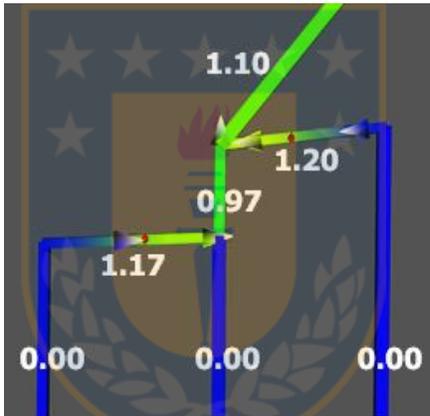


Figura O1: Concentraciones [%] de metano en los paneles de explotación del nivel 358 para el escenario 2.

B. Nivel 364: La figura O2.a expone los resultados de las simulaciones del modelo de flujo de aire con metano; se observa que hay labores que no cumplen con los rangos máximos del contenido del contaminante.

- I. Entrada al panel 364/2: $1.12\% \geq 1\%$
- II. Frente del panel 364/2: $4.93\% \geq 2\%$
- III. Galería post salida del panel 364/2: $2.69\% \geq 1.5\%$

Se propone la desgasificación de los paneles de explotación de este nivel. La figura O2.b presenta los resultados de las simulaciones considerando los porcentajes de desgasificación 20% y 76% en los paneles 364/1 y 364/2 respectivamente; permitiendo reducir las concentraciones por debajo de lo indicado por la normativa.

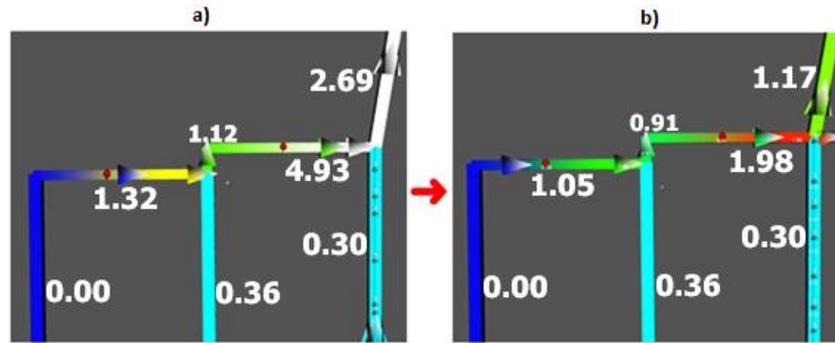


Figura O2: Concentraciones [%] de metano previo y post a la degasificación del panel 364 para el escenario 2.

- I. Entrada al panel 364/1: $0.00\% \leq 1\%$
- II. Frente del panel 364/1: $1.05\% \leq 2\%$
- III. Salida del panel 364/1: $0.91\% \leq 2\%$
- IV. Entrada al panel 364/2: $0.91\% \leq 1\%$
- V. Frente del panel 364/2: $1.98\% \leq 2\%$
- VI. Galería post salida del panel 364/2: $1.17\% \leq 1.5\%$

C. Piques II y V: Las figuras O3.a y O3.b exhibe los resultados una vez ejecutadas las simulaciones las concentraciones de metano en los piques de extracción de aire viciado II y V respectivamente una vez degasificados los paneles 341, 401, 364/1 y 364/2; se observa que ambos cumplen con la normativa.

- I. Pique de extracción II: $0.11\% \leq 0.75\%$
- II. Pique de extracción V: $0.68\% \leq 0.75\%$

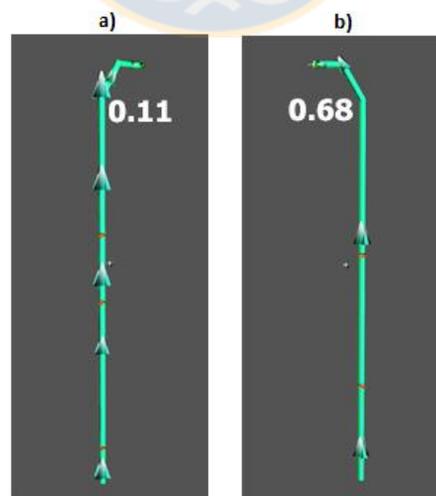


Figura O3. Concentración final de metano en los piques II y V para el escenario 2.

