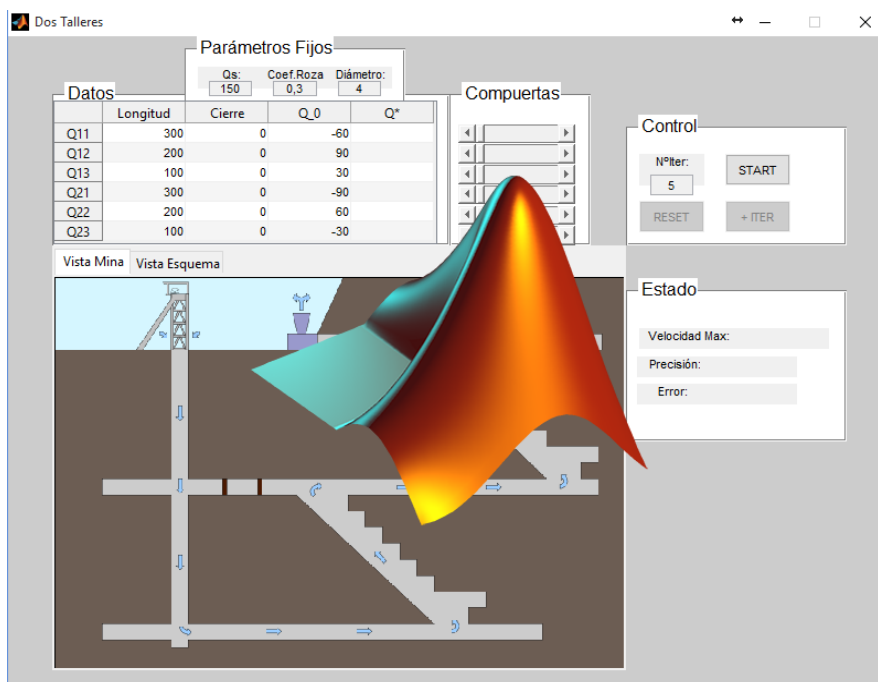




Trabajo fin de Grado

IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA EN MATLAB PARA LA RESOLUCIÓN DE LA VENTILACIÓN DE UNA MINA

GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS
ENERGÉTICOS

Autor: Yamandú Tellechea Díez

Director: Antonio S. Cofiño

Septiembre 2015

1. Índice de contenido

1INTRODUCCIÓN.....	2
1.1CONSIDERACIONES PREVIAS.....	2
1.2PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3OBJETIVO DEL TRABAJO.....	4
2ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1LA ATMÓSFERA EN LOS TRABAJOS SUBTERRÁNEOS.....	5
2.1.1Definición de los índices de peligrosidad.....	5
2.2GASES.....	6
2.2.1Según su origen.....	6
2.2.2Según los riesgos que pueden generar.....	7
2.2.3Según los efectos sobre el cuerpo humano.....	8
2.2.4Gases producidos en interior.....	9
2.2.5Soluciones técnicas.....	10
2.2.6Polvo.....	12
2.3AMBIENTE TÉRMICO.....	14
2.3.1Definiciones.....	14
2.3.2Enfermedades asociadas.....	14
2.3.3Evaluación del ambiente térmico. Medición.....	15
2.3.4Humedad y ambiente.....	16
2.3.5Medición.....	17
2.3.6Prevención.....	18
2.4PROYECTO DE VENTILACIÓN.....	19
2.4.1Definición de caudales.....	19
2.4.2Esquemas de ventilación.....	27
2.4.3Tipos de Ventilación.....	29
2.5VENTILADORES PRINCIPALES.....	31
2.5.1Introducción.....	31
2.5.2Ventilador.....	32
2.5.3Ventiladores Axiales.....	38
3RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA SUSCITADO.....	43
3.1MÉTODO DE HARDY-CROSS.....	43
3.1.1Fundamentos de método.....	43
3.1.2Ecuaciones básicas para el cálculo de la pérdida de carga.....	45
3.1.3Rugosidad de las tuberías.....	51
3.1.4Ejemplo Hardy Cross.....	52
3.2CONCLUSIONES.....	54
3.2.1Otras Soluciones.....	54
4PROGRAMACIÓN DE LA RESOLUCIÓN ADOPTADA.....	59
4.1Código de Matlab para el método de Hardy-Cross.....	59
4.1.1Hardy_Cross.m.....	60
4.1.2Hardy_Cross_correccion.m.....	61
4.1.3 Res_Fija.m.....	62
4.1.4 Res_Var.m.....	62
4.2Ejemplo en Matlab del problema de 2 talleres.....	63
4.2.1datos2talleres.m.....	63
4.2.2Salida.....	63
4.3Interfaz de Usuario.....	64
4.4 HERRAMIENTA DE PROGRAMACIÓN.....	65
4.4.1Puntos Fuertes.....	66
4.4.2Puntos Débiles.....	66
5Bibliografía.....	67

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es poder facilitar el cálculo y la comprensión de la ventilación en una mina. Para ello, se parte del trabajo anterior por parte del Profesor Emilio Andrea, que tras una vida de experiencia en la explotación de minas, decide elaborar una hoja Excel para la resolución de los cálculos de ventilación y facilitar su comprensión a los alumnos en la Escuela Politécnica de Minas y Energías en Torrelavega.

En este proyecto se intenta dar un paso más. Durante muchos años la resolución del método se ha realizado manualmente por los ingenieros. Con la llegada de nuevas tecnologías, y de potentes herramientas informáticas se puede simplificar esta tarea, Emilio Andrea ha dado un paso importante en este aspecto con su trabajo sobre hojas de cálculo. Con este estudio se debe mejorar en la precisión, así como en la comprensión de los resultados y la explicación del método.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Nos encontramos en una mina, en la cual se debe disponer de un sistema de ventilación que garantice una atmósfera respirable y segura en cualquier punto de la explotación.

Existen varias razones que justifican la ventilación en una mina, las principales son estas:

1. Mantener el nivel de oxígeno necesario para la vida de los trabajadores
2. Suprimir los gases tóxicos producidos en las voladuras con explosivos
3. Evitar la formación de mezclas explosivas gas-aire.
4. Eliminar concentración nociva de polvo en suspensión.
5. Reducir la temperatura en lugares muy calurosos y aumentarla si fuera muy baja.
6. Proporcionar el aire suficiente para el trabajo seguro de equipos diésel dentro de las minas.

(Eduardo Antonio 2015)

Estos problemas se han intentado resolver desde el comienzo de la explotación de minas. Antes del siglo XVI, cuando no existían medios como los actuales, se aprovechaba la ventilación natural, producida por la diferencia de nivel y cambios de temperatura. Posteriormente se utilizaban las caídas de agua en los *piques* para introducir el aire y el fuego para levantarlo.

En la segunda mitad del siglo XIX se comenzaron a desarrollar los ventiladores mecánicos. Estos ventiladores primitivos eran exclusivamente de tipo centrífugo, de grandes dimensiones y de velocidad reducida, movidos por molinos de viento o rueda hidráulica.

Después de la primera Guerra Mundial y debido al rápido avance de la aviación y el consiguiente progreso de la ciencia aerodinámica, comenzaron a desarrollarse los ventiladores de flujo axial.

En la actualidad los dos tipos de ventiladores han sido mejorados sustancialmente.

Respecto a los tipos de ventilación que pueden utilizarse en una mina existen dos grandes grupos:

- Ventilación Natural: es el flujo natural de aire, sin necesidad de equipos de ventilación, utilizando diferencias de presión entre la entrada y salida, así como diferencias de temperaturas.
- Ventilación Mecánica: es la ventilación auxiliar o secundaria y son aquellos sistemas que, haciendo uso de conductos y ventiladores auxiliares, ventilan áreas restringidas de las minas subterráneas, empleando para ello los circuitos de alimentación de aire limpio y de evacuación del aire viciado que le proporcione el sistema de ventilación general.

La ventilación utilizada en nuestro planteamiento del problema es la mecánica y se realiza estableciendo un circuito para la circulación del aire a través de las diferentes galerías. Para ello se utilizan varios ventiladores que introducen aire limpio y extraen el aire contaminado. Lo que se denomina como ventilación soplante para introducir el aire limpio, y ventilación aspirante para extraer el aire viciado.

La determinación de la forma como se distribuye el flujo de aire en una mina y de las pérdidas de presión que ocurren en la red, son los problemas de ventilación más comunes que tiene que resolver un ingeniero en la práctica.

Para resolver una red de ventilación cualquiera, se dispone de dos técnicas principales:

- a) Métodos numéricos o de aproximaciones sucesivas
- b) Métodos analógicos, para los cuales es necesario representar el circuito de ventilación en un modelo que contenga elementos en los que se pueda hacer mediciones físicas de las variables que se necesita determinar. Representando en este caso la mina con un modelo físico en tamaño reducido.

En nuestro caso, usaremos el método de *Hardy-Cross*, un método de tipo “a” el cual utilizan los Ingenieros de minas desde hace muchos años, debido a su facilidad para el cálculo manual. *Hardy-Cross* trata de resolver un sistema de ecuaciones simultáneas, partiendo de un juego de valores arbitrarios que satisfagan algunas de las ecuaciones.

Se calcula luego una corrección que, aplicada a los valores asumidos originalmente, permitirá satisfacer las demás ecuaciones. La corrección introducida hará variar los valores asumidos al inicio del cálculo, lo cual supone que las primeras ecuaciones ya no serán satisfechas por los valores corregidos.

Se inicia luego un segundo ciclo de cálculo con los valores corregidos, lo cual permitirá determinar un nuevo valor que se utilizará para hacer la corrección.

La aplicación repetida de este procedimiento conduce a la convergencia de los valores asumidos, reduciéndose progresivamente la corrección hasta hacerse despreciable.

El método se explicará detalladamente más adelante.

Disponemos de información detallada sobre los parámetros que influyen en el calculo de dicha ventilación. Tenemos restricciones impuestas por las Normas de Explotación de Minas respecto a la velocidad de aire y sobre concentraciones de diferentes compuestos perjudiciales para la respirabilidad en la atmósfera de las galerías.

1.3 OBJETIVO DEL TRABAJO

El fin de este TFG es la resolución del problema planteado con la herramienta informática *MATLAB*, analizar el método de *Hardy-Cross*, exponer sus ventajas y desventajas, y posibles alternativas de resolución con otros métodos matemáticos que puedan mejorar el resultado final e introducir variables que actúen como restricciones para la obtención de una solución. Conociendo programas y estudios más detallados y complejos, se pretende entender y dominar el método e implementarlo en *MATLAB* en un problema genérico, generar una interfaz gráfica que permita interaccionar con los objetos que componen un sistema de ventilación en una mina. Es un estudio que debe servir como punto de partida para el aprendizaje en la explotación de minas y posteriormente puede ser útil en cuanto al código desarrollado que internamente utiliza en su funcionamiento.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 LA ATMÓSFERA EN LOS TRABAJOS SUBTERRÁNEOS

La composición en volumen del aire seco de la atmósfera, en un punto situado al nivel del mar, es la siguiente: 20,93% O₂ 78,10% N₂ 0,9325% Ar 0,03% CO₂ 0,01% H₂ 0,0018% Ne 0,0005% He 0,0001% Kr 0,000009% Xe. Esta composición volumétrica varía muy poco con la altitud, no detectándose una variación significativa hasta los 80 km de altura.

Puede haber emanaciones sulfurosas, de metano u otros gases, pero se trata de alteraciones locales que no son debidas a variaciones globales de la atmósfera relacionadas con la altitud, sino situaciones puntuales debidas a las condiciones geológicas de la zona.

Las actividades humanas varían esta composición produciendo gases y sustancias peligrosas o nocivas para la salud y el medio ambiente. Si la atmósfera modificada se ve confinada a un espacio relativamente reducido (como ocurre en la minería de interior u obras subterráneas), es necesario que el intercambio de aire entre el interior y el exterior se produzca de manera adecuada para lograr que la atmósfera interior sea lo más parecida a la exterior, reduciéndose los problemas que pueda producir en los trabajadores la presencia de las sustancias nocivas generadas en estos ambientes confinados.

Por otro lado, el ambiente térmico de un puesto de trabajo viene determinado por las condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire. De la interacción entre dicho ambiente y las circunstancias inherentes al desarrollo de la tarea (esfuerzo, ropa, características personales) dependerá que el puesto de trabajo tenga unas condiciones de confort térmico aceptables o se dé una situación de riesgo por exposición térmica inadecuada, tanto al calor como al frío.

2.1.1 Definición de los índices de peligrosidad

Existen diferentes valores límites, establecidos por organismos nacionales o internacionales, que indican la peligrosidad en función de la tolerancia del cuerpo humano ante un agente químico.

- Índice de la OSHA
- El índice PEL (Permissible Exposure Limits) es empleado por la Occupational Safety and Health
- Administration (OSHA) (EE. UU.) para determinar el valor límite máximo de un agente químico al que puede estar expuesto un trabajador. Regula la concentración máxima de una sustancia en el aire referida a un periodo de exposición de 8 horas.

2.2 GASES

2.2.1 Según su origen

Las emisiones de gases a la atmósfera durante la ejecución de obras subterráneas y minería de interior pueden ser de varios tipos:

- Gases de combustión de la maquinaria implicada en el proceso productivo. Entre éstos se encuentran: monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno {Nox}, aldehídos como el benceno y el formaldehído, hidrocarburos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (en inglés PAH).
- Gases derivados de incendios y explosiones, consecuencia de la combustión de los elementos presentes en la zona o de la deflagración de los gases explosivos: monóxido de carbono y dióxido de carbono, entre otros.
- Gases derivados de las voladuras, producidos por la reacción química de los materiales explosivos empleados: principalmente nitrógeno y óxidos nitrosos {NOx}, y por las posibles emanaciones del macizo rocoso fracturado: dióxido de azufre, metano, etc.
- Gases derivados del uso de sustancias químicas: en algunos casos en los que las obras subterráneas tienen lugar en zonas muy fracturadas, se puede utilizar inyección de resina de formaldehído de urea, con espuma de poliuretano o con mezclas de cristales de agua sódica con formamida o con acetato de etilo y de butilo para estabilizar el macizo rocoso, pudiendo producirse, durante su aplicación, vapores de formaldehído, amoníaco, alcohol etílico o butílico o diisocianatos.
- Gases derivados de la oxidación: se originan, principalmente en minería de interior, debido a la oxidación de sustratos rocosos (al entrar en contacto con el oxígeno de la atmósfera) o de los materiales empleados en el sostenimiento (hierro, madera, etc.); fundamentalmente monóxido de carbono y dióxido de carbono.
- Gases liberados durante el proceso de extracción: los más comunes son los que se liberan en la explotación del carbón, fundamentalmente monóxido de carbono y dióxido de carbono (principalmente en minas de potasa o en zonas volcánicas) y el grisú (mezcla altamente explosiva de metano y aire). También entran en esta categoría los gases contenidos en las aguas que se explotan para la obtención de energía geotérmica, aunque puede haber otros, como los contenidos en determinadas mineralizaciones, por lo general en cantidades poco significativas.

- Gases implicados en procesos directamente relacionados con la actividad minera: combustión de carbón (monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de azufre {SOx}, óxidos de nitrógeno {NOx} o pirometalurgia {dióxido de azufre}).
- Gases debidos a determinadas actividades, como trabajos de soldadura que se realizan a pie de obra; su volumen en obras subterráneas no suele ser tan importante como para producir daño a los trabajadores expuestos a ellos, excepto en labores en fondo de saco.

Además de la presencia de algunos de estos gases, en función de las operaciones realizadas, pueden aparecer humos y partículas perjudiciales para la salud de los trabajadores expuestos a ellos.

2.2.2 Según los riesgos que pueden generar

En lo referente a sus efectos sobre la seguridad, la presencia de gases o humos puede producir falta de visibilidad en el lugar de trabajo. Por otro lado, las propiedades físicas de los gases nos indican las características específicas de cada uno de ellos que pueden afectar a la seguridad del lugar de trabajo. Así podemos distinguir entre gases:

- Explosivos: los que, si son iniciados por alguna causa externa (chispa, llama, _aumento de presión o temperatura, etc.), pueden liberar bruscamente una gran cantidad de energía en un volumen relativamente pequeño, produciendo un incremento violento y rápido de la presión. En función de las concentraciones, existen gases como el metano, hidrógeno, monóxido de carbono, que pueden formar mezclas explosivas con el aire.
- Inflamables: en los que si se inicia una chispa en algún punto en contacto con el gas, se produce una llama que se propaga instantáneamente a través del gas. Si las concentraciones de los gases son adecuadas, metano, sulfuro de hidrógeno e hidrógeno pueden inflamarse.
- Comburentes: gases en los cuales el oxígeno está en proporción suficiente para que se produzca la combustión.
- Potencialmente comburentes: cuando, bajo ciertas condiciones, el gas tiene propiedades comburentes, es decir, que favorecen la combustión.

2.2.3 Según los efectos sobre el cuerpo humano

En cuanto a la clasificación higiénica de los gases, depende del efecto que éstos tengan sobre el cuerpo humano, pudiendo diferenciarse entre:

- Gases irritantes: Son sustancias de acción corrosiva que inflaman las superficies húmedas y mucosas. En estos gases, el factor concentración es más importante que el tiempo de exposición, pues cuando la exposición es suficientemente elevada, pueden llegar a ser tóxicos para el pulmón. Su acción depende de las propiedades físicas (volatilidad, solubilidad). Un ejemplo son los óxidos de azufre (SOx).
- Gases asfixiantes: Ejercen su acción interfiriendo con la oxidación de los tejidos. Estos pueden actuar de dos maneras:
 1. Reduciendo la presión parcial de oxígeno ambiental por debajo de los niveles requeridos para mantener una saturación de oxígeno en sangre suficiente para la respiración normal de los tejidos. Entre los gases que presentan estas características están el nitrógeno, hidrógeno, metano y dióxido de carbono.
 2. Reduciendo la capacidad de transporte de oxígeno atmosférico (anoxia anémica), como el monóxido de carbono o el sulfuro de hidrógeno.
- Gases tóxicos: capaces de producir efectos adversos en órganos vitales. Los más peligrosos son los que tienen un umbral de irritación alto (apenas hay aviso de la inhalación por no detectarse la irritación ni el efecto nocivo). Entre estos se encuentran el monóxido de carbono, gases nitrosos (NOx), dióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno.
- Gases cancerígenos: capaces de producir enfermedades cancerígenas por contacto con la piel o en el sistema respiratorio por inhalación. En este grupo se incluyen los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en el hollín, el benceno y el alquitrán o la brea de hulla, empleados para el asfaltado.
- Anestésicos y narcóticos: producen anestesia sin efectos sistémicos serios, tienen acción depresiva sobre el sistema nervioso central, determinada por su presión parcial en sangre que afluye al cerebro. Los hidrocarburos acetilénicos producen este efecto.
- Gases sensibilizantes: producen reacciones alérgicas, como el dióxido de azufre.
- Otros gases, como el ácido fórmico, ácido cianhídrico y dioxina producen efectos nocivos sobre los trabajadores expuestos a ellos.

