

ESTUDIO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN A IMPLEMENTAR EN LA AMPLIACIÓN DE UNA MINA METÁLICA MEDIANTE EL SOFTWARE VENTSIM

Cipriano López Fanjul^[*], Mónica Galdo^[**]
[*] Alumno; [**] Tutor

UO66330@uniovi.es; cipriano.lopezfanjul@hotmail.com

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

El presente documento trata sobre la evaluación y dimensionamiento de los equipos de ventilación existentes y a instalar en una mina metálica explotada por el método de sub-level caving.

Para ello, se utilizó el software específico de ventilación VentSim, que permite simular y predecir tendencias en los sistemas de ventilación de infraestructuras subterráneas tanto a tiempo real como para realizar previsiones a futuro.

ABSTRACT

La explotación de la mina arrancó en 1989, siguiendo un cuerpo mineral cuya disposición se puede asumir como ligeramente subvertical, hasta una profundidad aproximada de 600m (nivel de explotación -190).

Las últimas campañas de testificación realizadas desde una galería existente ayudaron a identificar una serie de masas minerales "satélite" entre las cuales destaca por el volumen de sus reservas minerales y por su alta ley la denominada Masa Profunda (MP), situada al norte del cuerpo mineral principal entre los niveles -140 y -500.

La MP, es a día de hoy un recurso indicado situado aproximadamente a 150 m de distancia horizontal de las labores mineras existentes.

Este trabajo recoge una revisión de las condiciones de ventilación existentes en la explotación e investiga los requerimientos para planificar un sistema de ventilación

económicamente viable para el desarrollo de los trabajos de explotación de MP.

Para ello se realizaron diversas simulaciones numéricas mediante el software VentSim, específico para proyectos de optimización de sistemas y redes de ventilación. Finalmente se determinó el sistema que mejor se adapta a las nuevas operaciones mineras considerando su compatibilidad con las infraestructuras actuales, los ventiladores instalados, los equipos en operación, la distribución del sistema eléctrico, la planificación a futuro y los costes de capital y operación.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de ventilación de las minas tienen un carácter dinámico dado que las explotaciones se encuentran en continua transformación. Periódicamente es necesario actualizarlos conforme los desarrollos van experimentando modificaciones.

La empresa concesionaria de los derechos de explotación tiene en operación dos minas subterráneas, que llamaremos 1 y 2. La mina subterránea 1, objeto del presente trabajo, nació como un proyecto de optimización en profundidad de la explotación a cielo abierto que benefició el ámbito superior del cuerpo mineralizado.

Actualmente se están desarrollando diversas labores mineras para alcanzar el dominio profundo del cuerpo y teniendo en cuenta la futura explotación de la denominada Masa Profunda.

Cuando se acometa la explotación de MP, es posible que el sistema de ventilación actual no sea suficiente para mantener los

requerimientos de aire en cuanto a calidad y cantidad para el correcto desarrollo de los trabajos. Por lo tanto, para asegurar la compatibilidad y flexibilidad del sistema de ventilación con la futura extensión de la mina, se abordarán y estudiarán distintos escenarios mediante el paquete de simulación VentSim.

SITUACIÓN ACTUAL

El acceso a la mina 1 se realiza a través de una bocamina excavada en un banco de la explotación a cielo abierto en la cota 365msnm (la superficie del terreno está aproximadamente a 475). La rampa de acceso está ubicada al oeste del cuerpo mineral, habiéndose desarrollado en dirección Este una serie de accesos al mineral cada 25m de cota. El método de explotación aplicado es el de sub-level caving (SLC) con extracción del mineral en retirada.

Actualmente, la producción se centra en los niveles -40 y -65, estando en desarrollo diversas infraestructuras en los niveles -65 y -90. Se han abierto varios tajos de producción aislados en las mineralizaciones "satélite" en los niveles -15, -40 y -65. Por su parte, el frente de avance de la rampa principal se sitúa entre los niveles -90 y -115.

BREVE RESEÑA GEOLÓGICA

La explotación (Figura 1) se encuentra enclavada en un área geológica limitada por un cinturón de esquistos, que se divide en dos dominios: Este y Oeste. El dominio Este comprende una estructura compleja y alargada con una alineación norte-noroeste que presenta una secuencia de rocas máficas, ultramáficas, ígneas félsicas y sedimentarias. El sector Oeste está formado por una serie de pliegues cerrados formados por rocas máficas y ultramáficas que se sitúan sobre un lecho de rocas de origen sedimentario.

La mina 1 está localizada en el paquete de rocas sedimentarias, en la base del cual se encuentra el depósito mineral encajado en una masa de conglomerados de origen máfico. En los dominios más superficiales, el muro de la mineralización (ya explotada a cielo

abierto) estaba compuesto por un nivel de arenisca. Debido a la flexión que presenta el cuerpo mineral en el entorno del nivel 85 (aproximadamente), este estrato pasa a disponerse como techo de la mineralización en profundidad.

