



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Campus
de Excelencia
Internacional



E.T.S. de Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos
y de Ingeniería de Minas

Departamento de Ingeniería Térmica y fluidos

Simulación numérica del fenómeno no estacionario de transferencia de calor conjugada en el par galería-roca encajante en minas subterráneas profundas

Titulación: Grado en Ingeniería de Recursos
Minerales y Energía

Alumno/a: Eva Martínez García

Director: Juan Pedro Luna Abad

Cartagena, septiembre de 2017

Dedicado a mis padres y hermanos...

Agradecimientos

A mi director de proyecto, Juan Pedro Luna Abad, porque ha hecho posible llevar a buen fin este proyecto, por sus consejos estratégicos y organizativos y su trato siempre amable y servicial.

A mis padres por su apoyo incondicional y constante en la lucha.

A mis hermanos y sobrinos por existir, sobre todo mi hermana Raquel a quién le debo tanto.

A mis amigos por su comprensión y ánimo, por estar siempre para mí.

<<Si pudiéramos cambiar, lo imposible podría suceder>>

Mahmud Darwish

<<Mantén siempre a Ítaca en tu mente, llegar allí es tu destino.....

Aunque la encuentres pobre, Ítaca de ti no se ha burlado. Convertido en tan sabio, y con tanta experiencia, ya habrás comprendido el significado de las Ítacas>>

Ítaca. Constantino P. Kavafis

<< Antes que el amor, el dinero o la fama, deseo la verdad. Me senté en una mesa donde había manjares exquisitos y vino en abundancia, rodeado de comensales obsequiosos, pero carente de verdad y sinceridad.

Me alejé de la mesa inhóspita todavía sintiendo hambre.

La hospitalidad era tan fría como el hielo>>

Walden. Henry David Thoreau

<<El verdadero carácter de un hombre se puede apreciar en qué haría si supiera que nadie nunca lo sabría >>

Thomas B. Macaulay

<< Paradoja: La belleza del mar cantada por el náufrago>>

Breviario de la Aurora. Rafael Argullol

<<No lo intentes, hazlo o no lo hagas, pero no lo intentes>>

Maestro Yoda

Índice de figuras

Índice de tablas

Capítulo 1. Introducción

- 1.1. Justificación del proyecto
- 1.2. Definición del problema
- 1.3. Identificación de objetivos

Capítulo 2. Fenómenos de transferencia de calor que aparecen en el problema

- 2.1. Conducción: Sólido semi-infinito
- 2.2. Convección forzada: Flujo interno
 - 2.1.1. Longitud de entrada hidrodinámica
 - 2.1.2. Longitud de entrada térmica
 - 2.1.3. Flujo térmica e hidráulicamente desarrollado
 - 2.1.4. Flujo turbulento en conductos
- 2.3. Convección Mixta

Capítulo 3. Geometría y mallado

- 3.1. Diseño de la geometría
- 3.2. Estrategias de mallado
 - 3.2.1. Sub-modelo convectivo
 - 3.2.1.1. Creación y mallado de caras y aristas principales
 - 3.2.1.2. Creación y mallado de volúmenes
 - 3.2.1.3. Definición de medios continuos y condiciones de contorno
 - 3.2.1.4. Resumen geométrico y tamaño de la malla
 - 3.2.2. Modelos globales
 - 3.2.2.1. Creación y mallado de caras y aristas principales
 - 3.2.2.2. Creación y mallado de volúmenes
 - 3.2.2.3. Definición de medios continuos y condiciones de contorno
 - 3.2.2.4. Resumen geométrico y tamaño de la malla

Capítulo 4. Modelos numéricos utilizados

- 4.1. Sub-modelo convectivo

- 4.1.1. Hipótesis de simulación en FLUENT
 - 4.1.1.1. Estrategia de simulación
 - 4.1.1.2. Criterios de convergencia
 - 4.1.1.3. Programación del estado transitorio
- 4.1.2. Condiciones de contorno
- 4.1.3. Materiales
- 4.1.4. Simulaciones realizadas
- 4.2. Modelo global acoplado
 - 4.2.1. Modelo global tipo I: galería desnuda
 - 4.2.1.1. Hipótesis de simulación en FLUENT
 - 4.2.1.1.1. Estrategia de simulación
 - 4.2.1.1.2. Criterios de convergencia
 - 4.2.1.1.3. Programación del estado transitorio
 - 4.2.1.2. Condiciones de contorno
 - 4.2.1.3. Materiales
 - 4.2.2. Modelo global tipo II: galería con revestimiento
 - 4.2.2.1. Materiales
 - 4.2.3. Simulaciones realizadas con los modelos globales

Capítulo 5. Resultados

- 5.1. Sub-modelo convectivo
 - 5.1.1. Metodología de post-procesado. Solución transitoria. Estudio de la transferencia de calor.
 - 5.1.2. Interpretación de los parámetros adimensionales de la transferencia de calor
 - 5.1.2. Convección Mixta
 - 5.1.3. Conclusiones del sub-modelo convectivo
- 5.2. Modelo global
 - 5.2.1. Simulaciones modelo global roca desnuda
 - 5.2.1.1. Etapa inicial

5.2.1.2. Etapa final

5.2.2. Simulaciones modelo global roca con revestimiento

5.2.3. Conclusiones modelos globales

Capítulo 6. Estudios posteriores

Anexos

Anexo I. Programación de ficheros journal

Anexo II. Programación código Matlab

Bibliografía

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 (a) Esquema de explotación de cámaras y pilares. (b) Esquema de explotación de subniveles.....	8
---	---

Capítulo 2

Figura 2.1. Modelo ideal sólido semi-infinito.....	11
Figura 2.2. Desarrollo de la capa límite de velocidad en la región de entrada en conducto horizontal.....	12
Figura 2.3. Desarrollo de la capa límite térmica en un conducto horizontal.....	14
Figura 2.4. Caracterización de la relación entre capa límite térmica y capa límite de velocidad mediante Pr	15
Figura 2.5 (a) Canal de sección rectangular; (b) Líneas isotermas para $Pr=1$ y $Ra = 2 \times 10^4$	17
Figura 2.6: Valor de Rayleigh crítico para cavidades calentadas desde abajo.....	18

Capítulo 3

Figura 3.1: Geometría de la mina estudiada.....	20
Figura 3.2 Detalle de la geometría de la red de galerías subterránea (dimensiones en metros)	21
Figura 3.3 (a) Geometría de la galería con revestimiento. (b) Geometría de la galería desnuda.....	21
Figura 3.4 Geometría cara entrada de la galería para el sub-modelo convectivo.....	23
Figura 3.5 Ejemplo de mallado no simétrico de arista. Primer punto crítico de la construcción de la malla. Modeling Guide GAMBIT 2.4.....	23
Figura 3.6 Detalle malla refinada en las zonas más cercanas a la pared de roca. GAMBIT.....	24
Figura 3.7 Esquema de mallada cara de entrada a la galería subterránea. GAMBIT.....	24
Figura 3.8 Malla de la cara de entrada a la galería subterránea.....	25
Figura 3.9 Detalle mallado arista galería principal. GAMBIT.....	26
Figura 3.10 Volúmenes galería completa mallada.....	26
Figura 3.11 Detalle mallado cross-cut, tamaño inter-nodal muy reducido.....	27
Figura 3.12 (a) Definición medio continuo. (b) Definición condiciones de contorno. GAMBIT.....	28
Figura 3.13 Cara principal entrada a la galería.....	29
Figura 3.14 Volumen mallado galería completa.....	30

Figura 3.15 Detalle mallado galería completa.....	31
Figura 3.16 Volumen de roca envolvente inicial.....	31
Figura 3.17 Volúmenes de la galería y la roca ensamblados mediante interfase.....	32
Figura 3.18 Programación función de tamaño. GAMBIT.....	33
Figura 3.19 Detalle mallado cara lateral volumen roca.....	33
Figura 3.20 Esquema de mallado para las caras de los volúmenes de roca. GAMBIT.....	34
Figura 3.21. Modelo global mallado completo.....	35
Figura 3.22. Esquema de mallado de los volúmenes de roca. GAMBIT.....	35
Figura 3.23 (a) Definición medio continuo. (b) Definición condiciones de contorno. GAMBIT.....	36

Capítulo 4

Figura 4.1 Detalle de la geometría general de los sub-modelos convectivos. Galería subterránea.....	37
Figura 4.2 Algoritmo de Solver segregado transitorio. Fluent UDF's Manual, FLUENT.....	40
Figura 4.3 Activación del Solver transitorio, 2° orden de discretización, FLUENT.....	40
Figura 4.4 Activación ecuaciones transitorio, 2° orden de discretización, FLUENT.....	41
Figura 4.5 Activación de la gravedad. FLUENT.....	42
Figura 4.6 Activación aproximación de Boussinesq. FLUENT.....	42
Figura 4.7 Selección modelo de viscosidad turbulento $k - \omega$ SST. FLUENT.....	42
Figura 4.8 Criterios de convergencia de residuos programados para la simulación sub-modelo convectivo. FLUENT.....	45
Figura 4.9 Programación intervalos de tiempo para estado transitorio. FLUENT.....	45
Figura 4.10 Condiciones de contorno modelo convectivo.....	46
Figura 4.11 Condiciones de contorno temperatura de pared constante. FLUENT.....	47
Figura 4.12 Condiciones de contorno iniciales, resolución en estacionario. FLUENT.....	49
Figura 4.13 Condiciones de contorno velocidad de entrada galería. FLUENT.....	49
Figura 4.14 Condiciones de contorno velocidad de soplantes. FLUENT.....	50
Figura 4.15 Condiciones de contorno presión a la salida de la galería. FLUENT.....	51
Figura 4.16 Modelo numérico completo. Galería más roca. GAMBIT.....	54
Figura 4.17 Condiciones de contorno iniciales para fan1,2, y 3, entrada y salida. Resolución en estacionario. Modelo Global. FLUENT.....	55
Figura 4.18 Criterios de convergencia de residuos programados para la simulación sub-modelo convectivo. FLUENT.....	56

Figura 4.18 Programación intervalos de tiempo iniciales y diarios para estado transitorio.	
Figura 4.19 Programación intervalos de tiempo iniciales y diarios para estado transitorio.	
Modelo global roca desnuda. FLUENT.....	57
Figura 4.20 Condiciones de contorno modelo convectivo.....	58
Figura 4.21 Condición de contorno hflux. Modelo Global. FLUENT.....	58
Figura 4.22 Condición de contorno convection. Modelo Global. FLUENT.....	59
Figura 4.23 Definición de zona de interfase o ensamblaje de mallas. FLUENT.....	60
Figura 4.2 (a) hormigón celular (b) hormigón proyectado.....	61

Capítulo 5

Figura 5.1. Definición superficies de análisis del fluido.....	64
Figura 5.2 Resolución campo de temperatura en estado transitorio en la galería.....	66
Figura 5.3 Resolución campo de temperatura en estado transitorio en la galería.....	67
Figura 5.4 Evolución de la temperatura del aire en los primeros minutos de simulación. Temperatura de pared 80°C.....	68
Figura 5.5 Gráfica comparativa evolución temperatura medio de fluido para distintas temperaturas de pared.....	68
Figura 5.6 Patrones de convección mixta. Celdas de Bénard.....	74
Figura 5.7 (a) Patrones de flujo simulaciones con influencia de la gravedad. (b) Patrones de flujo sin influencia de la gravedad.....	74
Figura 5.8 Patrones de convección mixta. Gradiente de V_y en sección transversal cross-cut1. Temperatura de ventilación 25°C.....	75
Figura 5.9 Evolución de coeficiente de convección.....	76
Figura 5.10 Evolución de Ra, indicador de los efectos de flotación.....	76
Figura 5.11 Distribución vertical de la temperatura en el volumen completo. Estado estacionario....	79
Figura 5.12. Resolución campo de temperatura en estado transitorio en la galería.....	82
Figura 5.13 Evolución de la temperatura media del fluido y la temperatura de pared.....	83
Figura 5.14 Evolución de temperatura de pared durante 4 primeros años de producción.....	84
Figura 5.15 Evolución cargas térmicas que penetran en la galería. Simulación durante 4 años.....	85
Figura 5.16 Evolución del enfriamiento global de la roca envolvente de la galería durante los 4 primeros años de simulación.....	87

Figura 5.17 Planos detalle del volumen de roca encajante afectados por el proceso de enfriamiento.....	90
Figura 5.18 Evolución de la temperatura en superficie lineal $z = -40$ metros.....	91
Figura 5.19 Evolución de la temperatura en superficie lineal $z = 10$ metros.....	92
Figura 5.20 Evolución de la temperatura en la superficie lineal $y = 10$ metros.....	92
Figura 5.21 Gráfica comparativa de la relación de entre temperatura de pared y temperatura media del fluido obtenida en los modelos globales.....	93
Figura 5.22 Evolución de las cargas térmicas obtenidas en los modelos globales.....	95

Índice de tablas

Capítulo 3

Tabla 3.1 Resumen geometría sub-modelo convectivo.....	28
Tabla 3.2 Resumen elementos que constituyen el mallado del sub-modelo convectivo.....	29
Tabla 3.3 Resumen geometría modelo global.....	37
Tabla 3.4 Resumen elementos que constituyen el mallado del modelo global.....	37

Capítulo 4

Tabla 4.1. Propiedades del fluido: AIRE. FLUENT.....	52
Tabla 4.2. Propiedades del sólido paredes de roca. Carbón. FLUENT.....	52
Tabla 4.3 Simulaciones realizadas para sub-modelo convectivo.....	53
Tabla 4.4. Propiedades del revestimiento de mortero aligerado y proyectado.....	61
Tabla 4.5. Principales condiciones de contorno para las simulaciones de los modelos globales.....	62

Capítulo 5

Tabla 5.1 Resultados simulaciones numéricas sub-modelo convectivo.....	78
Tabla 5.1 Simulaciones ensayadas para los modelos numéricos globales.....	79
Tabla 5.2 Resumen comparativo de temperaturas de fluido y pared de los modelos numéricos globales.....	95
Tabla 5.3 Resumen comparativo cargas térmicas aportadas a la galería en las simulaciones de los modelos numéricos globales.....	96

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1. Justificación del proyecto

Este siglo ha de hacer frente a la resolución de paradigmas relacionados con la búsqueda del bienestar común. Las diversas industrias productoras encaran desafíos que ponen a prueba su capacidad de respuesta ante la escasez de recursos, el incremento exponencial de la población y los límites del planeta.

Una situación que pone en tela de juicio la capacidad, general y global, de optimización y eficiencia en términos de adaptación y desarrollo tecnológicos, seguridad energética y distribución equitativa de los insumos. Y que junto con disminución de los impactos que estas actividades provoquen en el entorno natural, constituye los puntos calientes en los que enfocar toda actividad productiva y de crecimiento.

En la actualidad, más del noventa por ciento de los todos los productos que se consumen proceden de la actividad minera: aluminio para las ventanas y motores, platino, rodio o tungsteno para elementos de medida y control industrial, potasio para fertilizantes en agricultura, radón y astato para medicina radiativa, renio para motores de cohetes, Tantalio para dispositivos electrónicos, Silicio para la fabricación de células solares o chips. Este hecho implica la relevancia de mantener una producción constante en este sector.

Desde Bruselas, la Comisión Europea (Europea, s.f.) una ha creado una lista de las materias primas consideradas cruciales para conservar el grado de desarrollo tecnológico y calidad de vida actuales. Son elementos que se encuentran en mineralizaciones de difícil localización, explotación y suministro, y su relevancia para el continuo desarrollo y abastecimiento industrial, los hace ser considerados como críticos o 'Critical Raw Material' (CRM, por sus siglas en inglés): galio, germanio, indio, magnesio, boratos, berilio, cobalto, cromo, flúor, grupo de los platinos, tungsteno, etc.

El conocimiento de esta situación convierte en prioritaria la localización de nuevos yacimientos económicamente rentables y la explotación de reservas situadas a grandes profundidades. Siendo lo más frecuente las minas profundas (hasta 3000 m) y ultra-profundas (>3200 m).

En las labores subterráneas es de vital importancia la supervisión estricta de los parámetros de seguridad y salud de la atmósfera de trabajo. A medida que se profundiza, las condiciones de presión y temperatura empeoran, resultando imprescindible la utilización de sistemas de ventilación y refrigeración que se encarguen de reducir la humedad del ambiente, las altas temperaturas producidas por el gradiente geotérmico, la temperatura superficial de los motores del parque de maquinaria, la dilución de gases anóxicos contenidos en la roca, tapones de humos de voladuras y tubos de escape de los equipos diésel, entre ellos: nitrógeno, anhídrido carbónico, monóxido de carbono, gases nitroso, anhídrido sulfuroso, gas sulfhídrico o grisú (metano).

A estas profundidades los sistemas de ventilación encaran vertiginosos desafíos para verificar los parámetros de rendimiento ambiental de las minas en operación. Es por ello que aparece la necesidad de utilizar herramientas de análisis multicriterio con las que evaluar el efecto de todos los actores en el clima subterráneo, así como poder prever y planificar las condiciones ambientales del mismo. En la actualidad se está fomentando el uso de metodologías más complejas y exhaustivas de simulación de las características subterráneas basada en una reconstrucción tridimensional y aplicando la mecánica de fluidos computacional, CFD. De esta

forma es posible hacer una caracterización de la atmósfera subterránea y los efectos que la ventilación y el resto de flujos existentes en la mina, producen sobre ella.

El desarrollo de metodologías que ayuden a comprender bien los fenómenos térmicos que afectan la atmósfera interna de trabajo para conseguir optimizar el sistema de ventilación-refrigeración, V-R, suponen un triunfo para las mejoras de los ambientes de la actividad subterránea, así como un aumento de productividad muy importante ya que el sistema de ventilación constituye un 60% del total de los costes de producción de toda la explotación (P. Sasmito Agus K. C., 2015).

La caracterización experimental de estas mejoras supondría un elevado coste, ya que, ante la imposibilidad de construcción de un prototipo, implicaría la ejecución de obra y medición continua de los parámetros enunciados; este hecho supondría parada de producción, recubrimiento de la roca con diversos materiales aislantes con finalidad de parametrizar el material óptimo, disposición del sistema de ventilación-refrigeración para fines experimentales, etc.

La simulación numérica desarrollada en este trabajo también es una herramienta que permite reducir los costes en las fases de prueba de implementación de estas mejoras sobre el sistema galería subterránea-roca ya que puede predecir el comportamiento térmico de la galería y sus superficies y de qué manera afecta a las demandas del sistema V-R.

1.2. Definición del problema

La validación con modelos de mecánica de fluidos computacional posee un uso muy extendido, aplicable en casi todos los campos y la industria de labores subterráneas no es una excepción. Por esta razón es cada vez más frecuente el desarrollo de programas que monitorizan las condiciones ambientales subterráneas, basados en modelos numéricos de mecánica de fluidos computacional, puesto que su precisión ha demostrado ser excelente para determinar y regular niveles de dilución de gases y humos y temperatura de trabajo de cavidades subterráneas (Isidro D., 2001).

Previo al desarrollo de software de control de explotación son los estudios basados en modelos numéricos capaces de resolver los campos fluido y térmico englobando todas las variables que influyen en ellos. Los investigadores coinciden en que la selección del software apropiado y el diseño de una malla lo suficientemente estructurada y de calidad son elementos esenciales para la obtención de resultados precisos (Hargreaves D.M., 2007).

En enfoque habitual de estudio es el contenido en gas metano o partículas de polvo en el aire subterráneo de la mina y la regulación del sistema de ventilación para su dilución (P. Sasmito Agus E. B., 2013), resolviendo el problema planteado con diversos modelos de turbulencia buscando afinar la precisión de los resultados.

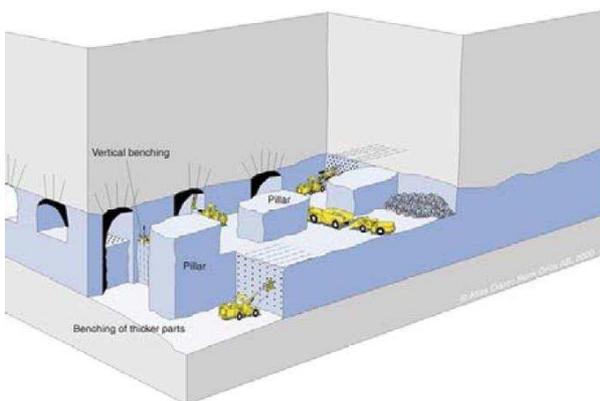
Los estudios centrados en el análisis de los flujos de aire en el interior de las galerías subterráneas, que se ven afectados por las altas temperaturas de los motores del parque de maquinaria y los gases procedentes de los tubos de escape de éstos (P. Sasmito, et al, 2015), son abundantes. En ellos se resuelve el campo fluido utilizando trazadores que permiten analizar índices de dilución, trayectorias, etc. Otra perspectiva es el estudio del ajuste de las curvas del sistema de V-R para obtener una dilución óptima de los gases anóxicos procedentes de las voladuras, los tubos de escape diésel y las altas temperaturas subterráneas (Guang, et al, 2015).

Estas metodologías poseen un sesgo en el análisis del comportamiento térmico del sólido continuo (roca encajante), ya que o no incluyen la interacción de estos gases con los efectos de temperatura o bien la estrategia de simulación consiste en imponer una temperatura de pared constante.

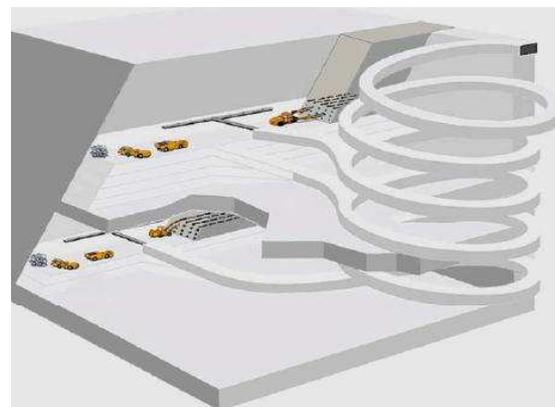
Este trabajo fin de grado se desarrolla una estrategia de resolución transitoria de los fenómenos térmicos que afectan a la temperatura del aire interior y cómo esto influye sobre la regulación del sistema de ventilación-refrigeración, V-R. La apertura de nuevos frentes supone, en las etapas iniciales de operación, cumplir con picos de demanda de V-R más exigentes que cuando las galerías ya están en operación durante varios meses. El análisis del estado transitorio también es importante desde el punto de vista mecánico, puesto que conocer el dominio roca enfriado, el tiempo que transcurre en ese enfriamiento y el salto térmico que sufre, capacitan para estudio del comportamiento mecánico del sólido en el que identificar posibles efectos de distensión, fisuras, sismicidad local e inestabilidades.

Los esquemas más frecuentes de explotación subterránea están constituidos por galerías transversales y longitudinales distribuidas a lo largo de varios niveles de profundidad y estos niveles comunicados por rampas. La geometría de las galerías es muy similar a la de túneles destinados a tráfico de vehículos a motor, trenes de alta velocidad o incluso redes de distribución.

Los dos métodos de explotación subterránea más comunes son los denominados: de cámaras y pilares y explotación mediante subniveles, figuras 1.1 (a) y 1.1 (b), respectivamente:



(a)



(b)

Figura 1.1. (a) Esquema de explotación de cámaras y pilares. (b) Esquema de explotación de subniveles.

Se trata de galerías excavadas en un medio rocoso cuyas características térmicas (conductividad, k , difusividad, α , densidad, ρ o calor específico, C_p) son variables en función de su naturaleza. La excavación suele dejar descubiertas paredes de roca con rugosidad superficial ± 0.4 m. Todos los niveles de la mina están dotados de un sistema de ventilación-refrigeración, que puede ser soplante, aspirante o soplante-aspirante, encargado de cubrir las demandas para mantener las condiciones de higiene y salud de la atmósfera subterránea. Las exigencias a estos sistemas de ventilación consisten en dilución de los tapones de gases tras las detonaciones para romper la roca y de los gases procedentes de la maquinaria, estabilización térmica a altas profundidades ocasionada por gradiente geotérmico y las altas temperaturas de los motores de la flota de maquinaria.

Para llevar a cabo el análisis térmico y fluido-dinámico de la atmósfera interior de la mina, se toma como modelo representativo una galería subterránea situada a 3000 metros de profundidad que se encuentra intersecada por 3 galerías transversales o cross-cuts, perteneciente a un esquema de explotación por subniveles.; la roca encajante en la que se encuentra esta galería posee unas dimensiones de 3000x300x300 metros. El material que la constituye es carbón y sus características térmicas se detallan más adelante.

1.3. Identificación de objetivos

Este trabajo fin de grado pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- *Modelizar y simular mediante métodos numéricos el comportamiento de los flujos de aire en el interior de la mina.* Es imprescindible analizar los patrones de flujo que aparecen en el interior de la mina, analizar cómo se ven afectados por la temperatura superficial de las paredes de roca de la galería y la temperatura y velocidad de los flujos de ventilación-refrigeración.
- *Desarrollar de una herramienta que prevea las solicitaciones del sistema de ventilación de una mina subterránea en tiempo real.* Para ello se realiza un análisis transitorio de los fenómenos de transferencia de calor conjugada en el conjunto galería-roca encajante que describe desde el momento inicial las fenomenologías que aparecen en sólido y fluido.
- *Identificar las variables que caracterizan los mecanismos de transferencia de calor que mayor influencia tienen en el ambiente interior de la mina.* Para ello es preciso diseñar la geometría que delimite el volumen de control afectado por los fenómenos de transferencia de calor implicados en una explotación subterránea genérica y estudio paramétrico junto con el cálculo y análisis de las cargas térmicas que fluyen hacia el interior de las galerías.
- *Desarrollar una nueva metodología, basada en CFD, para la caracterización de los fenómenos térmicos, complementaria de las existentes.* Si se pretende desarrollar un método de análisis computacional que sirva para completar y complementar al resto de estudios sobre análisis de comportamiento del clima interior de la mina, se debe acometer un modelo basado en los mismos principios de análisis, aplicando a la resolución de los modelos la mecánica de fluidos computacional.

Estudio comparativo de implementación de mejoras para la disminución efectiva de las cargas térmicas fluyentes hacia la galería subterránea. Simulación y análisis comparativo y caracterización entre el modelo con pared de galería roca-desnuda, el modelo pared de galería roca más mortero proyectado y roca más hormigón aligerado, siendo de singular importancia las diferentes características térmicas de los materiales de recubrimiento.

Capítulo 2: Fenómenos de transferencia de calor que aparecen en el problema

En primer lugar, es preciso enumerar y describir los fundamentos teóricos que respaldan este trabajo final de grado.