2.2.4 Gases producidos en interior

Tabla 1: Efectos asociados a algunos gases [Fuente: (Manual Ventilación)]

Gas	Efectos Asociados
CO	• Ingestión: Puede causar vómito y diarrea. • Inhalación: Muy peligroso, puede ser fatal. • Piel: Puede causar lesiones cutáneas. Evitar contacto con líquido criogénico. • Ojos: Puede causar problemas a largo plazo en la visión.
CO ₂	• Ingestión: Puede causar irritación, náuseas, vómitos y hemorragias en el tracto digestivo. • Inhalación: Produce asfixia, causa hiperventilación. La exposición a largo plazo es peligrosa. • Piel: Hielo seco puede producir daños. • Ojos: Puede ser peligroso.
CH ₄	• Inhalación: Asfixia; en algunos casos inconsciencia, ataque cardíaco o lesiones cerebrales • El compuesto se transporta como líquido criogénico. Su exposición causa congelación.
SO ₂	• Ingestión: Relativamente poco tóxico, puede causar náuseas, vómitos y esterilidad. Sin datos para exposición a largo plazo. • Inhalación: Irritación extrema. • Piel: Riesgo si se encuentra comprimido y criogenizado. • Ojos: Riesgo si se encuentra comprimido y criogenizado.
SH ₂	• Ingestión: Puede causar náuseas y vómitos. • Inhalación: Peligroso, puede ser fatal. • Piel: Puede causar picazón y dolor. • Ojos: Puede causar quemaduras.
NO	• Ingestión: Usado en medicina, pero las sobredosis son perjudiciales. • Inhalación: Peligroso, puede ser fatal. • Piel: Irritante. • Ojos: Puede causar irritación.
NO ₂	• Ingestión: Peligroso. • Inhalación: Peligroso, puede ser fatal. • Piel: Irritante. • Ojos: Irritante.
H ₂	• Inhalación: Produce asfixia, causa hiperventilación. La exposición a largo plazo es peligrosa. • Piel: Riesgo si se encuentra comprimido y criogénico. • Ojos: Riesgo si se encuentra comprimido y criogénico.
Aldehídos	• Inhalación: Irritante. • Piel: Irritante. • Ojos: Irritante. • Algunos aldehídos, como el benceno, son cancerígenos

Tabla con los efectos asociados a la ingestión, inhalación y contacto con la piel y ojos de los gases más importantes producidos por las actividades desarrolladas en obras subterráneas

- Los gases más densos que el aire se acumularan en las partes bajas del recinto; especialmente en labores mineras abandonadas o pozos en los que será necesario entrar con un medidor de gases.
- Por el contrario los menos densos, se acumularan en las partes más altas, dando lugar a bolsas o “campanas” de gas que deberán ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar los sistemas de electrificación de la obra o explotación, pues entre ellos se encuentran metano e hidrógeno, altamente explosivos en ciertas concentraciones.

2.2.5 Soluciones técnicas

2.2.5.1 Eliminación de la emisión en el origen

Las investigaciones y mejoras técnicas obtenidas en el campo de combustibles y motores están logrando reducir las emisiones de gases y partículas. Además, se puede lograr reducir las emisiones de:

- Azufre, por medio del uso de combustible de diesel bajo en azufre (menos de un 0.05% de azufre);
- Monóxido de carbono, aldehídos e hidrocarburos con el uso de convertidores catalíticos
- Óxidos de nitrógeno por medio de depuradoras húmedas;
- Partículas de diesel mediante filtros cerámicos;
- Gases de diesel, en general, por medio de filtros de papel desechables.

De este modo, realizando un correcto mantenimiento y actualización de la maquinaria que asegure el equipamiento con los sistemas de control de emisiones más avanzados que existan en el mercado y que éstos funcionan correctamente, se podrán cumplir los valores límites de contaminantes sin necesidad de aumentar el caudal de dilución de los gases de escape.

Por otra parte, si las condiciones de la obra subterránea lo permiten, la emisión de gases puede minimizarse sustituyendo la maquinaria de combustión interna por grandes equipos eléctricos, aunque presentan el inconveniente de su menor autonomía (dúmpers tipo trolebús, palas eléctricas, LHDs).

En cualquier caso, se deberán emplear sistemas de ventilación u otros medios para eliminar los niveles de contaminación en la atmósfera interior.

2.2.5.2 Ventilación

Las técnicas de ventilación son una buena herramienta para lograr la eliminación, o, al menos, la reducción de la concentración de los gases en la atmósfera. Tienen una relación coste/eficacia muy buena en comparación con otras técnicas preventivas y su implantación puede hacerse de forma independiente a la ejecución de la obras subterráneas.

Las diferentes técnicas de ventilación son las siguientes:

- Dilución: el diseño de un sistema de ventilación por dilución se basa en la hipótesis de que la concentración del contaminante es la misma en todo el espacio. El proceso consiste en introducir en un local una cantidad de aire exterior suficiente para diluir el contaminante generado hasta valores no peligrosos para la seguridad y salud. Con este sistema no se evita la contaminación del ambiente, simplemente se reduce su concentración.
- Extracción: uno de los métodos de eliminación del contaminante gaseoso es mediante la instalación de un sistema de extracción. Éste genera una depresión que conduce el aire contaminado hacia un filtro que elimina el contaminante o hacia una conducción a la atmósfera exterior, donde el contaminante se dispersará por dilución.
- Desplazamiento: este método consiste en la introducción de aire limpio lentamente y a poca altura, para favorecer la migración del contaminante hacia el techo, donde se instalará un sistema de extracción que lo elimine, reduciendo de este modo la velocidad de renovación del aire necesario en la extracción, pues la contaminación se concentra en la zona alta, donde no es respirada por los trabajadores. Normalmente, la velocidad de extracción debe ser superior a la de introducción, a fin de mantener la zona bajo una presión ligeramente negativa para evitar el arrastre de contaminantes a zonas no contaminadas.
- Software: en el mercado existen numerosos programas para evaluar la distribución de contaminantes en un fluido que pueden servir de ayuda a la hora de diseñar el sistema de ventilación adecuado. Normalmente, se emplean para evaluar contaminantes líquidos, pero pueden ser adaptados para evaluar la dispersión de contaminantes en el aire. Existen también algunos programas específicos para estudiar la dispersión de contaminantes en el aire, como pueden ser el programa de modelización en 3D de dinámica de fluidos Airpak® 3.0, de Ansys, o el Flovent, de Flomerics.

2.2.5.2 Riego

El riego de los escombros originados por las voladuras. es un buen sistema de prevención, pues no sólo elimina las partículas en suspensión, sino que fija los gases nitrosos producidos durante las voladuras (NO NO_2). convirtiéndolos en ácidos nítrico y nitroso, que se diluyen en el agua empleada para dicho riego. De esta manera se evita la exposición de los trabajadores a dichos gases tóxicos, que pasarían a la atmósfera del lugar de trabajo durante la carga del material extraído con la voladura.

2.2.6 Polvo

2.2.6.1 Origen del polvo en labores subterráneas

El polvo esta constituido por una serie de partículas sólidas procedentes de la disgregación de materiales que se dispersan en el aire Y se pueden depositar en suelos y paredes de las distintas labores.

Su permanencia en el aire depende. fundamentalmente de su granulometria, peso específico, humedad, temperatura ambiente y, en gran medida, de la velocidad de la corriente del aire.

Las principales fuentes generadoras de polvo se relacionan con las operaciones de:

- Perforación y voladuras.
- Trituración y molienda.
- Carga y transporte de materiales.
- Operaciones de arranque y de relleno.
- Tras lado de materiales.
- Velocidad excesiva de ventilación.

2.2.6.2 Nocividad del polvo

La nocividad del polvo al ser inhalado por el organismo depende tanto de las características químicas del polvo, como del tamaño de la partícula, expresado este como diámetro equivalente de una esfera, de densidad unidad y que, por la acción de la gravedad, tuviera la misma velocidad de caída de la partícula en una atmósfera con iguales condiciones de presión y temperatura.

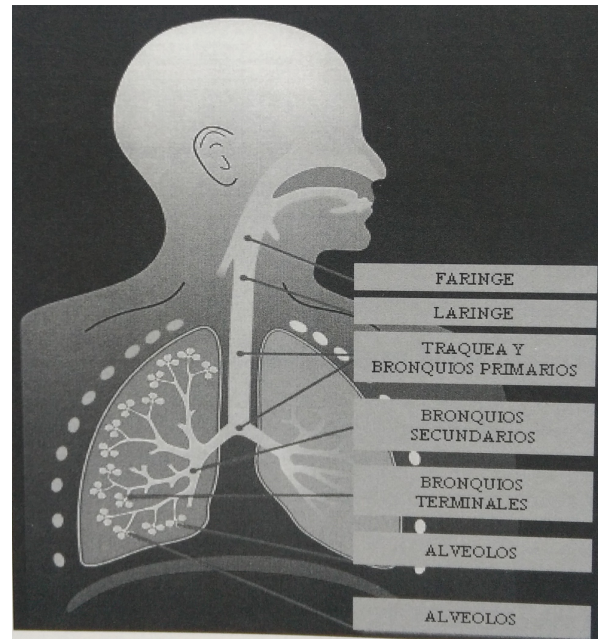


Ilustración 1: Aparato respiratorio

Así, dependiendo del tamaño de las partículas existentes en un determinado ambiente, una parte de ellas son inhaladas a través de la boca y fosas nasales, constituyendo lo que se entiende como “polvo inhalable”. De estas partículas inhaladas, las que, circulando por el tracto respiratorio, superen su paso por la laringe, se denominan “polvo torácico”, a su vez, las partículas que siguiendo su recorrido consiguen llegar a los alvéolos pulmonares, constituyen la fracción denominada “polvo respirable”.

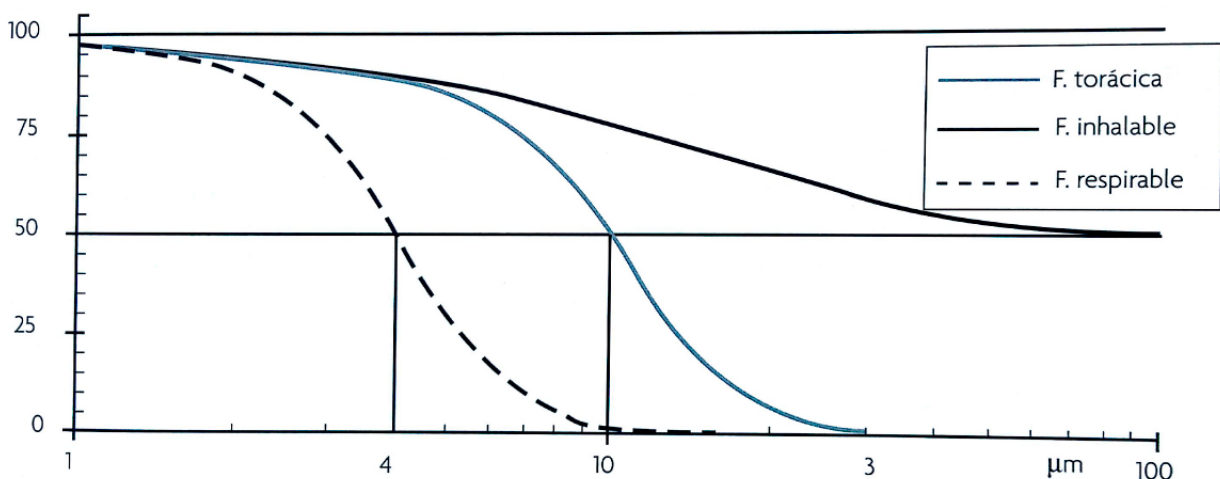


Ilustración 2: Curvas de retención

Por otra parte, el polvo depositado a lo largo del tracto respiratorio, entre la boca, fosas nasales y la laringe, se denomina “polvo extra torácico”.

Los efectos respiratorios del polvo en el organismo son los siguientes:

- Neumoconiosis: silicosis, asbestosis, neumoconiosis de los mineros del carbón, siderosis, aluminosis, beriliosis, etc.
- Cáncer pulmonar: polvo conteniendo arsénico, cromo, sílice, níquel, amianto, partículas radiactivas
- Irritación respiratoria: traqueítis, bronquitis, neumonitis, enfisema y edema pulmonar.
- Alergia :asma ocupacional y alveolitis alérgica extrínseca.
- Infección respiratoria: polvo conteniendo hongos, virus o bacterias.

Otros efectos pueden ser:

- Lesiones de piel: irritación cutánea y dermatosis (berilio, arsénico, etc.).
- Conjuntivitis: contacto con ciertos tipos de polvo.
- Riesgo de explosión: las materias orgánicas y metales sólidos pulverulentos, dispersados en el aire en forma de nube pueden arder con violencia explosiva.

2.3 AMBIENTE TÉRMICO

Existen diversos métodos para evaluar la agresividad del ambiente térmico. En este capítulo se introducirá el límite legalmente exigido en la minería española, así como la forma de valorar su cumplimiento. Igualmente se comentarán los índices habitualmente utilizados en otras industrias para evaluar el riesgo por exposición térmica que, si bien no son obligatorios en algunos países para el sector extractivo, constituyen la tendencia más moderna en prevención frente a este riesgo. Finalmente, se comentarán algunos aspectos sobre prevención de los riesgos derivados de un ambiente frío en el puesto de trabajo.

2.3.1 Definiciones

- Temperatura húmeda: Es el valor indicado por un sensor de temperatura recubierto de un tejido humedecido que es ventilado de forma natural, es decir, sin ventilación forzada. En ocasiones se denomina temperatura húmeda natural.
- Temperatura seca del aire: Es la temperatura del aire medida con un termómetro convencional de mercurio u otro método adecuado y fiable.
- Temperatura de globo: Es la temperatura indicada por un sensor colocado en el centro de una esfera de unas características determinadas, empleado para la determinación del índice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature), que se utiliza para valorar el estrés térmico.

2.3.2 Enfermedades asociadas

El sistema termorregulador del organismo se encarga de mantener la temperatura del cuerpo estable, y está preparado para hacer frente a variaciones del entorno mediante diferentes mecanismos que compensarán el exceso o pérdida excesiva de calor. Cuando dichos mecanismos (por ejemplo: sudoración -frente al calor- o aumento involuntario de la actividad metabólica -frente al frío) se muestran insuficientes para hacer frente a las alteraciones térmicas inducidas, se produce un riesgo para la salud del trabajador que, de forma esquemática, se resume en los siguientes apartados.

- Riesgo por exceso de calor: Los riesgos mas habituales son las alteraciones sistemáticas (síncope de calor, golpe de calor, deshidratación), pudiendo darse ocasionalmente alteraciones cutáneas.

También es preciso tener en cuenta que una humedad muy baja (inferior al 30%) puede generar diversas sensaciones adversas, así como sequedad de la piel y dermatitis o escozor. Igualmente, el desarrollo de trabajos que impliquen riesgo físico puede agravar la situación.

No debe olvidarse que el exceso de calor puede influir negativamente en el rendimiento.

- Riesgo por frío: Los riesgos principales son: hipotermia (enfriamiento general del cuerpo) y congelación de extremidades, debido a la vaso constricción que presenta el organismo para dificultar la pérdida de calor.

2.3.3 Evaluación del ambiente térmico. Medición

La temperatura_ equivalente (suele denominarse «effective temperature»), en la que intervienen la temperatura húmeda Y seca, y la corrección por velocidad, es un parámetro que presenta ventajas de índole práctica como índice de referencia en minería, dada su sencillez. Aunque en su origen fue desarrollada para prácticas, ha sido ampliamente utilizado en la minería europea. No obstante, presenta algunas limitaciones en cuanto a la influencia de la velocidad del aire y de la humedad y, especialmente, por no tener en cuenta el esfuerzo del trabajador. Otros parámetros tradicionalmente utilizados en el sector son:

- Temperatura húmeda: introducida en 1905. En algún caso, continúa siendo el parámetro respecto al que se establece el límite legal (p. ej.: Sudáfrica, 28 °C).
- Potencia de Refrigeración (Air Cooling Power, ACP). Desarrollado en los años 50 en Sudáfrica, se basa en ecuaciones de transferencia de calor. Habitualmente se recomienda un ACP de 250 W/m² en minería (Pickering, 1997; Donoghue, 2000).

Con la modernización del sector extractivo, al aumentar la mecanización y profundidad de los pozos, así como la concentración de personal y maquinaria, las condiciones térmicas de los puestos de trabajo han ido evolucionando, con lo cual es recomendable, en muchas ocasiones, mayor profundización en la determinación del riesgo por exposición a ambiente caluroso, que la mera valoración de acuerdo con la temperatura equivalente comentada.

2.3.4 Humedad y ambiente

Bajo este epígrafe, se estudian los aspectos relacionados con mezclas de aire/agua (en forma de vapor) de aplicación en acondicionamiento de aire, desecación, etc., y en muchos campos de la ingeniería.

En el ambiente minero, estas características se incluyen en los parámetros de temperaturas húmeda y equivalente. No obstante, en algún caso particular puede resultar necesario conocer las características particulares de un ambiente: temperatura húmeda, seca, humedad relativa, contenido en vapor de agua o presión parcial del mismo.

Con tal finalidad, se incluye el diagrama psicrométrico para 1.000 mbar (1.000 hPa). Para su utilización, conviene recordar la diferencia entre humedad absoluta y relativa:

Humedad absoluta es la relación entre el peso del vapor y el del aire contenidos en una masa de aire húmedo.

Humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor que contiene una masa de aire y la que contendría si estuviese saturada a la misma temperatura.

El diagrama facilitado, para 1.000 mbar (1.000 hPa), puede utilizarse para otras presiones, sin más que multiplicar la curva de la humedad relativa por el factor:

$$\frac{P}{P_{ref}}$$

donde:

P = presión real, y

P_{ref} = presión de referencia de 1.000 mbar (1.000 hPa).