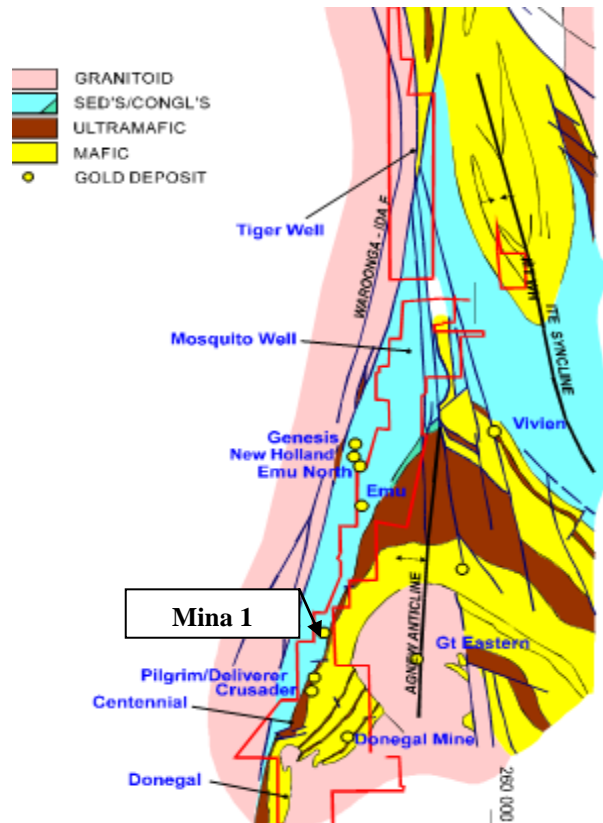


Figura 1. Mapa geológico de la zona

SISTEMA DE VENTILACIÓN ACTUAL

El sistema de ventilación adoptado ejemplifica una configuración de dos ventiladores aspirantes (o extractores) en paralelo (Figura 2). Se trata de un sistema de ventilación principal aspirante ascendente compuesto por dos equipos centrífugos instalados en el exterior de la mina.

Los ventiladores principales son: 1 unidad Richardson tipo 1780CY a 535 r.p.m. y 1 unidad Howden tipo HS 288 330 a 315 r.p.m.

Ambos airean de modo autónomo distintos niveles de explotación, pudiendo regularse la circulación de aire a través de los mismos según su nivel de actividad.

El circuito de ventilación principal está formado por la rampa principal o de acceso y un pozo de evacuación (entradas de aire), los niveles de explotación y dos pozos de ventilación que componen los retornos del sistema hacia el exterior.

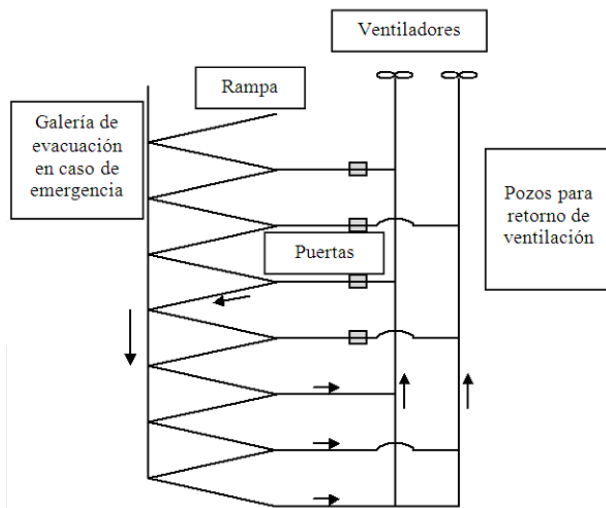


Figura 2. Esquema de ventilación de la mina 1

El sistema de aireación secundaria está formado por ventiladores y conductos o tuberías de ventilación, que aseguran el suministro de aire a los desarrollos que se estén ejecutando en fondo de saco (fuera del circuito principal de ventilación). Adicionalmente, se ejecutaron pozos de ventilación entre los distintos niveles de producción para mejorar la ventilación secundaria.

El buzamiento del cuerpo mineral decrece en profundidad, por lo que los niveles inferiores adquieren mayores longitudes de desarrollo, dificultándose la ventilación de los frentes activos. Estos pozos de ventilación, situados en las proximidades de la zona de explotación, representan ramas en paralelo a las principales entradas de aire del circuito de ventilación (rampa y galería de evacuación),

por lo que ayudan a disminuir la resistencia equivalente total de la mina.

Requerimientos de ventilación

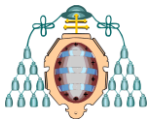
La determinación de los requerimientos de ventilación se ha realizado conforme a los estándares de seguridad y salud del país, concretamente atendiendo a las disposiciones y cláusulas recogidas en el Reglamento Minero vigente.

La principal consideración es la de asegurar un caudal suficiente de aire para diluir el máximo volumen de gases generado por los vehículos diesel que operan en el interior de la mina, tanto en las zonas de producción (cámaras), como en los desarrollos lineales (galerías en fondo de saco). El Reglamento Minero estipula que el caudal total de diseño será superior al sumatorio de los caudales individuales necesarios para cada uno de los equipos diesel activos, con excepción de vehículos ligeros para transporte de personal, jumbos electrohidráulicos y perforadoras de producción, todos ellos con motores diesel de baja capacidad y con coeficientes de simultaneidad muy bajos debido a la intermitencia de su utilización.

Las Disposiciones Internas de Seguridad (DIS) de la empresa establecen que en cualquier zona de trabajo en la que circulen equipos diesel, el caudal de ventilación no será inferior a 2,5 m³/s. Además, el volumen de aire requerido se calculará en función de una estimación de los niveles de emisiones máximos en puntos de funcionamiento críticos de los motores.

El listado de vehículos diesel que se tiene en cuenta para el cálculo de las necesidades de ventilación se muestra en la siguiente Tabla 1.

Vehículo	Potencia [kW]	No.	Caudal [m ³ /s]
Volquete perfil bajo	485	4	96,0
Pala LHD	268	2	26,8
Pala cargadora	200	1	10,0
Pala cargadora	96	1	No consid.