El fenómeno principal y responsable del gradiente geotérmico son las reacciones de fusión que se dan en el núcleo terrestre y emiten el flujo de calor constante y asciende hacia la superficie terrestre conocido como gradiente geotérmico, que se propaga por conducción.

Cuando ese flujo encuentra un espacio hueco lleno de aire en su camino ascendente la transferencia de calor que era por conducción se transforma en transferencia de calor por convección, es el caso particular de este estudio.

Dadas las altas temperaturas que se alcanzan en la cara superficial de la pared de la galería también existen fenómenos de radiación, pero serán despreciables pues, como se verá, la convección forzada que es predominante en este caso, va a anular sus efectos.

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:

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

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

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

Donde ρ , es la densidad del fluido; U , es la velocidad del fluido; p , es la presión; τ , son los esfuerzos viscosos; g , es la aceleración de la gravedad; C_p , calor específico del fluido; k_{eff} , es la conductividad térmica del fluido; T , es la temperatura y Pr_t , es número de Prandtl turbulento.

2.1. Conducción: sólido semi-infinito

En todo el volumen sólido de roca, la transferencia de calor se produce por conducción en estado transitorio. Para su entendimiento y estudio se aplica el criterio de análisis de sólido semi-infinito, mediante el cual se considera un cuerpo idealizado con una sola superficie plana que se extiende hacia el infinito en todas las direcciones. Este cuerpo idealizado se utiliza para indicar que el cambio de temperatura en la parte interior del cuerpo que interesa estudiar se debe a condiciones térmicas en una sola superficie.

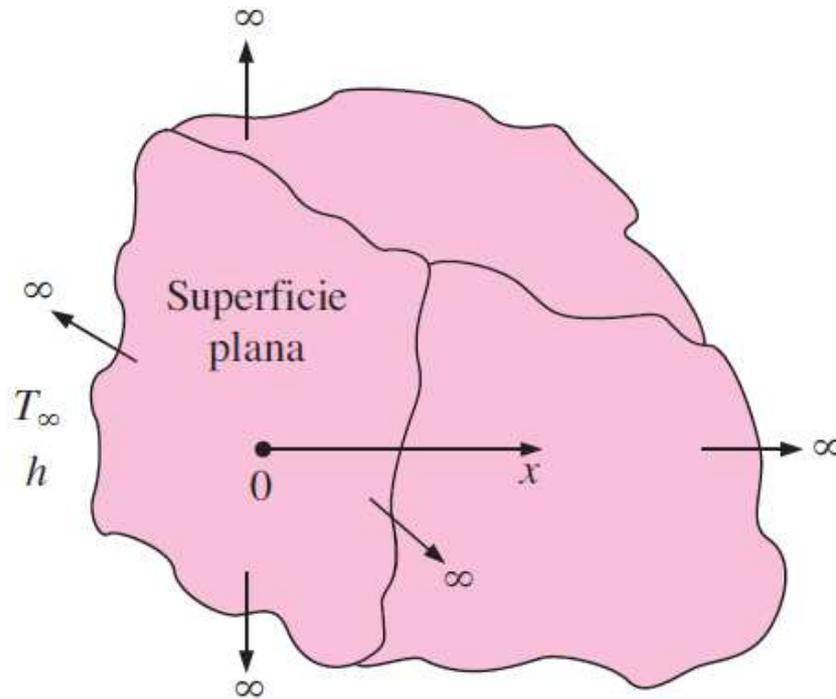


Figura 2.1. Modelo ideal sólido semi-infinito.

Por lo tanto, la roca encajante se considera un sólido de anchura infinita y altura 3100 metros en cuya base se impone un flujo de calor que va a ascender en una dimensión, dirección vertical hacia la superficie exterior. Los fenómenos de conducción en la roca se ven afectados por las propiedades térmicas del material en que se propaga el calor y las condiciones térmicas exteriores en la superficie: coeficiente de convección y temperatura.

Este problema puede ser formulado como una ecuación diferencial parcial que puede resolverse analíticamente mediante la distribución de la temperatura en estado transitorio, definida como:

$$\frac{T(x,t)-T_i}{T_s-T_i} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (2.4)$$

Donde x es la profundidad a la que se calcula la temperatura desde la superficie; T_i , es la temperatura a la que se encuentra en sólido en el instante inicial; T_s , es la temperatura superficial del sólido que es igual a la del aire y $T(x,t)$, es la temperatura en estado transitorio. El término $\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$ es el error de función complementario.

2.2. Convección forzada: Flujo interno

En las galerías de la mina se da un modelo térmico denominado flujo interno. Habitualmente este modelo se caracteriza por un fluido rodeado de paredes sólidas, como en el caso de tuberías, intercambiadores de calor, etc.

En una configuración de flujo interno se deben tener en cuenta: la relación de transferencia de calor o resistencia térmica entre el flujo y las superficies confinantes o paredes y la fricción existente entre corriente fluida y las paredes, ya que la fricción está presente incluso en ausencia

de transferencia de calor. Para calcular la razón de transferencia de calor y la distribución de la temperatura a través del flujo es preciso conocer la velocidad del mismo. Si la variación de la temperatura a lo largo del campo fluido es lo suficientemente pequeña para que la densidad y viscosidad del mismo sea descrita por dos constantes, el cálculo de velocidad y pérdida de carga son independientes del campo de temperatura.

En primer lugar, se detalla el mecanismo de los fenómenos que se dan en la sección de la entrada a la galería y el desarrollo de la capa límite de velocidad y capa límite térmica una vez desarrollados los campos de velocidad y térmico.

2.2.1. Longitud de entrada hidrodinámica

Considerando un flujo laminar a través de un conducto en 2D formado por dos placas paralelas, como se muestra en la figura 2.1. Dónde D , es la distancia entre las dos superficies, la velocidad, U_0 , en el origen, es uniforme. La ecuación de conservación de la masa indica que el valor de U es también la velocidad media, \bar{V} , para cualquier valor de x de la corriente.

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int_{\text{área}} u dA \quad \bar{V} = U_0 = \text{constante} \quad (2.5)$$

Donde A , es el área o sección por la que se desplaza el fluido.

Esta expresión se fundamenta en la suposición de que el fluido entra en la galería desde un extremo cuadrado convergente, por eso se caracteriza con un perfil de velocidad de entrada uniforme.

Para flujo turbulento ($Re_D > 10000$) la longitud hidrodinámica de entrada se puede obtener a partir de una expresión de forma (Langhaar et al., 1942) :

$$X_{h,turb} \approx X_{t,turb} \approx 10D \quad (2.6)$$

Considerando que $D = D_h = \frac{4Ac}{p}$, diámetro hidráulico de sección distinta a la circular; Ac , la sección del conducto y p , el perímetro mojado del mismo.

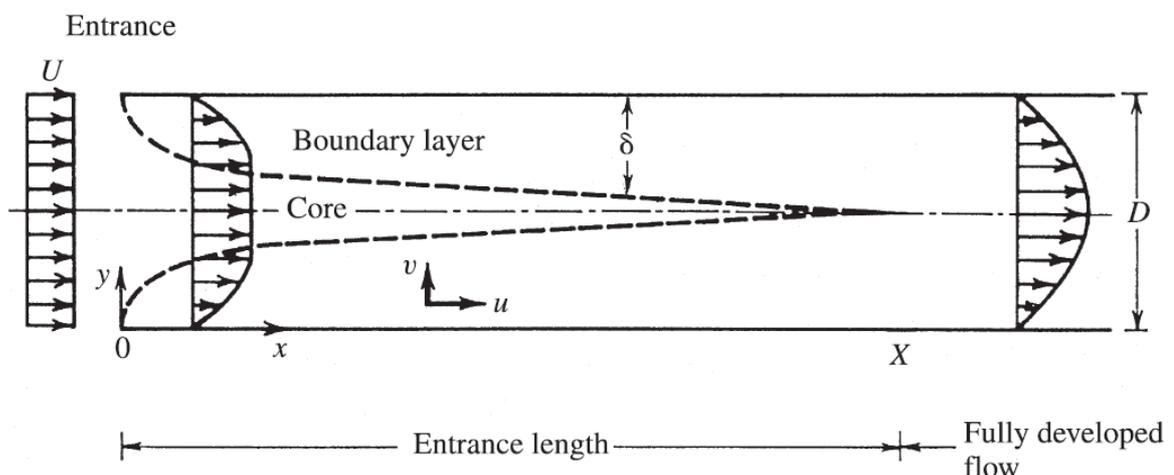


Figura 2.2. Desarrollo de la capa límite de velocidad en la región de entrada en conducto horizontal.

La capa límite de velocidad se desarrolla a lo largo de las paredes del conducto con un perfil parabólico conforme avanza en dirección axial hasta una determinada longitud de la entrada en la que deja de aumentar su espesor, encontrando una sección transversal en la que el centro de la vena fluida posee una velocidad uniforme y mayor a la velocidad del fluido de la capa límite. Este fenómeno transitorio se da en la zona a la que se llama longitud de entrada y diferencia dos zonas en el tubo: tramo más cercano a la entrada o Región de entrada y el tramo en que el flujo está totalmente desarrollado, y sólo se tienen en cuenta la velocidad en las direcciones x e y , siendo esta última constante, hecho que supone que la capa límite de velocidad deje de crecer y viene expresado por la ecuación:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.7)$$

Donde, $\frac{\partial u}{\partial x}$ y $\frac{\partial v}{\partial y}$ son la variación de la velocidad respecto a una posición dada en dirección x e y , respectivamente.

Esta expresión indica que $v = 0$ o lo que es lo mismo, $\partial u / \partial x = 0$, por lo tanto el valor de la velocidad no depende de x si no de la dimensión característica de la sección.

Otra consecuencia de un flujo totalmente desarrollado, es encontrar una presión constante en cada sección transversal ($\partial P / \partial y = 0$) término que se obtiene de sustituir el término $v = 0$ en la ecuación de la cantidad de movimiento (Navier-Stokes), ecuación para la dirección y . Por tanto, haciendo referencia a la figura 2.2, la distribución del campo de presiones es $P(x)$, y la ecuación del momento para la dirección de flujo x se convierte en:

$$\frac{dP}{dx} = \mu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (2.8)$$

Donde μ , es la viscosidad dinámica del fluido.

Ambos lados de la ecuación deben ser igual a la misma constante, uno corresponde al campo x y otro al y . Esta constante es la pérdida de carga por unidad de longitud, $\frac{\Delta P}{L}$:

$$\frac{\Delta P}{L} = - \frac{dP}{dx} \quad (2.9)$$

El valor de la pérdida de carga y de la velocidad en dirección y , se obtienen imponiendo las condiciones de contorno, $u(y_0)$ en las paredes $y \pm D/2$, donde $y = 0$, representa el plano central paralelo a las paredes del conducto, siendo para un conducto circular:

$$u(y) = \frac{3}{2} U \left[1 - \left(\frac{y}{D/2} \right)^2 \right] \quad (2.10)$$

Con

$$U = \frac{D^2}{12\mu} \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad (2.11)$$

Y variando el valor del parámetro 'n' en función del valor de Reynolds (R_e).

2.2.2. Longitud de entrada térmica

Existe también la capa límite térmica, en la que se manifiestan los fenómenos de transferencia de calor en el fluido y que se desarrolla de forma similar a la capa límite de velocidad y no siempre a la misma vez. La región de flujo en que la capa límite térmica se desarrolla y alcanza la parte central del tubo se denomina región de entrada térmica y el flujo en ella se tiene un perfil de temperatura completamente desarrollado, como se aprecia en la figura 2.2.:

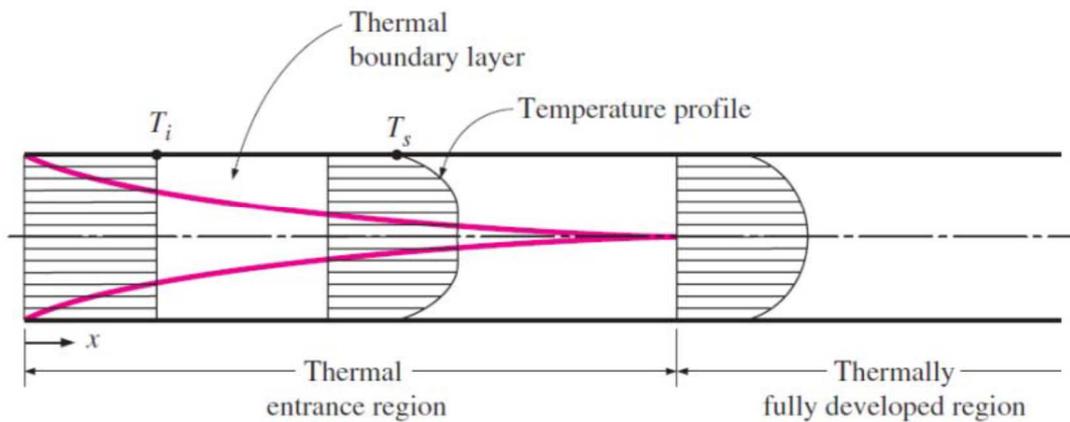


Figura 2.3. Desarrollo de la capa límite térmica en un conducto horizontal.

La expresión que describe el perfil térmico plenamente desarrollado es:

$$\frac{T_0(x) - T(r,x)}{T_0(x) - T_m(x)} = \phi\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (2.12)$$

En la que por consideraciones genéricas la función $\phi\left(\frac{r}{r_0}\right)$ representa la dependencia de r respecto de la geometría específica del conducto (cilíndrica, cuadrada,..etc.) e independiente de la longitud del ducto a la que se mida esta propiedad; $T_0(x)$ (K), es la temperatura inicial en x , y T_m (K) es la media de las temperaturas por sección unitaria o integral de superficie de la propiedad temperatura considerando como dimensión constante el área transversal del ducto:

$$T_m = \frac{1}{UA} \int_A uT \, dA \quad (2.13)$$

Este hecho también puede ser representado mediante análisis del coeficiente de transferencia de calor para el que se emplea:

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (2.14)$$

Donde h (W/m²K), es el coeficiente de convección; k (W/mK), la conductividad térmica de siendo el coeficiente de transferencia de calor por convección:

$$h = \frac{q''}{T_0 - T_m} \quad (2.15)$$

Donde q'' (W/m²), es el flujo de calor que se intercambia entre las partículas del fluido y $T_0 - T_m$, es la diferencia de temperaturas entre la superficie sólida y la temperatura media del fluido.

El número de Prandtl (Pr) es la relación entre la difusión viscosa, ν (m²/s) y la difusividad térmica, α (m²/s). Expresa la relación existente entre la capa límite de velocidad y la capa límite térmica $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ (2.16) Si el valor de $Pr \ll 1$, la capa límite térmica tiene mayor espesor que la capa límite de velocidad implica que la región de la longitud térmica es menor que la región de la longitud hidrodinámica. Cuando $Pr \gg 1$, la capa límite térmica es de menor espesor que la capa límite de velocidad y por lo tanto más desarrollada, como se aprecia en la figura 2.4.:

$$\frac{X_T}{X} \approx Pr$$

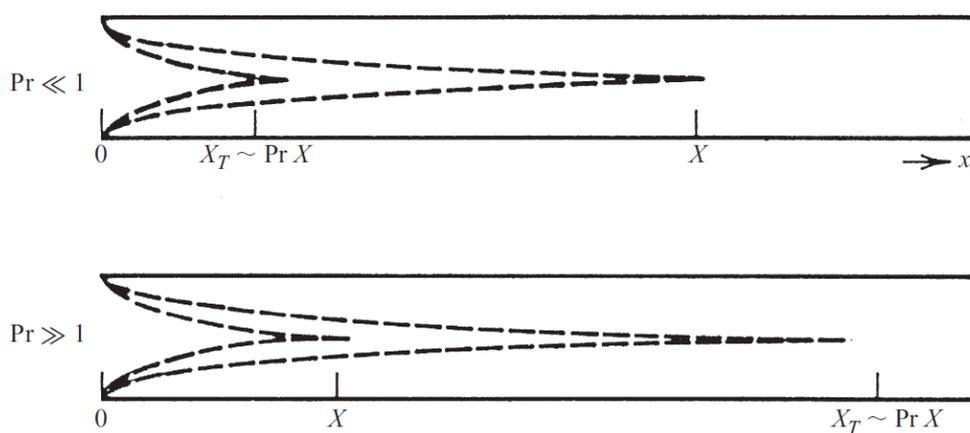


Figura 2.4. Caracterización de la relación entre capa límite térmica y capa límite de velocidad mediante Pr.

Siendo X_T longitud de desarrollo de la capa límite térmica y X la longitud de desarrollo de la capa límite de velocidad.

2.2.3. Flujo térmica e hidráulicamente desarrollado

Para saber si la capa límite térmica y la capa de velocidad se desarrollan a la misma vez se debe estudiar el valor del número de Prandtl. Cuando el valor de Prandtl ≈ 1 , sobre todo cuando el valor de Pr en la posición inicial varía muy poco con respecto a la posición en que el flujo está plenamente desarrollado, $Pr_x \approx Pr_{x_T}$, se puede decir, que los perfiles de velocidad y temperatura se desarrollan juntos, en la misma localización longitudinal x , de la entrada del conducto. Este es el caso más generalizado.

En el caso en que Prandtl sea inferior a 1, el perfil de temperatura es predominante sobre el perfil de velocidades y por el contrario, cuando Prandtl adquiere valores superiores a 1, el perfil de velocidades se desarrolla antes que el térmico.

2.2.4. Flujo turbulento en conductos

Tradicionalmente, el análisis de turbulencia en conductos y la transferencia de calor se presente en términos de cantidades promedias por unidad de tiempo, se denota con una barra superior. Así, por ejemplo, la velocidad promedio longitudinal se expresará como $\bar{u}(r, t) = \bar{u}(r) + u'(r, t)$, en el caso de un conducto circular. Las ecuaciones de conservación de la masa, el momento y la energía para régimen turbulento son:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{v}) = 0 \quad (2.17)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{P}}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\nu + \epsilon_M) \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right] \quad (2.18)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\alpha + \epsilon_H) \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right] \quad (2.19)$$

Donde, \bar{u} (m/s), es la velocidad media del fluido en dirección longitudinal del conducto; \bar{v} (m/s), es la velocidad media del fluido en dirección transversal del conducto; r (m) es el radio del conducto; \bar{P} (Pa), es la presión media en un punto del fluido; ϵ_M y ϵ_H , son la difusividad inducida del momento y difusividad inducida térmica, respectivamente.

Estos últimos términos incrementan significativamente los efectos de transporte que ocurrirían en presencia de difusión molecular, la cual se basa en la velocidad ν y la difusión térmica.

2.3. Convección natural en cavidades

Los flujos debidos a la convección natural en cavidades cerradas han sido objeto de numerosos estudios desde mediados del siglo pasado. Su particularidad principal, con respecto a otro problema ampliamente tratado como es el de la convección natural sobre una placa, es que las capas límite desarrolladas en las proximidades de las paredes encierran en su interior un núcleo influenciado por las mismas. Esta interacción entre núcleo y capa límite dificulta la obtención de soluciones analíticas. Además, la posible aparición de más de un flujo en el interior del núcleo (recirculaciones convectivas y otros fenómenos de turbulencia) hace todavía más complicado el estudio de este fenómeno.

Los parámetros adimensionales, como se verá posteriormente, asociados al problema de la convección natural en cavidades son: el número de Rayleigh, Ra , el número de Prandtl, Pr , y la relación de aspecto. Dependiendo del número de Rayleigh y de la relación de aspecto se puedan dar en el interior de la cavidad diferentes regímenes, pasando por laminar, transición y turbulento.

Para valores de Ra , $Ra \leq 1000$, se produce un ligero incremento en la transferencia de calor debido sólo a la conducción, para el que el valor del número de Nusselt es 1. En cualquier caso, Ra aumenta, se ha encontrado en varios regímenes de flujo, dando como resultado un incremento significativo en el valor de Nusselt. En flujo laminar, estos regímenes incluyen conducción, transitorio y regímenes de capa límite.

El régimen de conducción viene caracterizado por una variación lineal de la temperatura en la región central del conducto. En el régimen de capa límite, unas finas capas aparecen a lo largo de las paredes verticales, conservando una temperatura horizontal uniforme entre las dos capas. En la zona de régimen transitorio, las dos regiones que la limitan son de menor espesor y la región interior isoterma no aparece.

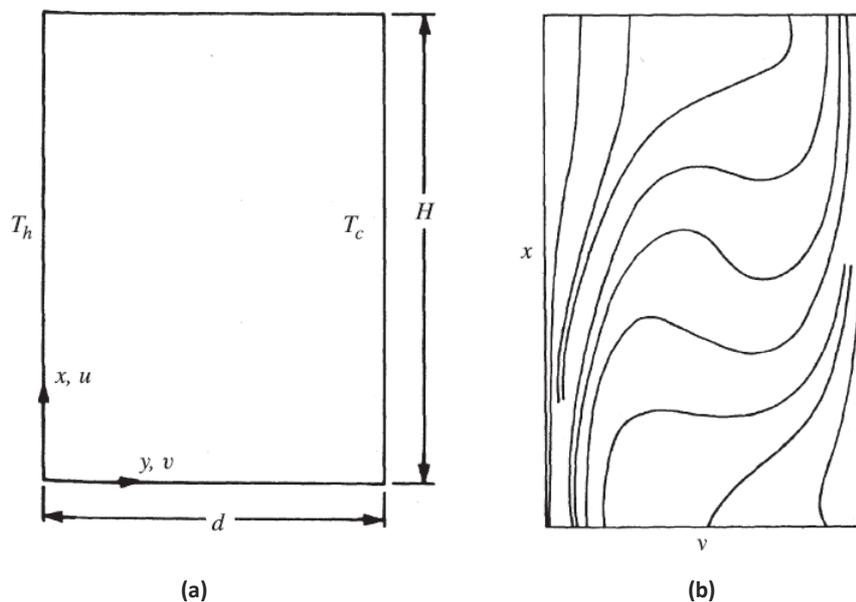


Figura 2.5 (a) Canal de sección rectangular; (b) Líneas isothermas para $Pr=1$ y $Ra = 2 \times 10^4$.

Estas características pueden apreciarse claramente en la figura 2.15 (a) y (b); Mientras Ra va aumentando, aparecen flujos secundarios, caracterizados como celdas adicionales en el flujo, y el régimen transitorio y turbulento suceden a valores de Ra mayores. Estudios detallados para diferentes patrones de flujo y su correspondiente transferencia de calor han sido llevados a cabo con transporte tridimensional, para un amplio rango de parámetros (Gebhart et al. ,1988).

- **Cavidades calentadas desde abajo –parámetros de la convección mixta**

La diferencia principal entre una cavidad calentada desde un lado (cavidad vertical) y una cavidad calentada desde abajo es que en el primer caso se tiene un flujo de flotabilidad tan pronto como se establece una pequeña diferencia de temperatura entre las paredes verticales. Por contra, en una cavidad calentada desde abajo, esta diferencia de temperaturas debe exceder cierto valor crítico para que los primeros signos de movimiento fluido hagan su aparición y se detecte transmisión de calor por convección.

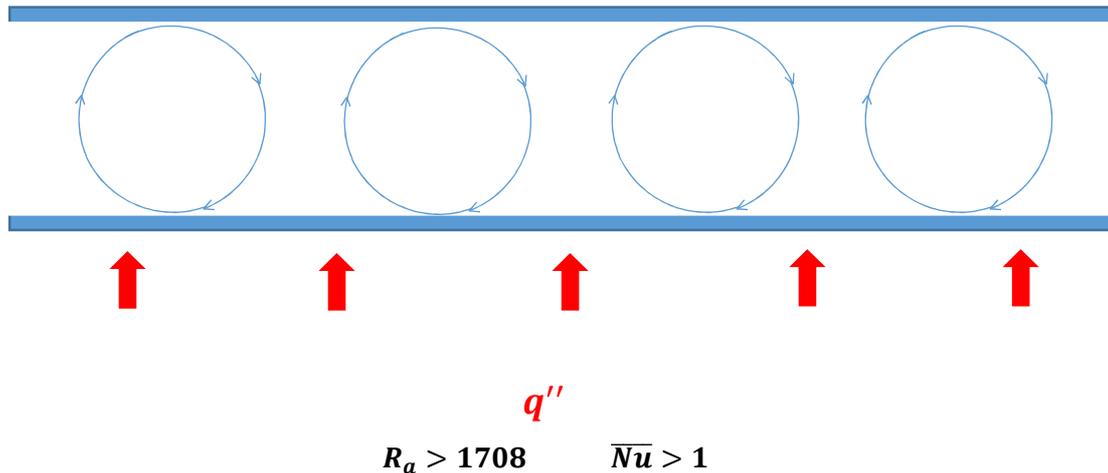


Figura 2.6 Valor de Rayleigh crítico para cavidades calentadas desde abajo.

Como se ve en la Figura 2. 3, para una cavidad cuya relación de aspecto tiende a infinito el número de Rayleigh para el cual comienzan los fenómenos de convección es de 1708. Inmediatamente después de este valor el flujo consiste en una serie de celdas en dos dimensiones que giran en sentido contrario a las adyacentes, lo que se conoce como celdas de *Bénard*. A medida que el número de Rayleigh va aumentando el flujo se vuelve más complicado y estas celdas bidimensionales se disuelven en celdas tridimensionales que aparecen en forma hexagonal, vistas desde arriba. Si el número de Rayleigh sigue creciendo, las celdas se van multiplicando y el flujo pasa por un régimen de transición caracterizado por las oscilaciones hasta llegar al régimen totalmente turbulento.

El efecto que tiene este "flujo celular" es el aumento de la transmisión de calor en dirección vertical, es decir, un incremento del número de Nusselt. Experimentalmente el flujo de calor para un número de Rayleigh comprendido entre 3×10^5 y 7×10^9 se describe mediante la siguiente correlación, válida para valores altos de la relación de aspecto:

$$\overline{Nu}_H = 0.069 Ra_H^{1/3} Pr^{0.074} \quad (2.19)$$

Donde las propiedades físicas para calcular Rayleigh turbulento, Ra_H y Pr , se evalúan a la temperatura media del fluido.

El análisis de escala realizado por Bejan (2004), muestra que cuando el número de Rayleigh es varios órdenes de magnitud superior al valor crítico, la convección en la cavidad está dirigida por el régimen turbulento. El núcleo de la cavidad está prácticamente a la temperatura media $\frac{T_1+T_2}{2}$, mientras que el cambio de temperatura hasta el valor de la pared ocurre en la capa límite que rodea las paredes horizontales – siendo T_1 y T_2 , las temperaturas del aire a la entrada y salida del conducto.

