

# ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR CONJUGADA EN EL SISTEMA GALERÍA-ROCA ENCAJANTE EN MINAS SUBTERRÁNEAS PROFUNDAS

MARTÍNEZ GARCÍA, EVA

[emg9@alu.upct.es](mailto:emg9@alu.upct.es)

Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

## RESUMEN

El estudio geofísico y explotación de nuevos yacimientos minerales, así como el aprovechamiento de las reservas de los ya existentes para poder cubrir la demanda de producción actual, implican la apertura de subniveles de excavación cada vez más profundos. De este modo, entran en juego diversos factores que afectan al clima subterráneo de la mina. De ellos, el más influyente, el aumento de temperatura en la superficie de la roca encajante originado por el gradiente geotérmico. También se consideran cargas térmicas significativas la influencia de los humos de exhaustación de la maquinaria diésel, la humedad del aire, la ventilación de las galerías.

Todos estos actores provocan un incremento térmico en la atmósfera donde se desarrolla la producción subterránea, y hacen imprescindible la adopción de sistemas eficientes de ventilación y refrigeración de las galerías de trabajo que de otra forma se verían sometidas a muy altas temperaturas, aire contaminado con elevadas concentraciones de gases nocivos y oxígeno insuficiente para unas condiciones salubres de trabajo.

En una primera etapa de estudio se aborda la modelización con CFD del gradiente geotérmico y la resolución del cálculo tridimensional no estacionario de la transferencia de calor conjugada entre la galería, sometida a ventilación, y la superficie desnuda de la roca.

**Palabras clave:** gradiente geotérmico, análisis transitorio de la transferencia de calor, ventilación.

## 1. Introducción

El crecimiento exponencial de la población mundial supone un aumento en la demanda de diversos minerales que tras su tratamiento y transformación satisfacen las necesidades de confort, seguridad energética, desarrollo tecnológico y servicios que suponen el mantenimiento y mejora de la calidad de vida. Estos minerales son considerados por la Comisión Europea por sus siglas en inglés CRM (Critical Raw Materials o materias primas críticas) y constituyen los pilares fundamentales de la economía globalizada. En esta clasificación se incluyen, entre otros, carbón, niobio, cobalto, tierras raras o el grupo de los metales del platino [1].

Estos minerales se consideran críticos, tanto por su importancia para la sustentación de la economía mundial como por su escasez, dificultad de localización y extracción. Por este motivo, es necesario explorar y desarrollar la producción extractiva a mayores profundidades -hasta 3,4 km en el caso de minas subterráneas profundas y más de 3,4 km en el caso de minas subterráneas ultra-profundas.

La operación a mayores profundidades hace imprescindible evaluar y controlar las condiciones de seguridad y salud en las galerías subterráneas, ya que van a estar sometidas a los aumentos de temperatura, la humedad, las partículas disueltas en el aire y gases asociados a los propios minerales a esa profundidad, o bien producidos por los equipos de combustión utilizados en la actividad extractiva.

Estos factores hacen del consumo de energía del sistema de ventilación-refrigeración, que es el encargado de diluir los gases perjudiciales para la salud y mantener una temperatura de trabajabilidad óptima en el interior de la mina, una partida de hasta el sesenta por ciento de los costes totales de la explotación [2]. En este trabajo se presenta un modelo numérico para evaluar las cargas térmicas en una galería subterránea profunda, haciendo uso de técnicas de mecánica de fluidos computacional. Se trata de una propuesta no afrontada hasta la fecha en la bibliografía científica especializada, y está orientada a poder conocer la demanda de energía durante los largos periodos transitorios que suceden al arranque de una instalación de ventilación subterránea. El estudio presentado aborda la generación de una geometría tridimensional formada por una galería con tres galerías transversales a la misma y rodeada por una roca encajante, y la posterior solución del problema no estacionario de transferencia de calor conjugada en el par galería-roca.

