

Desarrollo de un Estudio de Modelamiento de Incendio para la Construcción de la Mina Chuquicamata Subterránea

Brian Prosser, *Mine Ventilation Services – SRK*

Sergio Valencia Briones, *Codelco-Chuquicamata*

Jess Van Diest, *Mine Ventilation Services – SRK*

Roberto Álvarez Zúñiga, *Codelco – PMCHS VP*

Álvaro González Marín, *Codelco - Chuquicamata*

Gonzalo Lasagna Barrena, *Codelco - Chuquicamata*

Resumen

The addition of fire modeling during the development of a ventilation system design can greatly enhance the safety aspects of the mine. When a fire modeling program is developed in conjunction with the ventilation design then mitigation aspects and infrastructure can be included in the design process. Understanding how the ventilation system will respond to fires in key or high risk/consequence areas is a foundational building block for the ventilation design. The ventilation system for the new Chuquicamata underground block cave mine is in the intermediate stages of development. During November 2015 a fire modeling study was developed that established a correlated ventilation model that was used to simulate fire scenarios at key locations in the mine. The study was used to determine the placement and application of key mitigation infrastructure and to identify the consequences of a fire including fume spread, heat, and air reversals. This paper will describe the methodology and results of the fire modeling study.

La adición de un modelo de incendio durante el desarrollo del diseño de un sistema de ventilación puede mejorar enormemente los aspectos de seguridad de la mina. Cuando se desarrolla el modelamiento de un incendio junto con el diseño de ventilación, entonces se puede incluir la infraestructura y los aspectos de mitigación en el proceso de diseño. Comprender cómo responderá el sistema de ventilación ante incendios en áreas clave o de alto riesgo es fundamental para el diseño de ventilación. El sistema de ventilación para la nueva mina subterránea de hundimiento por bloques de Chuquicamata se encuentra en etapas intermedias de desarrollo. En noviembre del 2015, se desarrolló un estudio de modelamiento de incendios que estableció un modelo de ventilación correlacionado, el cual fue usado para simular escenarios de incendios en ubicaciones clave de la mina. El estudio fue usado para determinar la ubicación y aplicación de infraestructura clave de mitigación y para identificar las consecuencias de un incendio, incluyendo la dispersión de los humos, calor y cambios en el flujo de aire. Este documento describirá la metodología y los resultados del estudio de modelamiento de incendios.

1 Introducción

La mina Rajo Chuquicamata está ubicada a 15 km al norte de Calama, y a 245 km de Antofagasta, en la región de Antofagasta, Chile. Debajo de ella se construye la Mina Chuquicamata subterránea (MCHS), que es la mejor opción técnica y económica para extraer las reservas de mineral de cobre existentes en el yacimiento. La explotación subterránea se realizará con el método llamado block caving con macro bloques. Los trabajos necesarios para llevar a cabo la construcción de la nueva mina subterránea requieren una cantidad significativa de equipos, personal, y frentes de construcción. La cercana proximidad entre el personal, equipos y áreas de desarrollo incrementa enormemente los riesgos y consecuencias de un incendio.

En el año 2015, Codelco y MVS/SRK desarrollaron un estudio de modelamiento de incendios para los desarrollos mineros subterráneos en la Mina Chuquicamata. El estudio se inició con un levantamiento completo de presión y flujos de aire de ventilación para desarrollar un modelo preciso y correlacionado del sistema de ventilación existente. El modelo correlacionado fue usado como base para los modelos de simulación de incendios. Los modelos de incendio son simulaciones computacionales usadas para predecir temperaturas, inversiones del flujo de aire, y propagación del frente de humos durante un incendio. Se examinaron escenarios alternativos para predecir las diversas interacciones que se producirían cuando los laboreos mineros subterráneos estuvieran unidos con los Túneles de Acceso y Transporte Principal y Túneles de Inyección de aire.

2 Metodología de Estudio

El estudio estuvo compuesto por varios segmentos que condujeron a las simulaciones finales de incendios. Los segmentos corresponden a:

- Levantamiento inicial de ventilación.
- Desarrollo del modelo de ventilación.
- Correlación del modelo de ventilación.
- Análisis de riesgos.
- Desarrollo del modelo de simulación de incendios.
- Análisis de escenarios individuales de incendios.

Para que el estudio tenga credibilidad, debe estar basado en un modelo preciso de ventilación. Establecer ese modelo requiere de un levantamiento de ventilación en el cual se midan y cuantifiquen los caudales de aire y las pérdidas de presión por fricción. Estas mediciones se usan para determinar las resistencias de los ramales del modelo y la geometría de los conductos de aire. Luego se correlaciona el modelo y se le establece un valor de error. Típicamente, se usa un valor de error de correlación menor al 10% como criterio de aceptación.

Se realiza un análisis de peligros para determinar la probabilidad y la consecuencia de un incendio, con la finalidad de seleccionar áreas de alto riesgo. Los incendios en esas áreas de alto riesgo son simulados con el modelo de incendios.

Un modelo de incendio requiere de parámetros adicionales de los ramales para reflejar la interacción térmica entre las altas temperaturas propiciadas por el fuego y las paredes de la roca. Los factores de fricción (incluso si la resistencia de los conductos de aire se calcula por otros medios) son requeridos para todos los ramales.