La turbulencia está producida por las plumas que surgen desde la pared caliente y las que descienden desde la pared fría. De esta manera, el núcleo turbulento se encuentra rodeado por dos capas de conducción muy finas sobre las paredes horizontales de espesor δ . Cada capa δ se vuelve inestable cuando el número de Rayleigh basado en dicho espesor excede un orden de magnitud de 10^{10} :

$$Ra_{\delta} \sim 10^3 \quad (2.20)$$

O lo que es equivalente:

$$Ra_{\delta} \sim 10^3 \left(\frac{H}{\delta}\right)^3 \quad (2.21)$$

Donde H (m), es la altura del conducto.

El flujo de calor entre las paredes isoterma es:

$$\bar{q}'' \sim k \frac{\Delta T}{\delta} \quad (2.22)$$

Y por lo tanto el número de Nusselt basado en la altura de la cavidad:

$$\overline{Nu}_H = \frac{\bar{q}''}{(k\Delta T)/H} \sim \frac{H}{\delta} \quad (2.23)$$

Y eliminando $\frac{H}{\delta}$, entonces se obtiene:

$$Nu_H \sim 10^{-1} Ra_H^{1/3} \quad (2.24)$$

Este resultado reproduce prácticamente todos los rangos de las correlaciones empíricas recomendadas para régimen turbulento, además se puede comprobar que la transferencia de calor no depende de H .

CAPITULO 3: Definición de la geometría y estrategias de mallado con Gambit

3.1. Diseño de la geometría

El modelo geométrico inicial diseñado para este proyecto consiste en un volumen de roca de geometría prismática rectangular que abarca desde la superficie terrestre a cota cero sobre el nivel del mar hasta 3100 metros de profundidad, con anchura y fondo de 300 metros.

Con la finalidad de resolver y validar el comportamiento del flujo en el interior de la galería y los fenómenos transitorios en la roca encajante afectada por el sistema V-R, se diseñan tres modelos: un sub-modelo numérico incluyendo sólo la galería llamado sub-modelo convectivo y otros dos modelos globales que incluyen galería de roca desnuda más roca encajante y galería de roca revestida más roca encajante.

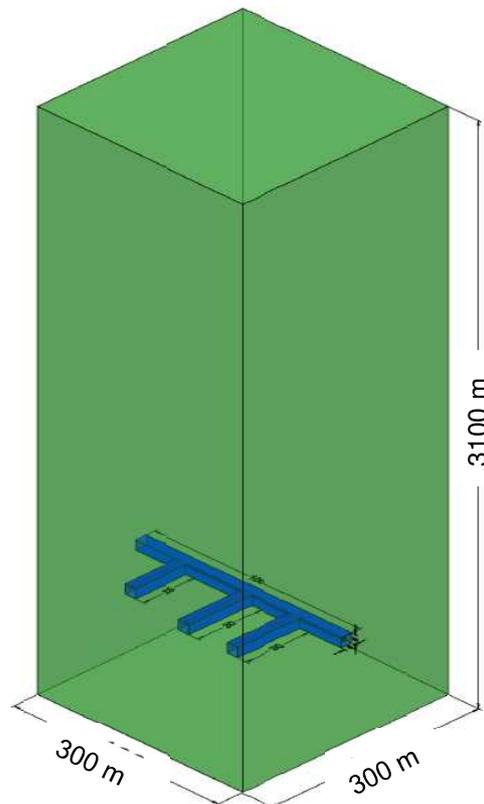


Figura 3.1 Geometría de la mina estudiada.

A 3000 metros de profundidad se sitúa una galería subterránea donde se desarrollan las labores de extracción. Se trata de una galería principal de unos 100 metros de longitud y 25 m² de sección, intersecada por tres conductos transversales (cross-cuts) de 30, 30 y 25 metros de longitud y la misma sección que la galería principal –tal como se aprecia en la figura 3.2:

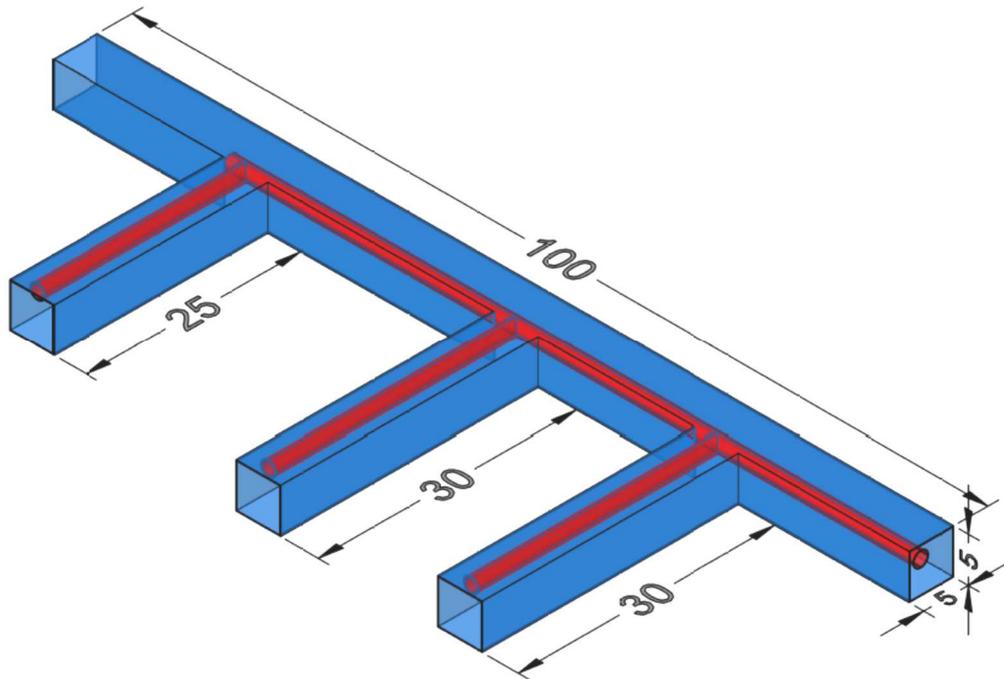


Figura 3.2 Detalle de la geometría de la red de galerías subterránea (dimensiones en metros).

Estos cross-cuts están dotados con sistemas individuales de ventilación/refrigeración (V-R) soplantes situados a 5 m de distancia de la pared del fondo o cul-de sac (CDS). La tobera de salida posee una sección de $0,75 \text{ m}^2$, como se aprecia en la figura 3.3(a). La principal diferencia entre la geometría de los modelos con revestimiento y roca desnuda se aprecian en la figura 3.3 (b), en la que aparece un volumen de diez centímetros de espesor en la superficie interior de la galería, que en función de la simulación se va caracterizar con las propiedades de mortero proyectado u hormigón aligerado.

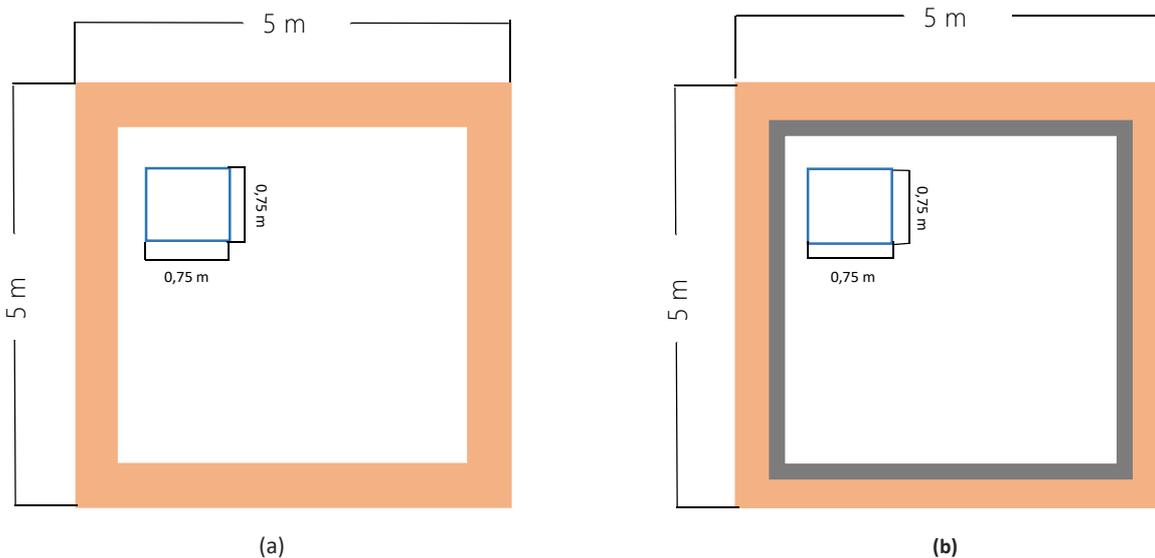


Figura 3.3 (a) Geometría de la galería con revestimiento. (b) Geometría de la galería desnuda.

3.2. Estrategias de mallado

El diseño de la geometría se realiza con la herramienta de mallado GAMBIT 2.4.6. Esta herramienta permite crear a partir de puntos y aristas lo que conforman las caras y volúmenes de la geometría que se ha diseñado para este estudio.

Una vez creados, se mallan todos: las aristas, superficies y volúmenes, dando lugar a una red de polígonos unidos por nodos. En estos nodos y los puntos centrales de estos polígonos se resolverán las ecuaciones de transferencia de calor y mecánica de fluidos necesarias para las simulaciones en cada caso.

El primer paso al iniciar Gambit es escoger el tipo de Solver que se va a utilizar. En el caso de este trabajo, para todas las mallas se selecciona un Solver FLUENT 5/6.

La calidad de la malla juega un papel significativo en la estabilidad y la precisión de la computación numérica. Los atributos que suelen estar asociados a la calidad de malla son la distribución de los nodos (aspect ratio), la uniformidad (Smoothness) y la distorsión (Skewness):

Aspect Ratio: Es una medida de la elongación de la celda y se calcula como el máximo valor de las distancias: centro de la celda al centro de las caras, centro de la celda a los nodos.

Smoothness: Las celdas contiguas no deben guardar grandes diferencias de aspecto puesto que ese hecho deriva un error de truncamiento mayor en la resolución de las ecuaciones, resta precisión.

Skewness: la diferencia entre la forma de una celda real y otra celda equilateral de volumen equivalente. Esta relación debe encontrarse por debajo de 0,95 ya que daría problemas de convergencia a un motivo de disminución de precisión y desestabilización de la solución.

Teniendo en cuenta la influencia de estos parámetros se escoge la estrategia de mallado a seguir. Por este motivo se han ensayado al menos 10 estrategias diferentes de mallado antes de escoger la definitiva, descrita a continuación.

3.2.1. Sub-modelo convectivo

El sub-modelo convectivo estudia exclusivamente el flujo en el interior de la galería. Para analizar esta geometría, se ha creado una malla conforme y estructurada. Su desarrollo comienza desde la cara de entrada a la galería, en la que se definen: la superficie representativa del dominio fluido, la superficie de la entrada de ventilación y las aristas que representan las paredes de la galería, como se muestra en la figura 3.4:

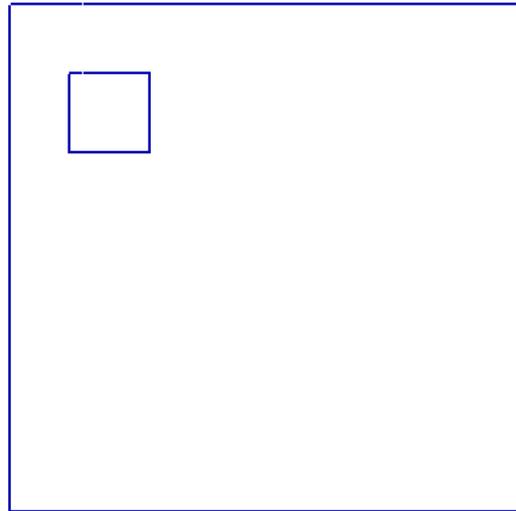


Figura 3.4 Geometría cara entrada de la galería para el sub-modelo convectivo.

3.2.1.1. Creación y mallado de caras y aristas principales

Una vez creada la geometría de la cara principal se mallan las aristas. Esta etapa es una de las tres más importantes en la creación de la malla. Cuando se malla una arista se debe especificar el espacio que va a existir entre los nodos y si éste va a ser igual en toda la arista o van a existir zonas en las que la separación entre los nodos sea mayor o menor de la fijada inicialmente.

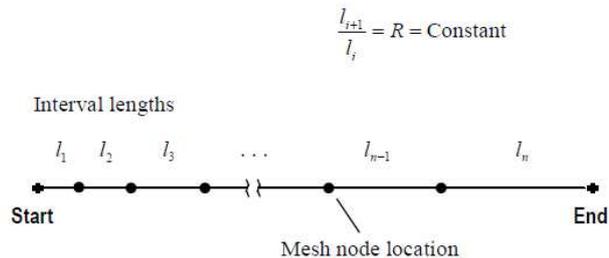


Figura 3.5 Ejemplo de mallado no simétrico de arista. Primer punto crítico de la construcción de la malla. Modeling Guide GAMBIT 2.4.

En la creación del sub-modelo convectivo se comienza mallando las aristas que van a definir las paredes de la galería de forma no simétrica, usando en los extremos de éstas tamaños de intervalos entre nodos pequeños, y en el centro tamaños de intervalos más grandes; con esta estrategia, al mallar la cara de entrada a la galería, las primeras capas de malla cercanas a la pared guardan entre ellas una estrecha distancia, mientras esa distancia aumentará conforme se aleje la malla hacia el centro de la galería

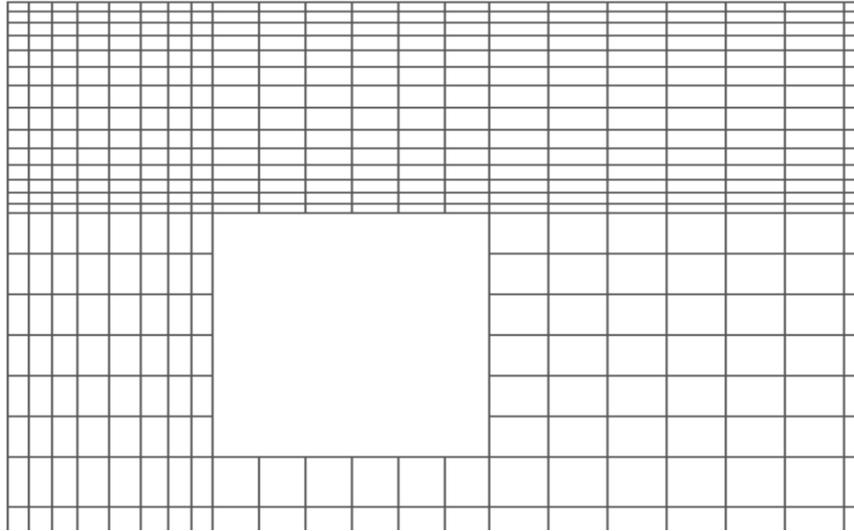


Figura 3.6 Detalle malla refinada en las zonas más cercanas a la pared de roca. GAMBIT.

Una vez definidos los intervalos de malla de las aristas, se malla la cara que estas conforman, que es la entrada de la galería principal, dejando sin mallas la superficie correspondiente al sistema de ventilación para ahorrar recursos de computación, ya que va a ser un conducto hueco en el que la malla y por tanto las condiciones de contorno, se impondrán en las toberas de salida situadas en el fondo de saco.

El esquema de mallado escogido para esta cara se encuentra resumido en la figura 3.7.

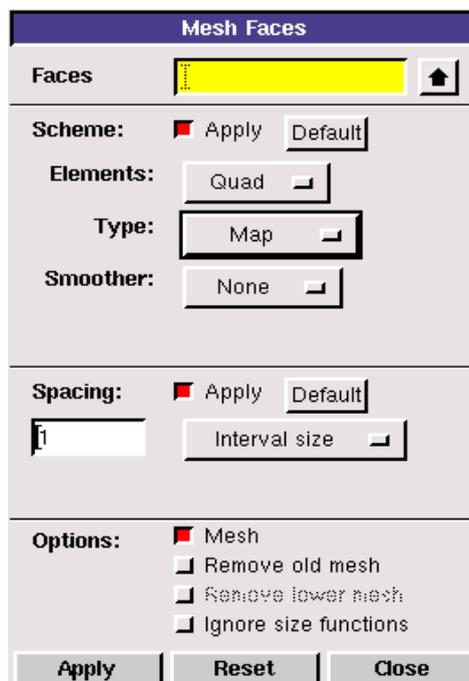


Figura 3.7 Esquema de mallada cara de entrada a la galería subterránea. GAMBIT.

Un esquema de mallado tipo Quad-Map, consiste en la creación de una malla regular y estructurada compuesta únicamente por cuadriláteros que aseguran una relación de aspecto efectiva. Estas características la convierten en la más apropiada para representar zonas de la geometría que son críticas y requieren un cálculo más preciso, como son el dominio fluido del interior de la galería o las primeras capas de aire cercanas a la pared que representan la capa límite -también se utiliza este esquema de mallado para representar las superficies de aislamiento cuando se construye el modelo global.

El resultado obtenido se aprecia en la figura 3.7. El mallado previo de las aristas consigue una malla más densa en las zonas del interior de la galería cercanas a la pared.

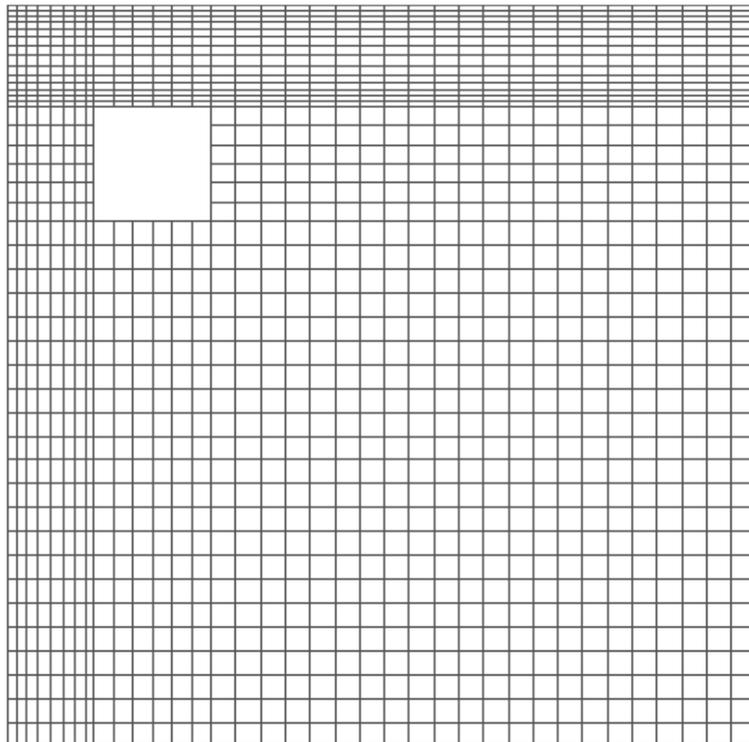


Figura 3.8 Malla de la cara de entrada a la galería subterránea.

Una vez se crea la cara principal se construye una arista paralela al eje longitudinal de la galería desde la entrada hasta la salida -100 metros. Éste es el segundo punto más importante del mallado de la geometría, el mallado de esta arista con un intervalo de nodo uniforme lo suficientemente pequeño para que la malla del volumen que se va a crear sea densa y capaz de obtener soluciones numéricas precisas, y lo suficientemente grande como para no dar problemas de distorsión cuando este modelo se acople a la malla desestructurada de la roca encajante para crear el modelo global.

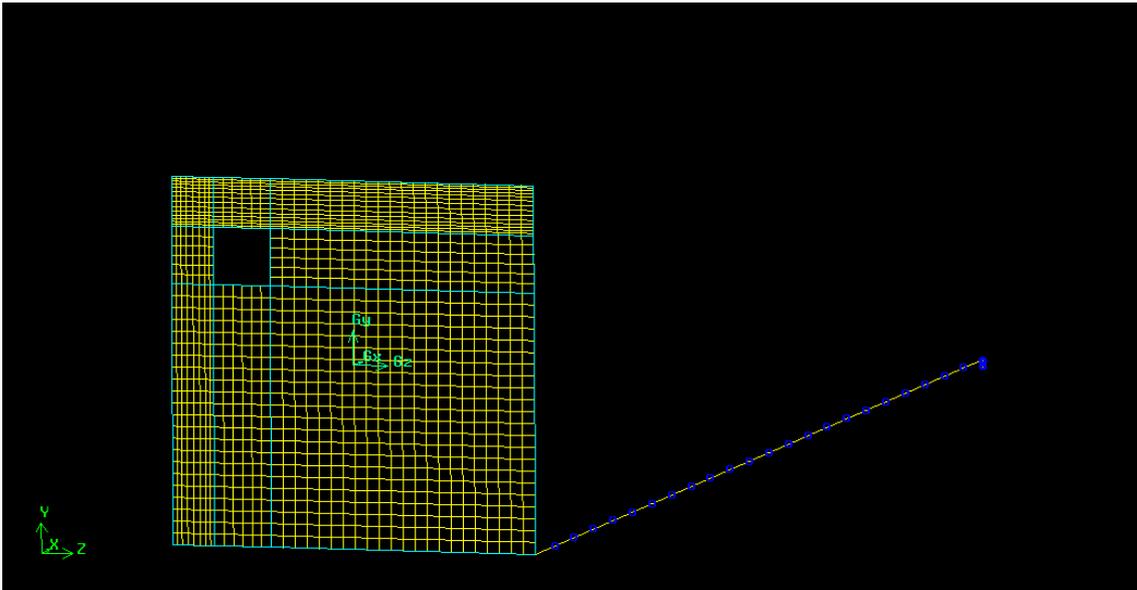


Figura 3.9 Detalle mallado arista galería principal. GAMBIT.

El resto de mallas construidas y desestimadas para el cálculo numérico han dado problemas de distorsión debido a tamaños de intervalos de nodos de la arista principal muy pequeños.

3.2.1.2. Creación y mallado de volúmenes

Para proceder con la creación de los volúmenes que conformarán la galería completa se utiliza la herramienta geométrica 'barrido de caras' que extruyen a lo largo de la arista principal la cara de entrada incluyendo su malla, creando así los volúmenes que constituyen los medios continuos de la galería (aire, paredes y conducto de ventilación).

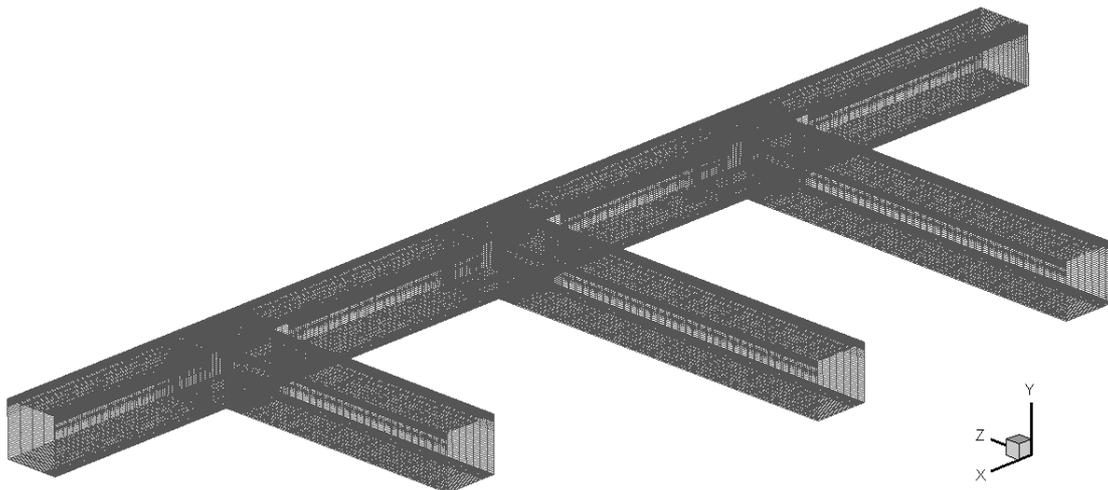


Figura 3.10 Volúmenes galería completa mallada

El tercer punto crítico de este mallado, en el que fácilmente pueden aparecer errores son las intersecciones con los cross-cuts. En ellos se utiliza la misma estrategia de mallado que para el resto de la galería, además el conducto de descarga de la soplante del sistema de ventilación termina cinco metros antes del fondo de saco.

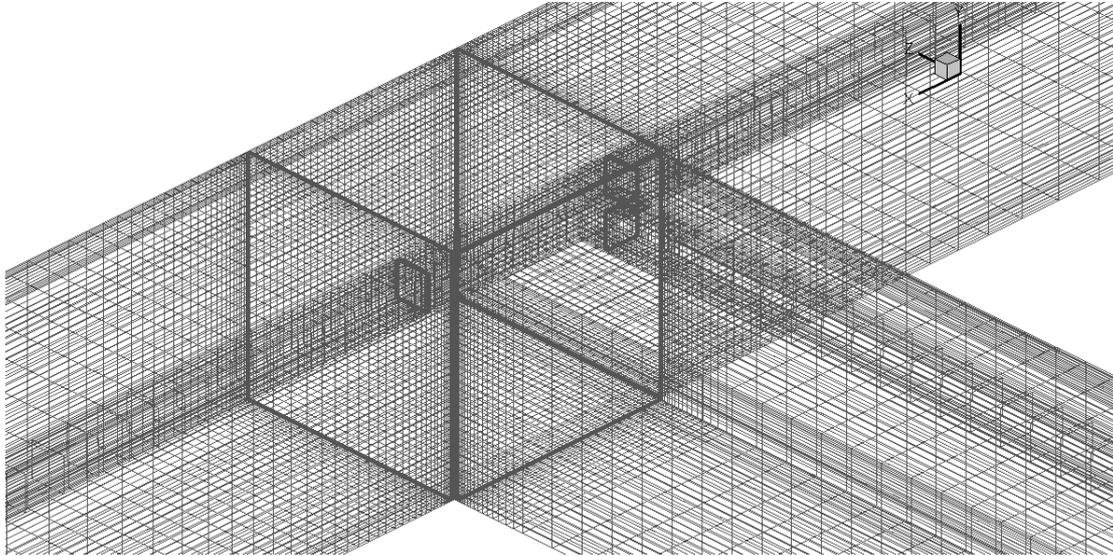


Figura 3.11 Detalle mallado cross-cut, tamaño inter-nodal muy reducido.

3.2.1.3. Definición de medios continuos y condiciones de contorno

Una vez construido todo el dominio se asignan los tipos de medios continuos y las condiciones de contorno que se van a diferenciar en el modelo. Así, todos los volúmenes interiores de las galerías se definen como medio continuo fluido, y las superficies externas como medio continuo sólido.