Por ejemplo, si queremos calcular la temperatura húmeda para una temperatura seca de 40 °C y una humedad relativa del 30%, para una presión total de 1.100 hPa:

$$P=1100 \text{ hPa}=1100 \text{ mbar}$$

$$P_{ref}=1000 \text{ hPa}=1000 \text{ mbar}$$

$$\frac{P}{P_{ref}}=\frac{1100}{1000}=1,1$$

Humedad relativa de referencia= 30%

Humedad relativa = 30 x 1,1 = 33%

Así, entraremos en el ábaco con la isoterma de 40 °C (en el eje de las ordenadas), buscando la intersección con la curva de humedad relativa del 33%, que nos dará un resultado de 26 °C de temperatura húmeda.

Tabla Psicométrica a nivel del mar Presión de 1 atmósfera

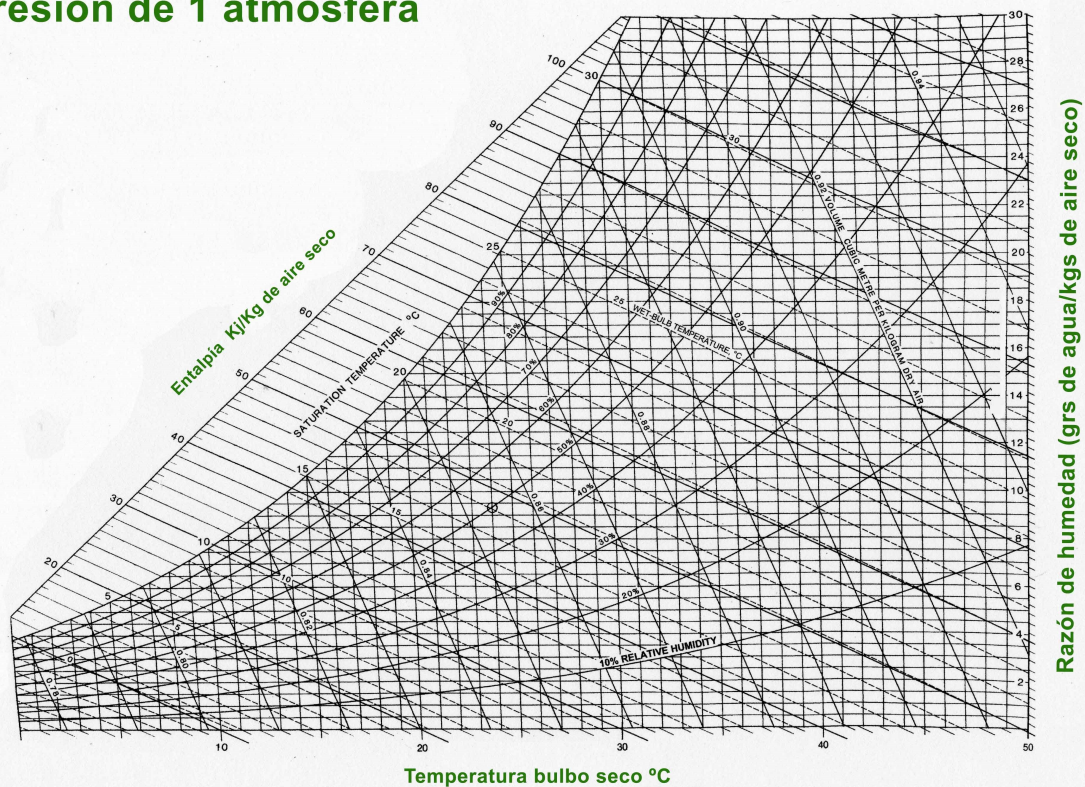


Ilustración 3: Tabla Psicométrica a nivel del mar [Fuente: ICER Ingenieros]

Los valores así obtenidos facilitan un resultado admisible para las presiones que se dan en la mina. Si fuese necesario realizar cálculos termodinámicamente avanzados, sería preciso acudir a la bibliografía específica.

2.3.5 Medición

Los índices más utilizados requieren la medición de temperaturas, para lo cual en las normas que introducen cada índice se especifican las características que han de cumplir los termómetros, existiendo además la norma general UNE EN ISO 7726 sobre instrumentos de medida.

2.3.6 Prevención

A continuación, se comentan algunos aspectos preventivos del estrés térmico. Puede ampliarse información en la bibliografía (HSE, 2006).

- Optimizar la ventilación y tener en cuenta el aumento de calor y de humedad debido al transporte del material en cintas en explotaciones profundas y de largo recorrido.
- Apartar los elementos generadores de calor de las entradas de aire limpio.
- Apagado de equipos que no están en funcionamiento.
- Control de agua para minimizar la humedad.
- Aclimatación de los trabajadores al incorporarse o reincorporarse a puestos de trabajo calurosos.
- Planificación del trabajo: rotación de puestos.
- Hidratación adecuada.

Para combatir el estrés térmico por frío, pueden seguirse las siguientes recomendaciones:

- Protección de las extremidades.
- Vestirse con varias capas de ropa holgada, de vestimenta que facilite la evaporación de sudor. Utilizar ropa cortaviento.
- Evitar pérdidas de calor: minimizar permanencia en ambientes fríos, evitar el consumo de diuréticos (café), sustituir ropa humedecida, ingesta de líquidos calientes.

Una actuación adecuada desde el punto de vista preventivo pasa por conocer en tiempo real las condiciones ambientales de los diferentes puntos de la mina, para poder actuar de forma rápida en aquellas zonas en que el estrés térmico sea elevado. La cantidad de factores involucrados hace de esto una tarea ardua y difícil, para la que es recomendable apoyarse en la informática. Existen programas de ordenador comerciales capaces de calcular, en función de distintos parámetros, el ambiente térmico existente.

2.4 PROYECTO DE VENTILACIÓN

2.4.1 Definición de caudales

2.4.1.1 Introducción

El objeto principal de la ventilación es hacer llegar a los distintos emplazamientos de la mina el caudal de aire necesario. Es fundamental, por lo tanto, proceder a un cálculo correcto del mismo, que ha de realizarse a dos niveles:

- En primer lugar, al nivel de cada taller o labor en la que se realice una determinada actividad, como un taller de arranque, una galería recorrida por máquina de gasoil, una sala de carga de baterías u otras.
- En segundo lugar, al nivel de cada cuartel, del conjunto de toda la mina y del retorno al ventilador. Estos caudales no se obtienen por pura suma algebraica de los anteriores, pues hay que tener en cuenta ciertos coeficientes de reparto y las fugas que siempre se producen.

Tanto en el caso de que el caudal de aire se calcule al nivel de cada taller o a nivel de cada cuartel o del conjunto de la mina, su valor ha de determinarse en función de los efluentes a diluir y evacuar, el número de trabajadores, los equipos operativos, etc.. En algunos casos pueden ser muy importantes los factores debidos al clima, pero no son considerados en este capítulo al no ser un caso frecuente y constituir actualmente una disciplina con tratamiento propio.

No obstante, la primera estimación de la cantidad necesaria de aire en el proyecto de una mina en una zona de trabajo todavía es un aspecto empírico en la planificación y diseño de un sistema de ventilación. La primera referencia son las exigencias reglamentarias, normalmente con carácter de mínimos, para después valorar las experiencias locales de emisiones de gases o de disipación de calor, referidas de una manera práctica a ratios de m³ ls por determinadas unidades: CV diesel, toneladas extraídas, m² de sección de túnel, etc.

Estos métodos de determinación de los caudales serán válidos siempre y cuando los métodos de trabajo propuestos, tipos de maquinaria y condiciones sean similares a los que dieron lugar a los ratios de caudal.

Según la experiencia de otras minas se recomienda empezar a cuantificar las necesidades de caudal en los propios puntos de trabajo, en los fondos de saco, etc.

Para ello, se pueden utilizar numerosas formulaciones para cuantificar el caudal de aire necesario:

- m^3/s por kilotoneladas de mineral/año.
- m^3/s por kW de diésel instalado.
- m^3 ls por un kW de diésel funcionando. .
- m^3/s por litro de diésel circulando dentro de la mina.
- m^3/s por persona en la mina.
- m^3/s para diluir los gases producidos en el proceso.
- m^3/s para diluir los gases producidos por la mina.
- Velocidades mínimas en cada sección

2.4.1.2 Velocidad Mínima

La velocidad mínima de retorno de ventilación es un valor de referencia bastante usado por su simplicidad. Como referencia, en todo tipo de túneles y galerías, una velocidad mínima de retorno de 0,5 m/s es suficiente. Esta velocidad define el caudal en el frente de trabajo de $0,5 \cdot S \text{ m}^3/\text{s}$, donde S es la sección de la labor en m^2 .

En minería de carbón se usa como referencia una velocidad mínima de retorno de 0,2 m/s para sus labores en roca, incrementándose a 0,3 m/s para labores en carbón.

En labores donde se emplea el explosivo, la velocidad mínima de aire será de 0,1 m/s, que por la sección definirá el caudal específico, y en algunas labores de carbón, 0,5 m/s. También se indican velocidades máximas, como 6 m/s en labores con polvo, 8 m/s en labores con acceso de personal o 10 m/s en labores puras de ventilación sin acceso de personal ni transporte, etc.

En general, no debería plantearse ninguna mina, por pequeña que sea, con valores de caudal total de aire inferiores a $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los valores de velocidad máxima y mínima recomendados son, como regla general:

Tabla 2: Valores de velocidad del aire[Fuente: (Manual Ventilación)]

Labor o tipo de galería	Máxima	Mínima
Pozos verticales(o inclinados, con circulación de personal en jaulas y/o skips (de entrada o de retorno	8	1
Planos inclinados, con circulación del personal sin protección contra el aire	5	1
Galerías principales de entrada o retorno de ventilación	5	1
Transversales de cuartel	4	1
Galerías sobra capa (guías), en tramos con ventilación principal	3	0,5
Galerías sobra capa (guías), en tramos con ventilación secundaria	1	0,2
Talleres de arranque	3	1
Chimeneas	1	0,5
Pocillos, contraataques, etc	5	1
Sala de cargas de baterías	1	0,5

2.4.1.3 Dilución de gases y polvo

El caudal de aire tiene que garantizar las concentraciones límite definidas en el Capítulo 1 y, dado que la ventilación es un proceso interactivo, es necesario que la verificación de estas exigencias se realice de forma sistemática y ordenada en función de los riesgos de su presencia. Trataremos de forma específica los gases producidos por los motores diesel(y los gases de voladura, dejando el grisú para tratarlo específicamente.

En general, hay que recordar la exigencia generalizada de disponer al menos del 19% en volumen de O_2 en el aire de la mina y como referencia el caudal mínimo de las reglamentaciones antiguas de 40 litros por segundo por trabajador.

- Escape de los motores diésel: la combustión incompleta de combustible en motores diesel produce emisiones que están constituidas por mezclas complejas de gases y partículas de carbón junto con componentes orgánicos que han absorbido.

Analizaremos por separado estas emisiones comenzando por los gases producidos.

La potencia producida por un motor diésel no está controlada por una válvula de estrangulamiento como en los motores de gasolina, sino por una variación de la cantidad de combustible. Esto implica que la relación entre los volúmenes de combustible y aire (C/A) varían sensiblemente según la carga del motor. Los motores diésel también se diferencian de los de gasolina en que requieren más oxígeno que puede ser utilizado para una combustión menos incompleta de todo el combustible.

Además, los motores diésel utilizados en obras subterráneas están decelerados. La cantidad de combustible máxima que se puede inyectar en los cilindros está reducida para que el combustible siempre disponga de un exceso de oxígeno para intentar lograr una combustión completa, de manera que la formación de productos de combustión incompleta sea mínima en el escape. Un motor diésel decelerado opera en unas condiciones más pobres que el límite inferior de riqueza de mezcla de un motor de ignición por chispa. La cámara de combustión de un motor diésel decelerado contiene gasóleo y aire en una relación en peso de combustible a aire (C/A) entre 0,01 (ralentí) y 0,05 (plena carga).

Los dos sistemas básicos de los motores diésel son los llamados de precámara y los de inyección directa:

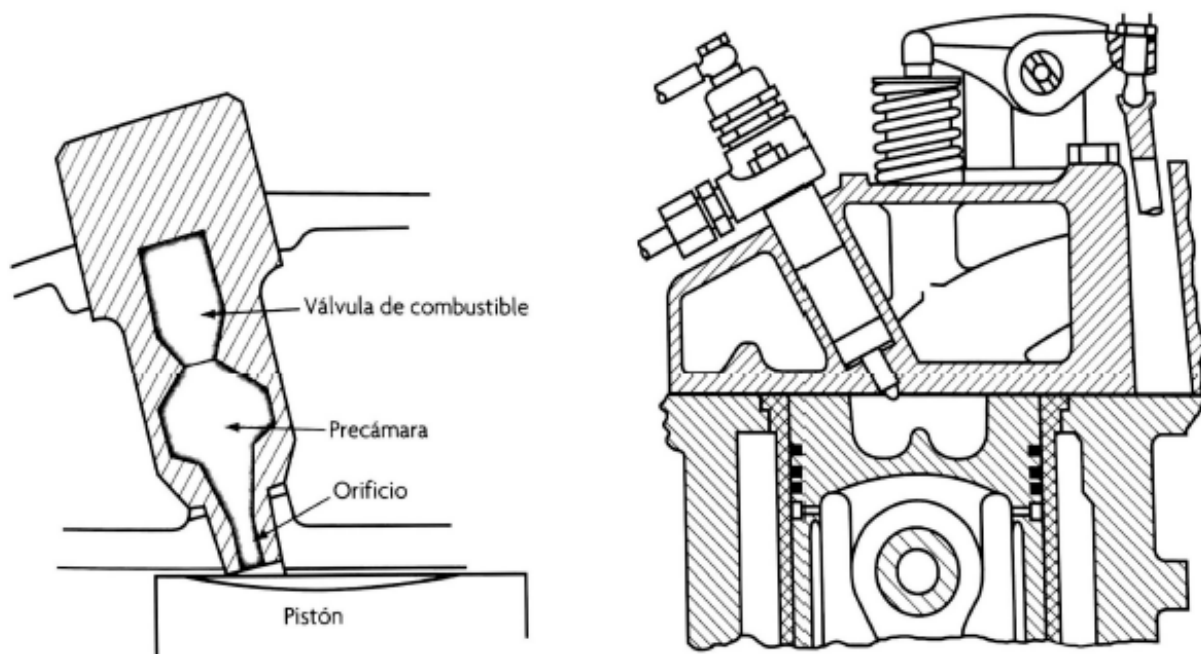


Ilustración 4: Tipos de inyección [Fuente:(Manual Ventilación)]

Los motores de inyección indirecta (o de precámara o cámaras separadas) tienen la ventaja de unas emisiones mas limpias que los de inyección directa. Por ello son el tipo de motor predominante en las obras subterráneas. La combustión tiene lugar en condiciones de exceso de combustible en la precámara y exceso de aire en la cámara principal. Como los NOx se forman en condiciones de quemado cercanas a la relación estequiométrica de combustible y aire, su contenido se reduce. La alta turbulencia en la precámara, así como en la cámara principal, tiende a producir la mezcla entre el combustible que arde y el aire disponible, resultando una reducción del humo y las partículas.

La precámara y la cámara principal contribuyen a la formación de NO. A grandes cargas las emisiones de NO están relacionadas con la combustión en la precámara, donde gran parte del combustible se quema.

La refrigeración de la cámara de combustión puede hacerse por aire o por agua. Los motores refrigerados por aire son menos pesados que los de agua. Los motores de precámara refrigerados por aire son probablemente los más comunes en las obras subterráneas

Las concentraciones de los tres componentes producidos de una combustión completa CO₂, H₂O y SO₂, dependen del ratio C/A en la cámara de combustión del motor y del contenido de carbono, hidrógeno y azufre en el combustible. Un gasóleo que contenga 85,5% de carbono, 14% de hidrógeno y 0,5% de azufre, la combustión de 1 g de combustible produce 3,135 g de CO₂, 1,26 g de H₂O y 0,01 g de SO₂. Para un ratio C/A de 0,045, estos productos de combustión son diluidos con aire parcialmente rebajado en oxígeno para producir unos gases de escape con la siguiente composición en volumen:

- Nitrógeno: 75,6%
- CO₂: 8,9
- Agua: 8,7%
- Oxígeno: 6,8%
- SO₂: 195 ppm

Los tres productos de una combustión completa representan los contaminantes que inevitablemente se obtienen en los gases de escape y que sólo pueden ser reducidos disminuyendo el consumo de combustible y modificando la composición del mismo.

En condiciones reales no se produce una mezcla homogénea para la combustión. Una parte del combustible alcanza las paredes de la cámara de combustión; hay zonas ricas en combustible y otras pobres o el combustible es inyectado tarde. Estos factores dan como resultado que se produzcan hidrocarburos no quemados, productos parcialmente oxidados y hollín en el escape.

Tabla 3: Comparación del gas de escape [Fuente:(Manual Ventilación)]

Productos de combustión incompleta	%volumen
Hidrocarburos	<1
Monóxido de carbono	<1
Oxidos de nitrógeno	<1
Humo	<1
Nitrógeno	73
CO ₂ y oxígeno	13
Agua	13
Total	100

Los hidrocarburos en los escapes de los motores diesel son en su mayoría combustible no quemado en el proceso de combustión. Además, debido a las altas temperaturas y presiones en el motor, una parte de los hidrocarburos del combustible se ven sometidos a transformaciones. La concentración de hidrocarburos en los gases de escape está directamente relacionada con el diseño del sistema de inyección de combustible y de la cámara de combustión. Los hidrocarburos en el escape pueden proceder de las siguientes fuentes:

- Combustible depositado en el pistón o en las paredes de la cámara, que no se evapora, mezcla o quema antes del escape.
- Vapores del combustible en zonas donde la relación A/C es mayor de 40:1, Y por tanto no arde.
- Combustible que se queda en los orificios del inyector al final del proceso Y que se evapora posteriormente.

El CO se forma en las zonas de combustión calientes y pobres en oxígeno y en las zonas donde la combustión es débil. Los motores diesel no producen altas concentraciones de CO, al contrario que los de gasolina, porque nunca trabajan por encima de las condiciones estequiométricas y, por tanto, nunca experimentan la falta de oxígeno de los motores de gasolina.

Los motores diésel producen pequeñas partículas de aglomerados. Estas partículas de hollín se forman por pirólisis de gotas de combustible en zonas pobres en oxígeno y en el combustible en las paredes de la cámara de combustión. Estas partículas son 100% respirables y contienen una proporción significativa de hidrocarburos dentro del rango de destilación del combustible.

Las emisiones de partículas están formadas por pequeñas esferas agregadas en grupos de tamaño superior a 1 mm. Están formadas por una mezcla de carbono e hidrocarburos absorbidos. Esta absorción es característica de carbono activado y sugiere que cantidades significativas de gases irritantes y ácidos pueden ser también absorbidos.