3 Estudio de Ventilación

El estudio de ventilación para las obras en construcción de la Mina Chuquicamata Subterránea, involucró la determinación de caudales de aire y de distribuciones de presiones diferenciales. Los caudales de aire se determinaron llevando a cabo lecturas en las secciones transversales de los conductos de aire usando un anemómetro de paletas o efectuando mediciones centrales con tubos de humo, y multiplicando los resultados por el área de dichas secciones. Los diferenciales de presión estática a través de tapados, puertas, y reguladores se midieron directamente usando un micro-manómetro digital conectado a una manguera de cierta longitud. El método de medición con manómetro y manguera fue usado para medir las caídas de presión (total) friccional a lo largo de los conductos de aire de la mina donde el caudal de aire (total) era lo suficientemente importante como para dar resultados significativos. Se emplearon mangueras de hasta 1,000 pies (ft) de longitud (300 metros, aproximadamente). Para cuantificar las energías de ventilación natural y el punto de operación del ventilador, se midió la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la presión barométrica en ubicaciones clave en la mina.

Los procedimientos de aseguramiento de la calidad estuvieron adheridos a todo el levantamiento de ventilación, tomando, como mínimo, dos lecturas de velocidad en cada estación, las cuales fueron evaluadas para determinar su consistencia. Las lecturas que se desviaban en más de 10% una de otra eran repetidas tantas veces hasta eliminar dicha desviación. En las corrientes parciales de aire, se tomaron mediciones para asegurar el cumplimiento de la Primera Ley de Kirchhoff de los caudales (la suma de los caudales que ingresan en una unión debe ser igual a la suma de los caudales que salen de esa misma unión). Para definir las resistencias de los conductos de aire de modo preciso, las mediciones de las caídas de presión friccional fueron tomadas aproximadamente en la misma ubicación y en el mismo tiempo en que se tomaban las mediciones de caudal de aire. Donde fue posible, se realizaron lecturas transversales de caída de presión friccional alrededor de bucles cerrados, y los datos fueron revisados para verificar el cumplimiento de la Segunda Ley de Kirchhoff (la suma algebraica de las caídas de presión friccional alrededor de cualquier circuito cerrado debe ser igual a cero, luego de haber tomado en cuenta los ventiladores y la Presión de Ventilación Natural [NVP: Natural Ventilation Pressure]).

4 Desarrollo del Modelo de Ventilación

El software de simulación de ventilación usado para establecer el modelo de la red de las Mina Chuquicamata Subterránea fue el programa VnetPC Pro. Usando los datos obtenidos de los levantamientos de ventilación o los determinados a partir de las características y dimensiones de las vías de aire, es posible simular redes de ventilación existentes, de tal modo que los caudales, las caídas de presión por fricción y los puntos de operación de los ventiladores se aproximen a los del sistema real.

Las resistencias de los ramales, determinadas a partir de datos medidos de los levantamientos junto con métodos empíricos, las presiones medidas de los ventiladores y las presiones de ventilación natural calculadas fueron ingresadas al programa VnetPC Pro.

El error de correlación de toda la red es calculado dividiendo la suma de las diferencias absolutas entre el flujo predicho y el medido para cada ramal por el flujo total medido, como se muestra a continuación en la Eq(1):

$$\text{Correlación} = \frac{\sum |\text{Flujo Medido} - \text{Flujo Predicho}|}{\text{Flujo Total Medido}} \times 100\% \quad (1)$$

Un error de correlación menor al 10% es el deseado para asegurar que el modelo es lo suficientemente preciso como para servir de base para la planificación futura de la ventilación.

El modelo de ventilación creado para la Mina Chuquicamata Subterránea tuvo un error de correlación de aproximadamente 5.4%. Hay varios factores que contribuyeron con ese error. A pesar de que el caudal de ventilación total de la mina permanecerá relativamente constante si no se realizan cambios importantes en el sistema, ocurrirán algunas variaciones locales durante el curso de las actividades normales. Los caudales de aire en áreas locales están afectados por el tráfico de vehículos, acarreo de marinas y la ventilación auxiliar.

A pesar de que el modelo representa adecuadamente el sistema de ventilación al momento de realizar el levantamiento, muestra diferencias que varían con respecto a los datos medidos. El caudal de aire total de la Mina Chuquicamata se aproxima mucho al de los datos medidos; sin embargo, los caudales individuales para cada ingreso difieren debido al tráfico en las respectivas áreas.

Es importante recordar que este modelo representa al sistema de ventilación en un punto determinado del tiempo, por lo que será necesario actualizarlo según las condiciones de avance en la construcción de la mina Chuquicamata Subterránea.

4.1 Diferenciales de Presión por Fricción

Los diferenciales de presión por fricción medidos a través de reguladores, tapados, y a lo largo de las entradas principales fueron plotados en planos. Los diferenciales de presión se midieron en todos los puntos accesibles en donde las cantidades de flujo de aire fueran suficientes para producir diferencias de presión por fricción significativas.

4.2 Mediciones de las Propiedades Psicrométricas

Las mediciones de presión barométrica, temperatura de bulbo seco y humedad relativa fueron tomadas en varios lugares de la mina. Estas propiedades psicrométricas se usaron para calcular la densidad del aire para la evaluación de la presión de ventilación natural, la expansión del aire y para definir los puntos de operación de los ventiladores.

4.3 Medición de Ventiladores

Las mediciones de presión se obtuvieron durante el estudio de ventilación de la Mina Chuquicamata Subterránea y de las áreas de desarrollo. En este documento, los valores de presión de ventilador referenciados son presiones totales, las cuales están dadas a una densidad de aire de mina promedio, y se muestran en la Tabla 1. La ubicación de los ventiladores se muestra en la Figura 1.