En el caso de las condiciones de contorno, se define la superficie de entrada de la galería, fan 1, 2 y 3 (soplantes), superficie de salida galería y las paredes de la galería: superior, inferior, izquierda y derecha

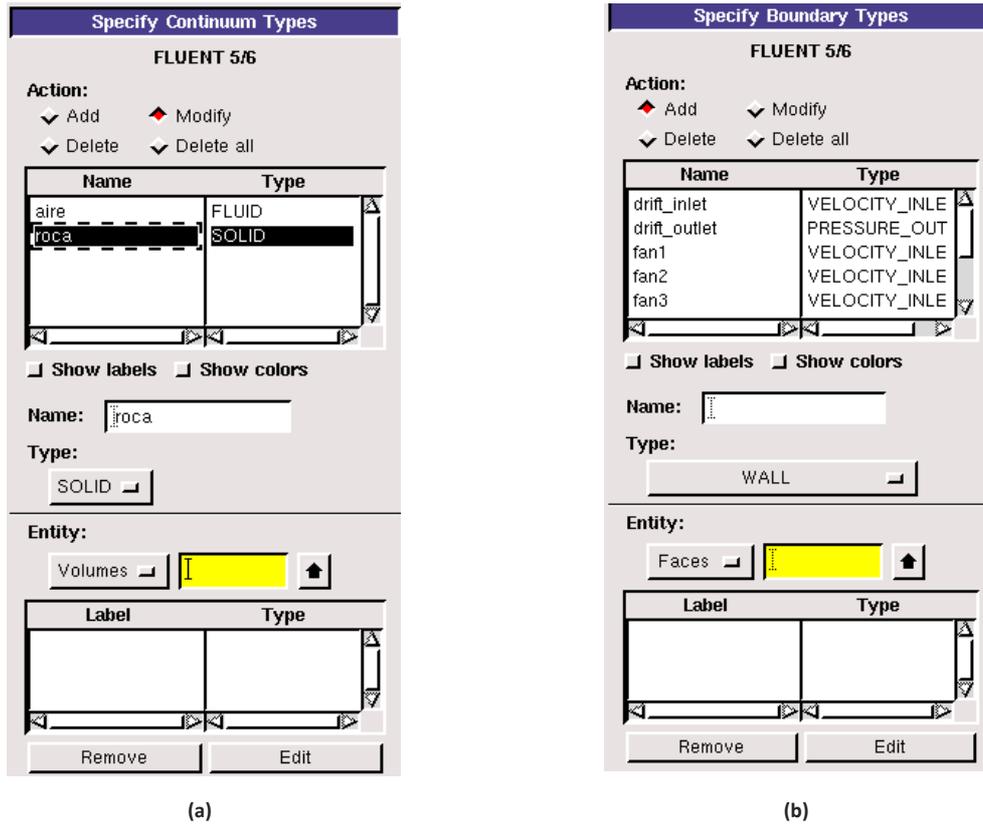


Figura 3.12 (a) Definición medio continuo. (b) Definición condiciones de contorno. GAMBIT.

De este modo al importar el caso en FLUENT, al medio continuo fluido se le asignan las propiedades definidas para el fluido que es aire, y al medio continuo sólido se le asignan las propiedades definidas para sólido, que son las del carbón.

En función del tipo de condición de contorno asignada a cada superficie, FLUENT permite que se programen valores de temperatura, coeficientes de convección o flujos de calor para la condición tipo 'Wall', velocidades y valores de turbulencia para el tipo 'velocity-inlet', presión y temperatura para las de tipo 'pressure-outlet'.

Una vez terminado de construir el modelo se exporta como archivo de extensión *msh*, 'sub-modelo_convectivo.msh', para poder cargarlo en FLUENT y realizar las simulaciones.

3.2.1.4. Resumen geométrico y tamaño de la malla

La siguiente tabla resume el número de entidades geométricas que contiene el sub-modelo convectivo:

Tabla 3.1 Resumen geometría sub-modelo convectivo.

Vértices	Aristas	Caras	Volúmenes
374	921	732	185

Es de interés conocer el número de elementos que constituyen las entidades malladas del modelo, distinguiendo entre nodos, aristas, caras y volúmenes, recogido en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Resumen elementos que constituyen el mallado del sub-modelo convectivo.

Nodos	Aristas	Caras	Volúmenes
299464	12746	109878	273424

3.2.2. Modelo global

Este modelo consiste en una galería principal encajada en un volumen de roca de 3100x300x300 m. Para recrear las condiciones de una galería con la pared de roca desnuda y otra con revestimiento de diez centímetros de espesor se construye la misma malla. La diferencia a la hora de realizar el cálculo numérico estribará en asignar unas condiciones térmicas específicas al volumen revestimiento.

3.2.2.1. Creación y mallado de caras y aristas principales

La estrategia de construcción para la parte de la galería va a ser como la del sub-modelo convectivo. Una malla conforme y estructurada con una cara principal de entrada a la galería y una arista principal sobre la que barrer esa cara para extruir los volúmenes continuos.

En la cara de entrada a la galería del modelo global aparece una nueva superficie que lo diferencia del sub-modelo convectivo. En este modelo global se diferencian: superficie hueco interior de la galería que será fluida, hueco del conducto de ventilación, superficie de diez centímetros de espesor de revestimiento en toda la superficie de las paredes de la galería y superficie de roca contigua al aislamiento de 1,60 metros de espesor, como se muestra en la figura 3.13.

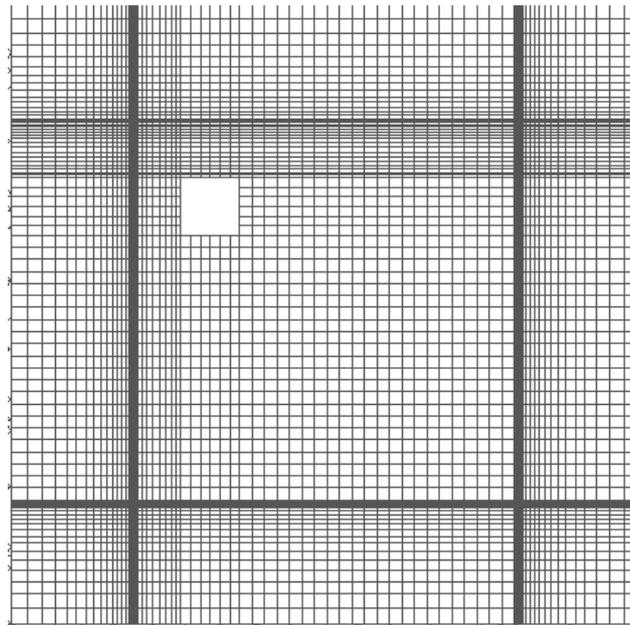


Figura 3.13 Cara principal entrada a la galería.

Una superficie que caracteriza este modelo es la capa de aislamiento que recubre las paredes de la galería, está en contacto directo con el dominio fluido por su cara interior e

inmediatamente anexa a la roca encajante por su cara exterior. Como esta superficie tiene un espesor pequeño, de diez centímetros, es preciso crear anexa a la anterior una porción de roca con el mismo tipo de mallado, asegurando así que no aparezcan problemas de ensamblaje debido a errores uniformidad y distorsión; también permite captar de forma más precisa los efectos del sistema de V-R sobre el estado transitorio de enfriamiento de la roca en los primeros metros de sólido cercanos a la galería.

Como se puede apreciar en la figura 3.13, se utiliza la misma metodología de tamaño de intervalo de los nodos en las aristas de la galería para crear una capa límite cercana a la superficie de las paredes.

3.2.2.2. Creación y mallado de volúmenes

- **Volumen galería**

En referencia a la construcción de los volúmenes de la galería se ejecutan igual al sub-modelo convectivo. Creando una arista principal a lo largo de la cual se extruyen los volúmenes, dando como resultado la imagen de la figura 3.14.

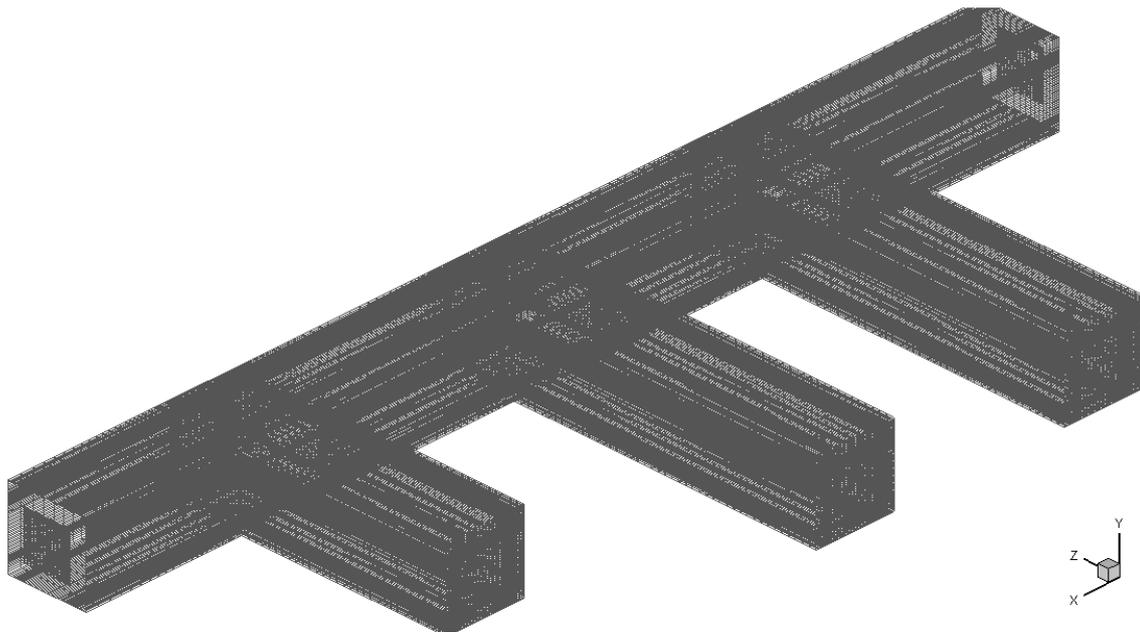


Figura 3.14 Volumen mallado galería completa.

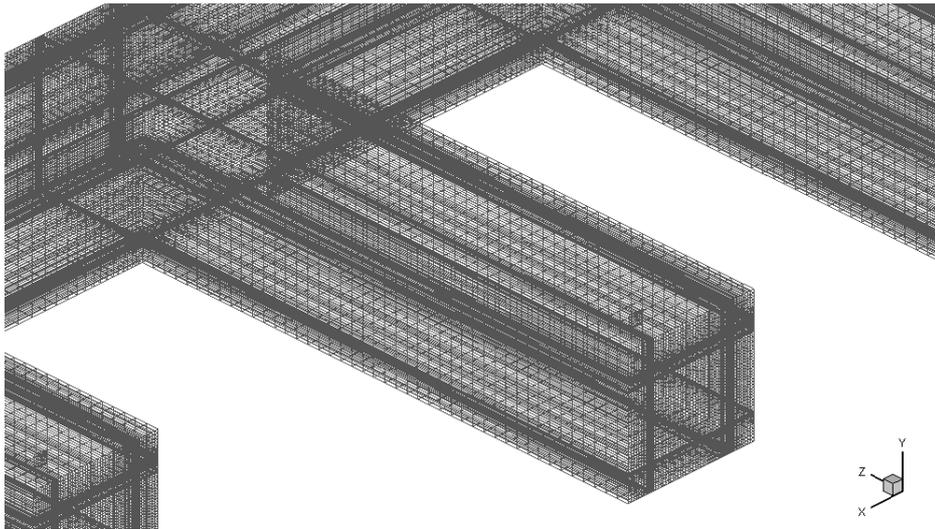


Figura 3.15 Detalle mallado galería completa.

- **Volumen roca**

El volumen de roca se caracteriza por ser una malla no-conforme y desestructurada. Esto quiere decir que los nodos de su volumen no van a coincidir de forma exacta con los nodos de los otros volúmenes a los que va a estar adherido. Por este motivo, la creación del volumen roca y su correspondiente mallado se debe hacer en dos etapas: una primera etapa en la que se construye un volumen de roca envolvente de la galería principal, figura 3.16, y un segundo volumen a partir de este, que crece en todas las direcciones del espacio hasta alcanzar las dimensiones de $3100 \times 300 \times 300 \text{ m}^3$ descritos en el apartado 1 de este capítulo.

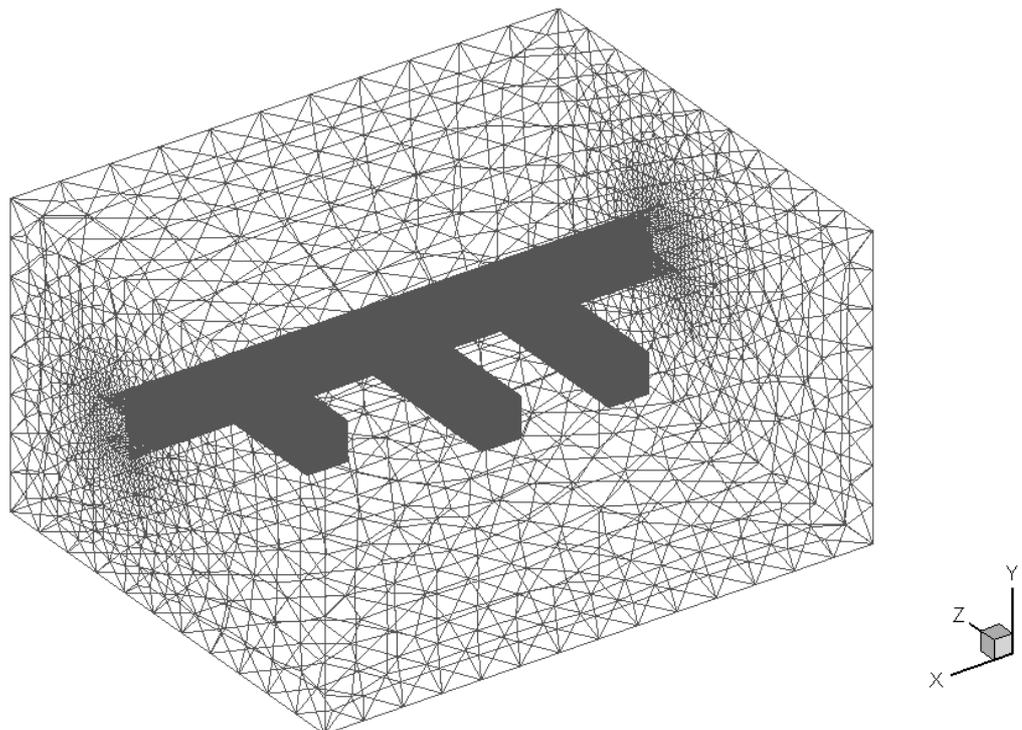


Figura 3.16 Volumen de roca envolvente inicial.

El volumen envolvente inicial es un hito clave del mallado del dominio sólido. Se trata de construir la 'malla no conforme' en el que las superficies del volumen de la galería van a estar unidas a las del volumen roca que no posee el mismo esquema de mallado y sus nodos no coinciden de forma idéntica. Para conseguir que el modelo sea válido y funcione es preciso crear superficies de interfase entre ambas geometrías (roca y galería) al unir los volúmenes. Este tipo de superficies facilitan el acoplamiento de diferentes tipos de mallas, permitiendo que se resuelva el campo fluido y/o térmico sin alteraciones.

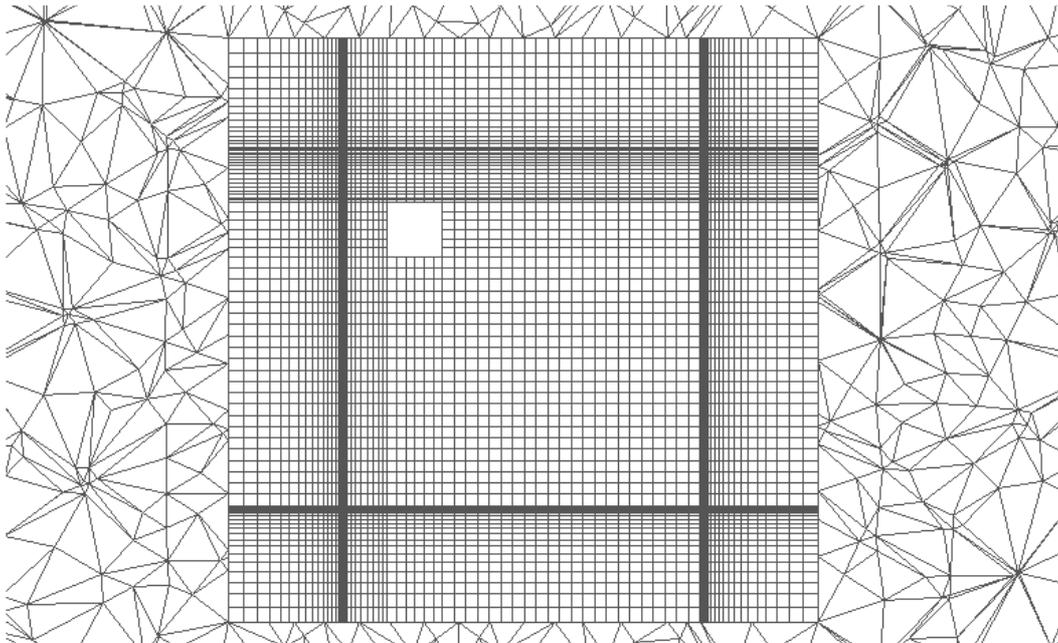


Figura 3.17 Volúmenes de la galería y la roca ensamblados mediante interfase.

La estrategia de mallado en este caso es diferente a la del mallado en la galería. Para crear los volúmenes de roca, se crean y mallan sus caras, con éstas se crea el volumen y finalmente se malla interiormente el volumen creado.

En primer lugar, se mallan las caras del cubo que va a definir el volumen roca y se unen a las caras existentes de entrada y salida de la galería. Para este propósito se aplican a las aristas de las caras de entrada y salida de la galería funciones de tamaño o 'size functions'. Con esta herramienta se establece el tamaño inicial de crecimiento de los polígonos desde las aristas de la cara entrada, un factor de crecimiento que se va a multiplicar por ese tamaño inicial indicado y el tamaño máximo que alcanzará la malla en las caras de roca. Por lo tanto, desde las caras de entrada y salida crecerá una malla desestructurada de elementos triangulares a razón de 1,2 desde el tamaño 1 hasta el máximo de 10, como se aprecia en la figura 3.19.

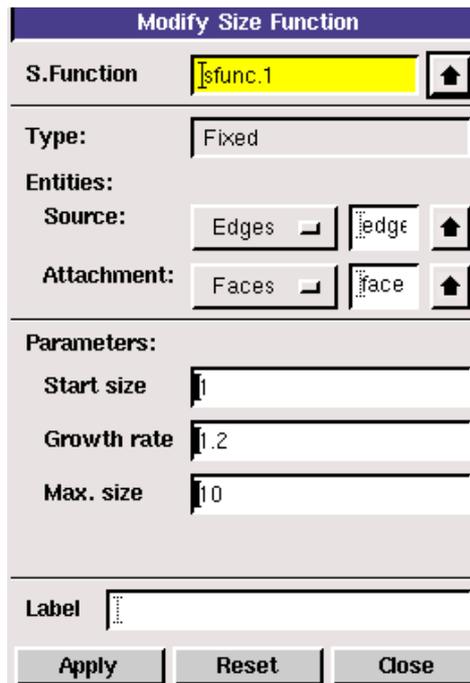


Figura 3.18 Programación función de tamaño. GAMBIT.

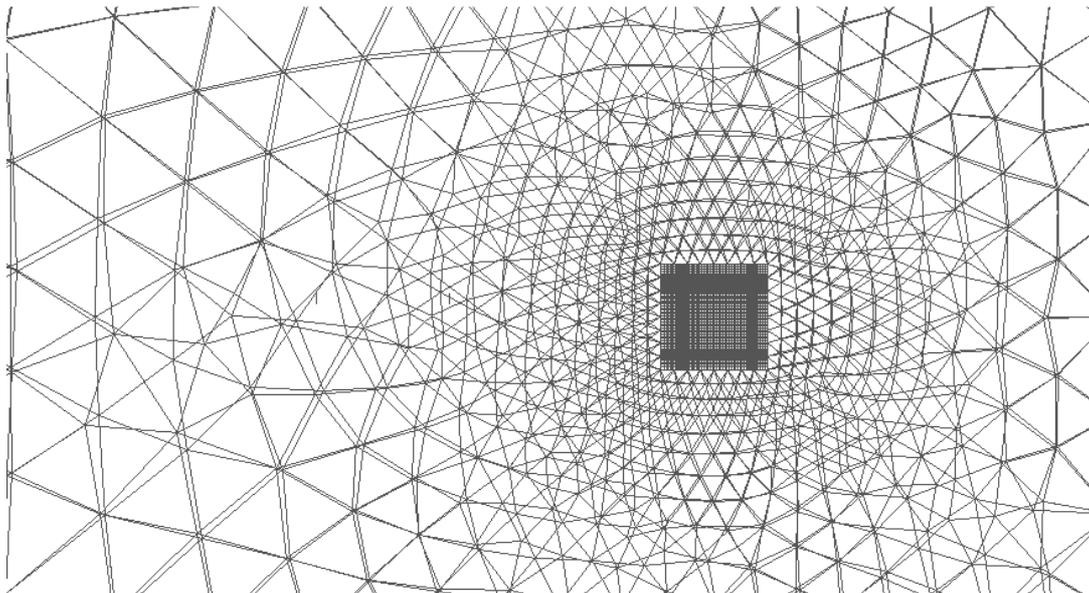


Figura 3.19 Detalle mallado cara lateral volumen roca.

La malla con la que se definen las caras del volumen roca sigue un esquema de mallado tipo Tri/Pave, lo que implica que está compuesta sólo por elementos de mallado triangulares que se desarrollan de forma desestructurada. Este tipo de malla es apropiada para la roca porque es un medio continuo con propiedades constantes y este método ahorra recursos computacionales

y calcula de forma eficiente y rápida la solución de la transferencia de calor en todo el dominio.

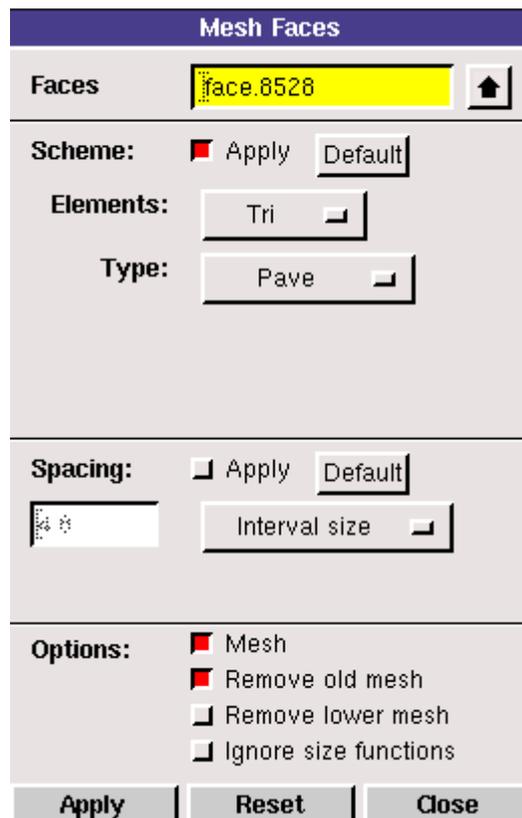


Figura 3.20 Esquema de mallado para las caras de los volúmenes de roca. GAMBIT.

Una vez creadas y malladas las caras del cubo de roca se une al volumen de la galería. En último lugar, se crea el resto del volumen de roca hasta completar el dominio de dimensiones 3100x300x300 m³ siguiendo la estrategia de mallado inicial de las caras y a partir de ellas creando volúmenes.

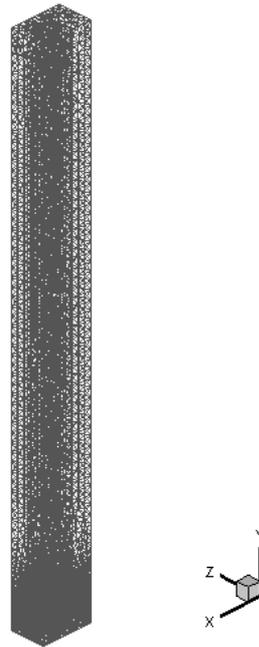


Figura 3.21. Modelo global mallado completo.

Ambos volúmenes, cubo de roca envolvente y resto de dominio roca, se mallan con un Esquema de mallado tipo Tet-Hybrid /TGrid, lo que implica que en su interior se crean una red mallado de nodos constituida principalmente por hexahedros y tetrahedros pero que también puede contener elementos piramidales o en forma de cuña.

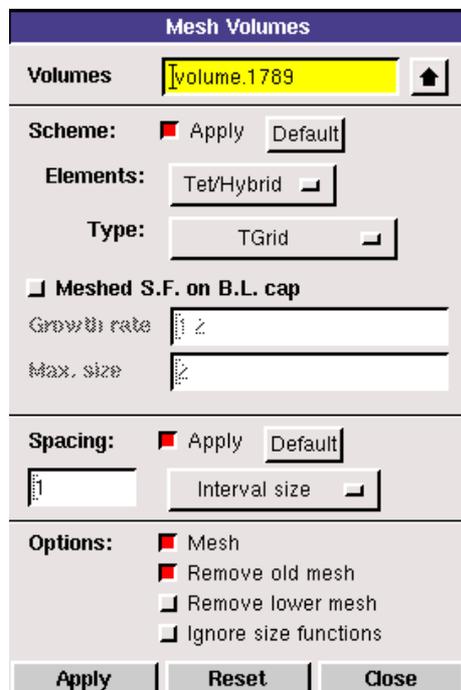


Figura 3.22. Esquema de mallado de los volúmenes de roca. GAMBIT.

3.2.2.3. Definición de medios continuos y condiciones de contorno

Una vez definidos todos los volúmenes se procede a asignar el valor de medio continuo que desempeñarán en FLUENT y las condiciones de contorno variables para las simulaciones numéricas.

Los medios continuos que se definen son sólido roca y sólido shotcrete, los volúmenes correspondientes al interior de la galería se dejan sin asignar ya que FLUENT lo identificará por defecto como fluido.