Anexo P. Resultados de las simulaciones modelo flujo de aire con metano, escenario 2.

A. Nivel 358: Los resultados de las simulaciones muestran que cada tipo galería tiene niveles de metano seguros para la operación, considerando la dilución de este por acción del flujo de aire:

- VII. Entrada al panel 358/1: $0.00\% \leq 1\%$
- VIII. Frente del panel 358/1: $1.81\% \leq 2\%$
- IX. Salida del panel 358/1: $1.50\% \leq 2\%$
- X. Entrada al panel 358/2: $0.00\% \leq 1\%$
- XI. Frente del panel 358/2: $0.77\% \leq 2\%$
- XII. Galería post salida del panel 358/2: $1.07\% \leq 1.5\%$

La figura P1 expone las concentraciones del contaminante una vez simulado el flujo de aire en el modelo.



Figura P1: Concentraciones [%] de metano en los paneles de explotación del nivel 358 para el escenario 2.

B. Nivel 364: La figura P2.a expone los resultados de las simulaciones del modelo de flujo de aire con metano; se observa que hay labores que no cumplen con los rangos máximos del contenido del contaminante.

- IV. Entrada al panel 364/2: $1.12\% \geq 1\%$
- V. Frente del panel 364/2: $4.93\% \geq 2\%$
- VI. Galería post salida del panel 364/2: $2.69\% \geq 1.5\%$

Se propone la desgasificación de los paneles de explotación de este nivel. La figura P2.b presenta los resultados de las simulaciones considerando los porcentajes de desgasificación 20% y 76% en los paneles 364/1 y 364/2 respectivamente; permitiendo reducir las concentraciones por debajo de lo indicado por la normativa.

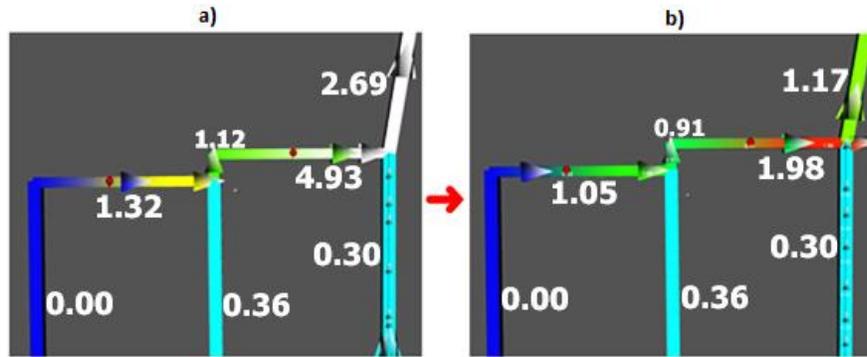


Figura P2: Concentraciones [%] de metano previo y post a la degasificación del panel 364 para el escenario 2.

- VII. Entrada al panel 364/1: $0.00\% \leq 1\%$
- VIII. Frente del panel 364/1: $1.05\% \leq 2\%$
- IX. Salida del panel 364/1: $0.91\% \leq 2\%$
- X. Entrada al panel 364/2: $0.91\% \leq 1\%$
- XI. Frente del panel 364/2: $1.98\% \leq 2\%$
- XII. Galería post salida del panel 364/2: $1.17\% \leq 1.5\%$

C. Piques II y V: Las figuras P3.a y P3.b exhibe los resultados una vez ejecutadas las simulaciones las concentraciones de metano en los piques de extracción de aire viciado II y V respectivamente una vez degasificados los paneles 341, 401, 364/1 y 364/2; se observa que ambos cumplen con la normativa.

- III. Pique de extracción II: $0.11\% \leq 0.75\%$
- IV. Pique de extracción V: $0.67\% \leq 0.75\%$

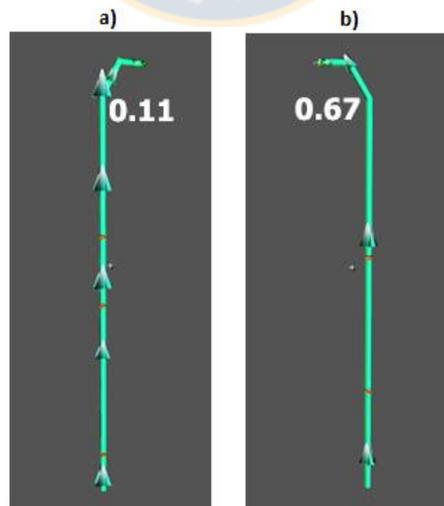


Figura P3. Concentración final de metano en los piques II y V para el escenario 2.