Motoniveladora	104	1	No consid.
Pala transporte	93	1	No consid.
Total			135

Tabla 1. Necesidades de ventilación para los equipos operativos en la mina 1

PLANIFICACIÓN DE LA VENTILACIÓN

En la planificación de los desarrollos que dan lugar al circuito de ventilación principal de la nueva explotación se modificaron por diversas razones la pendiente y las dimensiones de la rampa de acceso a MP en relación a la rampa de acceso actual.

La pendiente pasará del 10% al 15%, mientras que las dimensiones de la sección transversal de la nueva rampa serán de 5x5m, respecto a las dimensiones de la rampa existente, que son de 6mx6m. Estos cambios reducen la longitud total de la rampa principal de acceso y el volumen de estériles generado, así como una importante disminución en los costes de sostenimiento de galerías. Estos cambios también influyen en la elección de los equipos que operarán en el interior de la mina debido a posibles incompatibilidades en cuanto a sus dimensiones.

La planificación de equipos (realizada por el Departamento de Planificación de la compañía) así como sus consumos y emisiones diesel fueron trasladados posteriormente a las simulaciones con VentSim.

PROCESO DE MODELIZACIÓN

Programa VentSim

La simulación de la red de ventilación se ha llevado a cabo con el programa VentSim. La evaluación del circuito se basa en la metodología de cálculo y resolución de redes de Hardy Cross, un método de tipo iterativo utilizado para el ajuste de caudales hasta obtener una solución válida con un margen de error acotado.

Posibilidades de VentSim

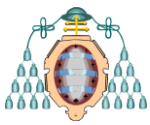
Como herramienta de trabajo, VentSim ofrece las siguientes posibilidades:

1. Simular y proporcionar el reparto de caudales en minas existentes y no existentes.
2. Predecir tendencias en el comportamiento general del circuito de ventilación de manera previa a la ejecución de un desarrollo planificado.
3. Herramienta de ayuda en la planificación a corto y largo plazo de los requerimientos y necesidades de ventilación.
4. Asistencia en el proceso de selección de ventiladores principales y secundarios, conductos, tuberías y otros accesorios del sistema de ventilación, como puertas y reguladores.
5. Análisis económico de distintas opciones.
6. Simulación de tendencias de propagación de gases contaminantes, humo y polvo para simulación de situaciones de emergencia y evacuación.

Procedimiento de modelización con VentSim

Un modelo de VentSim se crea sobre una base de datos a obtener a partir de las campañas de medición de ventilación, de las características geométricas de los desarrollos mineros y de las especificaciones técnicas de equipos. El usuario procede de la siguiente manera:

1. Introducir o importar a VentSim las especificaciones, dimensiones y geometría de los desarrollos mineros que forman parte del circuito de ventilación (longitudes, secciones transversales, perímetro de las secciones, coeficientes de rozamiento de las superficies, geometría, etc.).
2. Chequeo previo a la simulación, es decir: asegurarse de que se han introducido correctamente los datos geométricos y de dimensiones, que las entradas y salidas de aire están operativas y que las pérdidas de carga en puntos singulares han sido



incluidas en las características de la correspondiente rama.

3. Fijar el/los caudal/es de entrada que se han medido en la mina.
4. Proceso de calibración del sistema: modificar las resistencias teóricas introducidas/calculadas hasta ajustar el caudal circulante por las ramas de manera que sea fiel a los datos obtenidos en las mediciones de mina.
5. Introducir las curvas de los ventiladores principales.
6. Comprobar que la curva de funcionamiento introducida en el sistema corresponde con el punto de trabajo real del ventilador.

Simplificación del modelo real

La representación de la red de ventilación de la mina 1 se obtuvo importando el modelo 3D de Surpac. El modelo original tiene un elevado grado de complejidad que no es necesario simular al completo para conocer el comportamiento de la ventilación en las nuevas labores de MP.

Se realizó una simplificación de la estructura sustituyendo el circuito de ventilación existente por otro compuesto por un menor número de ramas con una disposición relativa equivalente. La infraestructura principal de la Masa Profunda, compuesta por una rampa y una espiral, fue transformada en una única rama estática. Las singularidades propias de las galerías transformadas se introdujeron incrementando la longitud equivalente de cada tramo. El modelo conceptual de la mina se puede observar en la Figura 3: en azul se distinguen las labores existentes, en verde la ampliación hacia la Masa Profunda y en rojo el modelo simplificado.

Caracterización del esquema

En la simulación del esquema se utilizaron tres tipos de ramas: rampas, galerías y pozos (de evacuación y ventilación):

- a) *Características de las rampas y otros desarrollos mineros (p.ej.: galerías de nivel):*

Dimensiones: 6m×6m (5x5 para las nuevas labores)

Método de excavación: perforación y voladura. Se considera un coeficiente de fricción de las paredes de $0,01 \text{ Ns}^2/\text{m}^8$

Se colocaron puertas de ventilación en los accesos a los niveles de explotación de manera que las fugas de caudal se mantuvieron entre $0,5$ y $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Incremento de la longitud equivalente en algunas ramas (25m) para simular las pérdidas de carga que se producen en curvas de 180° (espiral).