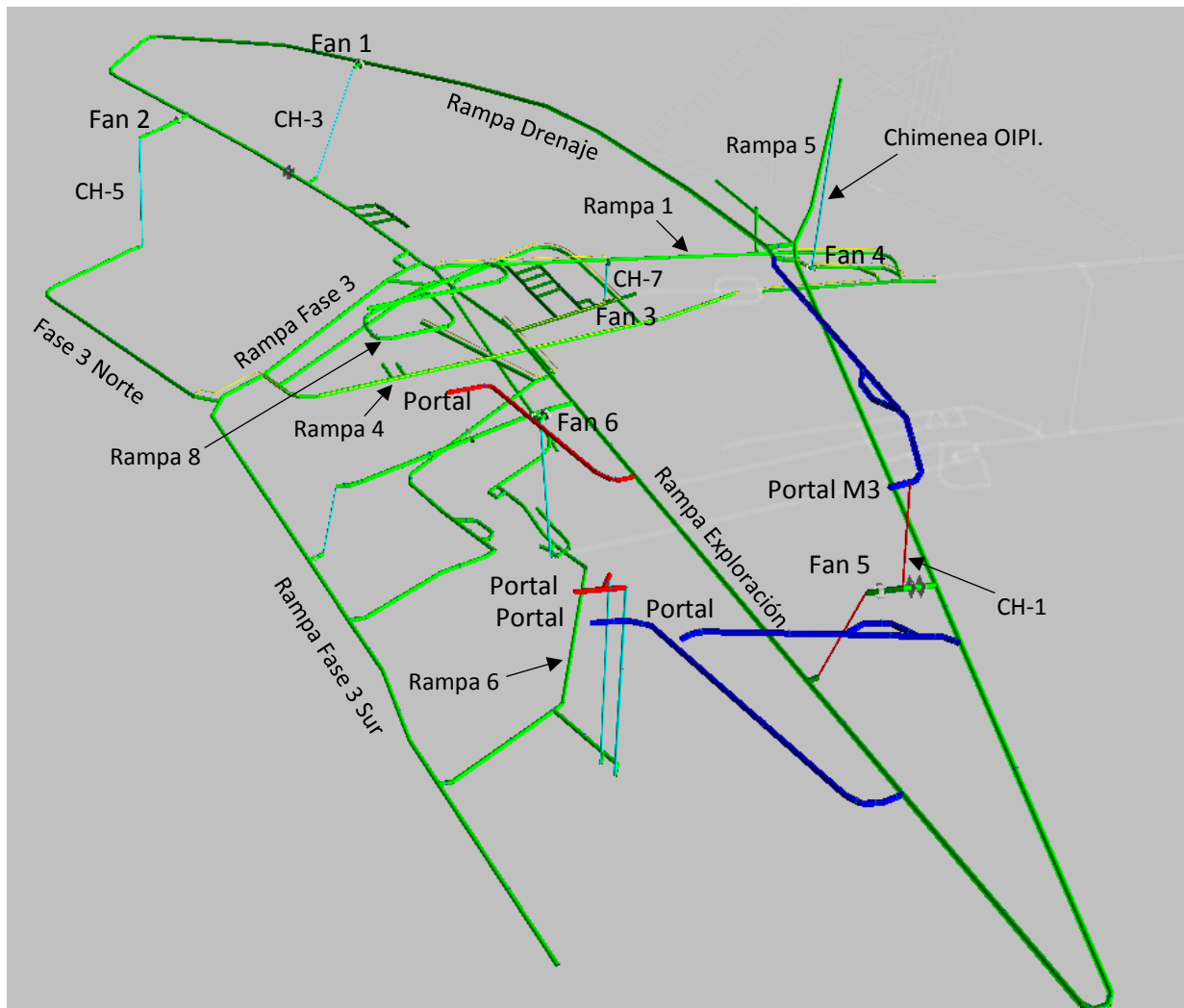


Figura 1 Ubicaciones de ventiladores booster y portales en obras de construcción MCHS.

Posición	Ubicación/Descripción	Marca/Modelo del Ventilador	Ventiladores en Paralelo	Caudal Total (m ³ /s)	Pt Entregada Medida
1	Chimenea 3	Howden 66-30 S2000 FB	2	120,7	1.145
2(L)	Chimenea 5	Howden 66-30 S2000 FB	1	89,7	0,910
2(R)	Chimenea5 (recirculación masiva a través de BH)	Alphair 5400-VAX-3150	1	104,3	0,920
3(L)	Chimenea 7 Ventilador	Howden 66-30 S2000 FB	2	78,8	1.392
3(R)	Chimenea 7 Ventilador	Howden 66-30 S2000 FB	1	43,5	1.116
4(L1)	Rampa 5 Chimnea Vnt. Iny.	Howden 66-30 S2000 FB	1	31,7	0,895
4(L2)	Chimenea 5 Vent. Iny.	Alphair 54-3150 FB	1	52,1	1.728
4(R1)	Rampa 5 Chimenea Vnt. Iny.	Howden 66-30 S2000 FB	2	45,5	1.450
5	Chimenea 1	Howden 66-30 S2000 FB	2	120,8	1.145
6	Frontón Superior 2 Chim. Iny. Chancado	System Air AXC 1600	1	84,1	0,042

Tabla 1 Mediciones de los ventiladores para la Mina Chuquicamata Subterránea.