La mayoría de los NOx que se encuentran en el escape de los motores diésel se producen en zonas de altas temperaturas de combustión y presencia de oxígeno. Aunque predomina el monóxido, se forma algo de dióxido en la operación con poca carga. En máquinas con convertidores de par y bombas hidráulicas, las pérdidas parásitas asociadas a estos dispositivos elevan la potencia de salida por encima de la zona de producción significativa de NO2.

El SO2 presente en el escape de un motor diésel no es producto de una combustión imperfecta, sino el resultado directo de la presencia de azufre en el combustible. Cuando un motor trabaja con un ratio A/C de 20, cada 0,1% de masa de azufre en el combustible se convierte en 43 ppm de SO2 en el escape. La siguiente ecuación puede utilizarse para calcular la concentración de SO2 en el escape:

$$[SO_2] = \frac{2}{1 + A/C} \frac{\%S}{100} \frac{Pm_{esc} \cdot 10^6}{Pm_{SO_2}}$$

donde:

- $[SO_2]$ = Concentración de SO2 en el escape (ppm)
- A/C = Ratio Aire/Combustible
- $\%S$ = Contenido en peso de azufre en el combustible (%)
- Pm_{esc} = Peso molecular de los productos de escape, :::: 29 g/mol
- Pm_{SO_2} = Peso molecular del SO2, 64 g/mol

Para diluir los gases de escape de los motores diésel, se considera necesario un volumen teórico de aire 1.500 m3 por cada kg de gasoil consumido.

Una máquina que trabaje en el frente consume 0,272 kg/(kW·h) (kg de gasoil a la hora por cada kW de potencia de la máquina). El funcionamiento normal de la máquina es al 60% de su potencia nominal, por lo que el valor obtenido se multiplicará por 0,6.

El caudal de aire necesario en m³/s, se obtiene partiendo de la potencia P, en kW. mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{P \cdot 1500 \cdot 0,272 \cdot 0,6}{3600} = 0,068 \cdot P$$

Con diferentes potencias, se tiene la siguiente gráfica:

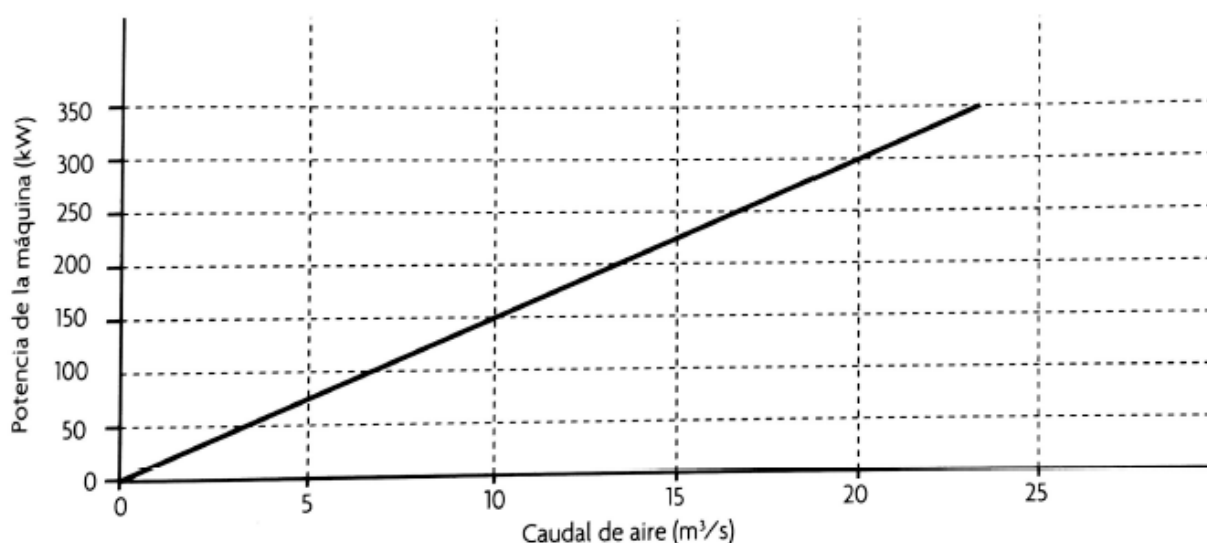


Ilustración 5: Relación entre el caudal del aire y la potencia de la máquina [Fuente: (Manual Ventilación)]

Con esta referencia y con los actuales equipos se suele dar como caudal de aire necesario:

- Para trabajos con Equipos Diesel Catalizados:

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 0,04 \text{ (m}^3\text{/s)} \times \text{N}^\circ \text{ de operarios} + 0,03 \text{ (m}^3\text{/s)} \text{ CV diesel}$$

- Para trabajos con Equipos Diesel No Catalizados:

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 0,04 \text{ (m}^3\text{/s)} \times \text{N}^\circ \text{ de operarios} + 0,05 \text{ (m}^3\text{/s)} \text{ CV diesel}$$

Con esta formulación se obtiene el caudal necesario para cada labor.

A efectos prácticos y en la mayoría de las minas esta formulación sería suficiente para el dimensionamiento de la ventilación, ya que profundizar en el origen de los coeficientes 0,03 y 0,05 no tiene sentido si no se tiene claro el coeficiente de simultaneidad de las máquinas que están trabajando en cada frente de trabajo.

2.4.2 Esquemas de ventilación

2.4.2.1 Introducción

Deben contemplarse. dos tipos de esquemas de ventilación: por un lado, a nivel del conjunto de la mina, Y por otro, a nivel de cada taller o explotación de arranque.

En cuanto al primer tipo, se desarrollan en este apartado:

- Las exigencias en cuanto a las entradas y los retornos principales de aire. También se harán recomendaciones respecto al abandono de labores.
- La importancia de una correcta planificación conjunta de la ventilación con el resto de las actividades y servicios de la mina. Se estudiarán algunos esquemas generales de ventilación.
- La incidencia de la ventilación en la independización de cuarteles con distinta clasificación respecto al grisú.

y en cuanto al esquema de cada taller o explotación de arranque, se contemplarán:

- Las exigencias en la ventilación de talleres de arranque.
- Las ventajas e inconvenientes de la ventilación descendente en minas con grisú.
- La ventilación de labores de arranque realizadas desde subniveles, sobreguías u otros emplazamientos en fondo de saco.
- La definición de algunos esquemas de ventilación de talleres. Terminología. Ventajas e inconvenientes.

Finalmente, se definirán algunos casos de instalaciones para la conducción de la corriente de aire, tales como puertas de ventilación, esclusas de pozos y tabicado de labores ya explotadas.

2.4.1.2 Entradas y retornos principales. Circulación de la corriente de aire

En general, existen unas normas elementales que deben cumplirse inexorablemente en toda explotación:

- Todas las labores subterráneas accesibles deben estar recorridas por una corriente regular de aire, suficiente y en armonía con las condiciones del trabajo y del criadero. El aire exterior introducido estará exento de gases, vapores y polvos nocivos o peligrosos.
- Toda mina deberá tener pozos o galerías distintos para la entrada y salida del aire. Sólo en casos excepcionales y en las labores preparatorias, la entrada y la salida de aire podrá hacerse por un mismo pozo o galería.
- Todo campo de explotación subterránea tendrá por lo menos dos salidas independientes a la superficie, que serán accesibles en todo momento al personal y debidamente acondicionadas.

Además, existen otras normas más específicas:

- Para regular y dirigir la corriente de aire, se pueden utilizar puertas de ventilación, pero las labores se dispondrán de manera que se evite, en lo posible, el empleo de estas puertas.
- Las puertas principales de ventilación deberán ser dobles e ignífugas, cuando constituyan la única separación entre las corrientes principales de entrada y retorno de la mina, debiendo instalarse convenientemente espaciadas para que, durante su utilización como paso, una permanezca siempre cerrada.

Para conseguir una correcta conducción del aire hacia los lugares de trabajo, es preciso evitar fugas y circuitos parásitos, o dicho de otra forma, es necesario tabicar las labores ya explotadas. Ello, además, por el riesgo de formación en estas zonas de atmósferas irrespirables o incluso explosivas, lo cual convierte esta recomendación en la exigencia de que las labores inactivas temporalmente que no se utilicen para la circulación de personal y no estén ventiladas, se señalará su entrada con dos postes cruzados y un letrero claramente visible que advierta al personal de la prohibición de acceso.

Las labores abandonadas se aislarán herméticamente cuando puedan acumularse en ellas gases peligrosos o producirse atmósferas irrespirables. El tipo de cierre depende del objetivo que se busque: aislar la labor evitando el paso, el cierre para evitar fugas de aire que alimenten fuegos endógenos, o bien resistir una posible explosión de gases acumulados tras el tabique.

2.4.1.3 Planificación de la ventilación con la explotación Y servicios de la mina

La consideración de los esquemas de ventilación es fundamental en el proceso de planificación a medio y largo plazo de la mina.

El diseño de la infraestructura, la sucesión de cuarteles o zonas, el cambio y sucesión de niveles de explotación, han de ser contemplados dentro de este marco conjunto. De igual forma, deben estar previstos otros problemas relativos al transporte, situación de puertas y esclusas, riesgo de fuegos e incendios, independización de cuarteles ... , que constituyen los grandes capítulos de la seguridad futura.

Una correcta planificación puede conllevar ahorros importantísimos en costes de infraestructura minera. Los modernos medios de cálculo, con programas informáticos como por ejemplo el VenPri, desarrollado por AITEMIN, permiten hoy en día simular las soluciones en estudio en muy breve lapso de tiempo, permitiendo una presentación gráfica y clara.

2.4.3 Tipos de Ventilación

Existen 3 tipos de ventilación en minería:

Ventilación aspirante: en ella se emplea la conducción del aire como aspirante (tubería rígida) extrayendo el polvo y los gases a su través. El aire entra por la boca del túnel y atraviesa toda su sección hasta llegar al frente de avance, mezclándose así con los distintos contaminantes que puedan existir. Un ventilador acoplado a la tubería hace que el aire del frente entre en ésta y sea expulsado por su otro extremo al exterior del túnel.

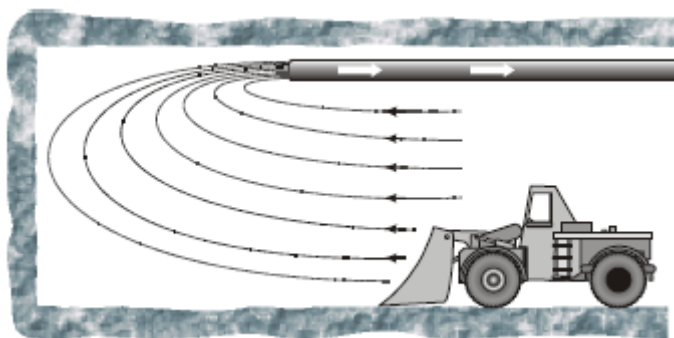


Ilustración 6: Ventilación Aspirante Fuente: [(Construmatica)]

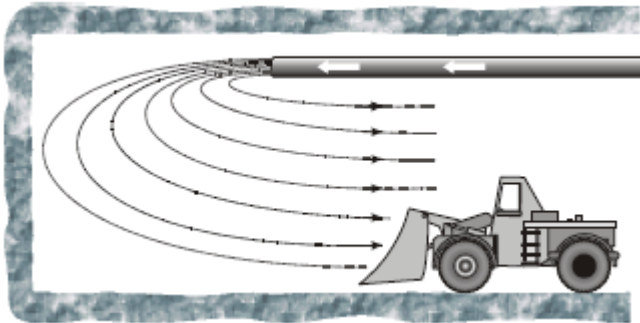


Ilustración 7: Ventilación Soplante. Fuente: [(Construmatica)]

Ventilación mixta: es una combinación de las anteriores; cuando se produce la pega (voladura) se adopta la disposición aspirante y una vez extraída la mayor parte de los gases sucios, se cambia a soplante.

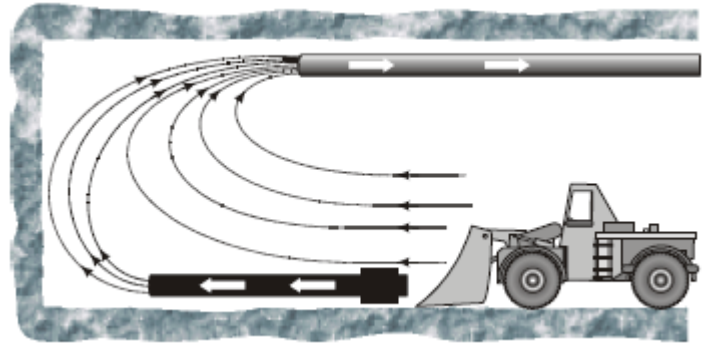


Ilustración 8: Ventilación Mixta. Fuente: [(Construmatica)]

La ventaja de la ventilación aspirante es que los gases y el polvo retornan por la tubería evitando que los respire el personal. Además, tras el disparo de las voladuras los gases y humos se eliminan rápidamente. Por contra, se requiere una tubería rígida o si es de lona deben estar armadas con una espiral de acero, el aire entra por el túnel lentamente, la ventilación aspirante deja algunas zonas del frente mal ventiladas, precisa una mayor potencia instalada y genera mayores pérdidas de carga.

Cuando la obra subterránea presenta una gran longitud, es práctica frecuente la utilización de dos o más ventiladores instalados en serie. Con esta disposición se racionaliza la utilización, añadiendo ventiladores a medida que avanza el frente hasta la instalación final para el último tramo de obra.

2.5 VENTILADORES PRINCIPALES

2.5.1 Introducción

Los túneles, minas, instalaciones subterráneas, edificios de espacios confinados, barcos, etc necesitan un sistema de ventilación más complejo cada día. Esto implica la necesidad de conocer con más profundidad el sistema de ventilación, pero sobre todo el ventilador y todos sus elementos auxiliares, que junto con los sistemas de arranque y control forman la parte primordial de dicho sistema.

Por ello, al igual que es fundamental el manejo de los conocimientos de los sistemas de ventilación y su buena práctica, se ha de tener en cuenta el rango de aplicación de las máquinas que conforman dicho sistema, lo que contribuye a reducir los problemas y sus consecuencias desde el origen.

Desde sus inicios hasta hoy día, la Ventilación de Minas tiene como objetivo central el suministro de aire fresco para la respiración de las personas y dilución-extracción de polvo y gases producto de las operaciones subterráneas (voladura, extracción, carga y transporte). En estos últimos años, han aumentado considerablemente los requerimientos de aire con el objeto de poder diluir y arrastrar fuera de la mina y de los túneles las grandes concentraciones de gases tóxicos emitidos por los equipos diésel -de alto tonelaje- incorporados de forma masiva a las operaciones subterráneas involucradas.

Los niveles de confort y seguridad adoptados hoy día son mucho más exigentes, lo que trae como consecuencia el aumento del número y tamaño de los ventiladores para cada sistema de ventilación, así como su optimización en el control de los mismos.

En el contexto de la ventilación, nos referimos al volumen de aire movido por el ventilador como «corriente de aire o de ventilación», mientras que el incremento de presión que se produce en el sistema se suele denominar «depresión del ventilador». Esta última denominación no será del todo correcta cuando el ventilador trabaja como impulsor.

2.5.2 Ventilador

2.5.2.1 Definición

Un ventilador es una máquina que transmite energía a un fluido (aire o gases), produciendo el incremento de presión necesario (Presión Total) con la que mantener un flujo continuo de dicho fluido.

Para realizar este trabajo el ventilador requiere una potencia en el eje del motor que lo acciona, que viene dada por la expresión:

$$Potencia[\text{vatios}] = \frac{\text{Caudal} [m^3/s \times \text{Presión Total} [Pa]]}{n_{\text{ventilador}}}$$

Cada ventilador se define por su curva característica que es el lugar geométrico de los puntos de funcionamiento del mismo para cada ángulo de regulación de los álabes. El punto de corte de la curva del ventilador con la curva que representa la resistencia del circuito es el punto de funcionamiento del ventilador.

2.5.2.2 Clasificación de los ventiladores

Con el progreso de la ciencia aerodinámica, en los años posteriores a la segunda guerra mundial se desarrollaron los primeros ventiladores de flujo axial o ventiladores axiales, los cuales son los más utilizados, en la actualidad y a nivel global, para mover grandes caudales de aire en los trabajos subterráneos, tanto en interior mina como en superficie. Los ventiladores de tipo centrífugo son ampliamente utilizados en Sistemas de Ventilación Industrial, dada su capacidad de generar altas caídas de presión con caudales relativamente bajos.

Los ventiladores se clasifican en general, en tres tipos: centrífugo, de hélice y axial. Cada uno de estos tipos puede disponer de varias posiciones de descarga y distintos tipos de accionamiento del rodete.

Ventilador centrífugo: consiste en un rotor encerrado en una envolvente de forma espiral; el aire, que entra a través del ojo del rotor paralelo a la flecha del ventilador, es succionado por el rotor y arrojado contra la envolvente, y se descarga a la salida en ángulo recto a la flecha; puede ser de entrada sencilla o de entrada doble. Son ventiladores de flujo radial. La trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y es perpendicular al mismo a la salida. Si el aire a la salida se recoge perimetralmente en una voluta, entonces se dice que el ventilador es de voluta.

En un ventilador de entrada doble, el aire entra por ambos lados de la envolvente succionado por un rotor doble o por dos rotores sencillos montados lado a lado. Los rotores se pueden clasificar, en general, en aquellos cuyas aspas son radiales, inclinadas hacia adelante o inclinadas hacia atrás del sentido de la rotación.

No obstante lo explicitado anteriormente, en la actualidad y en ciertos países, se están utilizando ventiladores de tipo centrífugo -de alta capacidad, en términos de caudal de aire- para ventilar operaciones minerosubterráneas, con la característica particular y principal de que tales unidades son instaladas mayoritariamente en superficie atendiendo la restricciones de evitar grandes excavaciones en el interior de la mina subterránea (no recomendable desde el punto de vista geomecánico, ya que este tipo de ventilador necesita un espacio muy amplio para su instalación).

Estos ventiladores tienen tres tipos básicos de rodetes:

- Álabes curvados hacia adelante,
- Álabes rectos,
- Álabes inclinados hacia atrás/curvados hacia atrás.