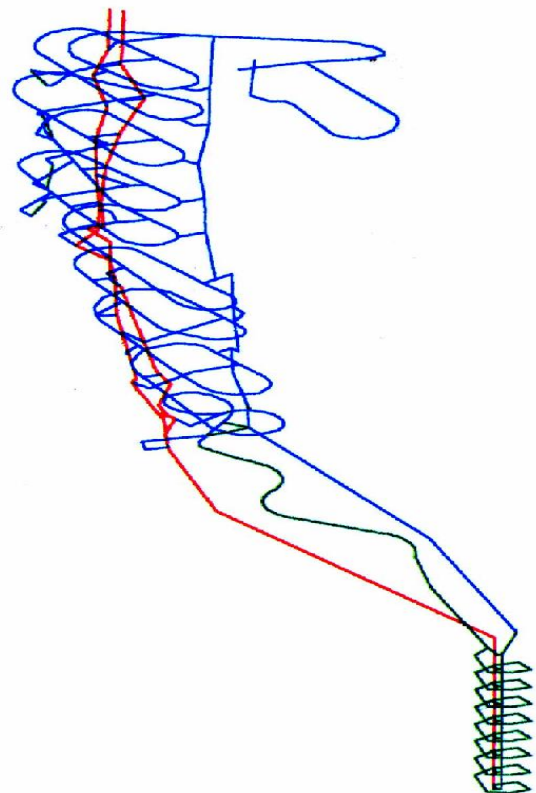
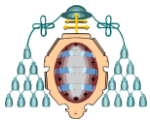


Figura 3. Modelo simplificado de la mina 1



b) Características de los pozos de evacuación:

Diámetro de los pozos:

∅ = 2,4 m en los pozos situados por encima del nivel 10;

∅ = 1,8 m en los pozos situados entre el nivel 10 y el nivel -90.

∅ = 1,5 m en los pozos inferiores al nivel -115.

Caudal de aire fijo: 10 m³/s

Método de excavación: Raise-boring. Se considera un coeficiente de fricción de las paredes de 0,004 Ns²/m⁸

En los accesos a los pozos se colocaron puertas con una estanqueidad elevada. Las fugas simuladas se establecieron entre 0 y 0,5 m³/s.

c) Características de los pozos de ventilación:

Diámetro de los pozos:

∅ = 2,4m en los pozos entre la superficie y el nivel 210.

∅ = 3,1m en los pozos situados entre los niveles 210 y -140.

∅ = 3,6 m en los pozos situados entre los niveles -140 y -390.

Método de excavación: Raise-boring, por lo que el coeficiente de fricción de las paredes es de 0,004 Ns²/m⁸

Ventilador aspirante tipo Howden HS 288 330 en cabeza de uno de los pozos de ventilación exterior.

Ventilador aspirante tipo Richardson 1780CY en cabeza del otro pozo de ventilación exterior.

Para optimizar el sistema de ventilación en la zona de explotación de la Masa Profunda en términos de cantidades y calidades del aire se estudiaron las siguientes cuestiones:

- Análisis de distintas opciones para el transporte.

- Rangos de trabajo de los ventiladores en función de distintas configuraciones del circuito de ventilación principal.
- Estudio de alternativas para el circuito de evacuación.
- Selección de nuevos ventiladores.
- Análisis de costes de inversión y de operación.

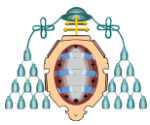
Opciones para llevar a cabo el transporte de mineral

Como se explicó anteriormente, se decidió reducir las dimensiones de la rampa de acceso al sector MP, debiéndose garantizar un margen de espacio lateral de 0,9 m respecto a los hastiales, de acuerdo al Reglamento Minero vigente. Por lo tanto, los volquetes que se están utilizando en la operación actual (CAT 73D) no serán aptos para circular por la nueva rampa de acceso a la Masa Profunda. A partir de esto, se plantean tres escenarios de transporte en las nuevas condiciones:

- Carga en dos fases.
- Carga automática con tolva en piqueras.
- Carga directa pala-volquete.

En todos los escenarios se consideran despreciables las emisiones de algunas unidades de carga y transporte como son: las palas cargadoras CAT IT28B y UC500, la motoniveladora CAT 12H y los vehículos de transporte de personal debido a los bajos coeficientes de simultaneidad que se manejan para estos vehículos.

Vehículo	Potencia [kW]	Núm.	Caudal [m ³ /s]
Volquete 69D	380	2	36,0
Volquete 73B	485	2	48,0
Cargadora Elphinstone R2900	268	1	13,4
Cargadora Elphinstone R1700	231	1	11,6



Cargadora 980C	200	1	10,0
Total			120

Tabla 2. Carga en dos fases

Vehículo	Potencia [kW]	Núm.	Caudal [m ³ /s]
Volquete 69B	380	2	36,0
Volquete 73B	485	2	48,0
Cargadora Elphinstone R1700	231	1	11,6
Cargadora 980C	200	1	10,0
Total			106

Tabla 3. Carga automática con tolva en piqueras

Vehículo	Potencia [kW]	Núm.	Caudal [m ³ /s]
Volquete 69D	380	4	72,0
Cargadora Elphinstone R1700	231	1	11,6
Cargadora 980C	200	1	10,0
Total			94

Tabla 4. Carga directa pala-volquete

Se optó por la tercera opción, ya que desde el punto de vista de costes es la más viable.

Opciones de ventilación de la zona profunda

Se llevaron a cabo tres simulaciones para determinar en cada uno de los casos la depresión que ha de generar el/los ventilador/es para hacer llegar el caudal de aire limpio requerido a la zona de explotación:

1. Modificar o sustituir el ventilador Howden, debido a que proporciona rangos de trabajo con bajas presiones.
2. Instalación de un booster en la rampa, próximo a MP.

3. Colocación de un booster en serie con el ventilador Howden de superficie.

- a. Modificación o sustitución (vent. Howden):

La resistencia de los niveles de la mina varía en función de la actividad que se registre en cada uno de ellos (cámaras abiertas o cerradas, apertura o cierre de puertas de ventilación o reguladores, piqueras llenas o vacías, presencia de vehículos, etc.).

Estos cambios en el desarrollo de la explotación provocan que el punto de funcionamiento de los ventiladores se modifique, alterándose la presión que deben proporcionar para hacer llegar el aire a las zonas donde es preciso (en este caso la MP).