4.4 Cálculo de las Resistencias de los Conductos de Aire

Para las vías de aire donde se midieron los diferenciales de presión por fricción y los caudales de aire, se utilizó la Ley Cuadrática para calcular la resistencia al flujo, de acuerdo con la Eq(2):

$$R = \frac{P}{Q^2} \quad (2)$$

Donde: R = resistencia (Ns²/s⁸)
 p = caída de presión friccional (Pa)
 Q = caudal de aire (m³/s)

Se calculó una resistencia al flujo para cada ramal en la red esquemática de ventilación. El modelo desarrollado para los túneles se muestra en la Figura 1. El esquema fue generado a partir de los planos en AutoCAD provistos por el personal de Codelco e importado luego al VnetPC Pro+. Donde no estaban disponibles los datos de diferenciales de presión por fricción, se calcularon las resistencias de los ramales usando la ecuación de Atkinson, según la Eq. (3):

$$R = \frac{k(L + L_{eq}) \rho v}{A^3} \quad (3)$$

Donde: k = factor de fricción (kg/m³)
 L = longitud del conducto de aire (m)
 L_e = longitud equivalente de pérdida por choque (m)
 P_{er} = perímetro del flujo (m)
 A = área de la sección transversal (m²)

Varios valores de resistencia fueron calculados incluyendo los factores k y las resistencias de la infraestructura para la Mina Chuquicamata Subterránea a partir de los datos medidos recolectados durante el curso del estudio, como se muestra en la Tabla 2.

Ítem	Ubicación/Descripción	Factor $k(\text{kg}/\text{m}^3)^*$
1	Rampas OIM	0.0109
2	Chimenea 1	0.0008
3	Chimenea Inyección Chancado	0.0048
4	Chimenea Sur 2	0.0046
5	Transporte y Acceso Túnel	0.0088
6	Chimenea 1 Túnel Acceso	0.0065
7	Chimenea 2 Túnel Acceso	0.0028
8	Chimenea 3 Túnel Transporte	0.0044
9	Túnel 11	0.0091
10	Túnel 11/12 Duct	0.0025

* valores basados en una densidad de aire de mina promedio de $0.908 \text{ kg}/\text{m}^3$

Tabla 2 Valores promedio de factores de fricción para la mina Chuquicamata.

5 Identificación de Escenarios y Peligros

Al inicio el estudio, el personal de ingeniería de minas realizó un análisis de peligros para identificar probables ubicaciones de incendios y de alta consecuencia. Las fuentes de incendios mineros subterráneos en la Mina Chuquicamata Subterránea son:

1. Equipo minero móvil diésel
2. Otros vehículos, buses, camiones de transporte, vehículos de servicio, etc.
3. Subestaciones eléctricas
4. Estaciones de compresores
5. Motores eléctricos en máquinas y bombas
6. Áreas de almacenamiento de aceite y lubricantes
7. Áreas de almacenamiento o suministro de diésel
8. Polvo de sulfuro (combustión espontánea o súbita) y en colectores de polvo seco
9. Áreas de molienda y soldadura en talleres
10. Talleres de mantenimiento
11. Al efectuar orden y limpieza general (e.g. desperdicios, etc.)
12. Revestimiento de cables eléctricos
13. Almacén de explosivos
14. Comedor, oficinas
15. Neumáticos y madera en almacenes
16. Instalaciones de almacenamiento de gas comprimido

Se modelaron ocho incendios en la Mina Chuquicamata Subterránea antes de que los Túneles de Inyección y los Túneles de Acceso y Transporte Principal fueran conectados a OIM. Estos modelos incluyen el trabajo de ductería necesario para ventilar frentes ciegas antes de que se ejecute la conexión de los túneles. La ubicación de los incendios y sus fuentes está listada en la Tabla 3 y en las Figuras 2, 3 y 4. Estos incendios están simulados a una baja intensidad basada en las entradas para los parámetros de entrada de contaminantes de la simulación en MineFire. Esto se logró usando una salida de calor y concentración de humos relativamente más bajas para la fuente del incendio.

Las ubicaciones de los incendios fueron elegidas sobre la base de posibles fuentes de combustible y del efecto del incendio. Los talleres y las subestaciones eléctricas son ejemplos de fuentes estacionarias de combustible que podrían afectar extensas áreas de la mina debido a la propagación del frente de humos. Las ubicaciones de los incendios que simulan fuentes de fuego móviles pueden tener un efecto mucho mayor porque podrían estar localizadas en zonas donde el aire está distribuido en toda el área de la mina. Esto también puede tener implicaciones en el diseño de la mina, porque el ubicar grandes fuentes estacionarias de combustible cerca de circuitos de extracción aislados tendrá un efecto mitigador.

Incendio No.	Ubicación	Fuente del Incendio
1	Rampa 10	Taller de Lubricación
2	Rampa Principal	Polvorín de Explosivos
3	Rampa 1	Camión de Acarreo
4	Rampa 4	Camión de Acarreo
5	Rampa Exploración	Subestación Eléctrica
6	Rampa 6	Camión de Acarreo
7	Túnel Inyección 11	Camión Lubricante
8	Túnel Transporte	Camión Lubricante

Tabla 3 Ubicación de incendios simulados en la Mina Chuquicamata Subterránea antes de la conexión de los Túneles de Inyección y los Túneles de Acceso y Transporte Principal.