Anexo Q. Resultados de las simulaciones modelo flujo de aire con metano, escenario 3.

A. Nivel 358: Los resultados de las simulaciones revelan que los paneles 358/1 y 358/2 no necesitan desgasificación, cumpliendo con los límites de concentraciones de metano solo con la dilución de este. La figura Q1 muestra las concentraciones finales del metano en cada galería vinculada de los paneles 358/1 y 358/2.

- I. Entrada al panel 358/1: $0.00\% \leq 1\%$
- II. Frente del panel 358/1: $1.17\% \leq 2\%$
- III. Salida del panel 358/1: $0.97\% \leq 2\%$
- IV. Entrada al panel 358/2: $0.00\% \leq 1\%$
- V. Frente del panel 358/2: $1.20\% \leq 2\%$
- VI. Galería post salida del panel 358/2: $1.10\% \leq 1.5\%$

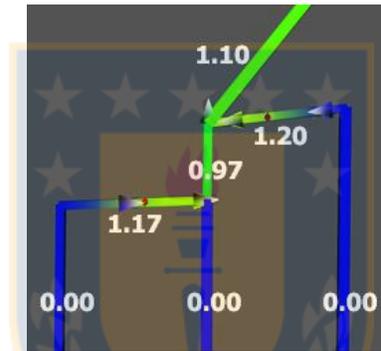


Figura Q1: Concentraciones [%] de metano en los paneles del nivel 364 para el escenario 3.

B. Nivel 364: La figura Q2.a expone los resultados de las simulaciones del modelo de flujo de aire con metano; se observa que hay labores que no cumplen con los rangos máximos del contenido del contaminante:

- I. Frente del panel 364/1: $4.80\% \geq 2\%$
- II. Salida del panel 364/1: $3.91\% \geq 1\%$
- III. Entrada al panel 364/2: $3.91\% \geq 1\%$
- IV. Frente del panel 364/2: $4.95\% \geq 2\%$
- V. Galería post salida del panel 364/2: $2.71\% \geq 1.5\%$

La figura Q2.b presenta los resultados de las simulaciones para las concentraciones finales del contaminante considerando los porcentajes de desgasificación 76% y 20% en los paneles 364/1 y 364/2 respectivamente.

- I. Entrada al panel 364/1: $0.00\% \leq 1\%$
- II. Frente del panel 364/1: $1.15\% \leq 2\%$
- III. Salida del panel 364/1: $0.99\% \leq 2\%$

- IV. Entrada al panel 364/2: $0.99\% \leq 1\%$
- V. Frente del panel 364/2: $1.83\% \leq 2\%$
- VI. Galería post salida del panel 364/2: $1.09\% \leq 1.5\%$

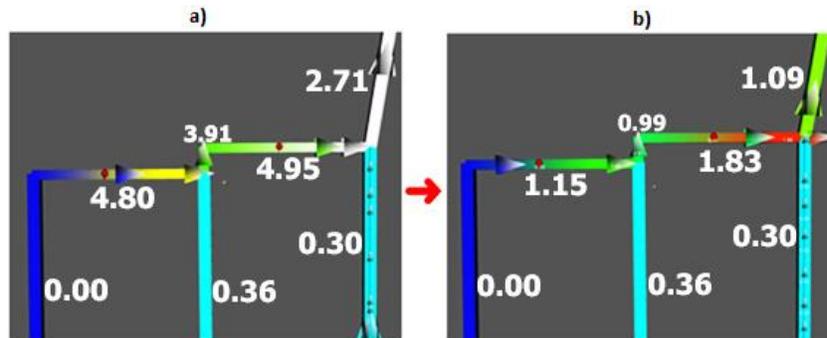


Figura Q2: Concentraciones [%] de metano previo y post a la degasificación del panel 364 para el escenario 3.