Los ventiladores de álabes curvados hacia adelante (también se llaman de jaula de ardilla) tienen una hélice o rodete con los álabes curvados en el mismo sentido que la dirección de giro. Estos ventiladores necesitan poco espacio, baja velocidad periférica y son silenciosos. Se utilizan cuando la presión estática necesaria es baja o media, tal como la que se encuentra en los sistemas de calefacción, aire acondicionado o renovación de aire, etc. No es recomendable utilizar este tipo de ventilador con aire polvoriento, ya que las partículas se adhieren a los pequeños álabes curvados y pueden provocar el desequilibrado del rodete.

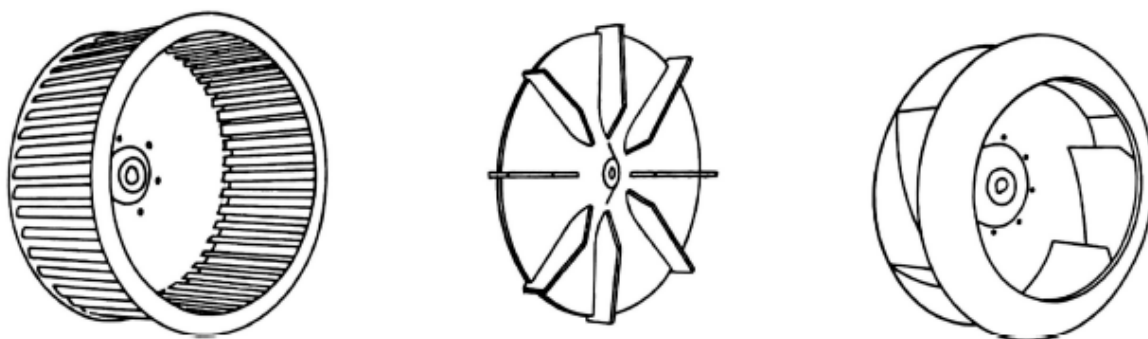


Ilustración 9: Álabes curvados hacia delante, radiales y hacia atrás [Fuente:(Manual Ventilación)]

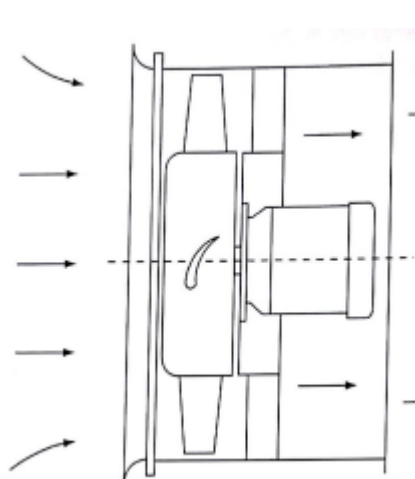
Estos ventiladores tienen un rendimiento bajo, fuera del punto de diseño. Además, como su característica de potencia absorbida crece rápidamente con el caudal, ha de tenerse mucho cuidado con el cálculo de la presión necesaria en la instalación para no sobrecargarlo. En general, son bastante inestables cuando funcionan en paralelo, debido a su característica caudal-presión.

Los ventiladores centrífugos radiales tienen el rodete con los álabes dispuestos en forma radial. La carcasa está diseñada de forma que a la entrada y a la salida se puedan alcanzar velocidades de transporte de materiales. Existe una gran variedad de diseños de rodetes, que van desde los de «alta eficacia con poco material» hasta los de «alta resistencia a impacto». La disposición radial de los álabes evita la acumulación de materiales sobre los mismos. Este tipo de ventilador es comúnmente utilizado en las instalaciones de extracción localizada, en las que el aire contaminado con partículas debe circular a través del ventilador. En este tipo de ventiladores, la velocidad periférica es media y se utiliza en muchos sistemas de extracción localizada que movilizan aire sucio o limpio.

Los ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia atrás tienen un rodete con los álabes inclinados, en sentido contrario al de rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento, con un nivel sonoro relativamente bajo y una característica de consumo de energía del tipo «no sobrecargable». En un ventilador «no sobrecargable», el consumo máximo de energía se produce en un punto próximo al de rendimiento óptimo, de forma que cualquier cambio a partir de este punto, debido a variaciones de la resistencia del sistema, dará como resultado un consumo de energía menor. La forma de los álabes condiciona la acumulación de materiales sobre ellos, de forma que el uso de estos ventiladores debe limitarse como se indica a continuación:

- Alabes de espesor uniforme: Los álabes macizos permiten el trabajo con aire ligeramente sucio o húmedo. No deben emplearse con aire conteniendo materiales sólidos, ya que tienen tendencia a acumularse en la parte posterior de los mismos.
- Alabes de ala portante: Los álabes de ala portante permiten mayores rendimientos y una operación más silenciosa. Los álabes huecos se erosionan rápidamente y se pueden llenar de líquido si la humedad es alta, por ello su uso queda limitado a aplicaciones en las que se manipule aire limpio.

Ventilador de hélice: está formado por un rodete dentro de la corriente de aire es paralela a la flecha del ventilador. Se emplea en circuitos cuya resistencia es muy pequeña, pudiendo manejar grandes volúmenes de aire a una presión estática baja.



Ventilador axial: tiene un diseño aerodinámico. Consiste esencialmente en un rodete alojado en una envolvente cilíndrica o carcasa. La adición de álabes-guía, detrás del rotor, convierte el ventilador turbo-axial con aletas guía.

Puede funcionar en un amplio rango de volúmenes de aire, a presiones estáticas, que van de bajas a moderadamente altas y es capaz de desarrollar mayores presiones estáticas que el ventilador centrífugo, a la vez que es mucho mas eficiente. Los álabes-guía, en la succiones o en la descarga, o en ambas partes, se ha añadido para enderezar el flujo de aire fuera de la unidad, sirviendo al mismo tiempo de apoyo en el diseño.

Ilustración 10: Ventilador Axial [Fuente: (Manual Ventilación)]

2.5.2.3 Comparativa de ventiladores axiales frente a ventiladores centrífugos

Las diferencias existentes entre un ventilador axial y un centrífugo son las siguientes:

Los ventiladores axiales ofrecen mejor eficiencia en un amplio rango de puntos de funcionamiento, mientras que los ventiladores centrífugos pueden tener un rendimiento muy alto, pero solamente sobre un rango muy reducido, y sólo sobre un curva característica. Este parámetro es muy importante, ya que el coste de la energía es un factor que se debe tener muy en cuenta. Por tanto, el rendimiento tiene una importancia primordial, como es lógico, primará conseguir rendimientos elevados en grandes gamas de puntos de funcionamiento, objetivo mucho mas difícil de conseguir con ventiladores centrífugos que con ventiladores axiales.

Si un ventilador centrífugo diseñado para un punto de funcionamiento determinado debe trabajar en otras condiciones, debido, por ejemplo, a un cambio en las condiciones resistentes de la mina, tendrá presumiblemente una disminución de rendimiento considerable. Los ventiladores axiales tienen mayor rendimiento mecánico, ya que los ventiladores centrífugos transmiten el movimiento desde el motor al rodete mediante correas u otros tipos de transmisiones. Esto implica una serie de complicaciones adicionales frente a un ventilador axial, ya que, además de la pérdida de rendimiento por transmisión, podrían axial aparecer más frecuentemente fenómenos de vibraciones por ser un sistema mecánico más complejo.

Ciertos ventiladores centrífugos plantean problemas en la transmisión, como puede ser el deslizamiento de la correa, destensado, exceso de tensado, etc, que repercuten sobre los rodamientos, y peligro de rotura de las correas cuando están expuestas a temperaturas extremas.

Un ventilador axial, para las mismas prestaciones de presión y caudal, requiere menor espacio físico que un ventilador centrífugo, ya que por su diseño puede utilizar motores de mayor velocidad. El ventilador centrífugo, al contrario, necesita cimentaciones mayores para el ventilador y sus conducciones, incrementando el costo de la instalación significativamente.

La presencia de agua es perjudicial para los ventiladores centrífugos, ya que su rodete, presenta en su configuración huecos que acumulan agua mientras trabajan, produciendo un desequilibrio en el ventilador que degenera en vibraciones. Un ventilador axial tiene más versatilidad en la regulación que un ventilador centrífugo, ya que podemos actuar sobre el ángulo de posición de los álabes y sobre la velocidad de rotación con un variador de frecuencia pudiendo alcanzar una alta gama de puntos de funcionamiento, mientras que el ventilador centrífugo tiene regulación por velocidad, y si queremos conseguir otro punto de funcionamiento será a base de aumentar la resistencia del circuito (con un damper de regulación, p.e.), lo que significaría un incremento de potencia debido a la regulación.

2.5.1.4 Tipos de configuraciones de un ventilador

Un ventilador puede ser, según su forma constructiva, horizontal o vertical. Los ventiladores horizontales son los más usuales, pero los verticales son más aconsejables para ciertos tipos de aplicaciones. Es este el caso de los ventiladores exteriores de minería subterránea, donde la configuración vertical reduce las pérdidas de carga del circuito, al evitarse el tener que construir un codo para dirigir el flujo. Este codo genera unas pérdidas de carga importantes, que requieren mayores potencias de instalación. Todo esto se evita con una configuración de ventilador vertical.

En las figuras podemos observar las tres configuraciones clásicas para ventiladores axiales de extracción de aire en minas subterráneas. Arriba a la izquierda la configuración vertical. Arriba a la derecha la configuración horizontal con salida vertical. A la izquierda tenemos la configuración horizontal con salida horizontal. Se aprecia la necesidad de construir un codo para dirigir el flujo de aire hacia el ventilador, con los inconvenientes que acarrea.

Por otra parte, ya hemos visto que según el tipo de accionamiento un ventilador puede ser accionado directamente por el motor, por medio de un eje de transmisión «cardan» o por medio de poleas/correa. Lo más frecuente es el acople directo del motor al rodete, pero en algunas aplicaciones es necesario el acoplamiento «cardan», cuando el aire a extraer es corrosivo o

potencialmente explosivo, o simplemente para optimizar las tareas de mantenimiento del motor. La transmisión por poleas y correas, por su parte, ha caído en desuso por su bajo rendimiento.

Otro tipo de clasificación podría hacerse en función del número de etapas o escalones. La mayoría de las aplicaciones requieren una sola etapa. Sin embargo, aplicaciones con presiones muy elevadas (más de 5.000 Pa) no se consiguen con un ventilador de un solo escalón. En estos casos es cuando se usan los ventiladores de dos escalones, que son capaces de conseguir presiones mayores. En las figuras de la izquierda pueden observarse las dos configuraciones mencionadas.

Teóricamente, un doble escalón conseguiría el doble de presión que un rodete de un solo escalón, pero en la práctica el aire sale tan torsionado del primer rodete que el segundo pierde mucha eficiencia, con lo que realmente se consigue menos presión. La utilización de estos ventiladores es equivalente al uso de varios ventiladores en serie.

Otra clasificación podría establecerse en base a la función que va a realizar el ventilador. Efectivamente, un ventilador puede ser de extracción de aire viciado o de impulsión de aire fresco. Los ventiladores de impulsión de aire generalmente son más sencillos que los de extracción.

Estos últimos han de estar preparados, según la aplicación, para extraer aire abrasivo, humos calientes o gases explosivos. En estos casos, la protección del ventilador en su conjunto es más rigurosa. Además, los motores pueden ser encapsulados para evitar que se dañen por la abrasión o atmósferas corrosivas (casos típicos de minería), o resistentes a la temperatura durante un cierto intervalo de tiempo (caso de ventiladores de extracción de humos para emergencias en túneles). En la figura, se muestra un ventilador vertical de construcción robusta para aplicaciones mineras.

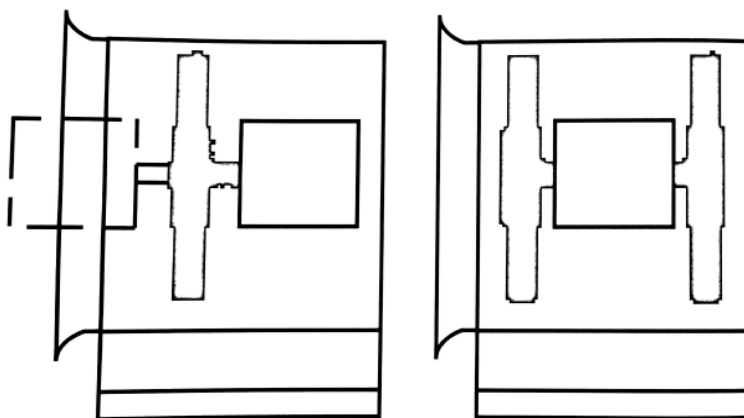


Ilustración 11: Tipo de etapas [Fuente:(Manual Ventilación)]

2.5.3 Ventiladores Axiales

El ventilador consta principalmente de los siguientes elementos:

- Parte activa del ventilador, que será el elemento principal del ventilador, donde están integrados el motor, el rodete de álabes y las directrices. Generalmente, estará constituida por dos carcasas, la carcasa del rodete y la carcasa del motor.
- Compuerta motorizada tipo «todo o nada», generalmente un «damper» de lamas paralelas o una guillotina.
- Difusor, cuya principal misión es la de decelerar el caudal de aire a la salida de la parte activa, con el fin de reducir la presión dinámica y, como consecuencia, reducir la pérdida de carga en presión.
- Carcasas de medición. Son carcasas adicionales en las que se miden los parámetros presión y caudal del ventilador. Generalmente, se instala una en el lado de aspiración de la parte activa del ventilador. Opcionalmente, puede ir integrada en la parte activa del ventilador, dentro de la carcasa rodete, aunque para ello ésta debe ser más larga.
- Conexión del ventilador al circuito. Si el ventilador está en exterior, en un extremo del circuito, la conexión se realiza mediante un codo, se conecta a un pozo, o mediante una conexión a pared, si se conecta a un tabique. Si el ventilador está dentro del circuito, para generar la presión sobre éste hay que conectar el ventilador por uno de sus lados a un tabique. Si se hace por el lado de aspiración, se utiliza una conexión a pared tipo redondo-cuadrado, pero si se realiza por el lado de impulsión, por ejemplo al final del difusor, la parte activa del ventilador necesitará una tobera de admisión.

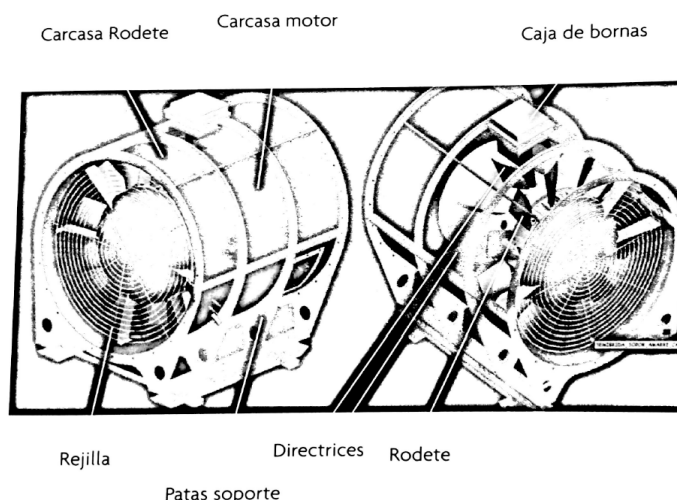


Ilustración 12: Empaquetado de un ventilador axial
[Fuente:(Manual Ventilación)]

2.5.3.1 El ventilador axial y sus accesorios mas frecuentes

Se considera ventilador, propiamente dicho, la parte activa del conjunto, y está compuesto por carcasa, rodete y motor.

- Carcasa: Es la envolvente que protege el rodete y el motor del ventilador. Normalmente esta construida con acero al carbono. Si las condiciones de trabajo del ventilador son de una exigencia baja suele hacerse un tratamiento de chorreado, mientras que si hay una exigencia mayor, el tratamiento será de galvanizado en caliente.

Para facilitar el transporte y el montaje pueden fabricarse carcasas independientes para motor y rodete. Por el mismo motivo, si el diámetro del ventilador es muy grande (más de 1.800 mm). La carcasa o carcasas se fabrican partidas en dos piezas.

- Rodete es la parte móvil del mismo. Como hemos visto, se compone de álabes y cubo o soporte de los álabes. En función de las necesidades, el rodete puede ser de álabes regulables o no regulables. En caso de álabes regulables, pueden serlo por diversos sistemas.
 - Álabes regulables manualmente por regulación individual, álabe a álabe.
 - Álabes regulables manualmente por regulación central.
 - Álabes regulables hidráulicamente. En este caso, existe la posibilidad de que dicha regulación se haga con el ventilador en marcha.
- Motor: el tipo de motor del ventilador depende de las características del mismo. Algunas características a reseñar son:
 - La forma constructiva varía entre B3, BS y B8, si el ventilador es horizontal y VI y V3, en caso de ventiladores verticales.
 - Ventiladores antideflagrantes necesitan motores encapsulados.
 - Si el ventilador es resistente a temperatura, por ejemplo, 400 °C durante 2 horas, el motor lógicamente también debe serlo, salvo que éste no esté bañado por el flujo del aire que moviliza el ventilador
 - En cuanto a los rodamientos del motor, suele exigirse que tengan una vida L10 mayor de 20.000.
- El motor debe ir preparado para llevar sondas de temperatura, si así se requiere.
- En la selección del motor se considerará también el tipo de arranque que se proyecte para el mismo (variador de frecuencia, arrancador suave, arranque directo o arranque estrella

triángulo)

- Si el ventilador va a trabajar a grandes altitudes (mayor de 1.000 m), en atmósferas con grandes humedades relativas (mayores del 90%) y temperaturas mayores de 40 °(o menores de -20 °C, hay que transmitir estos factores al fabricante para que dimensione adecuadamente el motor.
- En cuanto a la ubicación del motor, si éste puede ir dentro de la parte activa del ventilador, en la carcasa del ventilador o puede ir fuera del mismo, con transmisión por eje «cardan». Este tipo de accionamientos se usa en ventiladores para minería cuando se da alguno de los siguientes supuestos:
 - El aire que pasa por el ventilador es corrosivo, y por tanto el motor se desea instalar fuera de la influencia del circuito de aire para una mayor duración de los rodamientos.
 - En caso de atmósfera potencialmente explosiva, donde se desea instalar el motor fuera del circuito de aire para evitar tener que utilizar un motor antideflagrante.
 - Se desea instalar el motor fuera del circuito, porque así se optimizan las labores de mantenimiento o reemplazo del motor.

Los ventiladores con accionamiento por eje «cardan» suelen ser máquinas de mayores dimensiones y,por tanto, estructuras más complejas y que requieren de más obra civil de cara a su instalación.