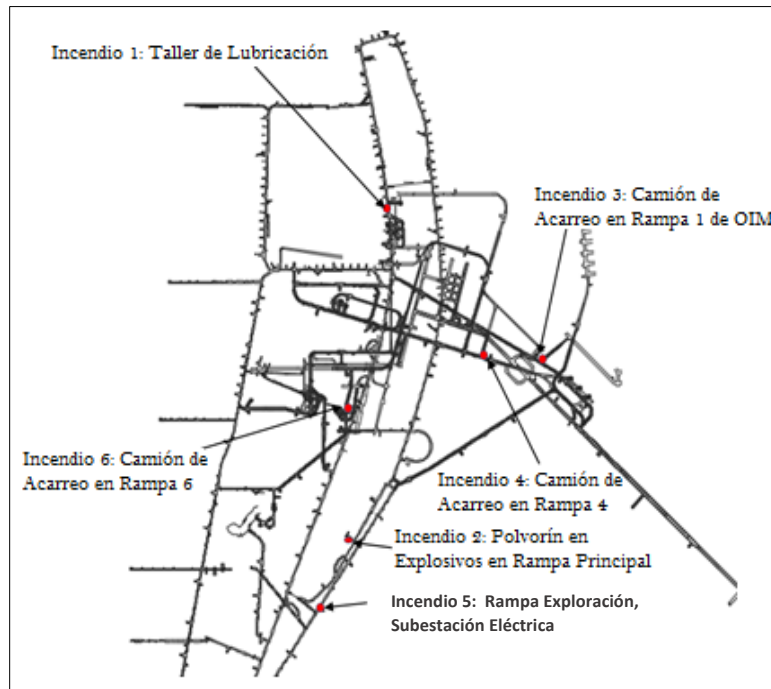


Figura 2 Ubicación de los incendios simulados en sector Obras Interior Mina de la MCHS antes de la conexión con Túneles de Acceso y Transporte Principal y Túneles de inyección.

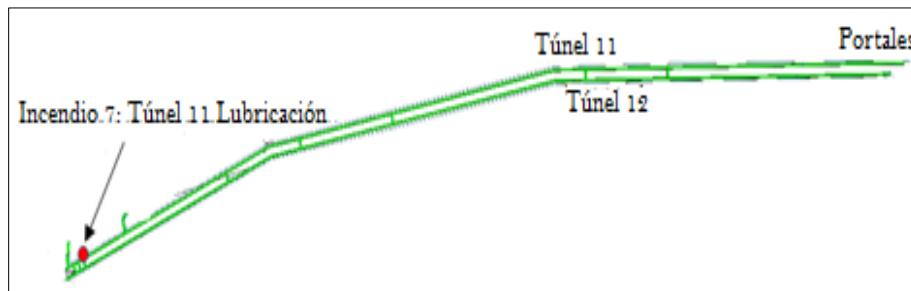


Figura 3 Ubicación del incendio simulado en Obras Túneles de Inyección de la MCHS.

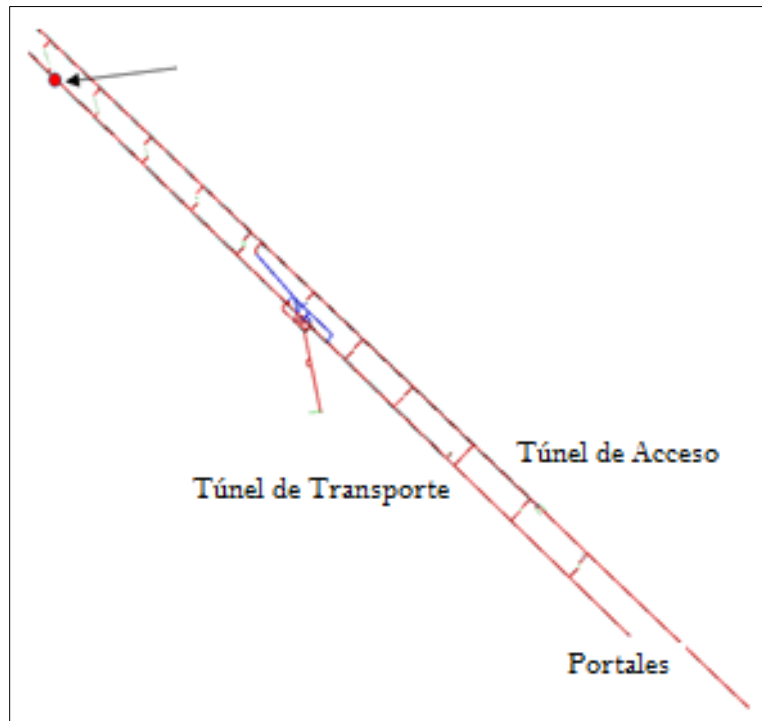


Figura 4 Ubicación del incendio en Obras Túneles de Acceso y Transporte Principal de la MCHS.

6 Desarrollo del Modelo de Incendio

El software de simulación de incendios usado para este análisis fue el programa MineFire. Se trata de una aplicación para Windows que debe ser usada con el paquete de software de simulación de redes de ventilación VnetPC. Está diseñado para simular la respuesta del sistema de ventilación de una mina a influencias externas, tales como un incendio. El programa se construyó a partir del antiguo código MFire del US Bureau of Mines, el cual fue modificado por MVS/SRK solamente para incrementar el número de ramales y ventiladores disponibles y para correrlo en el entorno Windows. Este cálculo base fue luego adaptado a la interface amigable con el usuario del paquete de software de redes de ventilación VnetPC de Mine Ventilation Services.

MineFire realiza cálculos de planificación de redes de ventilación y modelamiento dinámico de estados transitorios bajo una variedad de condiciones. El programa simula la respuesta de un sistema ante parámetros de ventilación alterados tales como: la introducción de fuego al sistema, temperaturas exteriores variables, cambios en las estructuras de control de ventilación o el desarrollo de nuevos laboreos mineros. Esto se logra usando datos obtenidos de los levantamientos de ventilación junto con la información determinada a partir de características y dimensiones conocidas de conductos de aire. Las tasas de liberación de calor se calculan de acuerdo con el tipo de combustible en combustión. La ubicación del incendio en un conducto principal de inyección o extracción o en un área de bajo flujo es importante para determinar si se asume un incendio rico en oxígeno o uno rico en combustible; por lo tanto, ayuda al usuario a determinar cuáles parámetros deberá usar en la simulación del incendio y cuáles podrían quedar en blanco. Los contaminantes podrían determinarse según la química de los componentes del combustible.