En este caso, tras realizarse la simulación se observa que las condiciones de operación del ventilador Howden no son satisfactorias ya que la curva resistente de la mina no corta las curvas de funcionamiento del equipo, como se puede ver en la Figura 4. Es evidente que las características del equipo no permiten suministrar bajos caudales a altas presiones, por lo tanto, o bien se debería modificar el ventilador para que la velocidad de giro del motor sea inferior (ya que es de tipo centrífugo) o habría que sustituirlo por otro que se ajuste mejor a las condiciones exigidas.

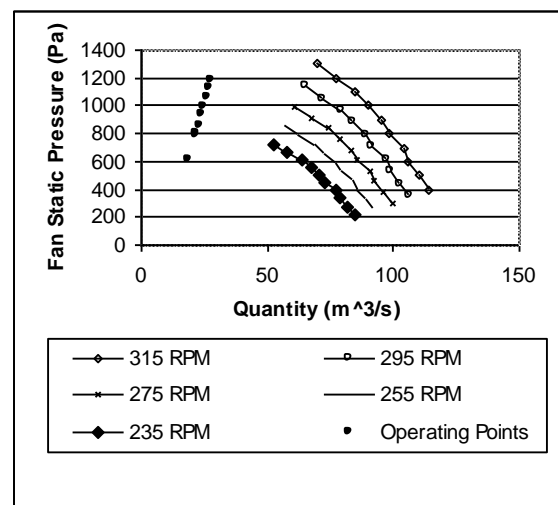
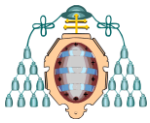


Figura 4. Curvas de funcionamiento del ventilador centrífugo a distintas RPM. Curva resistente de la mina en las condiciones de estudio definidas



Se modelizó el circuito ensayando con un ventilador tipo AL1200, que resulta adecuado a las condiciones futuras de la mina (Figura 5). Dado que se trata de un ventilador de tipo axial, al regular el ángulo de incidencia de los álabes se obtienen distintas curvas, lo que permite poder buscar la máxima eficiencia para cada momento de evolución de la mina, debido a la adaptabilidad que ofrecen este tipo de equipos.

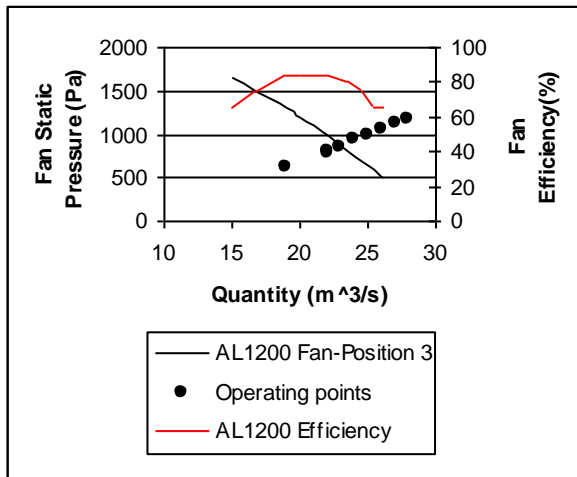


Figura 5. Ventilador con regulación de álabes en posición 3

b. Instalación de un booster en la rampa próximo a MP:

Esta ubicación permitirá que el ventilador trabaje en serie con los dos ventiladores principales exteriores. El booster ha de trabajar en un punto de funcionamiento que permita asegurar que el ventilador primario Howden opere fuera del régimen de bombeo.

Al encontrarse en serie con los dos ventiladores exteriores, el booster moverá un caudal de aire elevado a altas presiones, modificando las curvas de funcionamiento de los ventiladores exteriores: por un lado, permitirá trabajar a la unidad Howden a elevadas presiones, pero por el otro lado ejercerá un efecto negativo sobre el ventilador Richardson, que no podrá alcanzar elevadas eficiencias.

Esta opción requiere una cierta inversión económica y técnicamente es muy mejorable. No obstante, su instalación podría justificarse para un corto plazo de vida de la mina, dado que la sustitución de ventiladores principales tiene un coste económico mucho mayor.

c. Instalación de un booster en serie con el ventilador principal Howden:

El ventilador principal controla y regula el caudal que impulsa el booster. Además, al estar colocados en serie, el booster compensa la curva del ventilador principal, que tiene rangos de funcionamiento presiones muy bajas.

A pesar de esto, esta disposición limita de manera importante el funcionamiento del booster, que alcanza rendimientos muy bajos, por lo que se descartó para posteriores análisis.

Estudio de alternativas para el circuito de evacuación en la zona MP

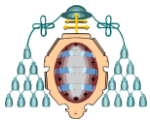
Actualmente está disponible una ruta de evacuación que está bañada por aire fresco en su totalidad. Este circuito de emergencia se encuentra aislado de la rampa de acceso principal mediante un sistema de puertas estancas.

En caso de emergencia, el personal llevará a cabo la evacuación a través de esta ruta, accediendo por las puertas hacia puntos seguros denominados "bases de aire fresco".

En los futuros desarrollos de la Masa Profunda, se ejecutará una vía de evacuación que se conectará con la ya existente por medio de un pozo vertical de 1,5 m de diámetro. Este pozo de evacuación se ubicará adyacente al pozo de ventilación (retorno de aire de la mina hacia el exterior). Inicialmente se barajaron otras tres alternativas:

1. Vía de evacuación a través del retorno de ventilación equipada con cámara refugio.
2. Conducciones de acero.
3. Ampliación de la red actual.