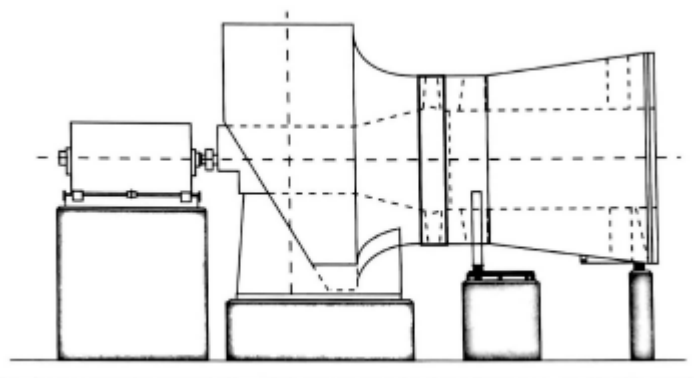


Ilustración 13: Ventilador Axial [Fuente:(Manual Ventilación)]

No obstante, los ventiladores accionados por eje «cardan» tienen una serie de desventajas que no aconsejan su instalación, a no ser que sea estrictamente necesaria. Estas desventajas son:

- Motor menos refrigerado, ya que no lo baña el aire que pasa por el ventilador (lo que implica un menor rendimiento y, por tanto, mayor consumo).
- La potencia absorbida de la red por el motor será la potencia necesaria en el eje (debido a los parámetros aerodinámicos), afectada por el rendimiento del motor más el rendimiento mecánico debido a la transmisión. Si no tenemos esta transmisión «cardan», debido a un acoplamiento directo del motor al rodete, la potencia absorbida será mayor:

$$E_{absorbida} = \frac{P_{eje}}{\eta_{motor} \times \eta_{cardan}} > \frac{P_{eje}}{\eta_{motor}} \cdot P_{absorbida}$$

- Habrá más puntos de inspección en el mantenimiento (no todos accesibles) debido a que tendremos mayor número de rodamientos y puntos de engrase.
- Se necesita un mayor espacio para la instalación/cimentación. Está claro que instalar el motor fuera del propio ventilador implica un espacio necesario para la ubicación del motor, así como una bancada especial para el motor, la cual, si no tiene una buena ejecución traerá problemas de vibraciones y deterioro de rodamientos a largo plazo.
- Dado que el ventilador será más complejo, la fabricación será más cara a igualdad de calidad.
- El ventilador con accionamiento mediante transmisión «cardan» necesita más elementos mecánicos que el ventilador con acoplamiento directo. Adicionalmente, para que el motor no entorpezca el paso del aire, a veces se requieren configuraciones de ventilador que implica codos a la salida del difusor, «cardan» más largo para separar el motor de admisión del ventilador, etc.

- Mayor nivel de ruido debido a tener el motor fuera. Cuando el motor está dentro del ventilador, el ventilador puede insonorizarse. Si la instalación va con «cardan», por un lado tendremos el ruido aerodinámico del ventilador y, por otro lado, tendremos el ruido mecánico del motor y de su transmisión. Si hubiese que reducir el nivel de ruido, sería necesario una insonorización del ventilador y una insonorización del motor.
- Resonancia. Se produce resonancia cuando una frecuencia de vibración coincide con la frecuencia natural del sistema, y puede ocasionar una ampliación espectacular de la amplitud que, a su vez, podría dar lugar a un fallo prematuro o incluso catastrófico. Puede tratarse de una frecuencia natural del rotor, pero en muchos casos pueden tener su origen en el bastidor de soporte, bancada, soporte, caballete. Con la instalación de un eje «cardan» se multiplica, por tanto, el riesgo de resonancia.
- Mayor probabilidad de desalineación del eje.
- Mayor probabilidad de flexión del eje

Estas desventajas pueden ser asumibles, ya que aunque la instalación sea más cara y puede requerir más puntos de mantenimiento, esta diferencia en el coste, dependiendo de las circunstancias en cada caso, puede ser favorable a la elección del «cardan» en caso de cambio de motor (que será más rápido), en caso de posible deterioro del motor por afectarle la mala calidad del aire que extrae el ventilador, etc.

3 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA SUSCITADO

3.1 MÉTODO DE HARDY-CROSS

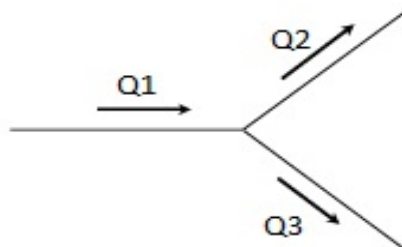
Este método constituye un caso particular de los procedimientos de cálculo denominados métodos de relajación. Se trata de resolver un sistema de ecuaciones simultáneas, partiendo de unos valores iniciales arbitrarios que satisfagan algunas de las ecuaciones.

Se calcula luego una corrección que, aplicada a los valores asumidos originalmente, permitirá satisfacer las demás ecuaciones. La corrección introducida hará variar los valores asumidos al inicio del cálculo, lo cual supone que las primeras ecuaciones ya no serán satisfechas por los valores corregidos. Se inicia luego un segundo ciclo de cálculo con los valores corregidos, lo cual permitirá determinar un nuevo valor que se utilizará para hacer la corrección. La aplicación repetida de este procedimiento conduce a la convergencia de los valores asumidos, reduciéndose progresivamente la corrección hasta hacerse despreciable. (Carrasco, 2011)

3.1.1 Fundamentos de método

El método se fundamenta en las dos leyes siguientes:

1. Ley de continuidad de masa en los nudos: "La suma algebraica de los caudales en un nudo debe ser igual a cero"



$$\sum_{j=1}^{m_i} (Q_{ij} + q_i) = 0 \quad (1)$$

Donde ,

Q_{ij} : Caudal que parte del nudo i o que fluye hacia dicho nudo.

q_i : Caudal concentrado en el nudo i

m_i : Número de tramos que confluyen al nudo i .

2. Ley de Conservación de la energía en los circuitos: "La suma algebraica de las "pérdidas" de energía en los tramos que conforman un anillo cerrado debe ser igual a cero".

$$\sum_{i=1}^n h_{fij} = 0 \quad (2)$$

Donde 2,

h_{fij} : Pérdida de carga por fricción en el tramo T_{ij} .

n : Número de tramos del circuito i

El planteamiento de esta última ley implica el uso de una ecuación de pérdida de carga o de "pérdida" de energía, bien sea la ecuación de Hazen & Williams o, bien, la ecuación de Darcy & Weisbach.

La ecuación de Hazen & Williams , de naturaleza empírica, limitada a tuberías de diámetro mayor de 2", ha sido, por muchos años, empleada para calcular las pérdidas de carga en los tramos de tuberías, en la aplicación del método de Hardy-Cross. Ello obedece a que supone un valor constante para el coeficiente de rugosidad, C , de la superficie interna de la tubería, lo cual hace más simple el cálculo de las "pérdidas" de energía.

La ecuación de Darcy & Weisbach, de naturaleza racional y de uso universal, casi nunca se ha empleado acoplada al método de Hardy Cross, porque involucra el coeficiente de fricción, f , el cual es función de la rugosidad, k , de la superficie interna del conducto, y el número de Reynolds, R , de flujo, el que, a su vez depende de la temperatura y viscosidad del agua, y del caudal del flujo en las tuberías.

3.1.2 Ecuaciones básicas para el cálculo de la pérdida de carga

La ecuación de *Hazen & Williams* originalmente se expresa como:

$$V = 0.355 \cdot C \cdot D^{0.63} \cdot S_f^{0.54} \quad (3)$$

Donde 3,

V : Velocidad del flujo, m/s.

C : Coeficiente de rugosidad de Hazen & Williams, adimensional.

D : Diámetro de la tubería, m.

S_f : Pérdida unitaria de carga (m/m).

Por continuidad,

$$Q = V \cdot A \quad (4)$$

Luego,

$$Q = 0.355 \cdot C \cdot D^{0.63} \cdot \left(\frac{h_f}{L} \right)^{0.54} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (5)$$

De la cual resulta:

$$h_f = \left(\frac{3.5866}{C \cdot D^{2.63}} \right)^{1.851} \cdot L \cdot Q^{1.851} \quad (6)$$

Donde 6,

Q : Caudal del flujo en el conducto, m³/s.

L : Longitud del tramo de tubería, m.

h_f : Pérdida de carga, m.

La ecuación anterior se puede transformar de tal manera que el diámetro se exprese en pulgadas y el caudal en l/s, obteniéndose la siguiente ecuación.

$$h_f = \left(\frac{56.23}{C} \right)^{1.851} \cdot \frac{L}{D^{4.87}} Q^{1.851} \quad (7)$$

Haciendo:

$$\alpha = \frac{1}{D^{4.87}} \left(\frac{56.23}{C} \right)^{1.851} \quad (8)$$

Resulta:

$$h_f = \alpha L Q^{1.851} \quad (9)$$

Los valores del coeficiente c de Hazen-Williams para los distintos materiales, clase y estado de los tubos, son los siguientes:

Tabla 4: Tabla de coeficientes de Hazen-Williams

Material	Coeficiente Hazen-Williams
Asbesto-cemento(nuevo)	135
Cobre y Latón	130
Ladrillo de saneamiento	100
Hierro fundido, nuevo	130
Hierro fundido, 10 maños de edad	107-113
Hierro fundido, 20 maños de edad	89-100
Hierro fundido, 30 maños de edad	75-90
Concreto, acabado liso	130
Concreto, acabado común	120
Acero Galvanizado (nuevo y usado)	125
Acero galvanizado nuevo	110
Acero remachado usado	85
PVC	140
PE	150
Plomo	130-140
Aluminio	130

La ecuación de Darcy & Weisbach expresa, en términos de velocidad del flujo, la siguiente:

$$h_f = f \cdot \frac{L V^2}{D \cdot 2 g} \quad (10)$$

Donde :

f : es el coeficiente de fricción, de Darcy. (Se obtiene con ecuación Colebrook & White)

V : Velocidad media del fluido (m/s)

L : Longitud del tramo de tubería, m.

h_f : Pérdida de carga, m.

D : Diámetro de la tubería, m.

Y en términos del caudal, expresa:

$$h_f = \frac{8 f \cdot L Q^2}{\pi^2 \cdot g D^5} \quad (11)$$

Haciendo:

$$\beta = \frac{8 f}{\pi^2 \cdot g D^5} \quad (12)$$

Resulta:

$$h_f = \beta L Q^2 \quad (13)$$

En general, la ecuación de pérdidas de carga por fricción se expresa:

$$h_f = r \cdot L \cdot Q^n \quad (14)$$

Donde 14:

Coeficiente de resistencia, cuyo valor depende del tipo de ecuación empleada para el cálculo.

n : Exponente del caudal, que depende la ecuación de resistencia empleada.

n : 1.851, según la ecuación de *Hazen & Williams* .

n : 2.0 según la ecuación de Darcy & Weisbach.

Esta expresión, $h_f = r \cdot L \cdot Q^2$, es la utilizada para el cálculo de la ventilación en minería con coeficiente $n = 2$ que responde a un planteamiento más formal del problema de distribución del aire en la mina.

Tabla 5: Toraño Alvarez A.J.

$\Delta X = l \cdot r \cdot Q^2$		
Valores para el cálculo de la resistencia unitaria en galerías y tuberías		
P: perímetro (m)	S (m ²): sección recta	r1: resistencia ($\mu\text{c}_a/\text{m}/\text{m}^3_{\text{aire}}^2$)
		r2: resist ($\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^9$)/m_tubo/ $\text{m}^3_{\text{aire}}^2$)
$\lambda = 0,024$	tubería rígida o flexible soplante	$r_2 = 0,153 \cdot \lambda \cdot \frac{P}{S^3}$
$\lambda = 0,080$	tubería flexible armada soplante	
$\lambda = 0,107$	tubería flexible armada aspirante	$r_1 = 15,3 \lambda \frac{P}{S^3}$
$\lambda = 0,050$	túnel carretero con pared gunitada	
$\lambda = 0,300$	galería de mina tradicional entibada con cuadro metálico	

Tabla que expone el cálculo de la resistencia unitaria en galerías y tuberías en minas, necesaria para la obtención de los caudales corregidos. En nuestro método se calculan dos resistencias por tramo, una fija, en la cuál se multiplica la resistencia por la longitud del tramo, y otra variable, que es en función de la apertura de la compuerta de dicho tramo y no se multiplica por la longitud, ya que es puntual. La fórmula de la resistencia depende del Perímetro de la galería, de su Sección y de el Coeficiente λ en nuestro caso es igual a 0.3.

El Método de Hardy Cross corrige sucesivamente, iteración tras iteración, los caudales en los tramos, con la siguiente ecuación general:

$$\Delta Q = - \frac{\sum h_f}{n \cdot \sum \frac{h_f}{Q}} \quad (15)$$

El coeficiente de fricción, f , de las ecuaciones (10) y (11), se calcula con la ecuación de Colebrook & White, que expresa lo siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{R \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (16)$$

Donde 16 :

k : El coeficiente de rugosidad de la tubería, mm.

D : Diámetro de la tubería, mm.

R : El número de Reynolds del flujo, adimensional.

Nótese que la relación k/D , en la ecuación (16) debe ser adimensional.

A su vez, el número de Reynolds, R , se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho \cdot u_s \cdot D}{\mu} = \frac{u_s \cdot D}{\nu} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu} \quad (17)$$

Donde 17,

u_s : Velocidad del flujo, m/s.

ρ : Densidad del fluido (agua), kg/m³.

μ : Viscosidad dinámica del fluido, kg/m.s.

ν : Viscosidad cinemática del fluido, m²/s.

D : Diámetro del conducto, m.

Q : Caudal del flujo en el conducto, m³/s.

La ecuación (16) es una ecuación implícita para f y, por lo tanto, se resuelve iterativamente, por ensayo y error, aplicando por ejemplo el Método de Newton & Raphson. Para acelerar el cálculo de f , en una subrutina, se emplea un valor inicial de $f = X0$, calculado con la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{5.1286}{R^{0.89}} \right) \quad (18)$$

Se puede resolver, en cada iteración, con la función “solver” de excel. El planteamiento general es solucionar la función de tipo: $\mathcal{A}E = A + 2 \cdot \log(B + C \cdot A)$; con $A = 1/\text{raiz}(f)$

3.1.3 Rugosidad de las tuberías

k: rugosidad absoluta; $e=k/D$, rugosidad relativa, con D: diámetro interno de la tubería (se puede usar, en primera aproximación, el diámetro nominal).

Tabla 6: Rugosidades en distintos tipos de galerías

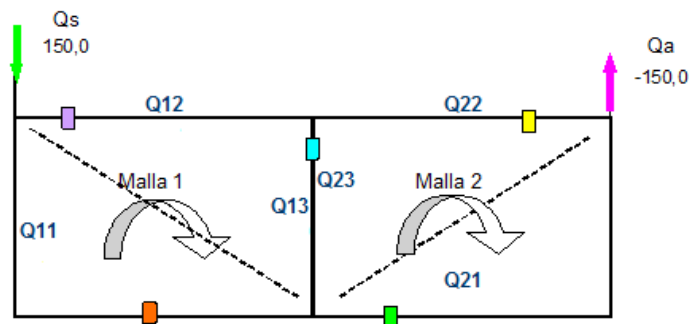
Material de construcción	Rugosidad (k:mm)
<u>Tuberías de Plástico</u> Polietileno (P.E.) Cloruro de polivinilo (PVC)	0,002 0,02
<u>Tuberías metálicas</u> Tuberías estiradas, sin soldaduras de latón, cobre, plomo Aluminio	0,0015 - 0,01 0,015 - 0,06
<u>Acero estirado sin soldaduras:</u> Nuevas Después de muchos años en servicio	0,02 - 0,10 1,2 - 1,5
<u>Acero galvanizado:</u> Nuevas, buenas galvanización Galvanización ordinaria	0,07 - 0,10 0,10 - 0,15
<u>Fundición:</u> Nuevas Nuevas con revestimiento bituminoso Asfaltadas Después de varios años de servicio	0,25 - 1,00 0,10 - 0,15 0,12 - 0,30 1,00 - 4,00
<u>Hormigón y fibrocemento:</u> - <u>Hormigón:</u> Superficie muy lisa Condiciones medias Superficie rugosa Hormigón armado - <u>Fibrocemento (F.C.):</u> Nuevas Después de varios años en uso	0,3 - 0,8 2,5 3 - 9 2,5 0,05 - 0,10 0,60

3.1.4 Ejemplo Hardy Cross

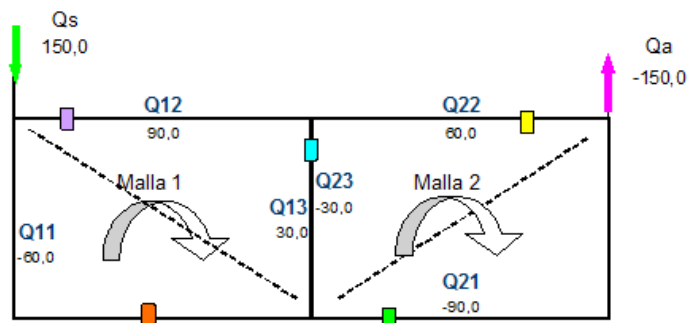
Cálculo de ventilación de una mina (método Hardy-Cross) en la se dispone de dos ventiladores, uno soplante que introduce aire limpio y otro aspirante que recoge el aire contaminado. Tenemos como valores iniciales los caudales de los dos ventiladores.

Descripción del método:

1. Numerar los tramos de tuberías y asignarles un sentido (esta elección es arbitraria).



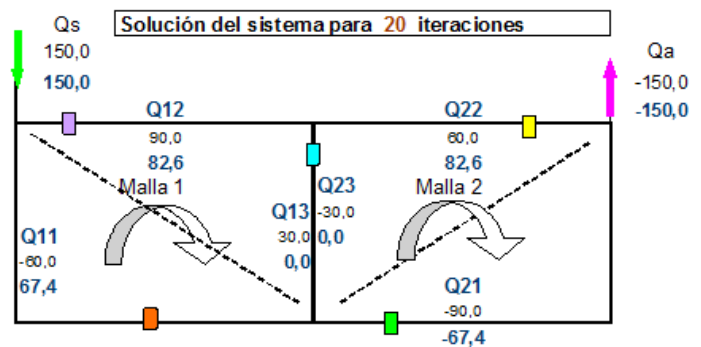
2. Elegir las mallas y un sentido de recorrido. Asignar un valor numérico a cada caudal de forma que se cumpla la conservación de la masa en cada nodo. El signo del caudal es negativo si se opone al sentido de recorrido de la malla.