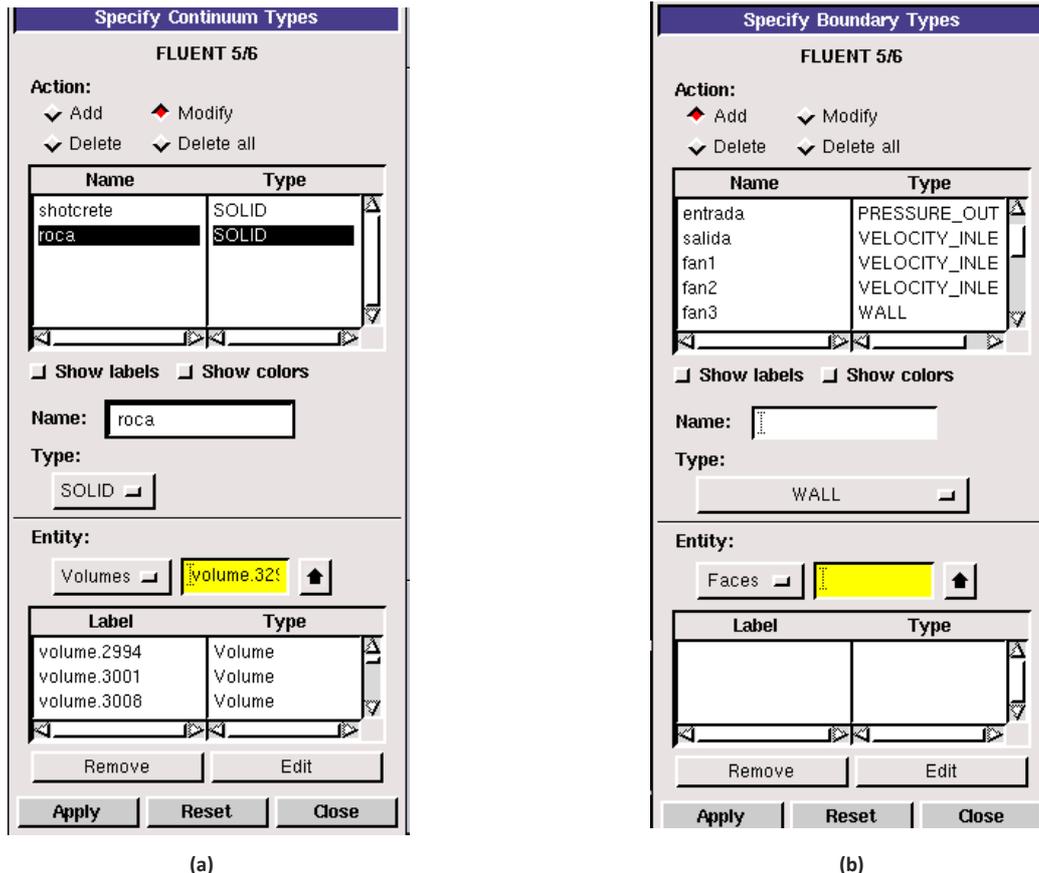


Figura 3.23 (a) Definición medio continuo. (b) Definición condiciones de contorno. GAMBIT.

El medio continuo designado como shotcrete corresponde al recubrimiento de diez centímetros de espesor sobre las paredes de la galería, en función de las simulaciones que se realicen se definirá con propiedades de carbón (modelo global roca desnuda), hormigón proyectado u hormigón aligerado (modelo global con aislamiento).

En cuanto a las condiciones de contorno aparecen: hflux (la base del dominio roca a 3100 metros de profundidad), entrada y salida a la galería, fan1, fan2 y fan3, convección (superficie exterior) e interfaz que junto con pared 1, pared2, pared 3 y pared 4 constituyen las superficies de ensamblaje entre la malla conforme y la no conforme.

Una vez trasladada la malla a FLUENT se imponen los valores de temperatura, flujo, velocidad o presión y asignación de tipo de materiales según sea la simulación que se esté ensayando.

3.2.2.4. Resumen geométrico y tamaño de la malla

La siguiente tabla resume el número de entidades geométricas que contiene el modelo global:

Tabla 3.3 Resumen geometría modelo global.

Vértices	Aristas	Caras	Volúmenes
2107	5678	5064	1494

En la siguiente se recoge el número de elementos que constituyen las entidades malladas del modelo, distinguiendo entre nodos, aristas, caras y volúmenes.

Tabla 3.4 Resumen elementos que constituyen el mallado del modelo global.

Nodos	Aristas	Caras	Volúmenes
3178310	73383	842290	3445868

Capítulo 4: Modelos numéricos utilizados

En este capítulo se resumen los modelos numéricos simulados. Debido a la complejidad del caso se ha seguido un procedimiento basado en la validación progresiva de modelos más simples para llegar a un modelo final global de la mina simulado en condiciones muy similares a las reales.

En primer lugar, se crea un sub-modelo convectivo, cuya geometría sólo es representativa de la galería subterránea principal junto con los tres conductos transversales (cross-cuts) a ella y el tubo correspondiente al sistema de ventilación, tal como se muestra en la figura 4.1. El modelo se ha diseñado con un recubrimiento de 10 cm de espesor sobre toda la superficie de las paredes de la galería principal y cross-cuts, aunque para simular el sub-modelo convectivo estas superficies se caracterizan con las mismas propiedades térmicas que el resto del volumen de roca, propiedades térmicas del carbón, ya que va a emular las paredes desnudas de la galería en contacto directo con la atmósfera interior.

El objetivo del sub-modelo convectivo es comprender el comportamiento del fluido y los patrones de convección forzada y natural que se dan en él cuando la cavidad está sometida a una temperatura de pared constante, en estado estacionario, así como su comportamiento cuando se ve afectado por el flujo forzado de aire de V-R.

Finalmente, y una vez validado el sub-modelo convectivo, se crea un modelo global representativo del par roca encajante más galerías subterráneas. Con él, se llevará a cabo una simulación completa para estudiar detalladamente los efectos de la ventilación sobre la evolución de la roca circundante a lo largo del estado transitorio, el espesor de roca que se va a ver afectado y cómo influye sobre las cargas térmicas que entran en la galería el revestimiento con material aislante.

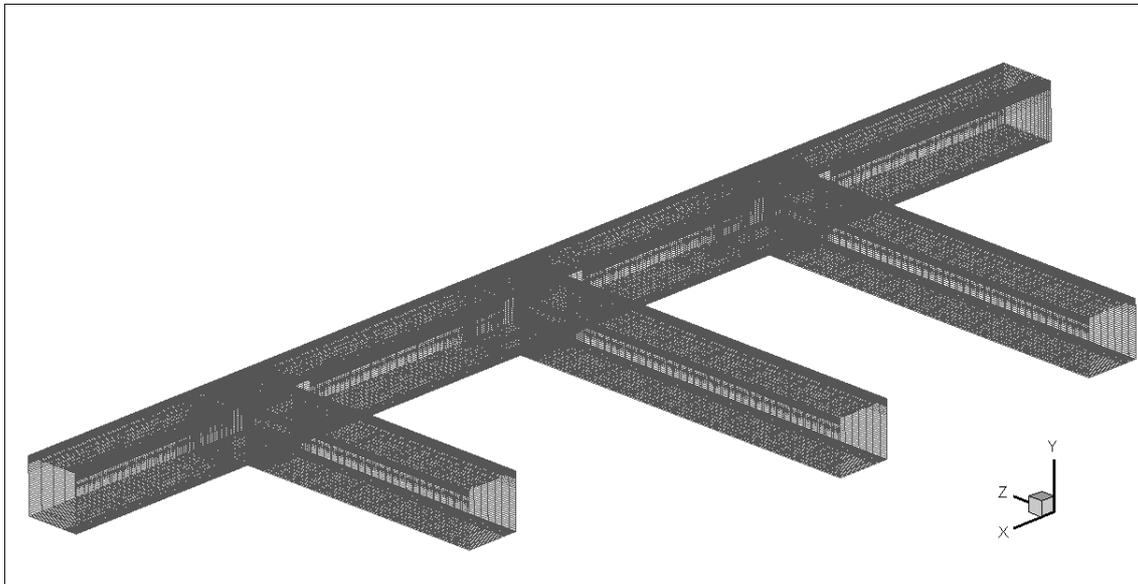


Figura 4.1 Detalle de la geometría general de los sub-modelos convectivos. Galería subterránea.

4.1. Sub-modelo convectivo

Como se detalla más arriba, el sub-modelo convectivo consta de la galería principal y los tres conductos transversales o cross-cuts que se hallarían situadas en la mina real a unos 3000 m de profundidad. Sobre las paredes de la galería se ha impuesto una temperatura constante para observar cómo afecta la transferencia de calor al aire subterráneo.

Las condiciones reales en la mina subterránea son las de un flujo de calor constante procedente de la base del dominio roca. Este flujo se propaga en dirección vertical hacia la superficie externa (cota 0 m) por lo que en las paredes laterales de la galería existiría un gradiente vertical de temperatura. Pero a esta profundidad y siendo considerado el dominio roca como un sólido semi-infinito, en realidad las paredes laterales de la galería están, prácticamente a la misma temperatura, por tanto, para calcular este sub-modelo se asume una temperatura de pared de galería constante.

Uno de los objetivos de estas simulaciones es calcular el campo fluido en el interior de la mina en la galería de paredes de roca desnuda, analizar la influencia de la temperatura de pared superficial sobre éste y observar cómo se ve afectado por el funcionamiento del sistema de ventilación. Conseguir caracterizar los patrones de flujo, coeficiente global de transferencia de calor convectivo y periodos de desarrollo de flujo. Otro objetivo es hallar los valores del número de Nusselt en flujo desarrollado y representarlos frente a los valores del número de Rayleigh para poder analizar y representar los fenómenos de flotación relacionados con la convección mixta que aparecen transversalmente al flujo axial.

4.1.1 Hipótesis de simulación en FLUENT

4.1.1.1. Estrategia de Simulación

- **Solver: Double Precision Pressure Based Segregated**

Este tipo de Solver está habitualmente indicado para simular patrones de convección natural, aunque es válido para el caso en estudio que se trata de un flujo incompresible que alcanza altas velocidades en las galerías trasversales. Este algoritmo es también válido para los patrones de turbulencia y el más indicado para un ahorro computacional. Con este algoritmo las ecuaciones que gobiernan el problema se resuelven de manera secuencial, y dado que dichas ecuaciones son no lineales y además están acopladas, eliminando posibles errores del desacoplamiento. El bucle se debe realizar de forma iterativa hasta alcanzar la convergencia. El diagrama de ejecución del algoritmo es:

Pressure-Based Segregated Algorithm

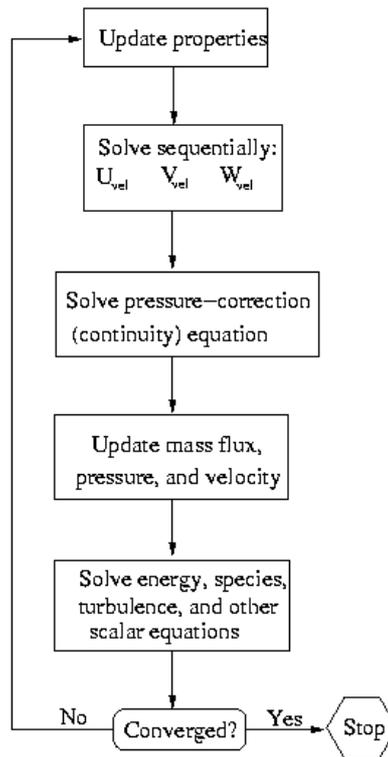


Figura 4.2 Algoritmo de Solver segregado transitorio. Fluent UDF's Manual, FLUENT.

En primer lugar, se resuelve sólo la ecuación de la energía en estado estacionario y primer orden de discretización y régimen laminar, hasta que la roca alcance la temperatura correspondiente a la temperatura de pared impuesta. Sólo se precisan de 25 iteraciones para que la solución converja.

Posteriormente se activa y resuelve el caso en estado transitorio, como se muestra en la figura 4.3.:

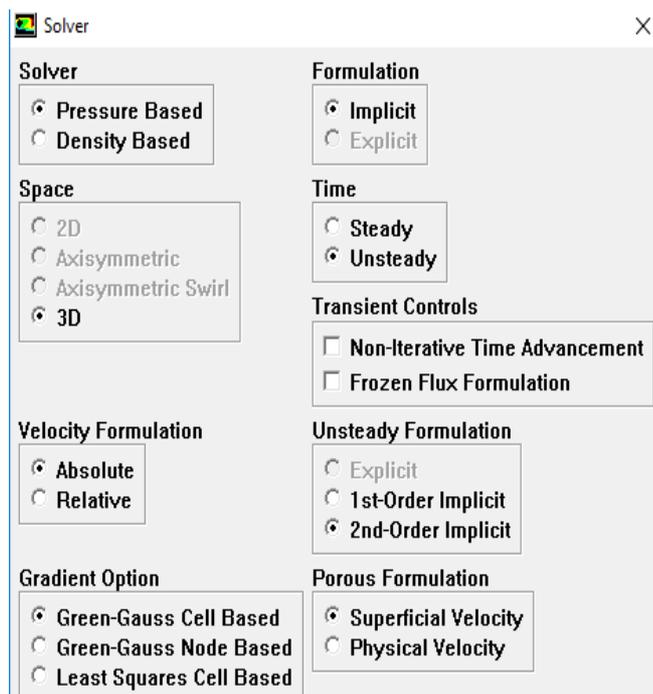


Figura 4.3 Activación del Solver transitorio, 2° orden de discretización, FLUENT.

En el algoritmo iterativo, las ecuaciones individuales que rigen las variables que son solución (u , v , w , p , T , k , etc.) se resuelven iterativamente, para un determinado intervalo de tiempo, hasta que se alcanzan los criterios de convergencia. Con este método iterativo, la no linealidad de las ecuaciones individuales y los acoplamientos entre ecuaciones son, todos, tenidos en cuenta, eliminando errores de separación de estas.

Se selecciona un acoplamiento de presión y velocidad tipo PISO (indicado para la resolución de modelos en los que se estudian los efectos de flotación), un modelo de viscosidad turbulento $k - \omega$ SST y se resuelven las ecuaciones de flujo, turbulencia y energía con un orden de discretización de segundo orden.

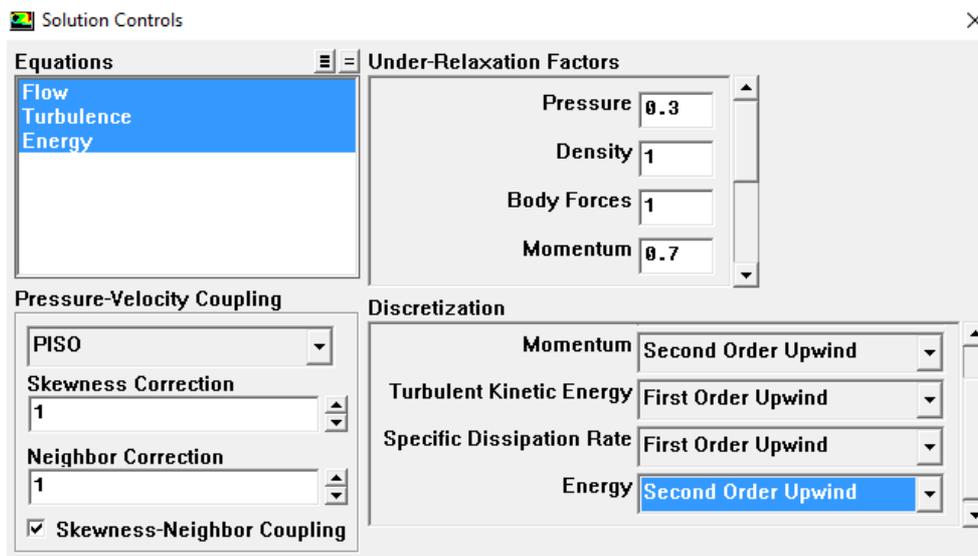


Figura 4.4 Activación ecuaciones transitorio, 2° orden de discretización, FLUENT.

Para el cálculo de la solución en estado estacionario se escoge primer orden de discretización y para el estado transitorio el segundo orden de discretización. Normalmente el primer orden de discretización se emplea en flujos convectivos uniformes y de mallado estructurado o bien cálculos de transferencia de calor por conducción dando resultados lo suficientemente precisos; por esta razón para resolver la transferencia de calor en estado estacionario se escoge el primer orden.

En cambio, al cambiar la solución a estado transitorio y activar la solución para la ecuación del flujo y la turbulencia se escoge el segundo orden de discretización, ya que se trata de un flujo complejo turbulento y un mallado con intersecciones transversales. De esta forma se sigue obteniendo una solución precisa con menor difusión de error.

Con la finalidad de captar los efectos de flotación si los hubiera en el campo fluido, se implementa el modelo de Boussinesq y se activan los efectos de la gravedad en dirección $-y$. Esta solución obtiene una convergencia más rápida pues considera la densidad constante para la resolución de todos los términos de las ecuaciones de momento, energía y masa, salvo para el término de flotación en la ecuación de momento, que lo considera variable.

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (4.1)$$

Donde ρ_0 es la densidad del fluido (constante), T_0 es la temperatura de inicio de la simulación, y β es el coeficiente de expansión térmica. Esta ecuación se obtiene de aplicar la aproximación de Boussinesq, $\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T)$ para eliminar el término variable, ρ , del término de flotación. Esta aproximación es válida mientras que los cambios en la densidad actual del fluido sean pequeños, sobre todo, es válida cuando $\beta(T - T_0) \ll 1$.

El modelo implica activar efecto de las fuerzas de la gravedad y fijar una densidad de operación que variará, únicamente, para el término de flotación.

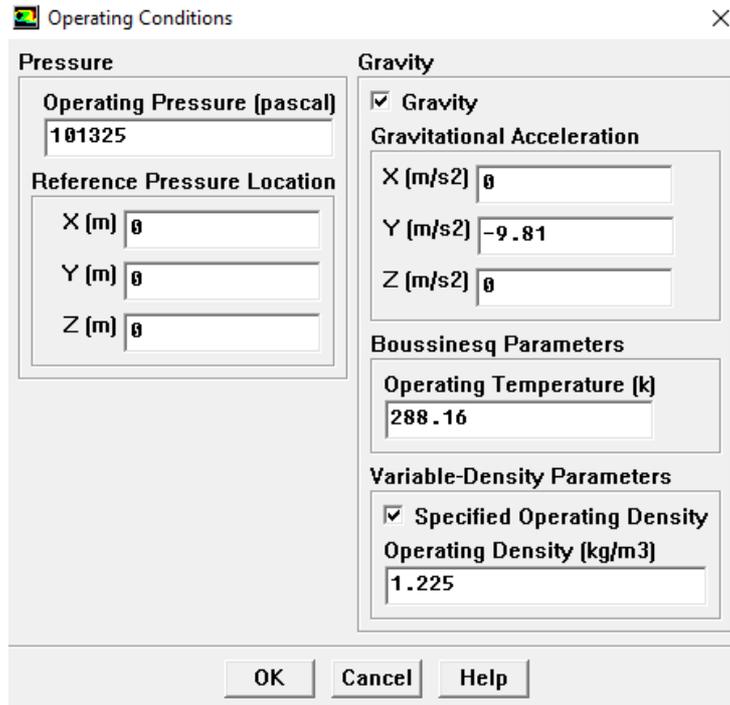


Figura 4.5 Activación de la gravedad. FLUENT.

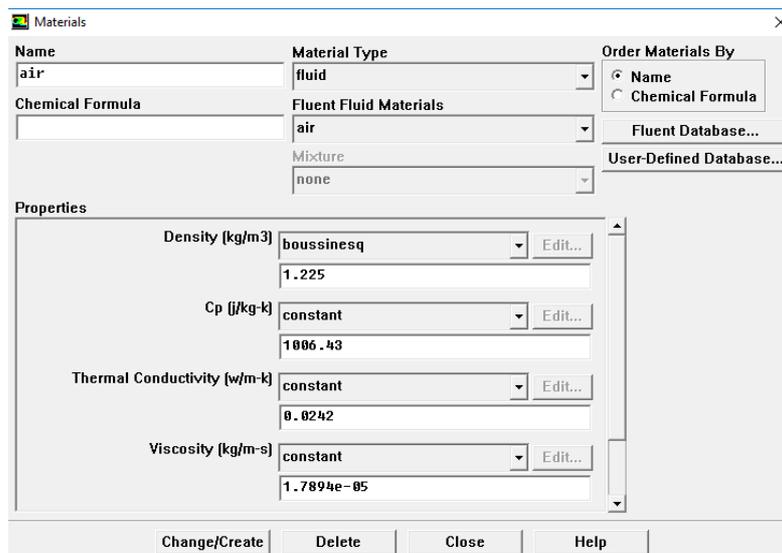


Figura 4.6 Activación aproximación de Boussinesq. FLUENT

El modelo de turbulencia escogido es SST, Shear Stress Transport, que acopla de forma efectiva la formulación del modelo de turbulencia $k - \omega$ en la región más cercana a la pared. Este modelo resuelve dos ecuaciones extra: la de la energía cinética ' k ' y ' ω ' o vorticidad, la producción y difusión de estas variables en el desarrollo del flujo hasta alcanzar el estado estacionario.

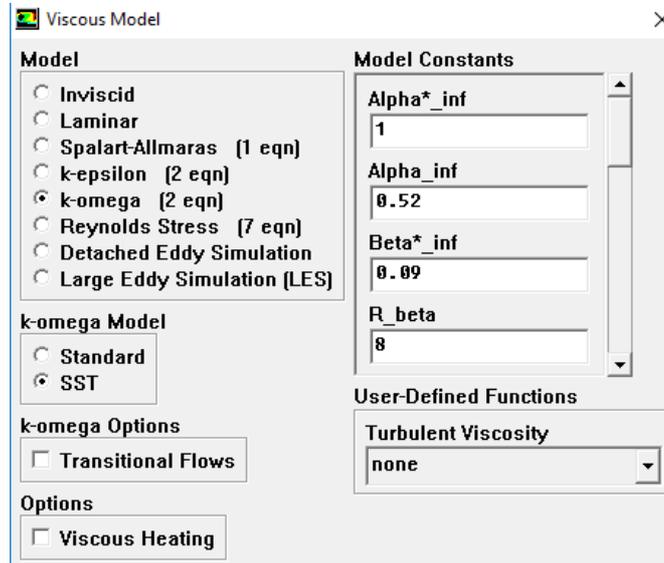


Figura 4.7 Selección modelo de viscosidad turbulento $k - \omega$ SST. FLUENT.

4.1.1.2. Criterios de convergencia

Al final de cada iteración, el sumatorio de los residuos de cada ecuación es calculado y almacenado constituyendo el historial de convergencia. Normalmente no alcanza el valor de cero que es convergencia exacta, pero alcanzar un valor estable, cuando esto sucede se considera que la solución ha convergido. Antes que esto suceda, los residuos pueden alcanzar hasta doce órdenes de magnitud.

La metodología de evaluación de residuos en el Solver Pressure Based consiste en que tras la discretización de la ecuación de conservación para una variable general en una celda P se puede expresar como:

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4.2)$$

Dónde a_P , es el coeficiente en el centro de la celda y ϕ_P , el coeficiente en las celdas vecinas, y b , la contribución de la parte constante del término fuente, S_c , en $S = S_c + S_P \phi$, y de las condiciones de contorno., en la ecuación (4.2):

$$a_P = \sum_{nb} a_{nb} - S_P \quad (4.3)$$

Por lo tanto, el residuo R^ϕ , se define como el sumatorio de la solución de la ecuación (4.2) resuelta en todas las celdas del dominio computacional. A este valor se le llama, residuo NO-escalado:

$$R^\phi = \sum_{cells P} |\sum a_{nb} \phi_{nb} + b - a_P \phi_P| \quad (4.4)$$

Pero es aconsejable que además de monitorizar los residuos éstos se comparen con valores escalados como el coeficiente de transferencia de calor. Para la mayoría de los casos sirve la convergencia que usa FLUENT por defecto, aplica a las ecuaciones unos criterios de convergencia de 10^{-3} para ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, y 10^{-6} para la ecuación de la energía. FLUENT escala estos residuos usando un factor de escala representativo del flujo de la variable ϕ , a través del dominio, es decir:

$$R^\phi = \frac{\sum_{cells P} |\sum a_{nb} \phi_{nb} + b - a_P \phi_P|}{\sum_{cells P} |a_P \phi_P|} \quad (4.5)$$

Para las ecuaciones de momento el término del denominador, $a_P \phi_P$, se cambia por $a_P v_P$, donde v_P es la magnitud de la velocidad en cada celda P.

Otra forma de evaluar que se ha escogido un criterio de convergencia apropiado es comprobar que los residuos no varían en más de tres órdenes de magnitud desde el valor inicial consignado, hasta el momento de su convergencia.

Una vez ha convergido la simulación, también puede ser útil examinar los residuos NO-escalados y comparar si los residuos son pequeños en comparación con una escala apropiada.

Para la ecuación de continuidad los residuos NO-escalados para el Solver Pressure-Based son los definidos por:

$$R^c = \sum_{cells P} |rate\ of\ mass\ creation\ in\ cell\ P| \quad (4.6)$$

Y los residuos escalados para ese mismo Solver se definen como:

$$\frac{R_{iteration\ N}^c}{R_{iteration\ 5}^c} \quad (4.7)$$

El denominador corresponde al valor absoluto más grande de los residuos de la ecuación de continuidad para las primeras cinco iteraciones.

Los criterios de convergencia escogidos en la resolución del modelo convectivo se muestran en la figura 4.8, han sido escogidos tras analizar los residuos escalados y no escalados de varias simulaciones y por ser recomendados por FLUENT Theory Guide, para la resolución de flujos en los que se resuelve la aproximación de Boussinesq:

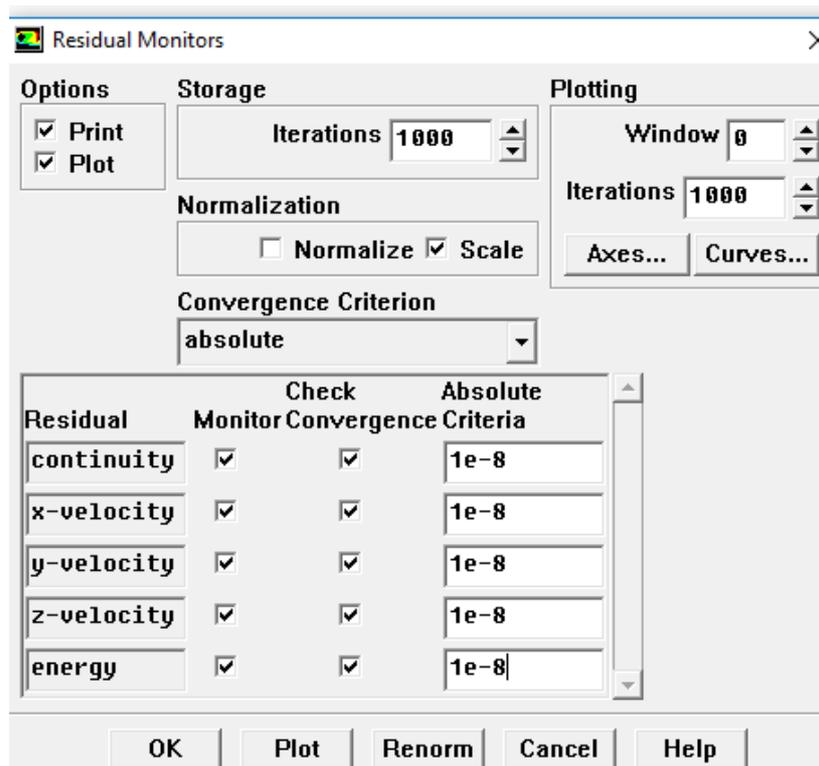


Figura 4.8 Criterios de convergencia de residuos programados para la simulación sub-modelo convectivo. FLUENT.