Se define cada una de ellas:



a. Vía de evacuación a través del retorno de ventilación:

Debido al elevado coste que representa ejecutar una vía de evacuación que disponga de aire fresco independiente del resto de desarrollos, se propuso establecer una vía de evacuación a través del retorno de ventilación en el sector MP.

En esta zona de la explotación se instalarían varias cámaras refugio en distintos niveles, próximos a los pozos de ventilación interiores, que servirían de vía de escape (mediante escaleras de gato) y a su vez como retorno del aire viciado.

En este caso, las cámaras refugio serían utilizadas en caso de incendio o de emergencias en las que se generen atmósferas irrespirables por generación de gases tóxicos. Esta alternativa añade un grado de complejidad en la planificación y entrenamiento de situaciones de emergencia.

b. Conducciones de acero:

Esta alternativa permite albergar en un mismo pozo el retorno de aire viciado y una vía de evacuación, aunque manteniendo dos atmósferas independientes. Para ello, habría que realizar el montaje de estructuras tubulares de acero que se equiparían con escaleras de gato en su interior, para la evacuación del personal.

c. Ampliación de la actual red de evacuación:

Se ampliarían los desarrollos de emergencia actuales hasta los niveles inferiores de la nueva zona de producción, de manera que siempre se garantizase la existencia de un recorrido completo con aire limpio para cualquier tipo de emergencia.

Esta alternativa se considera la mejor desde los puntos de vista práctico y de seguridad, pero cuenta con un importante obstáculo que es el elevado coste económico que habría que asumir para la ejecución de la infraestructura.

Selección de ventiladores. Cálculo del caudal de diseño en función del proceso de carga y transporte

La determinación de los puntos de funcionamiento requeridos a los ventiladores en VentSim se realiza en 4 etapas:

1. Crear los modelos correspondientes a las distintas configuraciones consideradas.
2. Evaluar si los ventiladores responden a los requerimientos formulados en cada uno de los casos analizados. Si no satisfacen a las necesidades formuladas, se fija el caudal de diseño en la rama en la que se desee ubicar el ventilador, y:

a) Si se pretende obtener un nuevo ventilador booster, fijar la presión en la rama en la que se vaya a ubicar y tras chequear de nuevo la rama se obtiene el punto de funcionamiento del ventilador.

b) Si buscamos determinar un ventilador principal superficial, se elimina el ventilador de la rama y se van fijando distintos caudales. A partir de aquí se construye la curva resistente de la mina.

3. Repetir el proceso para los distintos escenarios planteados.
4. Tabular los puntos de funcionamiento y seleccionar el ventilador óptimo.
5. Comparar la curva resistente del circuito y evaluar su interacción con los ventiladores.

a. Opción1: carga en dos fases:

Para asegurar que la posición de los puntos que conforman la curva resistente están contenidos dentro de las regiones de alto rendimiento del espectro gráfico del ventilador, se escogió un modelo de tipo axial Korfmann AL1700 (Figura 6) para la opción 1 que incluye un proceso de autocargado.

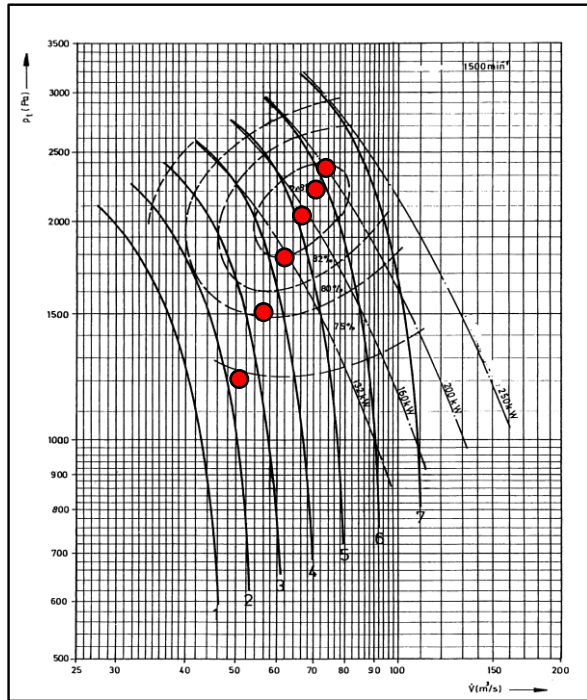


Figura 6. Ventilador axial Korfmann AL 1700
● = curva resistente óptima)

Se introdujo este ventilador en el simulador VentSim para comprobar su interacción con el resto de ventiladores y la propia red de ventilación. Para ello se escogieron dos curvas que representan dos regulaciones de álabes para distintos ángulos de incidencia.

Se obtienen dos modelos de predicción del comportamiento del equipo mediante una distribución gráfica del caudal por nivel de explotación en ambos escenarios. La Figura 7 muestra las curvas de operación del ventilador para ambas regulaciones.

Las curvas de trazos discontinuos indican la cantidad de aire que debe aportar el ventilador para abastecer cada nivel de explotación cuando se encuentre activo. El hecho de que los niveles más profundos demanden mayor caudal en el ventilador se debe al incremento teórico de las fugas a través de otras labores.

Los caudales máximos que se extraen de dichas gráficas (65-70 m³/s) indican que se precisará un motor de potencia 160 kW siempre que no se exceda de un valor de la presión estática de aproximadamente 2.300 Pa (ver

Figura 6), en cuyo caso habría que pasar a un motor de mayor capacidad. Según la actual planificación de desarrollo para MP, no se excederá este valor, aunque en caso de abordarse nuevos proyectos de ampliación se deberían recalculer los puntos de funcionamiento mediante nuevas modelizaciones.