El fuego es difícil de predecir, por lo que los resultados de una simulación serán buenos si los datos ingresados fueron buenos. Por esta razón es una buena práctica simular diferentes intensidades de fuego para cada ubicación. Esto permite examinar la sensibilidad del sistema de ventilación y asociar un nivel superior de confianza al estudio.

6.1 Conductividad

La variable de conductividad es la conductividad térmica de la roca para el macizo rocoso. El valor es usado por el programa para definir la difusión térmica hacia o desde el aire a medida que viaja a través de un conducto. Esto afectará los caudales de aire en la mina. La comprensión de qué tipo de roca define un ramal es necesaria para modelos detallados. Un valor teórico general o promedio para el macizo rocoso puede ser suficiente. Donde el tipo de roca en el modelo sea uniforme, varios ramales tendrán el mismo valor. Las unidades son $\text{Btu/hr}\times\text{ft}\times^\circ\text{F}$ or $\text{W/m}\times^\circ\text{C}$. Para este modelo, se eligió un valor global de $3.5 \text{ W/m}\times^\circ\text{C}$.

6.2 Difusividad

La difusividad de la roca se obtiene a partir de pruebas de laboratorio en testigos de roca o consultando tablas. Define cuán rápido se mueve el calor en el límite entre la roca y el aire cuando éste pasa a través de un ramal. Las unidades son ft^2/hr o m^2/sec . Para este modelo, se eligió un valor global de $1.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ ($0.072 \text{ ft}^2/\text{hr}$).

6.3 Temperatura de la Roca

La variable Temperatura de la Roca usa la temperatura promedio de la roca para un ramal dado. Las muestras pueden tomarse en varios puntos clave de la mina o se puede usar el paso geotérmico para determinar la temperatura promedio de la roca a cierta elevación y podría ser promediada tantas veces como fuera necesario para ramales con relieve vertical. Debemos notar que el paso geotérmico podría no proveer resultados enteramente precisos para laboreos antiguos donde la roca ha envejecido y el perfil de temperaturas ha cambiado. No había la disponibilidad de información detallada con respecto a la temperatura de la roca, por lo tanto se usó un valor de 25.4°C como temperatura básica de la roca. Este valor está basado en temperaturas promedio del aire medidas dentro de la mina.

6.4 Datos de los Ventiladores

Las curvas características de los ventiladores se registran ingresando entre dos y diez juegos de puntos de datos de presión/caudal. Los ventiladores deben ser ingresados con una curva de al menos dos puntos para el programa MineFire. Puesto que MineFire asume un flujo compresible, no se recomienda el uso de ramales de inyección y extracción y ventiladores NVP, excepto donde sea absolutamente necesario balancear la red básica "inicial". Los efectos de las energías de auto-compresión y ventilación son tomados en cuenta por MineFire sobre la base de los valores de temperatura, elevación y densidad.

7 Resultados Generales

Los modelos de simulación de incendios son usados para reflejar la propagación de los humos en la mina durante el apogeo de un incendio y cuando el evento alcanza un estado estable. También se identifica la distribución de temperatura. El objetivo de la simulación es ver cómo reaccionará el sistema antes las condiciones transitorias desarrolladas por el incendio. La introducción del calor del incendio puede tener impactos significativos en el sistema de ventilación. Estos impactos pueden dar lugar a inversiones del flujo de aire, niveles elevados de caudal, recirculación, y temperaturas elevadas. Se deben identificar las temperaturas máximas en locaciones clave aguas abajo para asegurar que los equipos eléctricos pueden continuar operando, que las estaciones de refugio no están sobreexpuestas, y que el personal no está en riesgo. La identificación de posibles recirculaciones e inversiones del aire es crítica pues las áreas consideradas seguras por los mineros y la administración podrían llegar a ser inhabitables por los mineros que tratan de huir del escenario del fuego o que buscan refugio. La Figura 5 identifica un área donde se produce la recirculación total o la inversión del circuito debido a un incendio en la zona de lubricación o en la ventana de acarreo.

7.1 Adiciones de Infraestructura

Sobre la base del desarrollo de los modelos de incendio y de la reacción del sistema de ventilación ante los incendios, MVS/SRK elaboró una serie de recomendaciones para su incorporación en el sistema de ventilación.

MVS/SRK recomienda que, durante un incendio que ocurra en áreas con ventilación auxiliar, se apaguen, si fuera posible, sus ventiladores auxiliares para prevenir que los humos sean desplazados rápidamente hacia las frentes en desarrollo. Esto les dará a los trabajadores algún tiempo para que determinen cómo evacuar hacia la superficie, dirigirse a una cámara de refugio, o hallar protección. En la mayoría de los modelos, se ha visto que, una vez que el frente de humos alcanza un sistema de ventilación auxiliar, se propaga rápidamente hacia la frente de trabajo. Cada uno de los sistemas tiene un control "local" que podría ser utilizado para apagar los ventiladores.

En la mayoría de los escenarios de incendio modelados, galerías alrededor del comedor y del taller de mantenimiento experimentan concentraciones y duraciones significativas de humos. MVS/SRK recomienda que se inspeccione y pruebe periódicamente el refugio del comedor para asegurar su funcionalidad. La estación de refugio central será importante para los trabajadores del taller, del área de lubricación, del comedor y sectores cercanos de la ruta de extracción de minas. Las personas que trabajan alejados del refugio central deben buscar protección en las estaciones de refugio portátiles cercanas a sus frentes de trabajo.