3. Calcular la corrección a los caudales de cada malla. Para esto se necesitaría las Longitudes de los tramos, Diámetro de la Galería, Coeficiente de Rozamiento, Apertura de las diferentes compuertas (en este ejemplo suponemos que están todas abiertas)

Aplicando la Formula de *Hardy-Cross*

4. Aplicar la corrección de cada malla a los caudales que la componen. En el caso de que un caudal pertenezca a dos mallas, la corrección de otras mallas tendrá signo negativo si el recorrido de la malla tiene distinto sentido que en la primera malla. Esta situación ocurre, para el ejemplo, con la línea 1.
5. Si ya está corregido un caudal en la malla (j) y se repite el ramal en la malla (j+1), se debe copiar el mismo valor, una línea tiene un valor único, y el signo es el que corresponda según el sentido elegido, normalmente el sentido opuesto, valor negativo.
6. Repetir la iteración hasta que el error se considere aceptable. Esta solución corresponde a la iteración numero 200.



3.2 CONCLUSIONES

El método de resolución plantea diferentes ventajas e inconvenientes. Por un lado, es de fácil comprensión y eso hace que el problema se entienda en su totalidad, con los diferentes factores clave que influyen en la ventilación de minas. Esto puede servir como un primer paso en el conocimiento de este campo de la ingeniería.

Sin embargo, hay parámetros que el método no llega a valorar, como puede ser la temperatura del aire en cada punto de la galería y su influencia en la compresibilidad del aire, y a su vez en el caudal por cada tramo. Otro inconveniente es que debemos tener una idea de la solución del problema para poder dar unos valores iniciales que hagan que las iteraciones tiendan a un error pequeño.

Por otro lado, la resolución del método en MATLAB convierte el TFG en un elemento didáctico, el desarrollo de este aplicativo ha requerido el conocimiento de la ventilación en minas desde sus inicios. Ese conocimiento también incluye trabajos más actuales, como el software ya creado, más preciso, con más campos de estudio y desarrollado entre equipos de grandes profesionales. Pero si utilizáramos esos programas para este TFG no partiríamos de la idea principal, asentando las bases de un futuro proyecto más grande. Aun así debemos conocer las soluciones existentes, para poder plantear nosotros una correcta.

3.2.1 Otras Soluciones

3.2.1.1 VnetPC

Es un simulador de red de ventilación originalmente desarrollado por el Dr. Malcolm J. McPherson. Está diseñado para ayudar al personal en la planificación de los diseños de ventilación subterránea. Como el más fácil de usar, la elección económica en la industria para los planificadores de ventilación y las empresas mineras, VnetPC sigue siendo el software de simulación de ventilación más utilizado en el mercado.(VnetPC)

3.2.1.2 VentSim

Ventsim™ es un paquete de software para sistemas de ventilación de minas subterráneas diseñado para modelar y simular la ventilación, flujos de aire, presión, calor, gases, finanzas, radón, fuego y muchos otros tipos de datos de ventilación desde un modelo de túneles y pozos.(VentSim)

3.2.1.3 VUMA

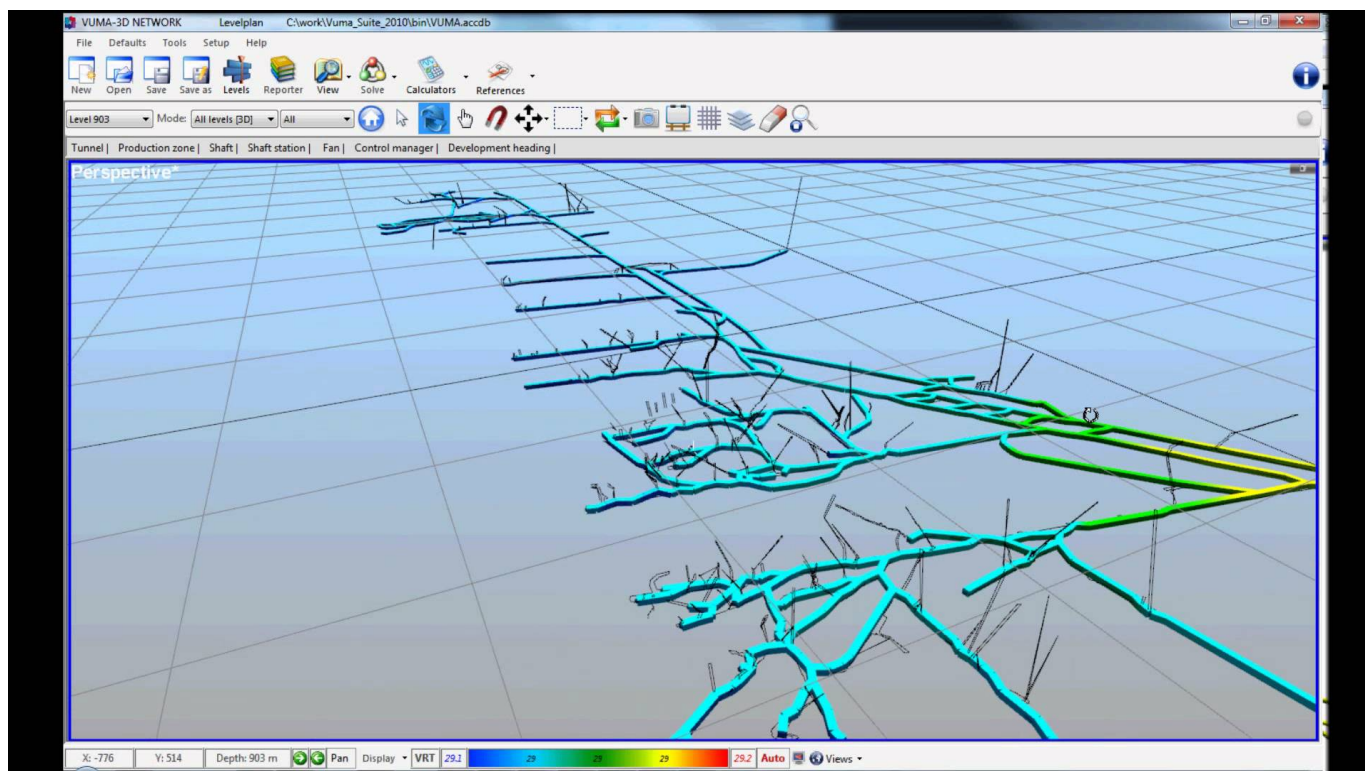


Ilustración 14: VUMA-3D-NETWORK [Fuente: (VUMA Software)]

Desarrollado en Sudáfrica por una entidad de investigación, CSIR, y la empresa de ingeniería, Bluhm Burton Engineering. Es similar a VentSim respecto a los parámetros que intervienen. Simula la ventilación en una mina, con interfaces de gráficas configurables para adaptarse al problema que necesites resolver. (VUMA Software)

3.2.1.4 VenPri

AITEMIN ha desarrollado, mantiene y comercializa el programa VenPri, para el diseño, simulación y cálculo de ventilación principal en minas y obras subterráneas.

Características generales:

- Uso fácil e intuitivo, mediante menús e iconos.
- Presentación clara y completa, tanto en pantalla como en informes impresos.
- Calidad y precisión en el cálculo, ampliamente contrastada en la práctica.
- Ayudas sensibles al contexto y manual incorporado.

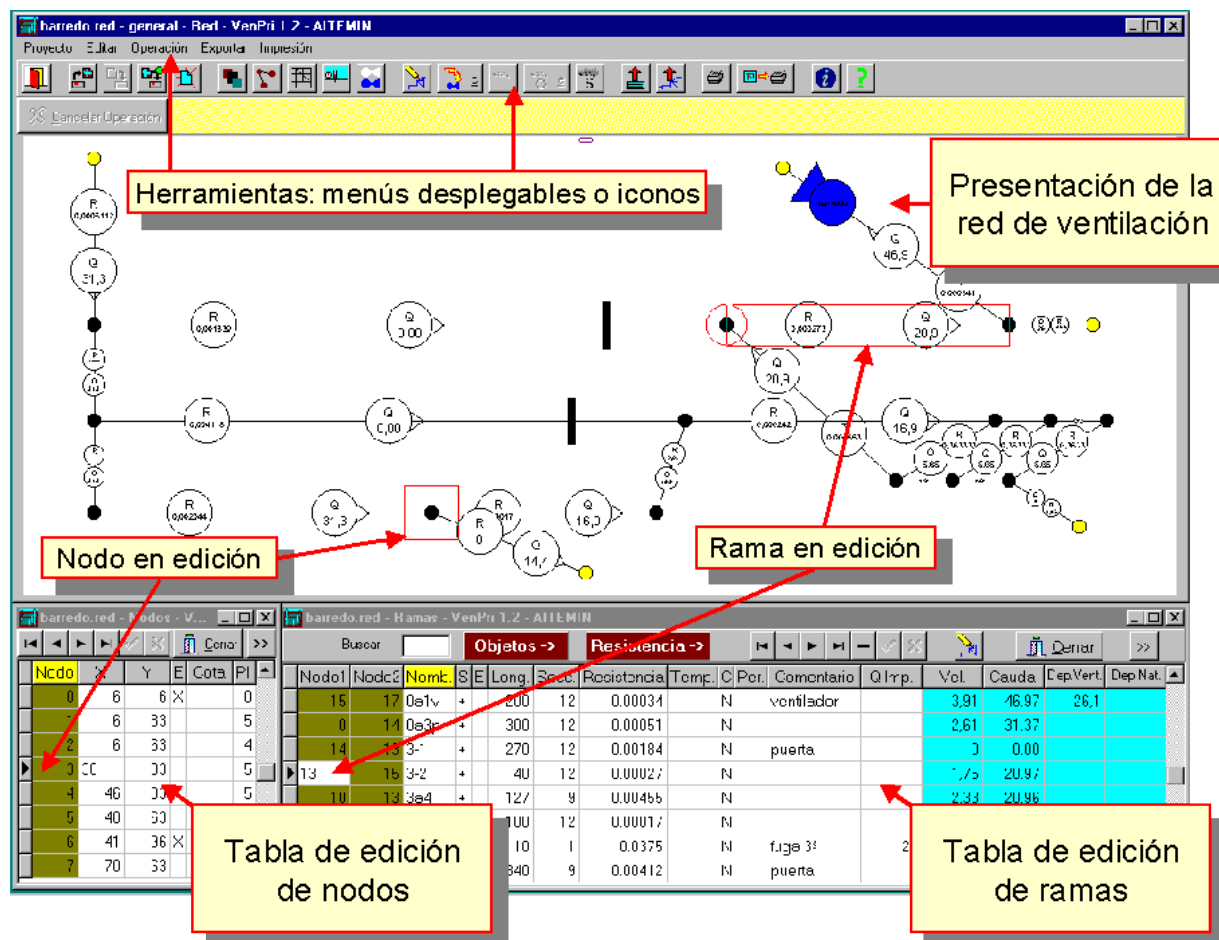


Ilustración 15: Pantalla de trabajo con tres ventanas abiertas: la principal con la vista de la red y las de edición de ramas y nodos. [Fuente:(VenPri)]

Descripción:

- Permite introducir de modo sencillo los datos significativos de redes de ventilación y representarlas de modo gráfico. La estructura de datos se ha hecho extremadamente flexible evitando cualquier clase de limitaciones, ya sea en el número de ramas o el número o tipo de elementos que se pueden colocar en dichas ramas (ventiladores, puertas, etc.).
- Calcula los caudales de la red de ventilación, en función de la estructura de la red, las resistencias de las ramas, las curvas de respuesta de los ventiladores y otros factores. El método de cálculo es rápido y de convergencia asegurada.



Ilustración 16: Ventana de edición de ramas, en la que se están editando los objetos de una de ellas.
[Fuente:(VenPri)]

Prestaciones:

- Para facilitar la entrada de datos permite hacer estimaciones de las resistencias de las ramas en función de su tipo, características y geometría, aplicando unas tablas predefinidas válidas para la mayoría de los casos. También tiene en cuenta los efectos de la ventilación natural.
- Permite hacer el seguimiento de los gases que se desplazan por la red de ventilación y estimar las concentraciones de los gases en cualquier punto de la red tanto en régimen transitorio como estacionario.
- Puede utilizarse como herramienta de simulación para hacer estudios de ventilación, probando distintas variantes e incluso puede servir para diseñar planes de emergencia en casos de averías o de incendios
- Puede trabajar con sistemas de control en tiempo real de la ventilación, por haberse diseñado para poder comunicarse fácilmente con otros programas. (VenPri)

4 PROGRAMACIÓN DE LA RESOLUCIÓN ADOPTADA

4.1 Código de Matlab para el método de Hardy-Cross

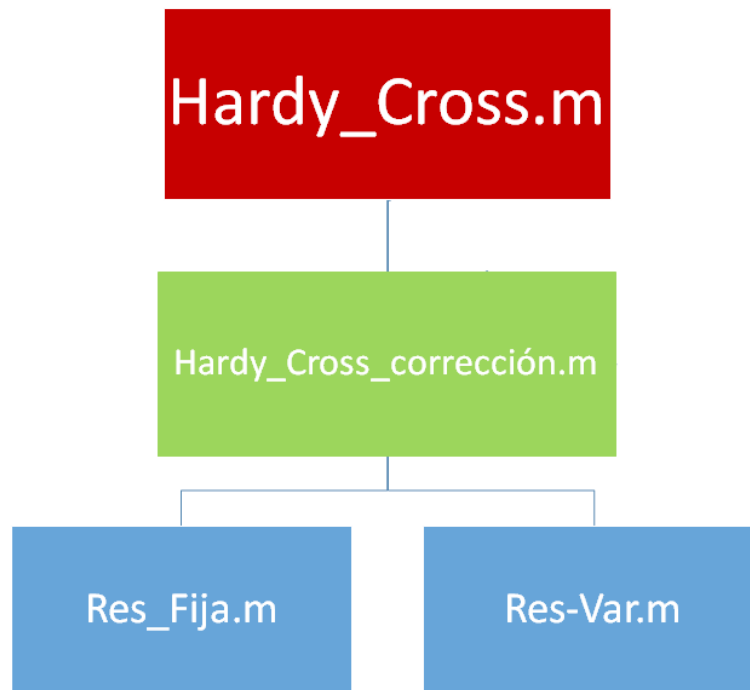


Ilustración 17: Esquema flujo del código

El código de este TFG está compuesto por cuatro funciones que trabajan conjuntamente para la obtención de los caudales en los diferentes tramos de una galería. El más importante es **Hardy_Cross.m** el cuál maneja a todos los demás. El realiza las iteraciones especificadas y obtiene los resultados finales, dentro de la implementación llama a **Hardy_Cross_corrección.m** que se encarga de calcular la corrección a aplicar por el método de Hardy-Cross en cada malla y a cada iteración, para este cálculo se ayuda de las funciones **Res_Fija.m** y **Res_Var.m** que obtienen la resistencia de fija y variable de la galería respectivamente.

4.1.1 Hardy_Cross.m

La función Hardy_Cross.m recibe los parámetros fijos y variables, obtiene la corrección de cada malla por iteración llamando a la función Hardy_Cross_correccion.m y después aplica esa corrección a los caudales de cada tramo. Finalmente muestra los resultados por pantalla.

```
function [Q_corr,correccionmalla]= Hardy_Cross(malla_inicial,D,lambda,num_iter)
%%Función que realiza las iteraciones para obtener los Caudales corregidos
%%Valores de entrada
%%
%%La malla inicial, el Diametro de la Galeria, el coeficiente de rugosidad
%%y el numero de iteraciones
%%
%%Valores de Salida
%%Los caudales corregidos y la corrección de la última iteración
%%
COL_MALLA=1;COL_LONGI=2;COL_CAUDA=3;COL_APERT=4;COL_TRAMO=5;
%%Numero de Mallas
num_mallas=max(malla_inicial(:,COL_MALLA));
%Factores de Corrección de las mallas
corr_mallas= zeros(1, num_mallas);
%Numero de tramos totales
num_tramos = size(malla_inicial,1);

% Bucle para el numero de iteraciones
for iter=1:num_iter
    %Bucle para obtener la corrección
    for i_malla=1:num_mallas
        ind_tramos=find(malla_inicial(:,COL_MALLA)==i_malla);
        malla_bucle=malla_inicial(ind_tramos,:);
        corr_mallas(i_malla)=Hardy_Cross_correccion(malla_bucle(:,COL_LONGI),
malla_bucle(:,COL_CAUDA), D, lambda, malla_bucle(:,COL_APERT));
    end

    %Bucle que aplica la corrección a los caudales a cada tramo
    for i_tramo=1:num_tramos

        i_malla=malla_inicial(i_tramo,COL_MALLA);
        i_tramo_comparte=malla_inicial(i_tramo,COL_TRAMO);

        malla_inicial(i_tramo,COL_CAUDA)= malla_inicial(i_tramo,COL_CAUDA) +
corr_mallas(i_malla);
        %Si el tramo es de una malla se le aplica su factor de corrección
        if i_tramo_comparte>0
            malla_inicial(i_tramo,COL_CAUDA)= malla_inicial(i_tramo,COL_CAUDA)
- corr_mallas(malla_inicial(i_tramo_comparte,COL_MALLA));
        end
    end
end
Q_corr=malla_inicial(:,COL_CAUDA);
correccionmalla=corr_mallas(num_mallas);
```

4.1.2 Hardy_Cross_correccion.m

Función que obtiene la corrección para cada malla a través del método de Hardy-Cross, se definen las variables sumatorias y un bucle que recorra los diferentes tramos. En cada iteración se llama a las funciones Res_Fija.m para el calculo de las resistencias fijas y a Res_Var.m para las resistencias variables, luego es obtenido el sumatorio correspondiente. Por último se calcula el valor de la corrección.

```
function correct = Hardy_Cross_correccion(L_array, Q_array, D, lambda,
Cierre_array)
%%Función que calcula el valor de la corrección aplicada a los caudales por
%%malla
%%Valores de entrada
%%Longitud de los tramos, caudales iniciales, diametro de la galería,
%%coeficiente de rugosidad, y el cierre de las compuertas
%%
%%Valores de Salida
%%Corrección a aplicar a cada caudal
%%
sum_superior = 0;
sum_inferior = 0;

for i = 1:length(L_array)
    res_fija = Res_Fija(D, lambda);
    res_var= Res_Var(Cierre_array(i), D, lambda);
    res_total= res_fija*L_array(i)+res_var;
    sum_superior = sum_superior + res_total*abs(Q_array(i))*Q_array(i);
    sum_inferior = sum_inferior + res_total*abs(Q_array(i));
end

correct=-0.5*sum_superior/sum_inferior;
```