4.1.1.3. Programación del estado transitorio

Para programar el cálculo numérico en estado transitorio se debe indicar en FLUENT el tamaño en segundos de cada paso de tiempo (Time-Step-Size), el número de pasos de tiempo del tamaño de intervalo indicado (Number of Time-Step) y el número de iteraciones de la solución por cada paso de tiempo que se van a calcular (Max iterations per Time-Step).

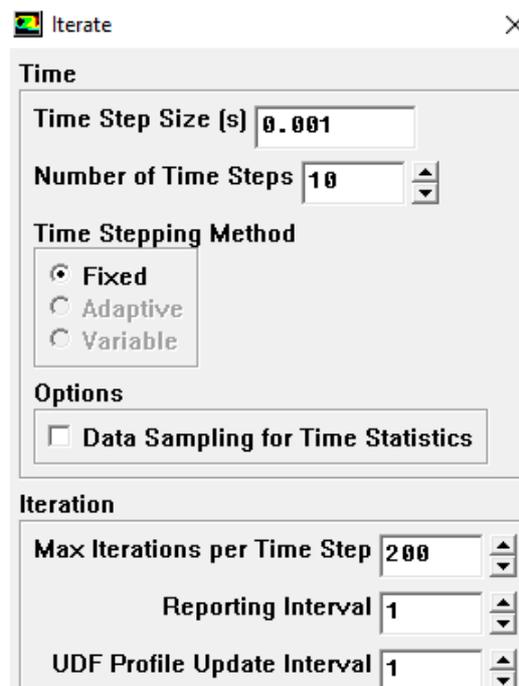


Figura 4.9 Programación intervalos de tiempo para estado transitorio. FLUENT.

De esta forma, la figura 4.9 resuelve 10 pasos de tiempo de 0,001 segundos cada uno, por lo tanto, equivale a la solución numérica para $t = 0,01$ segundos.

Las iteraciones iniciales poseen pasos de tiempo muy pequeños con la finalidad de conseguir captar de forma efectiva los instantes en que el aire en el interior de la galería se encuentra a la misma temperatura que las paredes y el sistema de V-R comienza a funcionar. Así se puede observar cómo se entremezclan ambos fluidos en los que existe un salto de temperaturas de más de 20 K.

Una vez el campo fluido y el campo térmico están plenamente desarrollados y alcanzan el estado estacionario, $dv/dt = 0$ y $dT/dt = 0$, se puede considerar que la solución converge y finalizar la simulación para su postprocesado.

En el anexo 1 se detalla la metodología de programación de los ficheros journal empleados para el lanzamiento de los casos en estado transitorio, así como el resto de parámetros que modelizan el tipo de Solver y condiciones de contorno.

4.1.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno implementadas en la simulación se resumen en la tabla 4.10:

Superficies	Condición de contorno
Paredes galería: izq-temp,der-temp,arriba-temp,abajo-temp	Wall (temperatura de pared constante)
entrada	Velocity-inlet
fan1, fan2, fan3	Velocity-inlet
salida	Pressure-outlet

Figura 4.10 Condiciones de contorno modelo convectivo

- **Paredes de la galería: abajo-temp, izq-temp, der-temp, arriba-temp**

Estas superficies son de tipo Wall, este tipo de condición de contorno permite asignar a la superficie definidas propiedades de flujo de calor, convección, radiación o temperatura. Para las simulaciones con este modelo se definen unas condiciones térmicas de **temperatura** de pared constante, en todas las paredes de la galería, que simulan la temperatura a la que están las paredes si reciben un flujo de calor constante desde el núcleo terrestre. Las consideraciones para los valores de G se han obtenido de las recomendaciones de la literatura específica (Mcperson, 1993).

Una galería emplazada a 3000 metros de profundidad en una roca de tipo carbón está transmitiendo un flujo de calor por conducción, procedente del núcleo terrestre, de $0,013 \text{ W/m}^2$, lo que se traduce en una temperatura superficial de las paredes de la galería subterránea $\approx 353\text{-}360 \text{ K}$.

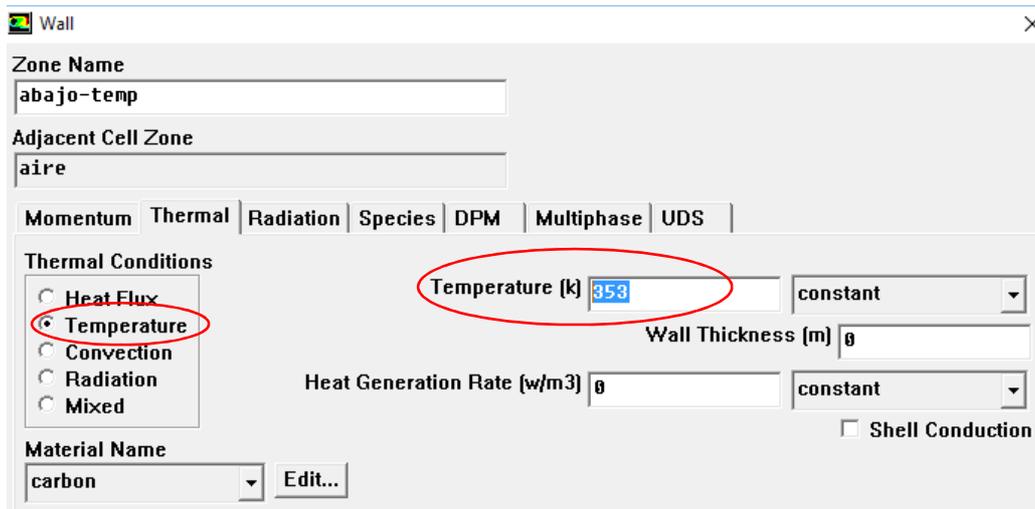


Figura 4.11 Condiciones de contorno temperatura de pared constante. FLUENT

Cuando en FLUENT se escoge la condición térmica de pared constante la transferencia del flujo de calor de la pared hacia las celdas de fluido es calculada:

$$q = h_{fluido}(T_{pared} - T_{fluido}) + q_{rad} \quad (4.8)$$

Dónde, h_{fluido} , es el coeficiente local de transferencia de calor del fluido, T_{pared} , temperatura de la pared impuesta, T_{fluido} , temperatura local del fluido y q_{rad} , flujo de calor radiativo. Para el caso en estudio se ha de tener en cuenta que al tratarse de un flujo en convección forzada se anulan los posibles efectos de la transferencia de calor por radiación.

Para calcular el coeficiente global de transferencia de calor en el lado fluido, FLUENT lo analiza aplicando la 'Ley de la Pared' que utiliza la analogía entre transferencia de calor y momento en las capas límite, encontrando una relación entre el valor de los esfuerzos cortantes en la pared y las velocidades de transferencia de calor, Nu .

Se consigue adimensionalizando las ecuaciones de cantidad de movimiento y energía de forma que sus términos de temperatura y velocidad adimensionales sean iguales y se pueda establecer una relación entre ambos.

$$C_f \frac{Re}{2} = Nu \quad \text{para } Pr \approx 1 \quad (4.9)$$

Donde, C_f , es el coeficiente de fricción, Re , valor de número de Reynolds y Nu , número adimensional de Nusselt. Esta relación también se conoce como analogía de Reynolds y permite conocer el valor del coeficiente de fricción para flujos con $Pr \approx 1$, conociendo el coeficiente de fricción:

$$\frac{C_f}{2} = S_t \quad (4.10) \text{Dónde, } S_t, \text{ es el número adimensional de Stanton y también es un coeficiente de transferencia de calor.}$$

$$S_t = \frac{h}{\rho C_p V} = \frac{Nu}{Re Pr} \quad (4.11)$$

Siendo h , coeficiente de transferencia de calor convectivo, ρ , densidad del fluido, C_p , calor específico del fluido y V , su velocidad.

El material asignado para estas superficies es el correspondiente a roca carbón, detalladas en la sección 1.2.4 de este capítulo.

- **Entrada**

Esta superficie es un tipo de condición de contorno tipo, velocity-inlet, se utiliza para definir la velocidad y otras propiedades escalares en la zona de entrada del fluido. Es preciso tener en cuenta que se va a dar un flujo de tipo turbulento con $Re \gg 2500$.

FLUENT al definir un flujo entrando en el dominio físico, las componentes de la velocidad y los escalares definidos (temperatura...) se utilizan para calcular el gasto másico y los flujos de cantidad de movimiento y energía.

El gasto másico entrando en una celda adyacente a una condición de 'velocity-inlet' se expresa:

$$\dot{m} = \int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (4.12)$$

Téngase en cuenta que solo la componente normal de la velocidad sobre la superficie de entrada es la que contribuye a la entrada de gasto másico.

En cuanto a los parámetros y características que es necesario especificar se encuentran:

- Se elige el método para especificar la dirección del flujo, en este caso: magnitud y dirección normal a la superficie de entrada.
- La velocidad se especificará en términos absolutos.
- Se especifica el valor absoluto del vector velocidad
- Se tiene que especificar lo que Fluent denomina Outflow Gauge Pressure, dicho valor es necesario para que en el caso de que durante proceso de resolución del caso exista refluo, la cara por la cual retroceda el fluido se tratara como una condición de Pressure-outlet, con este valor.
- Por último, también se deberá de tomar muy en cuenta la temperatura a la que fluido entra en el dominio computacional.

Es importante reseñar que, en las simulaciones realizadas para resolver el estado estacionario, en esta superficie se ha impuesto la condición de contorno inicial Wall con un flujo de calor constante de 0 W/m^2 .

$$q = k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (4.13)$$

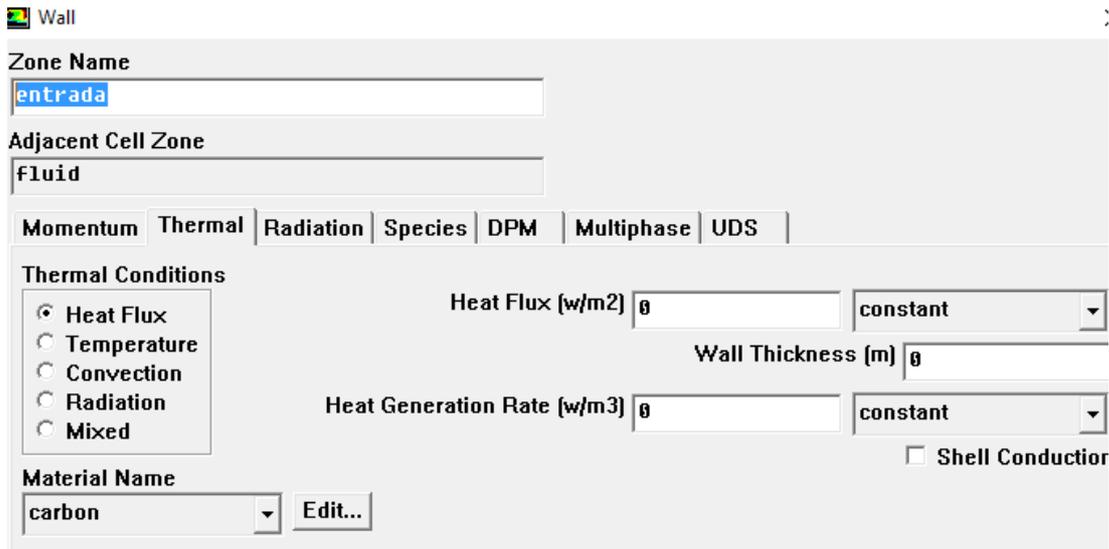


Figura 4.12 Condiciones de contorno iniciales, resolución en estacionario. FLUENT

Posteriormente, una vez iniciado el estado transitorio esta superficie se define como condición de contorno velocity-inlet, implementando una velocidad de entrada de aire en la galería principal y temperatura, tal como se muestra en la figura

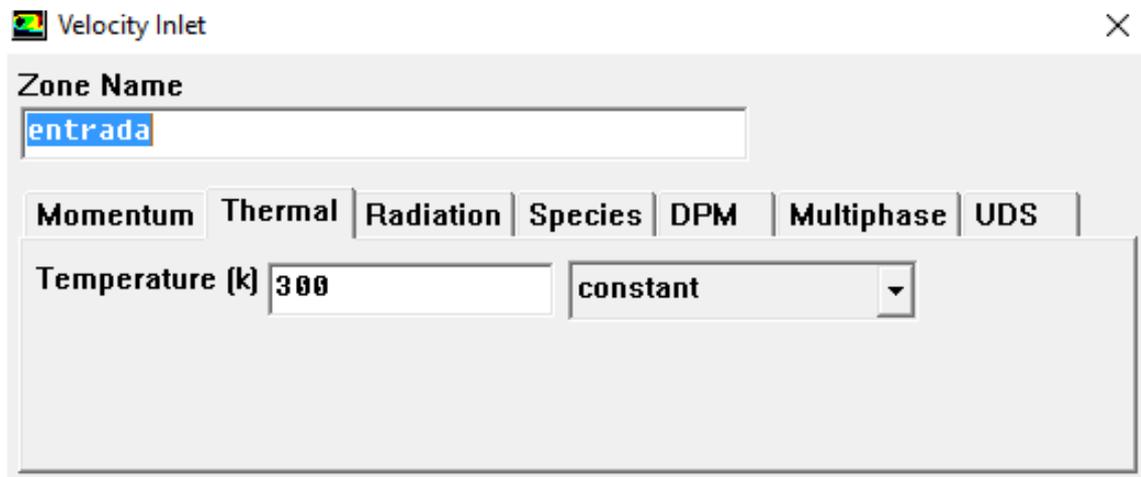
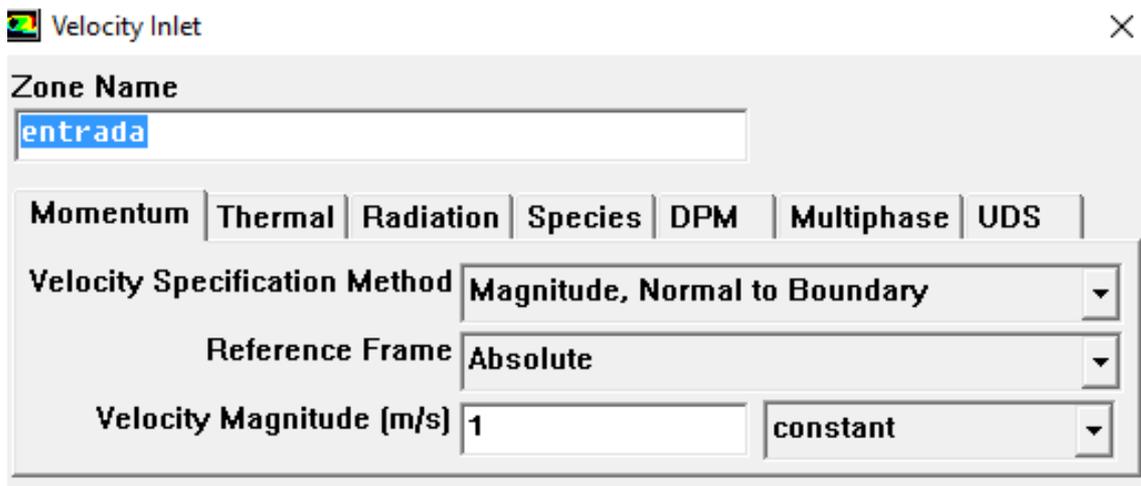


Figura 4.13 Condiciones de contorno velocidad de entrada galería. FLUENT

- **fan1, fan2 y fan3:**

Estas tres superficies representan las toberas de salida del sistema de ventilación y se encuentran situadas en los cross-cuts a 5 metros de distancia del frente de explotación. Para estas superficies sucede igual que con la de entrada para la resolución del caso en estado estacionario. Primero se definen como tipo Wall con flujo de calor 0 W/m^2 .

Una vez resuelto el estacionario se definen como condición de contorno tipo velocity-inlet, iguales a la anterior. En las soplantes se imponen las condiciones de velocidad absoluta perpendicular a la superficie de 12 m/s con una temperatura de 293 K ($20 \text{ }^\circ\text{C}$), tal como se aprecia en la figura 4.12:

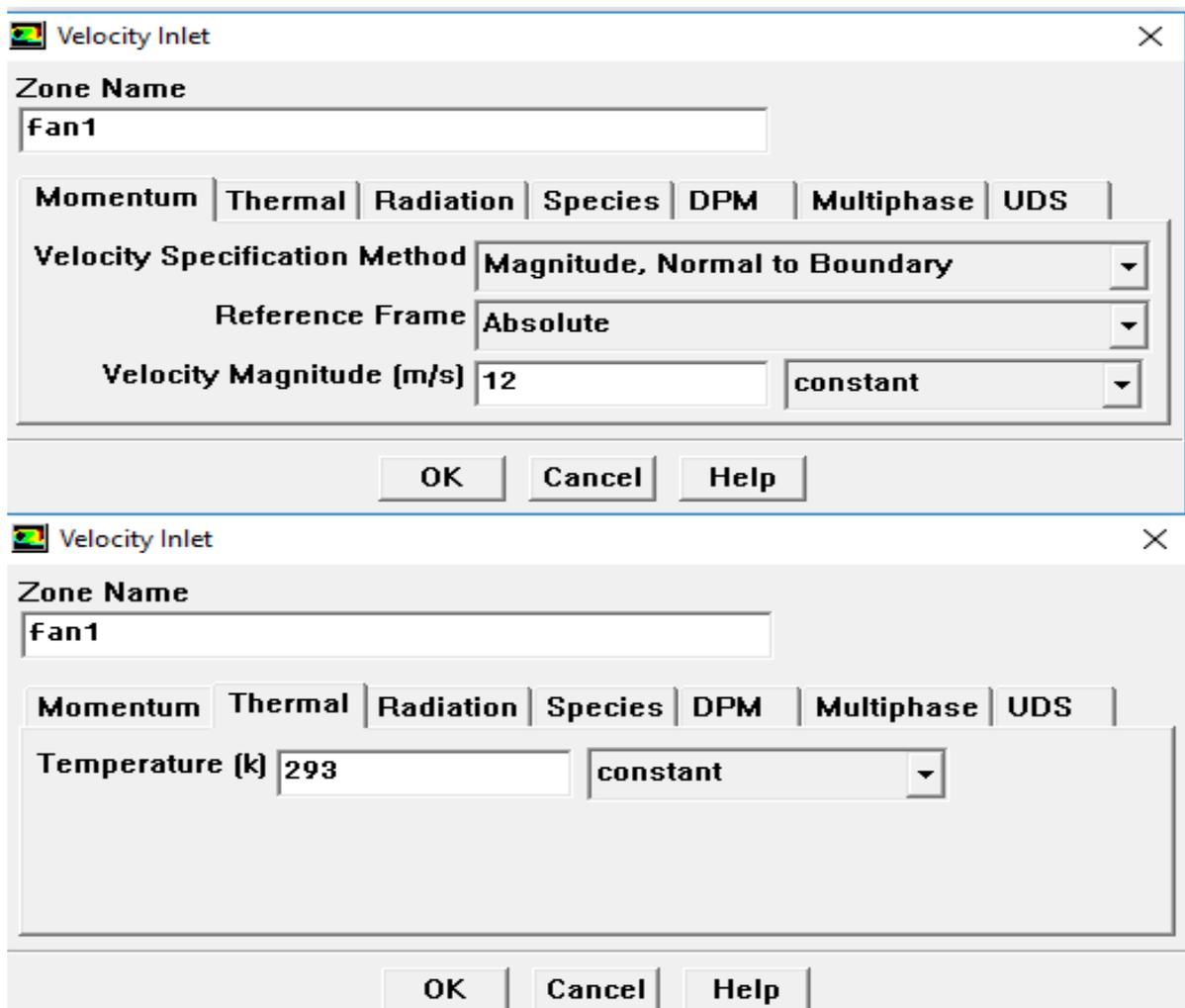


Figura 4.14 Condiciones de contorno velocidad de soplantes. FLUENT

La velocidad impuesta como velocidad de salida es la velocidad máxima según normativa sobre seguridad y ventilación subterránea (Ministerio de Energía, 1985).

- **Salida**

La salida de fluido se caracteriza con la condición de contorno tipo Pressure-outlet. Requiere la especificación de la presión estática en la superficie de salida de la galería. FLUENT únicamente utiliza este valor mientras que el flujo sea subsónico, tal y como es el caso. Como la presión de operación, se deja la que FLUENT asigna por defecto 0 Pascales.

En el caso de esta condición de contorno se ha procedido de la misma forma que para la condición entrada. Durante la solución estacionaria en la que se resuelve la ecuación de la energía esta condición es de tipo Wall con flujo de calor 0 W/m^2 , una vez activado el transitorio se define como condición pressure-outlet, tal como muestra la figura 4.13.

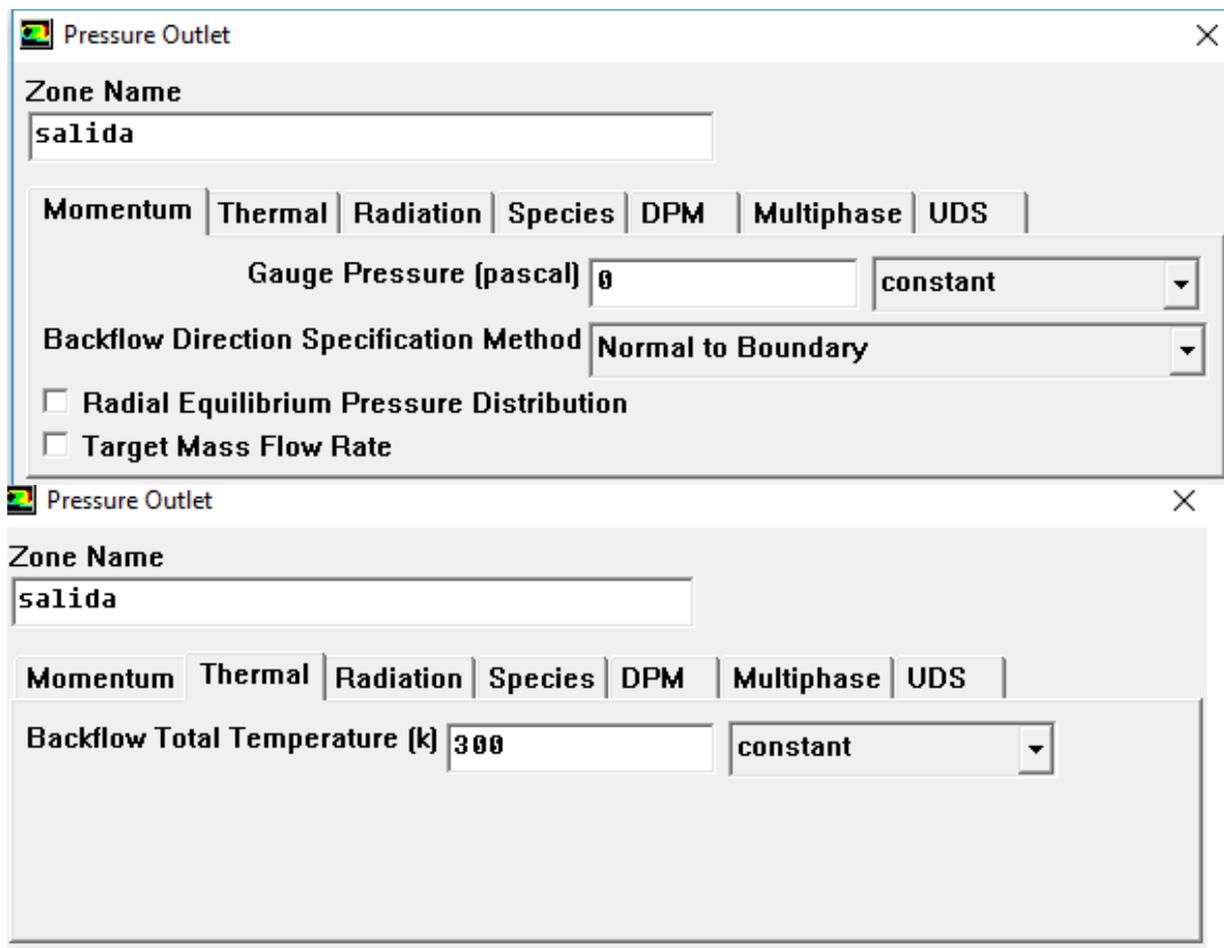


Figura 4.15 Condiciones de contorno presión a la salida de la galería. FLUENT

Para el posible retroceso del flujo (backflow) a la salida se ha de tener en cuenta la configuración de los parámetros que rigen esta variable. Por lo tanto, como en las simulaciones se resuelve la ecuación de la temperatura es necesario asignar un valor para la temperatura de salida de que es 300 K, el mismo que a la entrada puesto que se pretende conseguir una temperatura consigna en el interior de la galería tras activar el sistema de ventilación. Cuando la dirección de las recirculaciones puede llegar a ser relevante en la resolución del campo fluido se puede modificar el cambiando las opciones de 'Backflow Direction Specification Method'; en estas simulaciones se deja el valor por defecto de 'Normal to Boundary' no se prevé ningún efecto adverso por esas causas. Para el caso en estudio, si ocurre el retroceso del fluido la presión se usada como presión total será la especificada en la condición de contorno.

4.1.3. Materiales

- **Dominio fluido (aire seco)**

En el este sub-modelo se pueden distinguir dominios de diferente naturaleza.