## 2. Fenómenos de transferencia de origen geológico - Gradiente geotérmico

Para evaluar la influencia del aumento de temperatura en el interior de las galerías en minas profundas y ultra-profundas, se deben tener en cuenta los focos que la originan, como son: generación de calor asociada a los equipos mecánicos de trabajo, la importante aportación térmica que supone el flujo de calor que proviene del núcleo terrestre, que genera una estratificación térmica vertical en la roca llamada gradiente geotérmico.

El cálculo computacional de esa influencia se realiza resolviendo la ecuación de la energía en estado transitorio en el par galería-roca encajante, así como la influencia del sistema de refrigeración-ventilación sobre el comportamiento del conjunto.

Según la bibliografía especializada, el valor promedio del gradiente geotérmico ( $\frac{d\theta}{dD}$ ) suele variar entre 0,05-0,07 W/m<sup>2</sup>. Para su cálculo se aplica al medio rocoso continuo la Ley de Fourier de la conducción de calor [3], quedando la ecuación:

$$q = -kA \frac{d\theta}{dx} \Rightarrow G = q'' = \frac{d\theta}{dD} \Rightarrow \quad (1)$$

donde,

q= calor de conducción (W)

G=q''= flujo de calor/gradiente geotérmico (W/m<sup>2</sup>)

k= conductividad térmica de la roca (W/mK)

A= superficie de propagación del calor (m<sup>2</sup>)

$\theta$ = temperatura de la roca (°C)

D= profundidad (m)

Las formulaciones matemáticas que comprenden el cálculo y resolución del estudio transitorio de los flujos de calor son: ecuación de conservación de la masa, momento y energía [3]:

$$\nabla \rho \mathbf{U} = 0 \quad \text{Conservación masa} \quad (2)$$

$$\nabla \rho \mathbf{U} \mathbf{U} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \mathbf{g} \quad \text{Conservación momento} \quad (3)$$

$$\nabla (\rho C_p \mathbf{U} T) = \nabla (k_{eff} + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t}) \nabla T \quad \text{Conservación energía} \quad (4)$$

### 3. Descripción del caso en estudio –Sistema acoplado galería-roca

Se considera una galería subterránea de sección 25 m<sup>2</sup>, longitud 80 m y transversales a ella 3 galerías de 30 m, 30 m y 25 m de longitud con la misma sección que la galería principal. La red subterránea descrita se sitúa a 3000 m de profundidad respecto al nivel de la superficie del terreno. El dominio roca completa comprende un prisma cuadrangular de altura 3100 m y lado 100 m. Se considera un sistema de ventilación soplante de sección 0.75 m<sup>2</sup>, según se muestra en las figuras 1 y 2:

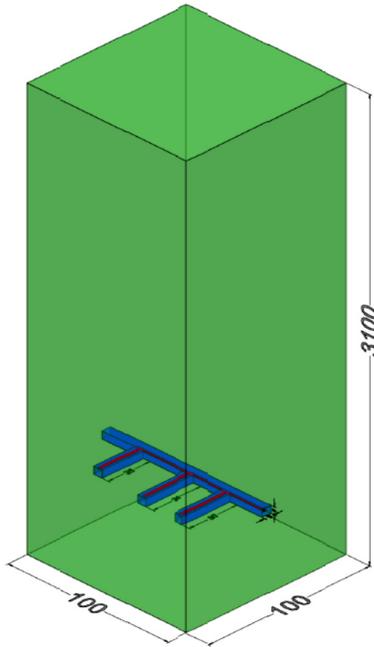


Figura 1. Geometría dominio roca completo.