Se recomendó la instalación de seis (6) puertas de aislamiento en la mina para aislar los frentes de humo y prevenir que recirculen, como se muestra en las Figuras 6 y 7.

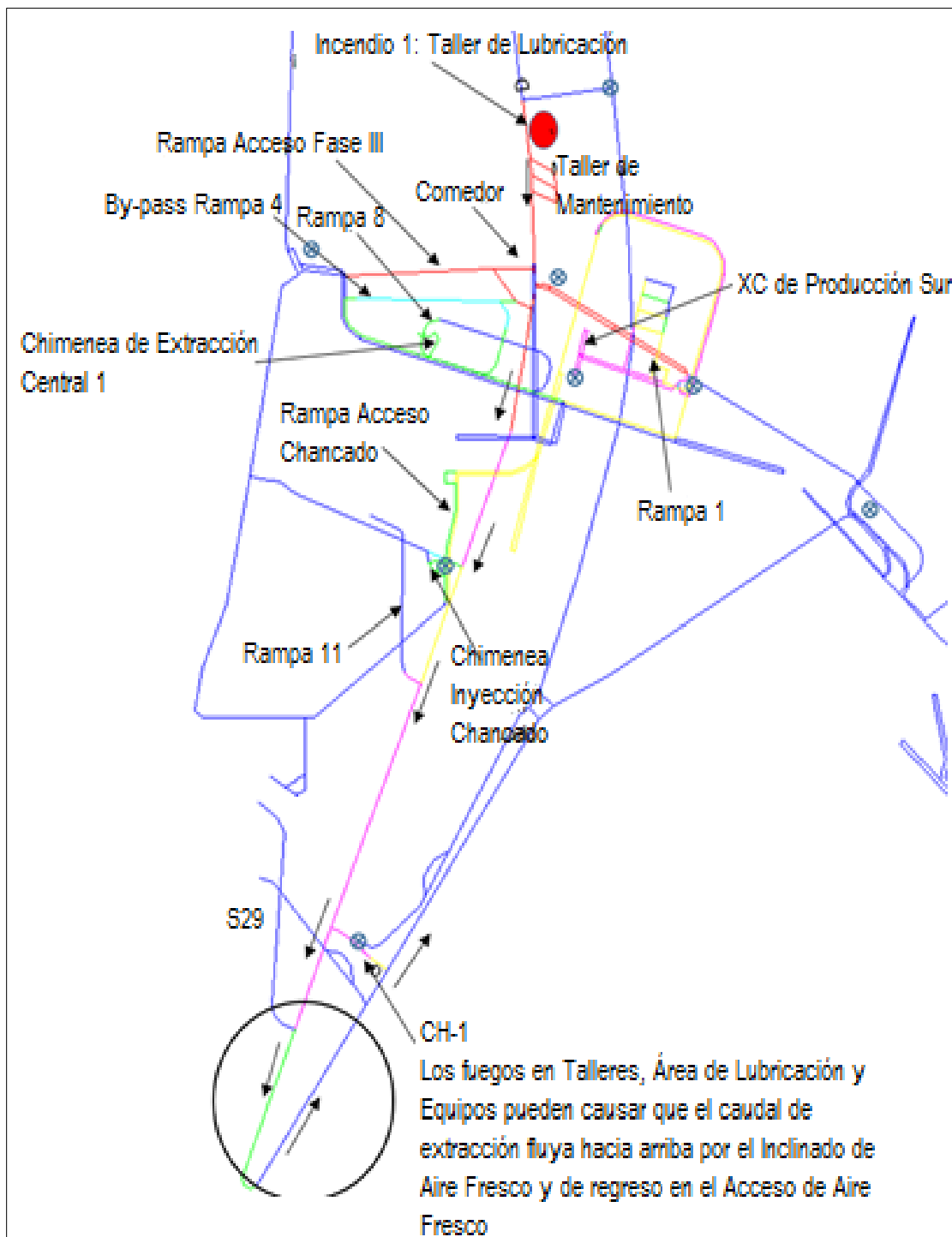


Figura 5 Propagación de humos de un incendio en el Taller de Lubricación de OIM, aproximadamente 20 minutos después de comenzado el evento.