El dominio fluido es el interior de la galería y los cross-cuts y se asume constituido por aire libre de contenido en humedad, aire seco. Las propiedades de este fluido están en estrecha dependencia con la implementación de la aproximación de Boussinesq, ya que como valor inicial para la densidad se toma la densidad del aire a 288,16 K, que una vez se estén resolviendo las ecuaciones variará en el término de flotación a razón del valor de la temperatura y su relación con el coeficiente de expansión térmica del aire. La figura 4.14 recoge las propiedades del aire simuladas:

Tabla 4.1. Propiedades del fluido: AIRE. FLUENT

Propiedades fluido (aire seco)	
ρ (kg/m ³)	1,225
k (W/m·K)	0,0242
C_p (J/kg·K)	1006,43
ν (kg/m·s)	1,789e-05

- **Dominio sólido (roca)**

En el sub-modelo convectivo las paredes de la galería se caracteriza con las propiedades térmicas de roca carbonífera (Herrin M. James, 1996).

Tabla 4.2. Propiedades del sólido paredes de roca. Carbón. FLUENT

Propiedades roca carbonífera	
k (W/m·K)	0,33
ρ (kg/m ³)	1296
C_p (J/kg·K)	1300

4.1.4. Simulaciones realizadas

La ejecución de los casos se ha llevado a cabo variando principalmente dos parámetros: la temperatura de pared de la galería, temperatura de aire de ventilación y velocidad de entrada de aire por la galería principal, quedando como se muestra en la tabla 4.3:

Tabla 4.3 Simulaciones realizadas para sub-modelo convectivo

Descripción	Temperatura pared (K)	Temperatura aire de ventilación (K)	Velocidad entrada galería (m/s)
V298_353_d1_v12	353	298	1
V298_343_d1_v12	343	298	1
V298_333_d1_v12	333	298	1
V298_323_d1_v12	323	298	1
V298_313_d1_v12	313	298	1
V293_353_d1_v12	353	293	1
V293_343_d1_v12	343	293	1
V293_333_d1_v12	333	293	1
V293_323_d1_v12	323	293	1
V293_313_d1_v12	313	293	1

La variación de la temperatura superficial de la pared de la galería suele oscilar entre los dos valores extremos impuestos y la velocidad del aire de entrada en la galería nunca debe ser superior a 2 m/s. Así mismo, la temperatura de aporte del sistema de V-R, varía en los rangos establecidos pues habitualmente se busca encontrar la temperatura de confort humana para el desarrollo de los trabajos de una forma segura.

Para ejecutar las simulaciones se ha utilizado el servidor Labmach, propiedad de la Universidad Politécnica de Cartagena, mediante la programación previa de los casos con archivos de tipo journal para FLUENT – ver anexo I.

4.2. Modelo global acoplado

Como se ha explicado al principio de este capítulo, una vez validado el sub-modelo convectivo de forma individual y habiendo resuelto el campo fluido se procede con la construcción de un modelo global consistente en añadir a la geometría y mallado de la galería inicial un dominio roca encajante en todas las direcciones conformando un nuevo volumen mallado de dimensiones 3100×300×300 metros, como se muestra en la figura 4.16:

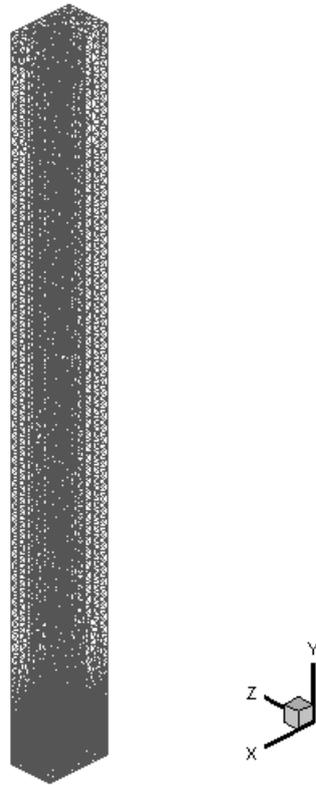


Figura 4.16 Modelo numérico completo. Galería más roca. GAMBIT.

Este modelo se resuelve de manera distinta al anterior ya que se añaden dos condiciones de contorno extra respecto al sub-modelo convectivo y se caracteriza un revestimiento de material aislante en toda la superficie de la pared de la galería.

En primer lugar, es preciso aclarar que la caracterización de G viene dada por la imposición de un flujo de calor constante situado a 100 metros por debajo de la galería en la superficie de roca. A su vez, la superficie exterior de la mina situada a 3000 metros de altura por encima de la galería se considera una superficie por la que fluye el aire libre con unas condiciones de temperatura y convección que se detallan más adelante.

Las simulaciones que se realizan con este mallado completo van a ser, por una parte, con todo el volumen sólido caracterizado como roca carbonífera, y, por otra parte, un volumen de revestimiento de 10 centímetros de espesor que rodea la galería caracterizado como hormigón aligerado y el resto roca carbonífera. El objetivo de estas simulaciones es observar la influencia del revestimiento de la roca sobre las cargas térmicas que penetran en la galería.

4.2.1. Modelo global tipo I: galería desnuda

Este modelo posee la geometría especificada en el apartado anterior. Su particularidad, como se ha detallado más arriba, es que posee un volumen de 10 cm de revestimiento interior de la galería. Para este primer modelo global de galería desnuda se asume que ese revestimiento también es de carbón, como el resto de roca encajante; por esta razón los dos materiales que

intervienen en estas simulaciones son el carbón (todo el volumen sólido) y el aire (volumen fluido).

4.2.1.1. Hipótesis de simulación en FLUENT

4.2.1.1.1. Estrategia de Simulación

- **Solver Double Precision Pressure Based Segregated**

El algoritmo de resolución es igual al del sub-modelo convectivo, se utiliza un Solver de doble precisión, basado en la presión segregado. Se procede en primer lugar con la resolución de la ecuación de la energía (transferencia de calor por conducción en el sólido) en estado estacionario para obtener la estratificación vertical de la temperatura en los 3100 metros de volumen sólido.

Para la solución en estado transitorio se selecciona un acoplamiento de presión y velocidad tipo PISO y se resuelven las ecuaciones de flujo, turbulencia y energía con un orden de discretización de segundo grado.

Las características del campo fluido se definen exactamente igual que en el sub-modelo convectivo, mediante la aproximación de Boussinesq, se resuelve activando el modelo de viscosidad turbulento $k - \omega$, SST (Solver idéntico al sub-modelo convectivo).

Las simulaciones del modelo completo se llevan a cabo mediante el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se resuelve sólo la ecuación de la energía en estado estacionario y régimen laminar definiendo las condiciones de contorno para convection y hflux, según se detalla en el apartado 2.1.2. Para las superficies fan1, fan2 y fan3 se establecen condiciones de contorno de tipo Wall con flujo de calor 0 W/m^2 . Se procede de la misma manera para las superficies de entrada y salida. Se caracterizan todas las superficies con las características térmicas de carbón.

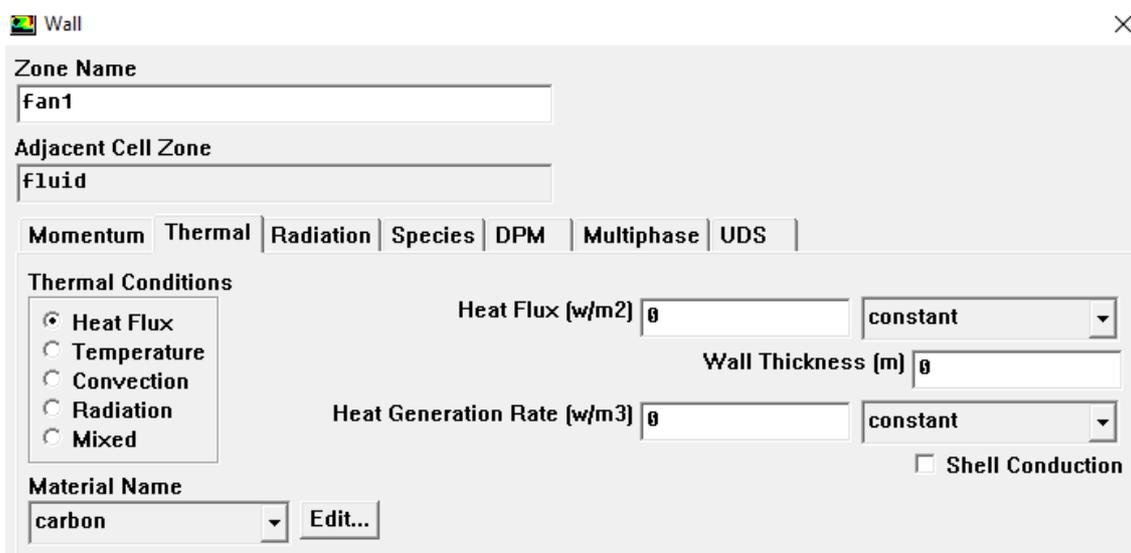


Figura 4.17 Condiciones de contorno iniciales para fan1,2, y 3, entrada y salida. Resolución en estacionario. Modelo Global. FLUENT

Se resuelve hasta que todo el dominio roca ha alcanzado la temperatura consignada en la galería (≈ 353 K), aproximadamente unas 25 iteraciones.

Posteriormente, se activa la resolución en estado transitorio modificando las condiciones de contorno de fan 1, 2 y 3, entrada y salida, según se resumen en el apartado 2.1.2. Todo el volumen sólido se caracteriza con las características térmicas del carbón. Se selecciona el modelo de viscosidad turbulento $k - \omega$, SST.

Se continúa resolviendo la ecuación de la energía y además las de flujo y turbulencia especificando el segundo orden de discretización. Los saltos de tiempo son inicialmente muy pequeños, al igual que se hizo el el sub-modelo convectivo, y tras los primeros minutos se comienzan a resolver con frecuencia diaria (cada 24 hrs) y posteriormente mensual (720 ó 744 horas) durante cuatro años.

La razón por la que el modelo se resuelve durante 4 años es para poder observar el proceso de enfriamiento de la roca encajante ante los efectos del sistema V-R.

4.2.1.1.2. Criterios de convergencia

Al final de cada iteración, el sumatorio de los residuos de cada variable conservativa es calculado y almacenado constituyendo el historial de convergencia. La memoria de computación del servidor no hace posible que los residuos lleguen hasta cero para convergencia, pero logra que éstos alcancen un mínimo y a partir de ahí permanezcan estables. Antes que esto suceda, los residuos pueden alcanzar hasta doce órdenes de magnitud.

Los criterios de convergencia escogidos en la resolución del modelo convectivo se muestran en la figura 4.5, han sido escogidos tras analizar los residuos escalados y no escalados de varias simulaciones y por ser recomendados por FLUENT Theory Guide, para la resolución de flujos en los que se resuelve la aproximación de Boussinesq:

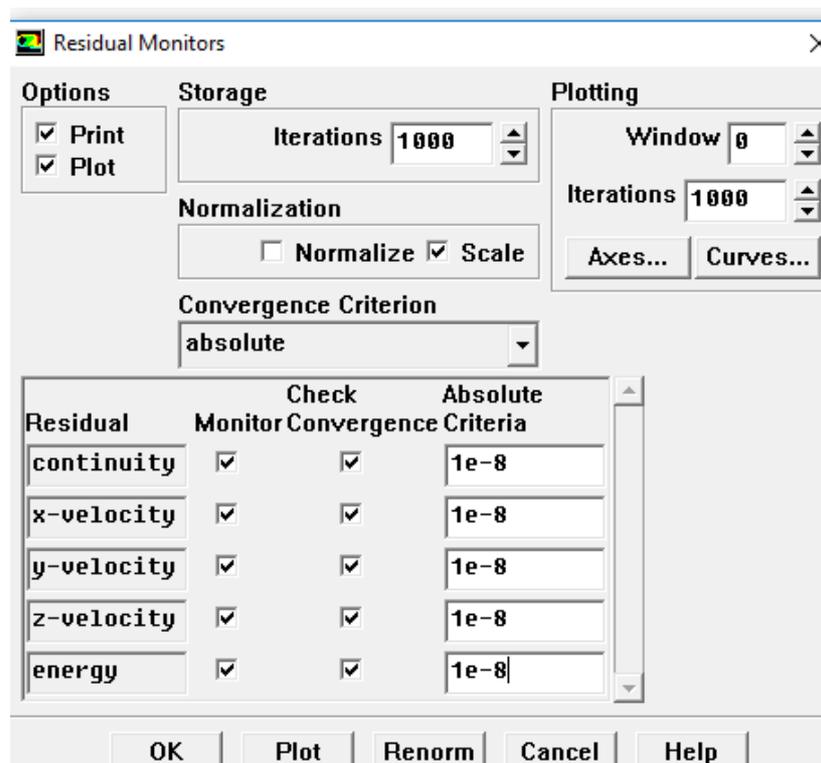


Figura 4.18 Criterios de convergencia de residuos programados para la simulación sub-modelo convectivo. FLUENT.

4.2.1.1.3. Programación del estado transitorio

Para programar el cálculo numérico en estado transitorio se debe indicar en FLUENT el tamaño en segundos de cada paso de tiempo (Time-Step-Size), el número de pasos de tiempo del tamaño de intervalo indicado (Number of Time-Step) y el número de iteraciones de la solución por cada paso de tiempo que se van a calcular (Max iterations per Time-Step).

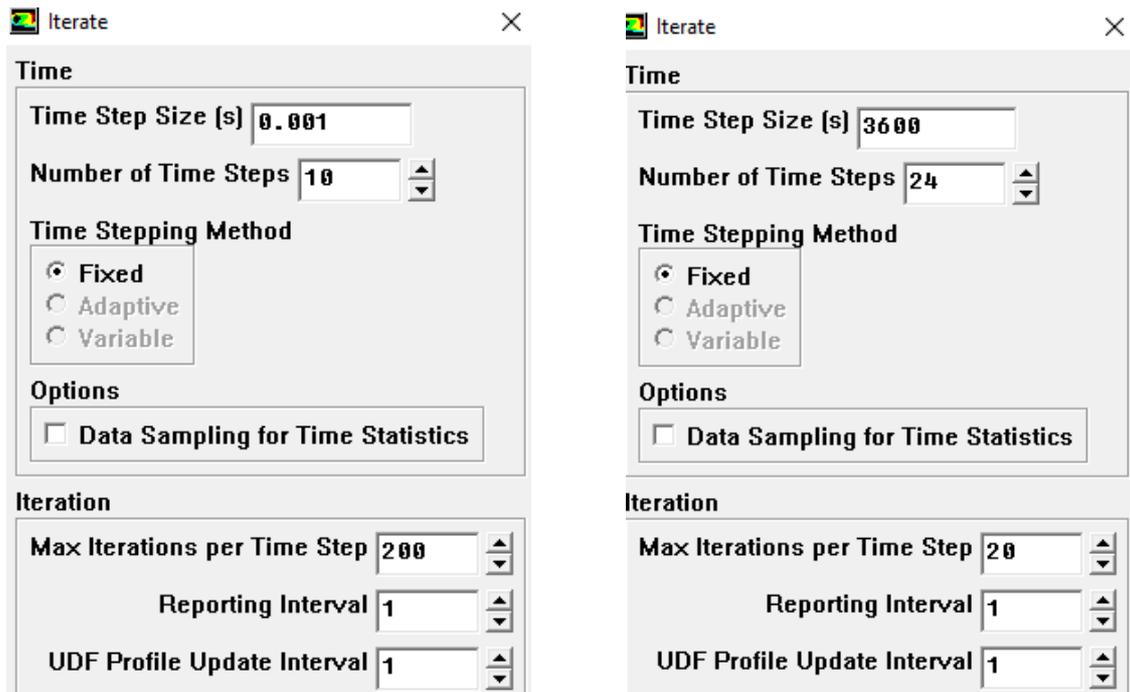


Figura 4.19 Programación intervalos de tiempo iniciales y diarios para estado transitorio. Modelo global roca desnuda. FLUENT.

Las iteraciones iniciales poseen pasos de tiempo muy pequeños con la finalidad de conseguir captar de forma efectiva los instantes en que el aire en el interior de la galería se encuentra a la misma temperatura que las paredes y el sistema de V-R comienza a funcionar. Así se puede observar cómo se entremezclan ambos fluidos en los que existe un salto de temperaturas de más de 20 grados centígrados.

Una vez el campo fluido y el campo térmico están plenamente desarrollados y alcanzan el estado estacionario, $dv/dt = 0$ y $dT/dt = 0$, se puede considerar que la solución converge y finalizar la simulación para su postprocesado.

4.2.1.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno implementadas en la simulación se recogen en la figura 4.19:

• Figura 4.20 Condiciones de contorno modelo convectivo

Superficies	Condición de contorno
hflux (basamento roca), convection (exterior, superficie)	Wall
entrada	Velocity-inlet
fan1, fan2, fan3	Velocity-inlet
salida	Pressure-outlet
Interfaz, pared1,2,3 y 4	interfase

• **Hflux**

La superficie 'hflux' viene definida por una condición de contorno tipo Wall, es una superficie cuadrada de 300 x 300 metros. Está situada 100 metros por debajo de la galería y tiene las características térmicas de carbón. Las simulaciones se realizan imponiendo unas condiciones térmicas de tipo 'Heat-flux' o flujo de calor constante. El valor fijado para conseguir una temperatura de pared de la galería entorno a los 353 K es de 0,013 W/m².

$$t = 0 \left\{ q'' = -k \frac{\partial T}{\partial z} = cte = 0,013 \frac{W}{m^2} \right.$$

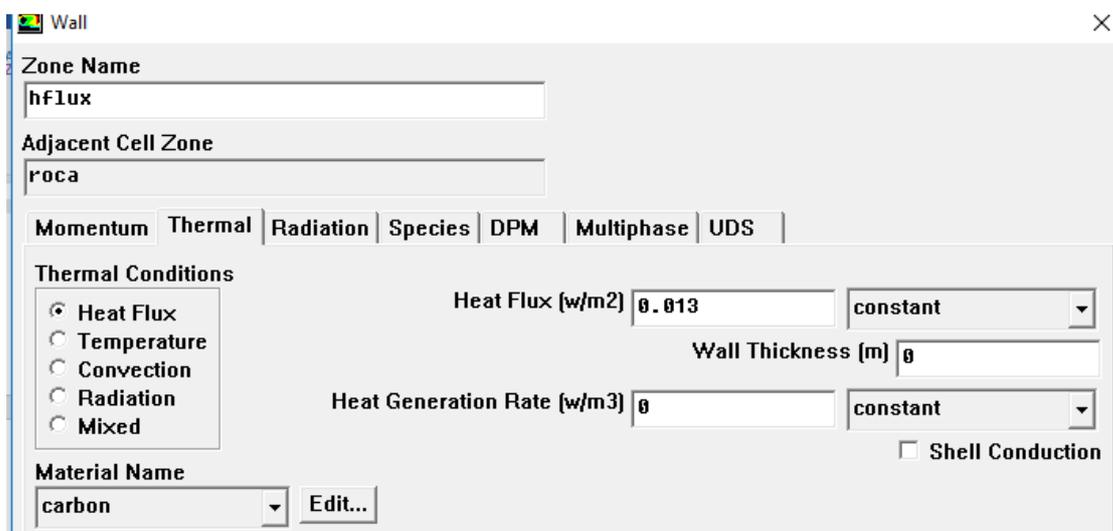


Figura 4.21 Condición de contorno hflux. Modelo Global. FLUENT.

Cuando se define como condición de contorno heat-flux en una superficie tipo Wall, FLUENT utiliza la ecuación:

$$q = \frac{k_s}{An} (T_{pared} - T_{local}) + q_{rad} \tag{4.14}$$

Donde k_s , es la conductividad térmica del sólido, T_{local} , es la temperatura local del sólido y An , es la distancia entre la superficie tipo wall y la celda central del sólido.

- **Convection**

Esta superficie representa la superficie exterior de la mina, el terreno a cota cero sobre el nivel del mar, es de tipo Wall y se define con unas condiciones térmicas de tipo ‘convection’ en las que se fija un valor para el coeficiente de convección del aire, 10 W/m²K y una temperatura de 25° C (298 K). El material con el que se caracteriza es carbón.

$$t = 0 \begin{cases} h_{ext} = 10 \frac{W}{m^2 K} \\ T_{ext} = 298 K \end{cases}$$

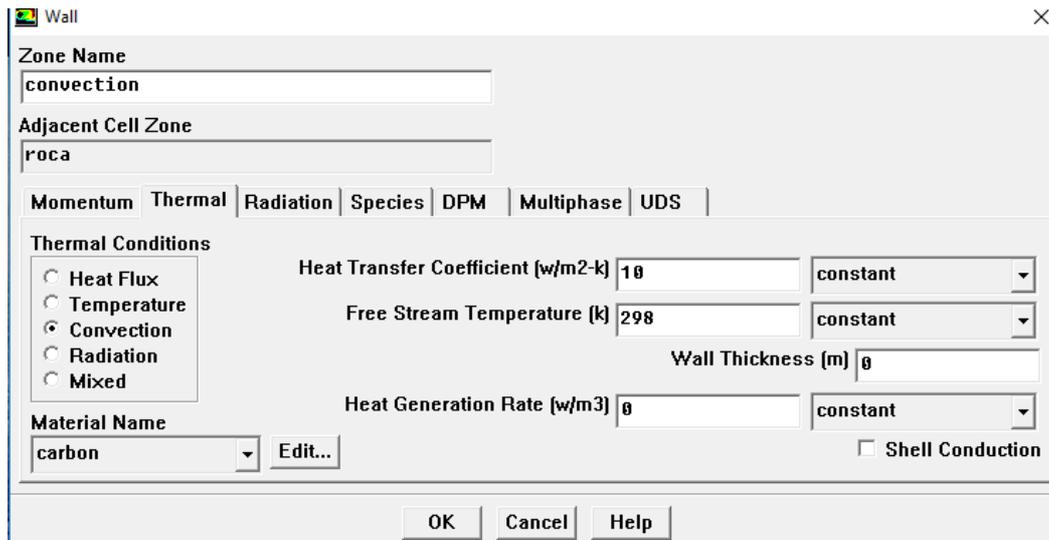


Figura 4.22 Condición de contorno convection. Modelo Global. FLUENT

Cuando se impone una condición térmica a una superficie tipo Wall, FLUENT usa los datos prefijados de coeficiente de convección externo y temperatura de sumidero de calor externa para calcular el flujo de calor hacia las paredes, como se muestra en la ecuación 4.13.:

$$q = h_f(T_{ext} - T_w) \tag{4.15}$$

donde , h_f , es el coeficiente exterior de transferencia de calor fijado por el programador, T_{ext} , temperatura ambiente, considerado sumidero de calor, fijada por el programador.

- **Entrada, fan1, fan2 y fan3**

Estas tres superficies representan las toberas de salida del sistema de ventilación y se encuentran situadas en los cross-cuts a 5 metros de distancia del frente de explotación –exactamente igual que el sub-modelo convectivo. Se caracterizan como condición de contorno tipo velocity-inlet.

En las soplantes se imponen las condiciones de velocidad absoluta perpendicular a la superficie de 12 m/s con una temperatura de 20°C (293 K). La velocidad impuesta como

velocidad de salida es la velocidad máxima según normativa sobre seguridad y ventilación subterránea (Ministerio de Energía, 1985).

$$t = 0 \begin{cases} v_{vent} = 12 \frac{m}{s} \\ T_{vent} = 293 K \end{cases}$$

- **salida**

Las condiciones de contorno para la superficie de salida se programan igual que en el sub-modelo convectivo. Condición de contorno tipo Pressure-outlet con presión prefijada a cero Pascales ante la posibilidad de retrocesos en el campo fluido y temperatura del aire de salida a 300 K.

$$t = 0 \begin{cases} p_{salida} = 0 Pa \\ T_{salida} = 300 K \end{cases}$$

- **Interfase**

Son de especial mención las superficies designadas como condición de contorno tipo Interface. Aunque a estas superficies no se les asigna ningún valor térmico desempeñan un papel de vital importancia ya que conectan los volúmenes de galería y roca que poseen un mallado conforme y no –conforme, permitiendo que se dé continuidad de resolución de las ecuaciones de transferencia de calor en todo el medio sólido.

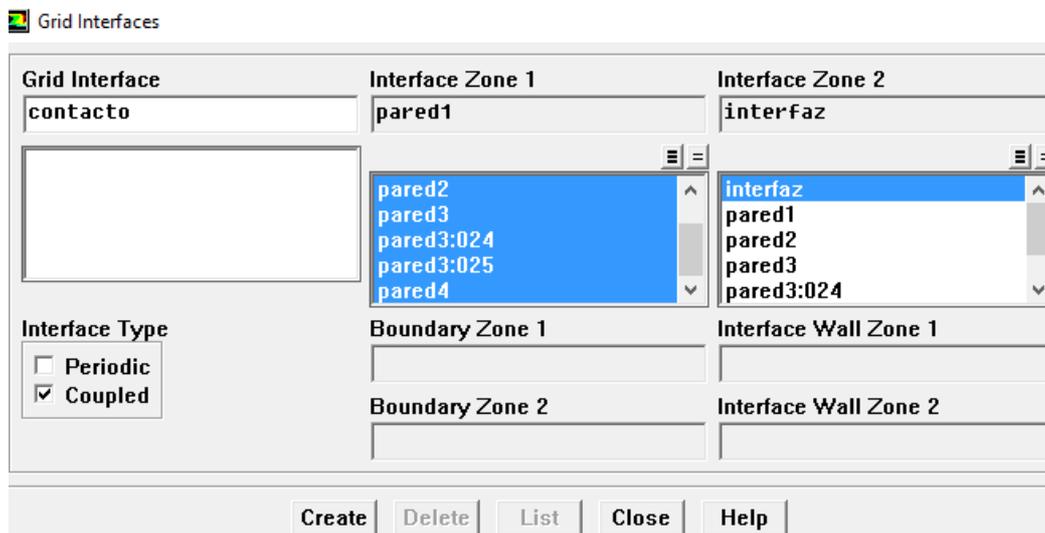


Figura 4.23 Definición de zona de interfase o ensamblaje de mallas. FLUENT.

Se activan al inicio, antes de programar el Solver de resolución.

4.2.1.3. Materiales

Los materiales definidos en este modelo son los mismos que en sub-modelo convectivo: de naturaleza fluida el aire seco y el sólido carbón.

4.2. Modelo global galería con revestimiento

Con la finalidad de implementar mejoras de ahorro energético para el sistema de V-R , en la geometría global se ha descrito un volumen de espesor 10 cm que se define como capa de recubrimiento aislante en las paredes de la galería. Se ha ensayado este modelo global con revestimiento caracterizando este material con propiedades térmicas diferentes, correspondientes a varios tipos de materiales con naturaleza de baja conductividad térmica, como el mortero proyectado o el hormigón aligerado.