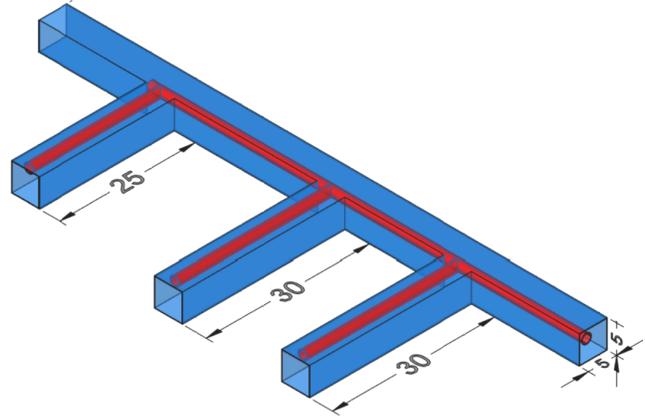


Figura 2. Detalle galerías

Las propiedades térmicas de la roca encajante (dominio-roca) se recogen en la tabla 1:

Tabla 1. Propiedades térmicas de la roca

$T_{roca}$ (K)	$k_{roca}$ (W/m·K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kg·K)
357	0,33	1296	1300

Para el sistema de ventilación se consideran los conductos de salida de aire de refrigeración situados a 5 m de distancia del fondo de saco en cada galería transversal. La temperatura de impulsión del aire es 25 °C (298 K) y se impone una velocidad de salida de 12 m/s en cada conducto. Se considera que el aire que entra en la galería principal tiene una velocidad de propagación de 1 m/s.

Asimismo, en la superficie inferior del dominio roca (cota -3100 m) se impone un flujo de calor, correspondiente al gradiente geotérmico, de 0,07 W/m<sup>2</sup>.

#### 4. Resolución de flujo en el sistema acoplado y Resultados

En este trabajo se acomete una primera resolución simplificada del sistema térmico galería – roca encajante, mediante la herramienta de CFD ANSYS.

La geometría y las condiciones de contorno se han resuelto de forma independiente para cada parte del dominio físico, utilizando un Pressure Based Solver, flujo transitorio, discretización de segundo orden y modelo turbulento  $k - \omega$ , SST. Debe tenerse en cuenta que el flujo en el interior de los conductos de ventilación no ha sido resuelto sino que se ha impuesto a la salida de estos una solución estacionaria según las condiciones de contorno indicadas en el apartado anterior.

Para el cálculo del flujo en el interior de las galerías se imponen las condiciones de contorno siguientes:

$$z = -3100 \text{ m}, \forall x, y \quad q'' = 0,07 \text{ W/m}^2$$

$$z = 0 \text{ m}, \forall x, y \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_{z=0} - T_{\infty})$$

$$t = 0 \quad \begin{cases} T(x, y, z) = T_{estacionaria} \\ v_g = 0 \\ v_c = 0 \end{cases}$$

donde:  $z$ , es la profundidad,  $h$ , es el coeficiente de convección para  $z=0$  (superficie),  $v_g$ , es la velocidad del aire en el interior de la galería,  $v_c$ , es la velocidad del aire a la salida de los conductos de refrigeración y  $T_{estacionaria}$  es la distribución de temperatura que se obtiene al resolver la ecuación de conducción de calor en el dominio descrito anteriormente.

Se obtienen los valores de estratificación vertical de la temperatura que se muestran en la figura 3.