4.1.3 Res_Fija.m

Función que calcula la resistencia fija de cada tramo en función del diámetro y del coeficiente de rugosidad, valores que en la mayoría de los casos no cambian.

```
function res_fija = Res_Fija (D, lambda)
%%Función que calcula la resistencia fija de la galeria
%%
%%Valores de entrada
%%D: diametro del tramo
%%lambda: coeficiente de rugosidad
%%
%%Valores de salida
%%res_fija: resistencia fija del tramo

S= pi*(D/2)^2; %sección del tramo
Per=2*pi*(D/2);%perimetro del tramo

res_fija=15.3*lambda*Per/(S^3)/1000;
```

4.1.4 Res_Var.m

Función que calcula la resistencia variable, la cual depende de la apertura de las compuertas en los diferentes tramos.

```
function res_var = Res_Var (Alto, D, lambda)
%%Función que calcula la resistencia variable de la galeria
%%Valores de entrada
%%Alto: Altura del obstáculo o cierre de compuerta
%%D: Diametro del tramo
%%lambda: Coeficiente de rugosidad de la tramo
%%Valores de salida
%%res_var: resistencia variable del tramo
Area_Compuerta = Alto*3/4*Alto;
S= pi*(D/2)^2 - Area_Compuerta;
Per=(pi*D)+(7/2*Alto);

if Area_Compuerta == 0
    res_var = 0;
else
    res_var=15.3*lambda*Per/(S^3)/1000;
end
```

4.2 Ejemplo en Matlab del problema de 2 talleres

4.2.1 datos2talleres.m

En primer lugar, se deben establecer los valores necesarios para la resolución del problema. Esta parte del código define una matriz con todos los parámetros variables del sistema de ventilación. Posteriormente se establecen los parámetros fijos, como son el diámetro, el coeficiente de rugosidad y el número de iteraciones. Por último, se hace una llamada a la función *Hardy_Cross.m*.

```
%Establezco Parámetros Variables
% malla inicial[ -Nºde malla -Longitud (m) -Caudal (m3/s) -Apertura(m) -Tramo
Compartido]
malla_inicial = [ 1 300 -60 0 0 ;
                  1 200  90 0 0 ;
                  1 100  30 0 6 ;
                  2 300 -90 0 0 ;
                  2 200  60 0 0 ;
                  2 100 -30 0 3 ;
                  ];
%Establezco Parámetros Fijos
%Diametro de Galería
D = 4;
%Coeficiente de Rugosidad
lambda=0.3;
%Numero de Iteraciones
num_iter=10;

%Hago la llamada a HardyCross
Q_corr=Hardy_Cross(malla_inicial,D,lambda,num_iter)
```

4.2.2 Salida

```
>> datos2talleres

Q_corr =

-67.4235
 82.5765
  0.0000
-67.4235
 82.5765
-0.0000
```

4.3 Interfaz de Usuario

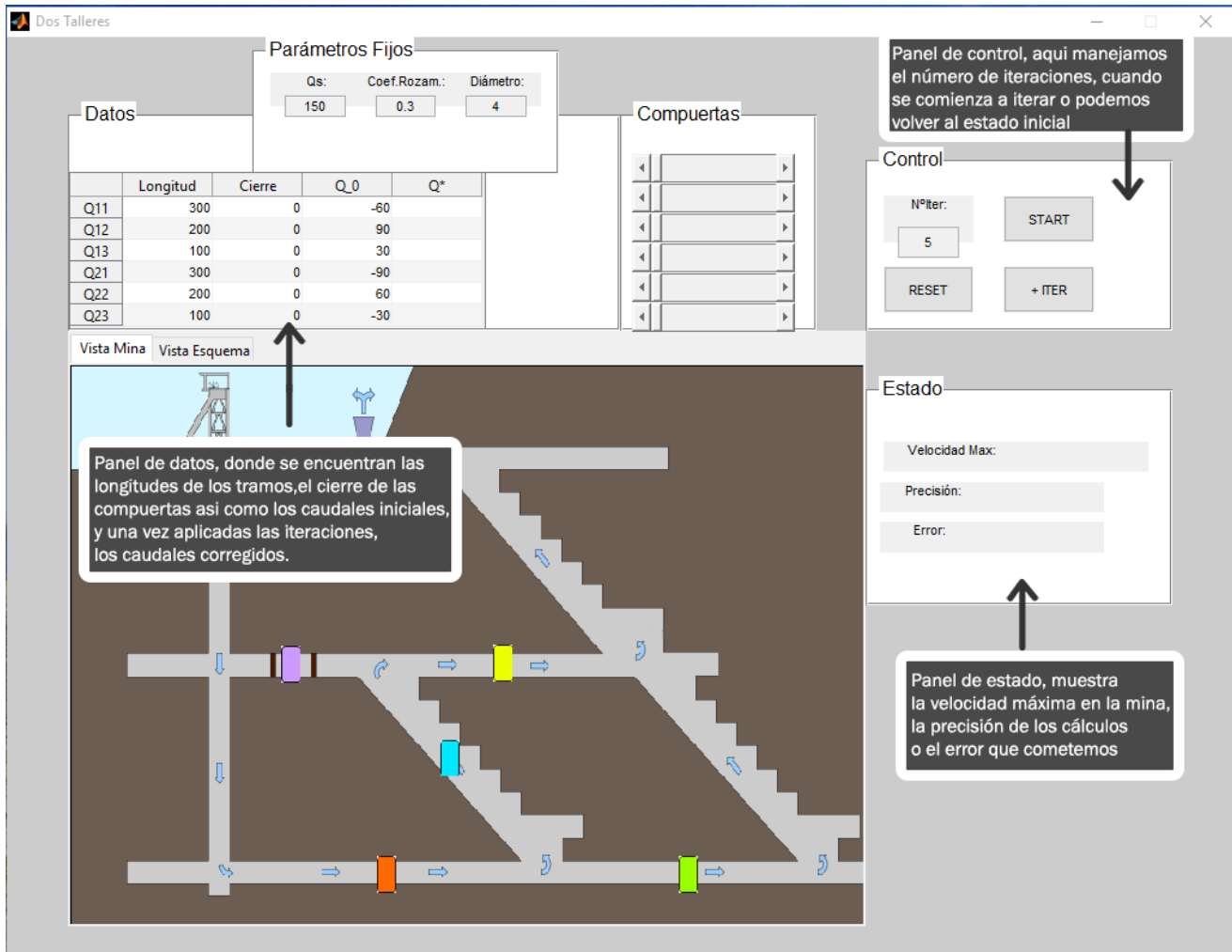


Ilustración 18: Interfaz Gráfica de la aplicación con sus diferentes paneles

Interfaz que aparece cuando ejecutamos la aplicación, compuesta por diferentes paneles, que definen los datos necesarios para la resolución de la ventilación en un caso dado de una mina de dos talleres.

Disponemos de un panel de datos, en el que podemos especificar las longitudes de los tramos, el cierre de las compuertas o los caudales iniciales.

Por otro lado tenemos un panel para los parámetros fijos, los cuales solo se pueden modificar antes de empezar a iterar, ya que son constantes en todas las iteraciones y necesarios para la obtención de los valores de estado.

Se presenta también unos sliders para el cómodo control del cierre de las compuertas.

El panel de control se encuentra en la parte superior derecha, y nos permite definir el número de iteraciones y también cuando comenzamos a iterar para llegar a la resolución del problema.

Por último, tenemos un panel de estado, que muestra parámetros que definen como esta la minas en cada momento, como puede ser la velocidad máxima en toda la galería entre los diferentes tramos, la precisión de calculo y el error que cometemos.

A continuación se muestran diferentes imágenes que muestran el funcionamiento de la aplicación:

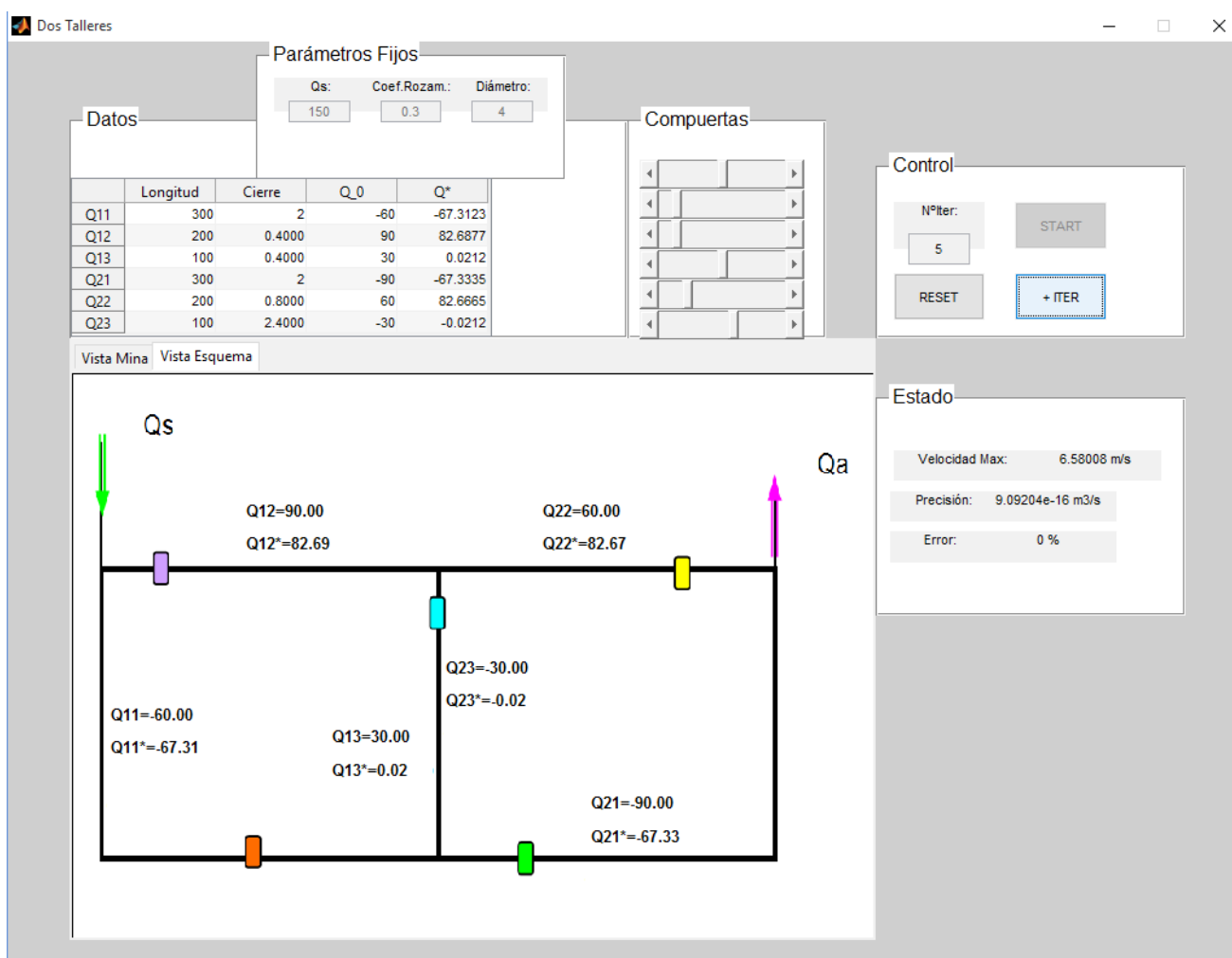


Ilustración 19: Interfaz gráfica ejecutada con 5 iteraciones, y con la vista del esquema

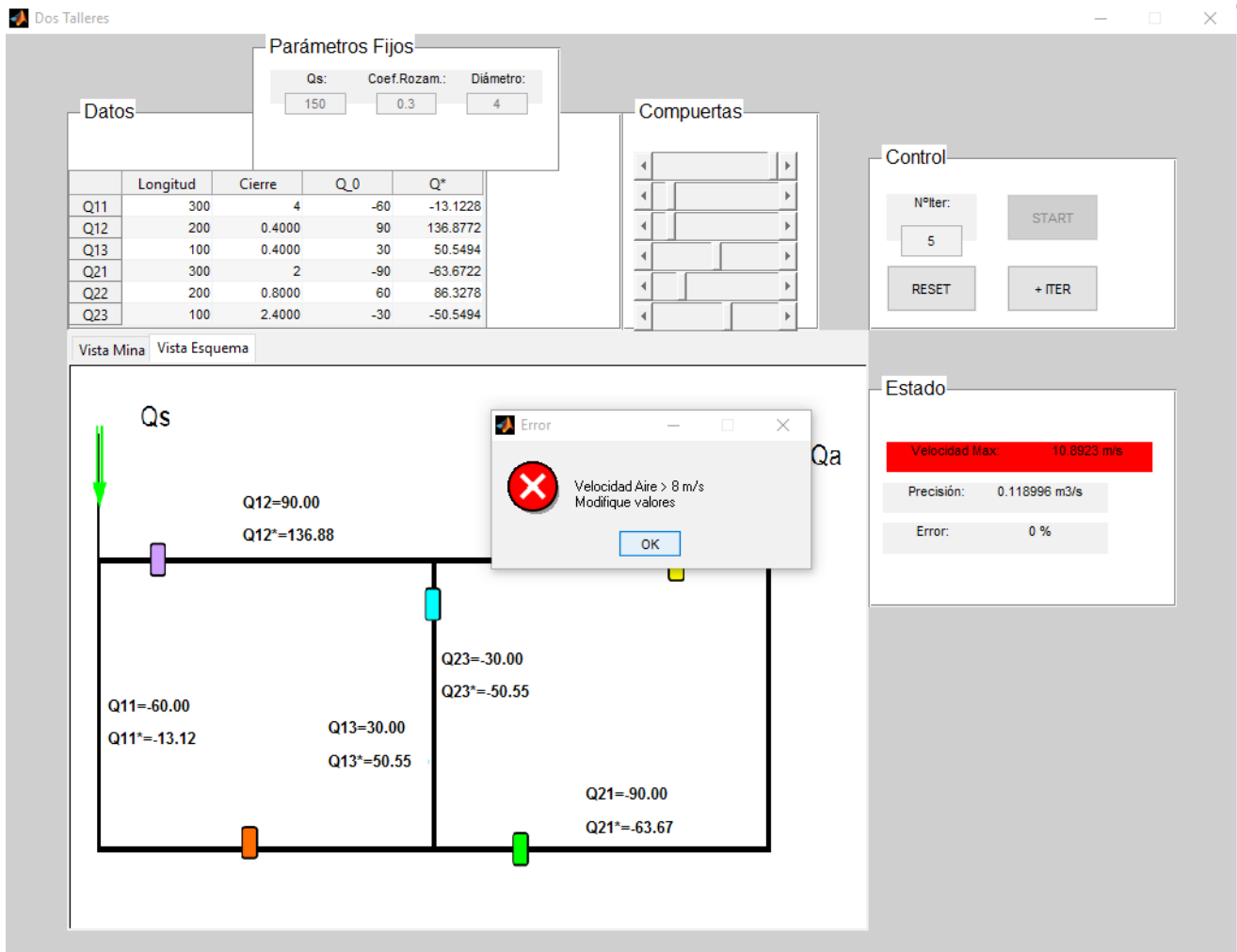


Ilustración 20: Interfaz gráfica cuando la velocidad máxima supera los límites establecidos

MATLAB

4.4 HERRAMIENTA DE PROGRAMACIÓN

MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían racionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional.

MATLAB dispone de un amplio abanico de programas de apoyo especializados, denominados Toolboxes, que extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos Toolboxes cubren prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación, destacando entre ellos el 'toolbox' de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neurales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc. es un entorno de cálculo técnico, que se ha convertido en estándar de la industria, con capacidades no superadas en computación y visualización numérica.

integra los requisitos claves de un sistema de computación técnico: cálculo numérico, gráficos, herramientas para aplicaciones específicas y capacidad de ejecución en múltiples plataformas. Esta familia de productos proporciona al estudiante un medio de carácter único, para resolver los problemas más complejos y difíciles.

MATLAB nace como una solución a la necesidad de mejores y mas poderosas herramientas de calculo para resolver problemas de calculo complejos en los que es necesario aprovechas las amplias capacidades de proceso de datos de grandes computadores.

El nombre MATLAB viene de "matrix laboratory" (laboratorio matricial). MATLAB fue originalmente escrito para proveer acceso fácil al software matricial desarrollado por los proyectos LINPACK y EISPACK, que juntos representan el estado del arte e software para computación matricial. Hoy MATLAB es usado en una variedad de áreas de aplicación incluyendo procesamiento de señales e imágenes, diseño de sistemas de control, ingeniería financiera e investigación médica. La arquitectura abierta facilita usar MATLAB y los productos que lo acompañan para explorar datos y crear herramientas personalizadas que proveen visiones profundas tempranas y ventajas competitivas.(Garcia, 2005)

4.4.1 Puntos Fuertes

- Con una optimización adecuada, es rápido de ejecución y de alta precisión.
- Convierte en trivial, un calculo que a mano resultaría muy laborioso.
- Te permite desarrollar una interfaz gráfica, facilitando la comprensión del problema por parte del usuario.
- Dispone de una gran comunidad de desarrolladores que pueden servir como apoyo técnico ante un problema en la implementación del código.
- Amplio soporte matemático, puedes resolver tu problema con diferentes métodos.

4.4.2 Puntos Débiles

- Problemas eventuales de velocidad.
- Se debe depurar el código a conciencia, ya que es muy fácil cometer errores.
- Las herramientas de debugging y profiling no son sencillas de utilizar.
- El ordenador donde se usará la aplicación debe tener instalado MCR(MATLAB Component Runtime) para que los archivos MATLAB funcionen correctamente.
- Distribución de ejecutables complicada.

5 Bibliografía

Eduardo Antonio 2015: Dominguez E.A., Ventilación de Minas, 2015,
<http://myslide.es/documents/ventilaciondeminas.html>

Manual Ventilación: Carrasco Galán, José. Alarcón Rojas, David., Manual de ventilación de minas y obras subterráneas, 2011

Construmatica: , , , construmatica.com

Carrasco, 2011: Carrasco J. , Rojas D., Manual de ventilación de minas y obras subterráneas, 2011

VnetPC: Mine Ventilation Services, , , <https://www.mvsengineering.com/index.php/products>

VentSim: Vent Sim Australia, , , <http://www.ventsim.com/es/>

VUMA Software: CSIR and Bluhm Burton Engineering, , , <http://www.vuma.co.za/#>

VenPri: AITEMIN, , , http://www.aitemin.es/producto_venpri.html

Garcia, 2005: García J. , Rodríguez J. I. , Vidal J., Aprenda Matlab 7.0, 2005