Por ultimo, añadir que como se puede observar en la Figura 7, antes de abordar la explotación del nivel -290 (9710) será preciso modificar la posición de los álabes (de la 4 a la 5), ya que las prestaciones del ventilador con esta configuración no permiten cubrir la demanda de aire.

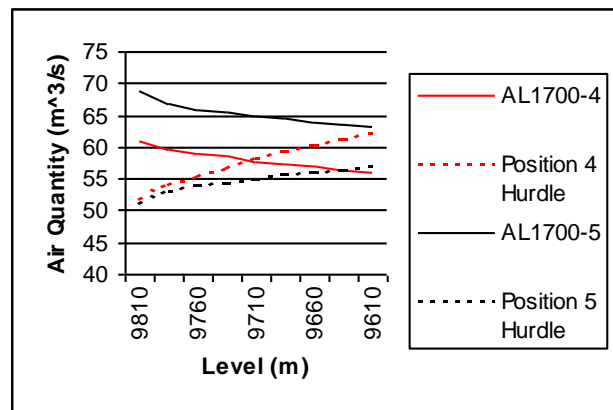


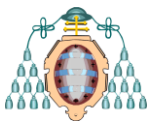
Figura 7. Simulador con ventilador axial AL1700 en la red de la mina 1

b. Opción 2: carga automática en piqueras:

Se llevó a cabo un procedimiento de modelización de manera análoga al realizado para la opción 1. La simulación se realizó con las curvas 3 y 4 del ventilador AL1600, arrojando unos resultados que indican la necesidad de modificar el ángulo de paletas de la posición 3 a la 4 antes de comenzar los desarrollos del nivel -290 (9710).

Dadas las necesidades de caudal (en torno a 50 m³/s), la potencia del motor podría ser de 132 kW siempre que no se exceda un rango de presiones estáticas superiores a 2.250 Pa con una curva de funcionamiento 4, para evitar que el ventilador funcione de manera inestable.

c. Opción 3: carga directa pala-volquete:



En este escenario tan solo se utilizarían volquetes tipo 69D por cuestiones de dimensiones y gálibos. Para esta simulación se incluyó un ventilador axial Korfmann modelo AL1200. Se utilizaron las curvas 3, 4 y 5, siendo necesarias dos modificaciones a lo largo del período de explotación diseñado: un primer reajuste del ángulo de los álabes de la posición 3 a la 4, previamente al desarrollo del nivel -290 (9710) y un segundo ajuste de la posición 4 a la 5, antes de la apertura del nivel -340 (9660). En estas condiciones, se podría instalar un motor de 45 kW con una presión estática límite de 1.500 Pa para la curva número 5.

Análisis de los costes de inversión y operación

Las dimensiones de las galerías y pozos a ejecutar como nuevos desarrollos, tienen una influencia directa en la resistencia aerodinámica añadida del circuito de ventilación principal. Si el caudal de diseño está fijado, un aumento de la resistencia equivalente del circuito tiene influencia directa en el incremento de la presión que ha de suministrar el/los ventilador/es y por lo tanto en los costes de operación (consumos energéticos).

$$\Delta P = R_{eq} \cdot Q^2 \quad (1)$$

Los desarrollos verticales que actualmente componen el circuito de retorno de ventilación principal (pozos de ventilación interiores y exteriores) se han ejecutado mediante la técnica de raise boring debido a una serie de condiciones favorables: se logran acabados en las superficies de excavación con coeficientes de fricción menores que en las excavaciones mediante perforación y voladura a la vez que se evitan los riesgos y daños ocasionados por las voladuras y se consigue mayor facilidad de ejecución para grandes longitudes.

Por estas razones, se ha considerado mantener el mismo método ejecutivo en las futuras ampliaciones. Desde el punto de vista de la ventilación, los desarrollos mineros más económicos (óptimos) son los que cuentan con

unos costes de operación y de inversión mínimos. El coste total de una labor minera se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C_T = C_I + \frac{P_A \times T \times C_{Ener} \times t}{12} \quad (2)$$

Donde:

- C_T = costes totales [€];
- C_I = costes de inversión [€];
- P_A = potencia de aireación [kW];
- T = tiempo de operación anual [h/año];
- C_{Ener} = coste energético unitario [€/kWh];
- t = duración del proyecto [meses].

Para obtener una comparativa de costes se han planteado tres diámetros de escariado con los que se realizaría el acabado final de los pozos de ventilación: 2,4 m, 3,1 m y 3,6 m.

Por otro lado, se ha realizado una planificación de la vida útil de la explotación del sector MP, calculándose un período de 24 meses. Con estas premisas, se obtuvo que el diámetro de acabado interior óptimo será de 3,6 m.

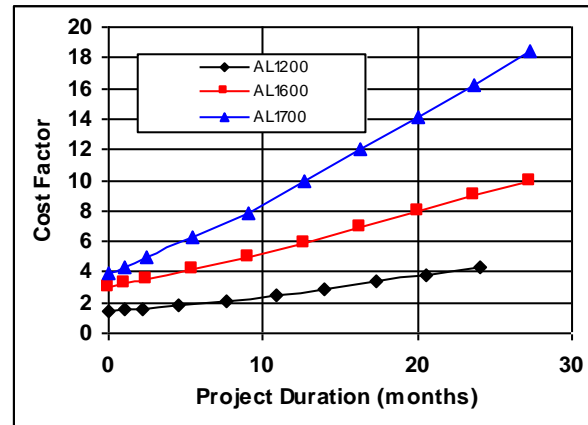
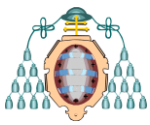


Figura 8. Costes de operación y de inversión de las distintas opciones

Por otro lado, al determinar los costes de operación en la modelización de cada una de las opciones de transporte evaluadas, se debe calcular el plazo de ejecución total para la explotación de los niveles. El cronograma de trabajo permite cuantificar los consumos energéticos de los equipos de ventilación según los distintos puntos característicos de



funcionamiento (presión-caudal) que son determinados por la resistencia equivalente de la mina y la disposición de las distintas ramas que la componen.