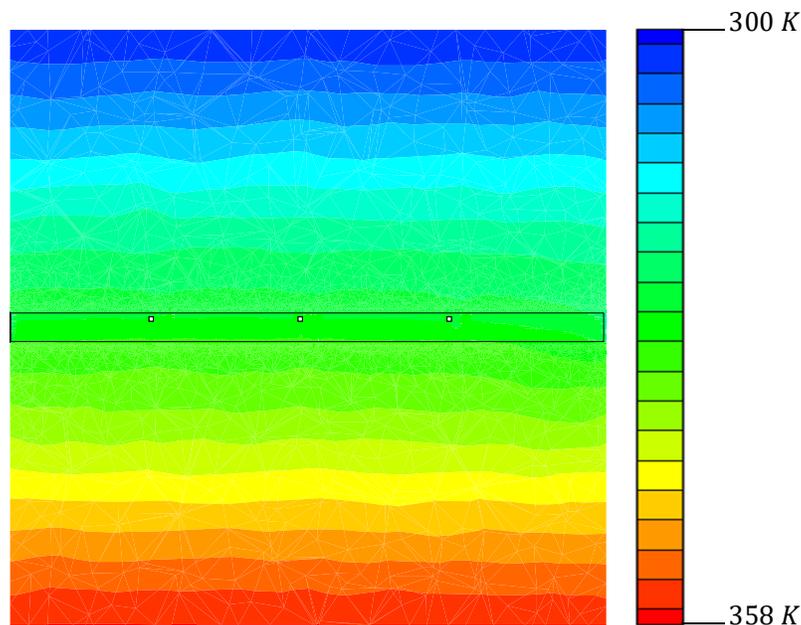


Figura 3: Campo vertical de temperatura

Como puede apreciarse en la figura 4, el efecto del sistema de refrigeración sobre el aire en el interior de la galería provoca, de forma casi inmediata, que la temperatura del aire sufra un descenso hasta las condiciones de confort consigna 25 °C mientras la temperatura de la pared de la roca y el resto de su dominio permanecen a 80 °C ..

Se asume que la temperatura del aire de refrigeración es isoterma aunque las paredes de la galería estén a alta temperatura, de esta forma el coste computacional queda simplificado, resolviendo sólo la ecuación de la energía

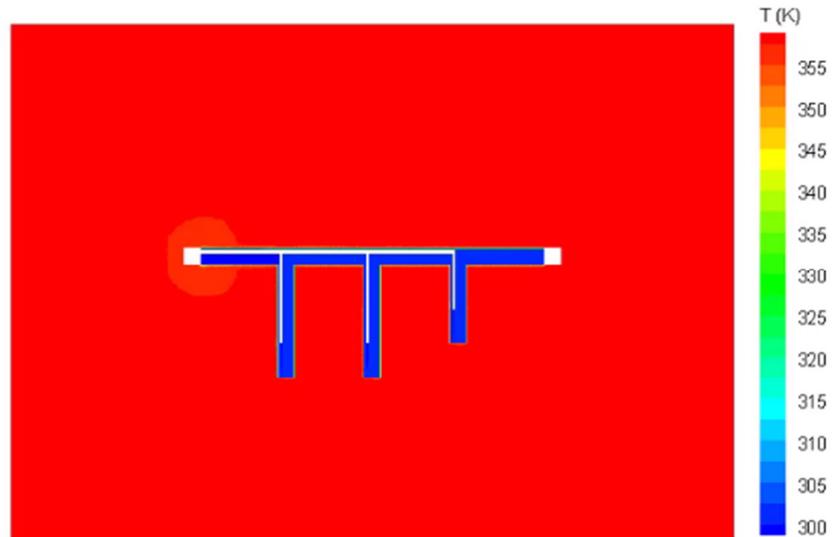
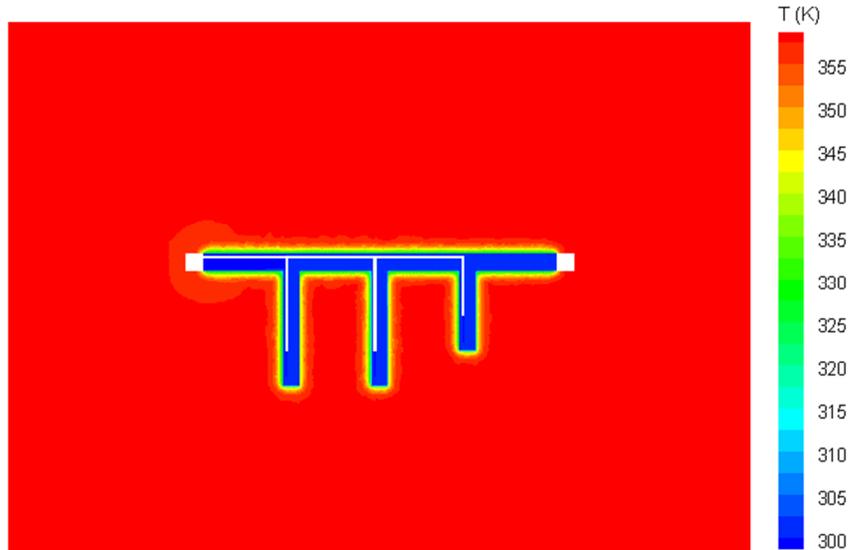