C. Piques II y V: Las figuras Q3.a y Q3.b muestran los resultados de las concentraciones finales del metano en los piques de extracción de aire viciado II y V respectivamente una vez degasificados los paneles 341, 401, 364/1 y 364/2. Los porcentajes del contenido de metano están bajo los límites de la ley.

- I. Pique de extracción II: $0.11\% \leq 0.75\%$
- II. Pique de extracción V: $0.66\% \leq 0.75\%$

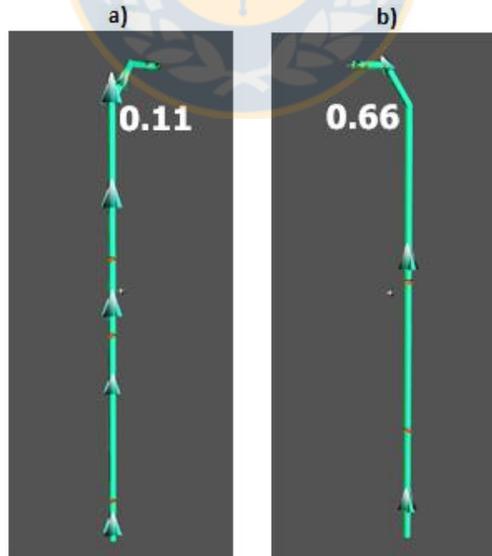


Figura Q3. Concentración final de metano en los piques II y V para el escenario 3.

Anexo R. Resultados de las simulaciones modelo flujo de aire con metano, escenario 4.

A. Nivel 358: La figura R1 expone las concentraciones del contaminante una vez simulado el flujo de aire en el modelo. Los resultados de las simulaciones muestran que cada galería del panel tiene niveles de metano por debajo de los límites permisibles y que el nivel 358 no requiere desgasificación en ninguno de sus paneles de explotación.

- I. Entrada al panel 358/1: $0.00\% \leq 1\%$
- II. Frente del panel 358/1: $1.81\% \leq 2\%$
- III. Salida del panel 358/1: $1.50\% \leq 2\%$
- IV. Entrada al panel 358/2: $0.00\% \leq 1\%$
- V. Frente del panel 358/2: $0.77\% \leq 2\%$
- VI. Galería post salida del panel 358/2: $1.07\% \leq 1.5\%$

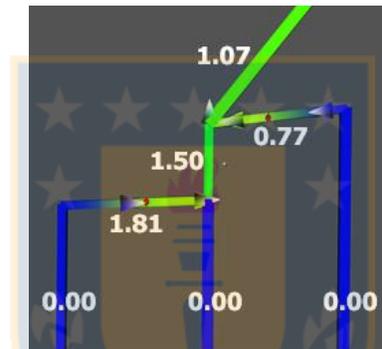


Figura R1: Concentraciones [%] de metano en los paneles del nivel 364 para el escenario 4.

B. Nivel 364: La figura R2.a expone los resultados de las simulaciones del modelo de flujo de aire con metano; se observa que hay labores que no cumplen con los rangos máximos del contenido del contaminante:

- I. Frente del panel 364/1: $4.80\% \geq 2\%$
- II. Salida del panel 364/1: $3.91\% \geq 1\%$
- III. Entrada al panel 364/2: $3.91\% \geq 1\%$
- IV. Frente del panel 364/2: $4.95\% \geq 2\%$
- V. Galería post salida del panel 364/2: $2.71\% \geq 1.5\%$

La figura R2.b presenta los resultados de las simulaciones considerando los porcentajes de desgasificación calculados para los paneles de explotación 364/1 y 364/2 de 76% y 20% respectivamente.