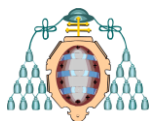
La Figura 8 muestra 3 gráficas con la evolución del Factor de Coste (constante que engloba los costes de operación y de inversión) para cada una de las opciones de ventilación consideradas. Cuanto mayor es el caudal requerido (determinado en función de la opción de transporte escogida), mayores son los costes de operación y de inversión.

Tablas 5, 6 y 7. Efectos de los futuros desarrollos sobre el sistema de ventilación elegido

Ventilador / Núm. Curva	Caudal diseño [m ³ /s]	Margen de trabajo Estado del motor
AL1700/5	101	Margen del motor: 10% hasta alcanzar un régimen de operación inestable. Riesgo de aparición de fenómenos de bombeo.
AL1600/4	93	Margen del motor: 20% hasta alcanzar régimen inestable. Se considera dentro de un rango de operación aceptable.
AL1200/5	86	Margen del motor: 10% hasta alcanzar régimen inestable. El motor es insuficiente para dar el caudal requerido.

Ventilador / Núm. Curva	Directrices a seguir
AL1700/5	Modificar los álabes a posición 6 (110 m ³ /s). Elevar la potencia del motor a 200 kW.
AL1600/4	Incrementar la potencia del motor hasta 200 kW, modificando el ángulo de incidencia de las paletas hasta la posición 6 (105 m ³ /s).
AL1200/5	Modificar el ángulo de incidencia de las paletas (90 m ³ /s). Incrementar la potencia del motor hasta 55 kW. Se deberán aplicar algunas restricciones en las emisiones diesel, ya que tampoco se alcanza el caudal requerido.

Ventilador / Núm. Curva	Desventajas
AL1700/5	Elevado coste del nuevo motor. Altos costes de operación.
AL1600/4	Elevado coste del nuevo motor. Altos costes de operación.
AL1200/5	Necesidad de aplicación de restricciones en las emisiones diesel (utilización de menos equipos y por lo tanto, ralentización de la producción). Incremento del plazo de explotación, lo que implica mayores costes de operación.



POSIBLES DESARROLLOS FUTUROS

Se consideraron tres posibles escenarios para la ejecución de futuros desarrollos, más concretamente:

1. Desarrollo de una nueva rampa de acceso (posible vía de evacuación) desde el exterior hasta la nueva zona de explotación.

2. Ejecución de un nuevo pozo de ventilación desde el exterior hasta la rampa principal.

3. Ejecución de un pozo de ventilación exterior desde el exterior hasta el nivel inferior del sector MP.

Todas las soluciones discutidas anteriormente proveerán una cantidad suficiente de aire limpio para los dos primeros escenarios, aunque se deberá reevaluar la ventilación para el tercero, toda vez que los sistemas de ventilación propuestos en el estudio no serían suficientes.

Los resultados de las simulaciones, que contemplan los 8 niveles de explotación con sus correspondientes desarrollos verticales y la rampa de acceso sin considerar estos 3 posibles escenarios se adjuntan resumidos en la Tabla 5.

CONCLUSIONES

Para asegurar unas buenas condiciones de trabajo en las nuevas labores, el sistema principal de ventilación requiere de lo siguiente:

- Utilización de los dos pozos de ventilación exteriores actuales.
- Sustitución del ventilador principal exterior centrífugo tipo Howden HS 288 330.
- Desarrollo de chimeneas o pozos de ventilación entre los distintos niveles de explotación de MP mediante raise boring y con un diámetro de acabado de 3,6 m.
- Opción de carga y transporte mediante carga directa de pala a volquete.
- Ejecución de una chimenea de evacuación paralela e independiente a

los pozos de retorno de ventilación de 1,5 m de diámetro.

AGRADECIMIENTOS

El autor del estudio quiere agradecer a la Directora del TFM, doña Mónica Galdo por su atención, colaboración y disposición durante el desarrollo del mismo.

También se hace extensivo el agradecimiento a mis compañeros del Departamento de Ingeniería Civil y Minera de SADIM – Grupo HUNOSA por el apoyo puntual en algunos hitos del desarrollo.

En último lugar, agradecer también al personal del Departamento de Proyectos de la empresa ZITRÓN, especialmente a don Jaime Albuerne, por su inestimable colaboración tanto en este como en otros proyectos y estudios de ventilación de minas, túneles y otras infraestructuras subterráneas.

REFERENCIAS

- [1] Bandopadhyay S., 1992, "Computer Applications in Mine Ventilation and the Environment," SME Mining Engineering Handbook, Hartman, ed., SME, Littleton, CO, p.1139-1150.
- [2] CMS Software, 2000, Manual de Usuario de VentSim.
- [3] Hall, G.C., Clarke, B.N., 1988, "Ventilation Design and Practice at the Olympic Dam Mine, South Australia,"
- [4] Procedimientos del 4º congreso internacional de ventilación de minas
- [5] Hartman, H. L., Mutmanský, J.M., Y.J. Wang, 1982, Mine Ventilation and Air Conditioning. John Wiley & Sons, New York.
- [6] WA Mines Safety and Inspection Regulations 1995, Government Gazette, No. 169, Australia