Figura 4: Solución transitoria, t=0 s

Para calcular el transitorio del fenómeno acoplado de conducción-convección se considera:

$$t > 0 \begin{cases} \Delta T = 3600 \text{ s} \\ v_g = 1 \text{ m/s} \\ v_c = 12 \text{ m/s} \end{cases}$$

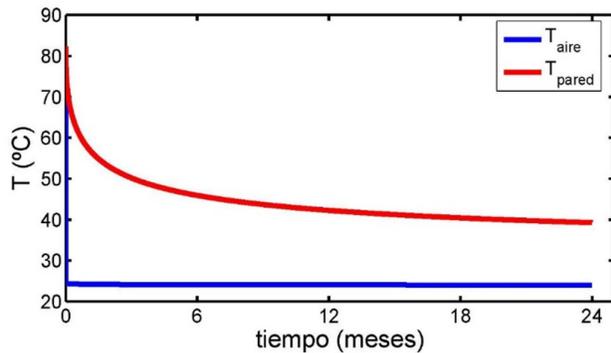


Tras 24 meses la evolución de la temperatura en la roca encajante se muestra en la figura 5:

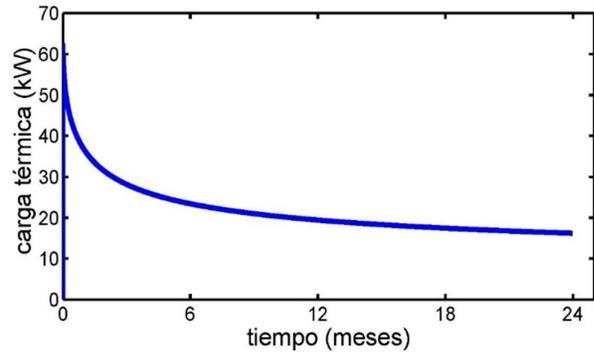
Figura 5. Solución transitoria tras 24 meses

Se aprecia que después de un largo periodo la roca circundante a la galería sufre un descenso progresivo de su temperatura mientras que el aire en el interior de la ésta se conserva a 25 °C (298 K), como muestra la gráfica 1:

Gráfica 1. Evolución de la Temperatura



Gráfica 2. Estabilización Cargas Térmicas



Se aprecia una tendencia al descenso en las cargas térmicas aportadas al interior de la galería., como se puede valorar en la gráfica 2.

## 5. Conclusiones

La solución acoplada del flujo y la transmisión de calor en el par galería-roca encajante es un método apropiado para evaluar las cargas térmicas en galerías subterráneas profundas.

En las condiciones estudiadas, existe un descenso en la temperatura de pared y flujos de calor hacia las galerías que es acusado durante los primeros meses de funcionamiento de la instalación, pero cuya velocidad de cambio se modera con el tiempo.

La temperatura en la galería cae súbitamente al comenzar la impulsión de aire a través del sistema de ventilación.

Sin embargo, la temperatura en la roca circundante disminuye lentamente, debido a la alta capacidad térmica y baja difusividad de la roca encajante.

La roca encajante funciona como una fuente infinita de calor, que fluye hacia el interior de la galería en un proceso no estacionario que, aparentemente, no culminaría en la consecución de una solución estable en el tiempo.

## 6. Agradecimientos

El más sincero agradecimiento al profesor Juan P. Solano y el Departamento de Ingeniería térmica y de fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena por brindarme su apoyo y confianza constantes.

## 7. Referencias

- [1] Comisión Europea (2011). *Communication from the European commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions talking the challenges in commodity markets and on raw materials*, - <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0025>
- [2] Sasmito Agus P. Jundika A. Kurnia B. *A Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine*. Applied Thermal Engineering, 2015, vol 90, pp.1144-1150
- [3] McPherson, M. *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. Nueva Delhi. Chapman & Hall, 1993, 526-527p.(Thomson Press).