- I. Entrada al panel 364/1: $0.00\% \leq 1\%$
- II. Frente del panel 364/1: $1.15\% \leq 2\%$
- III. Salida del panel 364/1: $0.99\% \leq 2\%$
- IV. Entrada al panel 364/2: $0.99\% \leq 1\%$

- V. Frente del panel 364/2: $1.83\% \leq 2\%$
- VI. Galería post salida del panel 364/2: $1.09\% \leq 1.5\%$

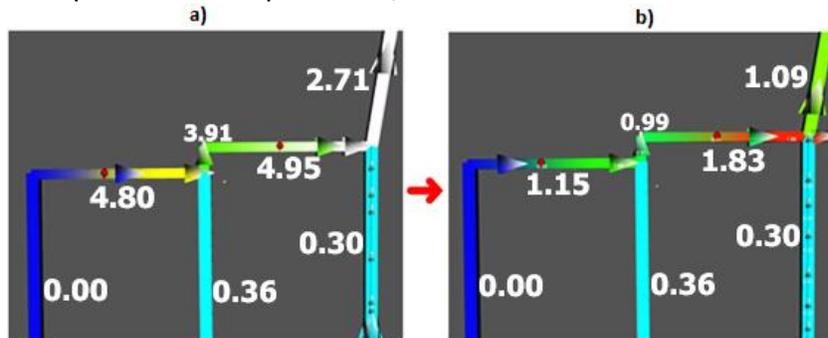


Figura R2. Concentraciones [%] de metano previo y post a la desgasificación del panel 364 para el escenario 4.

- C. Piques II y V:** Las figuras R3.a y R3.b muestran los resultados de las concentraciones finales del metano en los piques de extracción de aire viciado II y V respectivamente una vez desgasificados los paneles 341, 401, 364/1 y 364/2.

- VII. Pique de extracción II: $0.11\% \leq 0.75\%$
- VIII. Pique de extracción V: $0.66\% \leq 0.75\%$

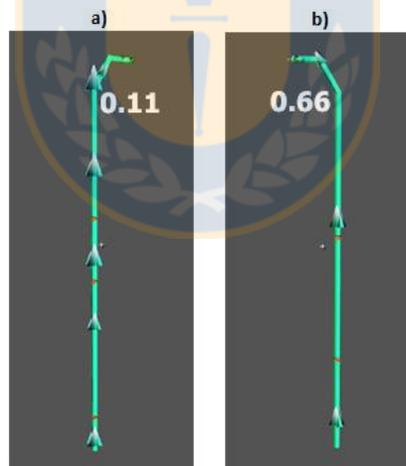


Figura R3. Concentración final de metano en los piques II y V para el escenario 4.

Anexo S. Plano global de FezMine.

Se adjunta al final de esta memoria.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: <i>Modelamiento del sistema de ventilación y control del metano con el simulador VentSim™ en la mina subterránea de carbón FezMine, Polonia.</i>	
Nombre Memoristas: Nicolás Alexander Ramírez González, Claudio Fernando Fuentes Ortega	
Modalidad	Profesor Patrocinante
Concepto	Ramón Díaz N.
Calificación	
Fecha	
Prof. Roberto Fustos T.	Ingeniero Supervisor:
	Institución:
Comisión (Nombre y Firma)	
Prof. Roberto Fustos T.	Prof. René Gómez P.
Resumen	
<p>El desarrollo de esta memoria se llevó a cabo en los departamentos de Ingeniería de Minas en la Universidad AGH de Ciencia y Tecnología de Polonia y en la Universidad de Concepción de Chile durante el periodo 2018-2019.</p> <p>En esta investigación se diseña y analiza un sistema de ventilación que permita mantener los índices de emisión de metano inocuos para la operación, considerando la reprofundización de la mina con un nuevo nivel denominado 1290. En el desarrollo de esta memoria se optó por el uso del software de simulación VentSim™ para modelar el problema.</p> <p>Utilizando el simulador y la información disponible se define un modelo de simulación de flujo de aire considerando las emisiones de metano desde los seis paneles de explotación de carbón, el cual sirve para estudiar el comportamiento del aire viciado que fluye a través de las labores mineras.</p> <p>Los resultados obtenidos en VentSim™ muestran el comportamiento de las emisiones de metano a través de todas las galerías de la mina, y permiten distinguir los paneles de explotación en los que el metano se pudo diluir por la acción del flujo de aire de la ventilación y aquellos en donde no es posible alcanzar diluciones adecuadas.</p> <p>Se propone el uso de la técnica minera de desgasificación, como un método accesorio a la ventilación, para cumplir con las concentraciones máximas permisibles de metano en la atmósfera de mina.</p>	