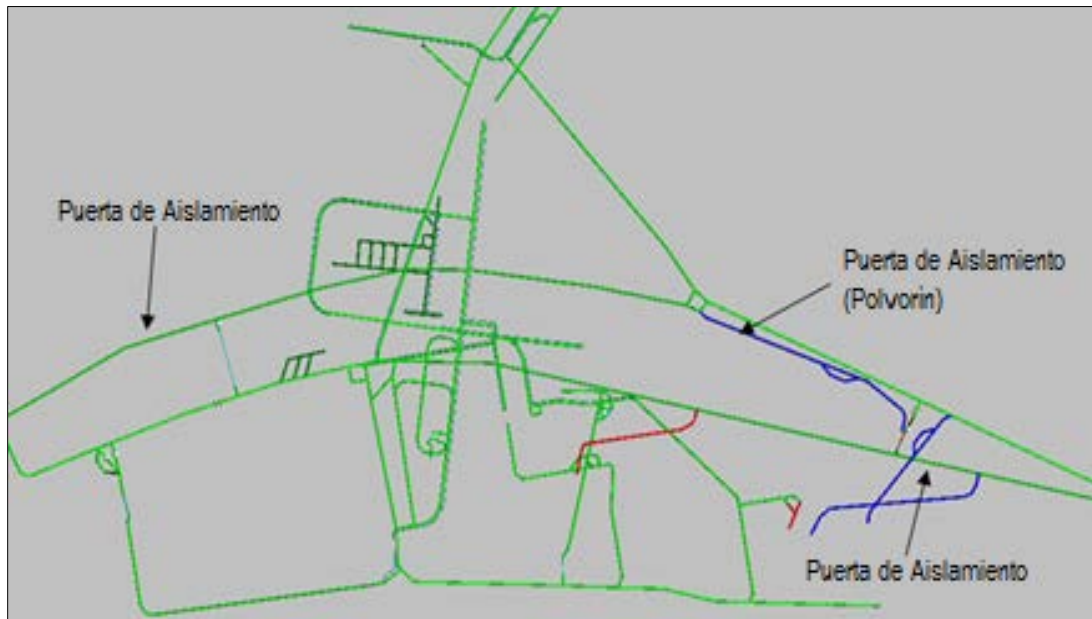


Figura 6 Puertas de aislamiento requeridas para el sistema existente

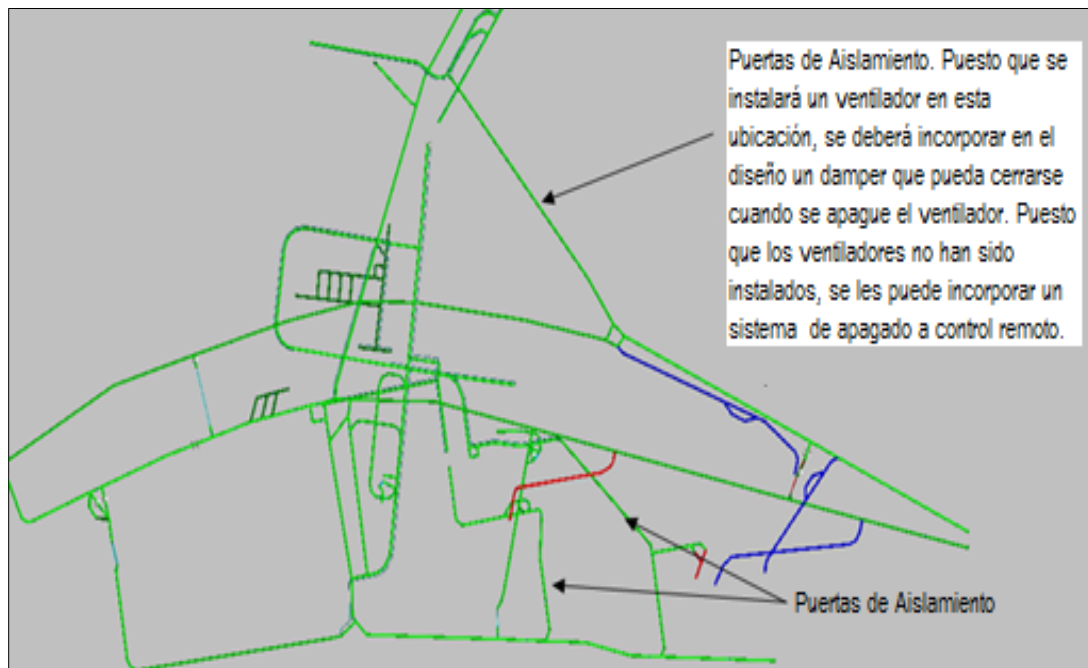


Figura 7 Puertas de aislamiento requeridas para la próxima fase del sistema de ventilación en MCHS.

8 Ventiladores Principales

Los ventiladores principales deben permanecer encendidos durante un incendio, salvo algunas pocas excepciones críticas. El sistema eléctrico desarrollado actualmente para la construcción de la Mina Chuquicamata Subterránea solo permite apagar el sistema completo, lo cual apagaría todos los ventiladores al instante. Una vez que se apaga el sistema de ventilación, se pierde todo el control de la ventilación y con ello el direccionamiento del frente de humo. Es común que el caudal de aire se invierta a través del sistema y contamine más áreas de las que podría contaminar si los ventiladores permanecieran encendidos. Se examinaron varios modelos para demostrar ese fenómeno, y fueron identificados en la presentación final del estudio realizado. Si tuviera que apagarse un ventilador (singularmente) entonces se debe conocer la ubicación precisa del incendio de modo que las áreas afectadas puedan ser despejadas. Sin embargo, determinar la ubicación exacta de un incendio puede ser difícil durante el momento caótico experimentado en el evento. Se puede y se debe incorporar un sistema de monitoreo remoto en el diseño integral de ventilación.

9 Referencias

- McPherson, M.J., 2009, *Ingeniería de Ventilación Subterránea*, Publicado por Mine Ventilation Services, Inc., 824 pp.
- Mine Ventilation Services, Inc., "MineFire Versión 1.0, Un Simulador para Incendios Subterráneos, Manual & Tutorial del Usuario," 2003.
- Mitchell, D.W., 1998, "Lucha, Detección y Prevención de Incendios Mineros" Tercera Edición, Publicado por Intertec Publishing Company, ISBN: 0-929531-35-3.
- Prosser, B. y Ruckman, R., 2010, "Conduciendo un Estudio de Modelamiento de Incendios" 13^{er} Simposio de Ventilación de Minas en E.U.A., 365-370 pp.
- Thomson, N., 2002, "Peligros de Incendio en la Industria", Publicado por Butterworth-Heinemann, ISBN: 0-7506-53210-3
- Reglas Chilenas Mineras de Seguridad, Título III, Exploración Minera Subterránea, Capítulo Ocho, "Prevención y Control de Incendios."
- Hartman, H.L, et. Al, 1997, "Ventilación de Minas y Acondicionamiento de Aire," Tercera Edición, John Wiley e Hijos, Inc., 730 pp.