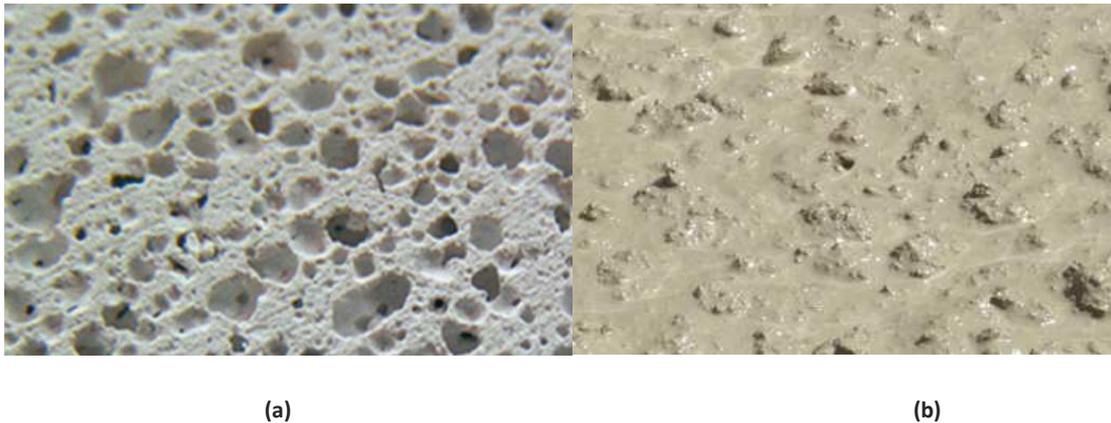


Figura 4.24 (a) hormigón celular (b) hormigón proyectado.

Este modelo con revestimiento se ha programado de manera idéntica al anterior modelo global con galería desnuda para poder comprar ambos y analizar en qué medida este revestimiento aislante supone una mejora que atenúe el flujo de calor que entra en la galería derivado de G.

Por lo tanto, ha de tenerse en cuenta que la hipótesis de simulación en Fluent, las condiciones de contorno y la estrategia de simulación son iguales al modelo global con galería desnuda.

4.2.2.1. Materiales

Los modelos globales con revestimiento aparecen de nuevo los materiales aire y carbón, con las mismas propiedades de simulación que en el resto de casos. Además, se definen las características térmicas del mortero aligerado y el mortero proyectado que actuaran como aislamiento, se muestran en la figura 4.14:

Tabla 4.4. Propiedades del revestimiento de mortero aligerado y proyectado.

Propiedades aligerado	hormigón
k (W/m·K)	0,07
ρ (kg/m ³)	400
C_p (J/kg·K)	2,285

Propiedades proyectado	mortero
k (W/m·K)	0,3799
ρ (kg/m ³)	1169,07
C_p (J/kg·K)	945,196

4.2.3. Simulaciones realizadas con los modelos globales

Las más significativas condiciones de contorno utilizadas en las simulaciones para los modelos globales son:

Tabla 4.5. Principales condiciones de contorno para las simulaciones de los modelos globales.

Descripción	$q(\text{W/m}^2)$	$T_{\text{ventilación}} (\text{K})$	$v_{\text{ventilación}} (\text{m/s})$	$v_{\text{galería}} (\text{m/s})$	Aislamiento	Tipo de aislamiento
Modelo global roca desnuda	0,013	293	12	1	NO	—
Modelo global_roca aligerado	0,013	293	12	1	SÍ	Hormigón aligerado
Modelo global_roca proyectado	0,013	293	12	1	SÍ	Hormigón proyectado

CAPÍTULO 5. Resultados de la simulación numérica

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas y para cada uno de los modelos. Se presentan en base a dos enfoques:

1. Descripción y análisis de los fenómenos de transferencia de calor que se dan en el interior de la galería y la roca encajante. Caracterización de la convección mixta.
2. Observación de la influencia o independencia de estos fenómenos en relación con el sistema de ventilación/refrigeración de la instalación y sus costes de producción.

Se describen los patrones de flujo hallados en cada simulación y su comportamiento mediante visualización de los resultados con herramienta de post-procesado numérico. Además, se van a analizar los valores del número de Nusselt y analizar otro parámetro adimensional muy influyente en los fenómenos de convección natural, el número de Rayleigh y su relación con el anterior.

5.1. Sub-modelo convectivo.

5.1.1. Metodología de post-procesado. Solución transitoria. Estudio de la transferencia de calor.

Como se concreta en el capítulo 1 de este trabajo, uno de los objetivos de las simulaciones consiste en alcanzar una temperatura media de fluido dentro de los valores de seguridad y salud establecidos por la normativa y los estudios de seguridad e higiene en minería subterránea (Xiaojie Yang, 2011), lo que sitúa esta temperatura entre 25-30 °C (298-303 K). Este objetivo se alcanza mediante la regulación del sistema de ventilación, analizando el comportamiento del fluido interior de la galería en base a la variación de la temperatura de pared. Por lo tanto, las simulaciones transitorias realizadas se consideran terminadas cuando temperatura y patrones de flujo del aire interior de la mina alcanzan un estado estacionario.

Para realizar el análisis se definen varias superficies perpendiculares al plano YZ, para los valores de $x= 33, 55$ y 85 metros; y perpendicular al plano XZ, se define la superficie $y=1,5$ m; estas superficies permiten visualizar la evolución del flujo en lugares críticos del dominio estudiado, tal como muestra la figura 5.1.

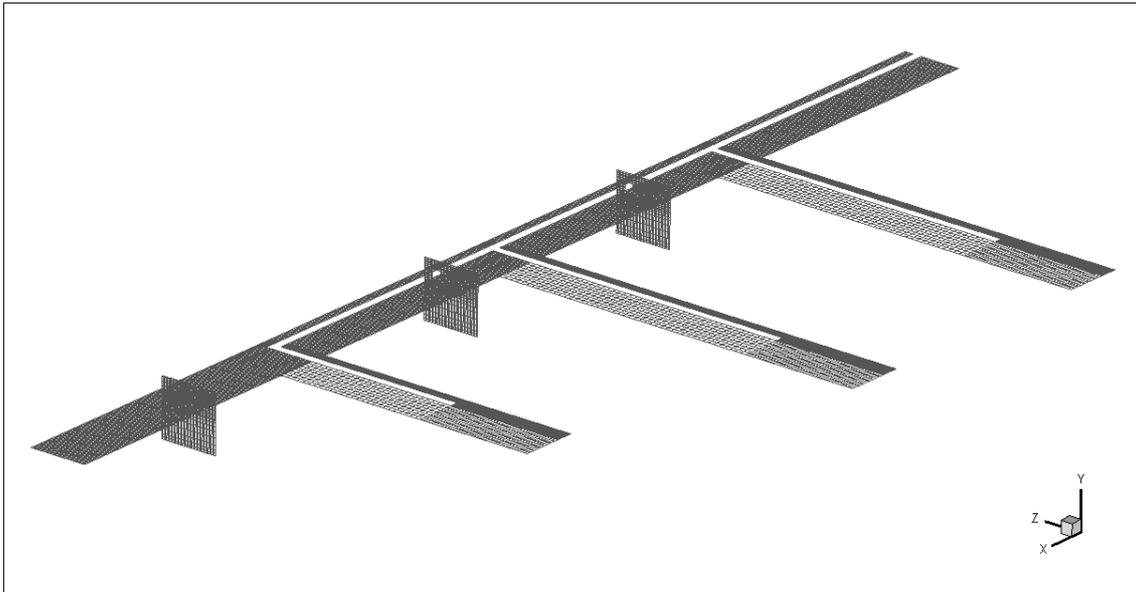


Figura 5.1. Definición superficies de análisis del fluido.

Es preciso decir que los fenómenos del estado estacionario y transitorio que se van a describir aparecen igualmente en los ensayos con temperaturas de pared 80°C (353 K), 70°C (343 K), 60°C (333 K), 50°C (323 K), y 40°C (313 K), aunque se detallan específicamente los resultados para temperatura de pared 80°C y se comparan con el resto.

Inicialmente se comienza la simulación en estado estacionario con las condiciones de contorno detalladas en el capítulo cuatro, apartado 1.2, fijando una temperatura de pared constante, 353 K. La transferencia de calor de sólido a fluido se produce mediante conducción, ya que el aire del interior de la galería en esos momentos está exento de movimiento, por lo que el fenómeno se basa en la ley de Fourier:

$$\dot{q}_{conv} = \dot{q}_{cond} = -k_{fluido} \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5.1)$$

Donde \dot{q}_{conv} y \dot{q}_{cond} , son calor de convección y conducción respectivamente; k_{fluido} , es la conductividad térmica del fluido; A , es el área de la sección en estudio o afectada y $\frac{dT}{dx}$ es la variación de temperatura respecto a la posición.

Se consigue una temperatura uniforme tanto en las paredes de la galería como en el aire de la misma. Partiendo de esta situación, se pone en funcionamiento el sistema de V-R y se calcula la solución en estado transitorio, activando el resto de condiciones de contorno de ventilación y entrada de la galería.

- **Flujo turbulento. Valor de número de Reynolds**

Como las propiedades del fluido de trabajo (aire seco) son conocidas y consideradas constantes, y también se conocen los valores de velocidad media en el interior de la galería, especificados por la normativa, es posible calcular el valor del número adimensional de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{1,225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 1,8 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 5 [m]}{1,74e^{-5} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]} \approx 6,34 \cdot 10^5 \quad (5.2)$$

Donde, ρ , es la densidad del aire, v , es la velocidad promedio que existirá en la galería al imponer 1 m/s a la entrada y 12 m/s en cada una de las toberas de salida del sistema de ventilación. D_h , es el diámetro hidráulico de la cavidad rectangular de la galería (sección constante) y μ , es la viscosidad dinámica del aire.

El valor de Reynolds es $> 10^5$, el flujo va a ser turbulento así que durante la simulación se monitorizan los valores promediados para el flujo de calor que entra por las paredes de la galería, la temperatura media de pared y la temperatura media del aire en las secciones transversales fluidas para $x= 33$ m, $x= 55$ m y $x=85$ m ; Esto es así porque el estudio de flujo interno turbulento es imprescindible hallar un valor promediado de las variables que definen el comportamiento del fluido, pudiendo así analizar el comportamiento del número de Nusselt, que caracteriza la razón de transferencia de calor y de los números adimensionales Rayleigh y Richardson que explican los patrones de flujo de calor que aparecen en la galería.

- **Etapas de resolución del campo fluido en estado transitorio**

La evolución del estado transitorio se describe en las figuras 5.2 y 5.3 El periodo de tiempo que el fluido en toda la galería tarda en alcanzar una temperatura de entre 36°C (309 K) es de aproximadamente 7 minutos (420 segundos).

- Durante este tiempo el aire a 20°C (293 K) que expelen las soplantes en cada cross-cut, se entremezcla con el aire caliente de toda la galería, el aire frío empuja al aire caliente hacia la salida de la galería.
- Los cross-cuts son las primeras zonas donde se alcanza una temperatura aproximada de 30°C (303 K); esto es importante ya que es en el fondo de saco donde los obreros desarrollan las labores de extracción cercanas a la superficie caliente de la pared, por lo tanto, el sistema de ventilación debe demostrar ser rápido en alcanzar la temperatura de operatividad de los trabajos, y además efectivo a la hora de empujar hacia el exterior y diluir el aire con alto contenido en polvo y gases anóxicos.
- Durante los primeros minutos la galería principal alcanza la temperatura a la que se encuentran los cross-cuts y se estabiliza.
- Asumiendo esto, una vez alcanzados patrones de flujo y temperatura, de estructura compleja pero que se pueden considerar no variables con el tiempo, se termina la simulación con 200 iteraciones más en estado estacionario, sin apreciación de variaciones significativas en el flujo.

Es preciso anotar que debido a las características geométricas de la galería subterránea el flujo se encuentra en continuo estado de desarrollo. Al no tratarse de un tubo recto, sino que es un conducto de sección cuadrada intersecado transversalmente por tres galerías que están aportando nuevo fluido, ocurre que la región de entrada térmica y de velocidad para $Re \gg 2500$, no se da a los 10D, como se indica en la teoría correspondiente (Frank P. Incropera, 1999).

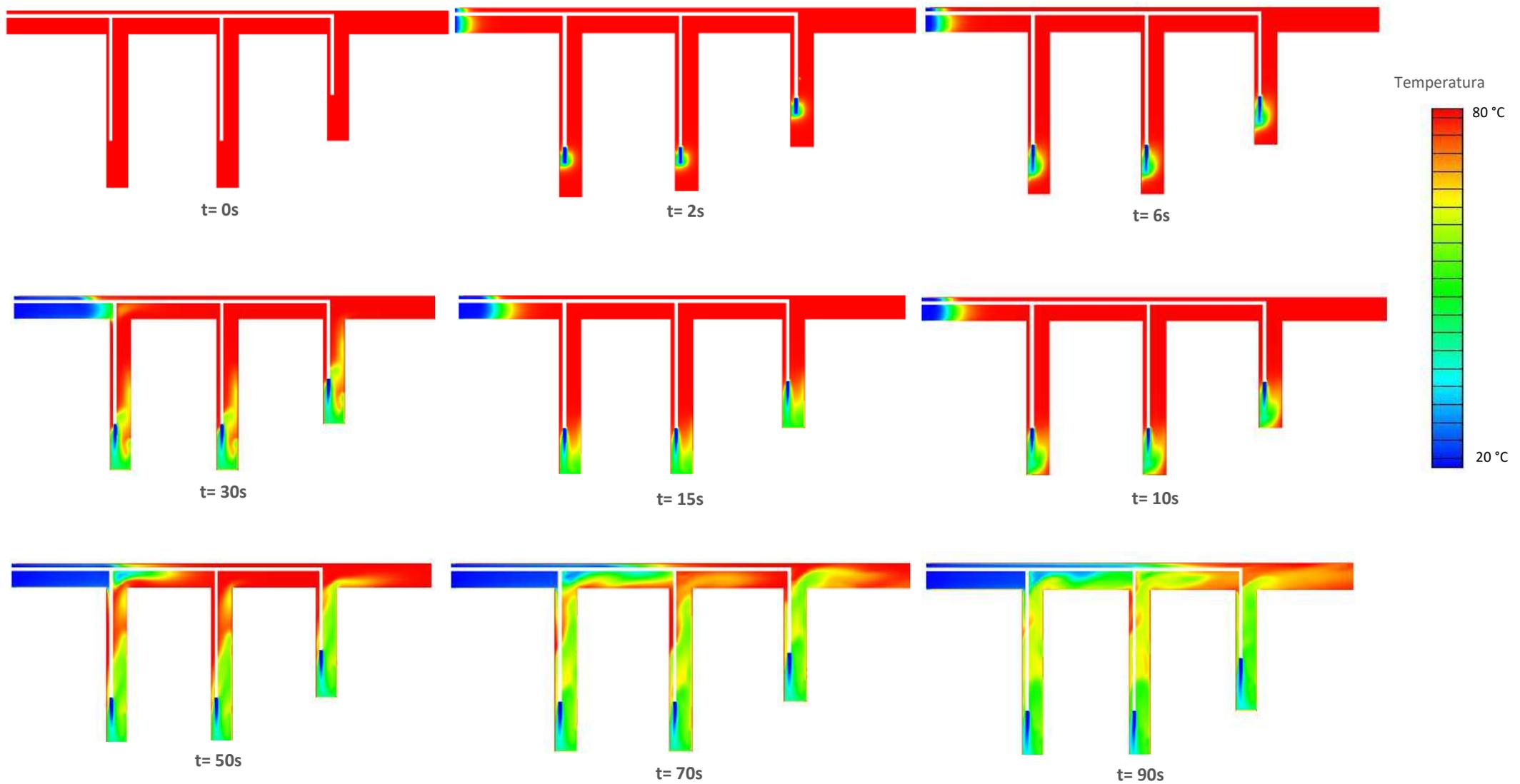


Figura 5.2 Resolución campo de temperatura en estado transitorio en la galería.

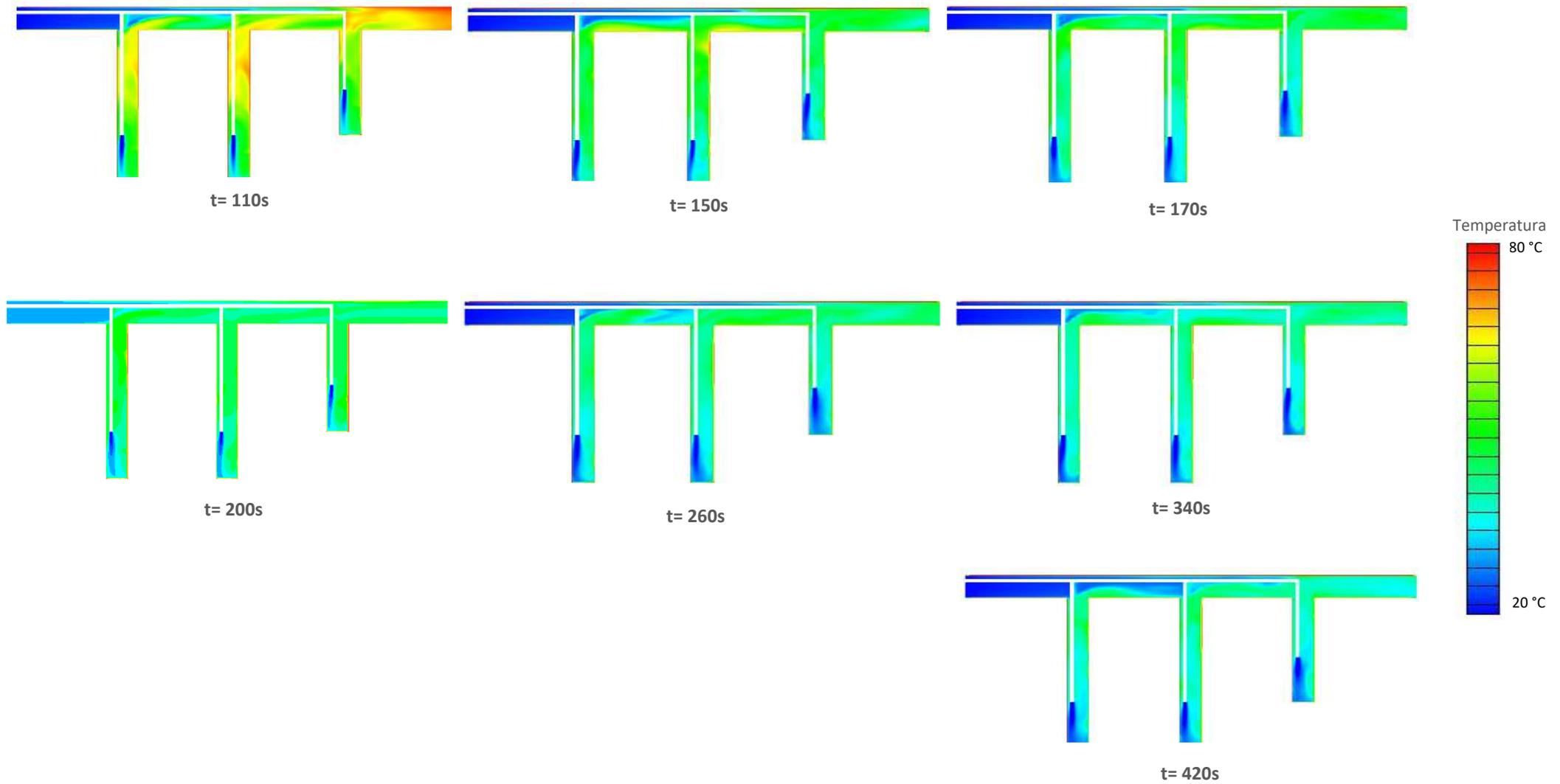


Figura 5.3 Resolución campo de temperatura en estado transitorio en la galería.

La evolución del campo fluido expuesta más arriba se representa en la figura 5.4. En la simulación con temperatura de pared 80°C (353 K) durante los primeros minutos tras encender el sistema V-R, la temperatura desciende rápidamente hasta 36°C (309 K), a partir de ahí continúa descendiendo progresivamente conforme desciende la temperatura de pared.

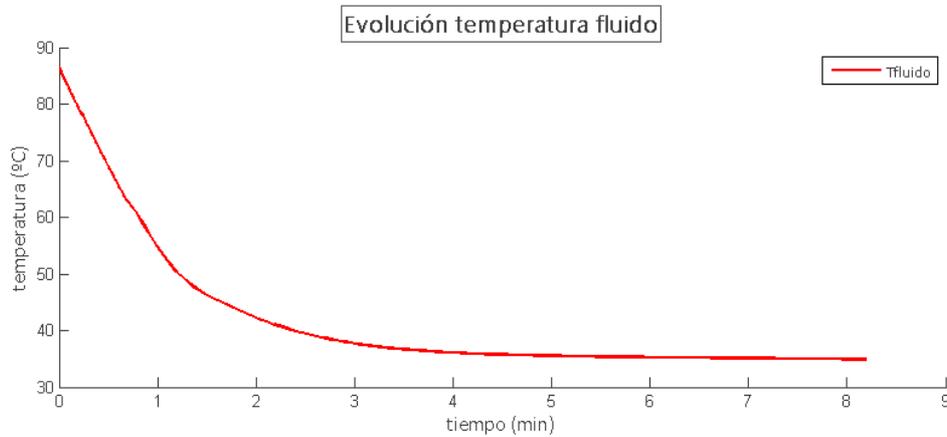


Figura 5.4 Evolución de la temperatura del aire en los primeros minutos de simulación. Temperatura de pared 80°C.

Como cabe esperar, tener una temperatura de pared más baja implicará alcanzar una temperatura media del fluido más cercano a la temperatura de operación, 27-30°C. La figura 5.5 recoge los resultados de las simulaciones para distintas temperaturas de pared de galería.

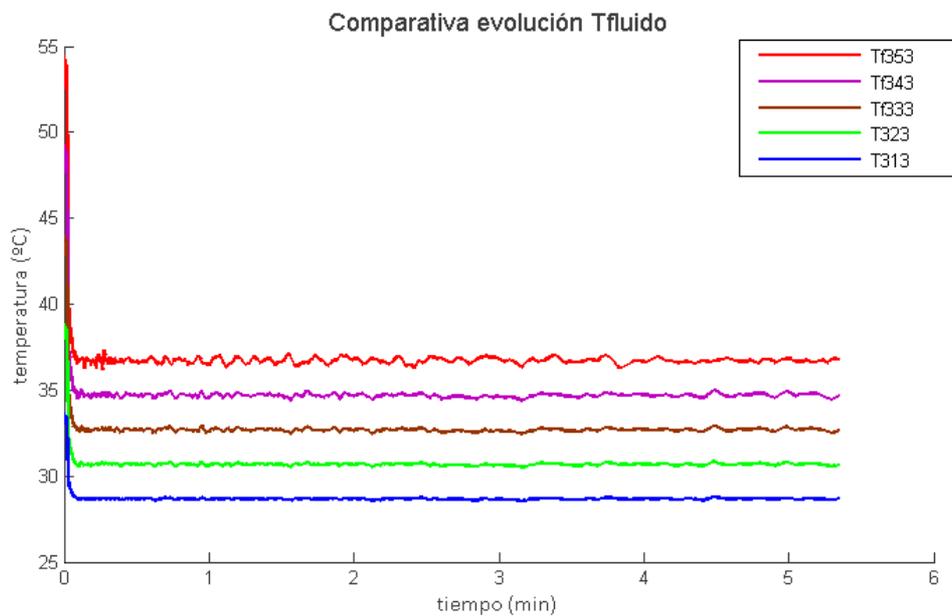


Figura 5.5 Gráfica comparativa evolución temperatura medio de fluido para distintas temperaturas de pared.

Estos resultados confirman las hipótesis sobre los efectos de la temperatura de pared en la temperatura media del fluido. En el caso de temperatura de pared 40°C (313 K), por ejemplo, la temperatura media instantánea que alcanza el fluido también es menor, en torno a 25-26 °C, (298 K) por lo que llegar a valores de temperatura de aire aptos para el desarrollo de trabajo requiere menos tiempo e implica un ahorro en la energía empleada en el sistema de V-R.

- **Influencia de la relación de aspecto H/L**

Aunque los sistemas de ventilación estén expulsando aire a 12 m/s, el hecho de que la relación de aspecto de la galería sea grande hace que las velocidades medias en su interior sean bajas. Este hecho, implica que pueda aparecer un gradiente de velocidades en la sección transversal y longitudinal de la galería, influenciado por la acción de la gravedad y la distinta densidad del aire, al que se conoce como efecto de flotación.

- **Resultados de las simulaciones**

Usando los resultados de las simulaciones realizadas, se expone de forma cualitativa la resolución del flujo de aire, analizando los valores de los parámetros adimensionales que caracterizan la transferencia de calor. Se resumen detalladamente en la tabla 5.1:

Tabla 5.1 Resultados simulaciones numéricas sub-modelo convectivo.

	Ensayos	Flujo de calor (W/m ²)	$T_{pared} - T_m$ (K)	V_{prom} ($\frac{m}{s}$)	Pr_{∞}	h_{∞} ($\frac{W}{m^2K}$)	Nu	G_r	Re	R_i	R_a
<i>Roca desnuda</i> $T^{\circ} V-R = 293 K$	V293_353_d1_v12	290,55	43,95	1,8	0,8498	6,61	1370	$9,80 \cdot 10^{11}$	$6,34 \cdot 10^5$	2,44	$6,05 \cdot 10^{11}$
	V293_343_d1_v12	242,44	34,97	1,8	0,8498	6,93	1430	$7,80 \cdot 10^{11}$	$6,34 \cdot 10^5$	1,94	$4,81 \cdot 10^{11}$
	V293_333_d1_v12	192,79	26,94	1,8	0,8498	7,15	1480	$6,01 \cdot 10^{11}$	$6,34 \cdot 10^5$	1,50	$3,71 \cdot 10^{11}$
	V293_323_d1_v12	140,92	19,07	1,8	0,8498	7,38	1530	$4,25 \cdot 10^{11}$	$6,34 \cdot 10^5$	1,06	$2,63 \cdot 10^{11}$
	V293_313_d1_v12	86,07	11,12	1,8	0,8498	7,67	1590	$2,50 \cdot 10^{11}$	$6,34 \cdot 10^5$	0,62	$1,54 \cdot 10^{11}$
<i>Roca desnuda</i> $T^{\circ} V-R = 288 K$	V288_353_d1_v12	339,01	47,73	1,8	0,8498	7,10	1467	$1,06 \cdot 10^{12}$	$6,34 \cdot 10^5$	2,65	$6,57 \cdot 10^{11}$
	V288_343_d1_v12	282,60	39,98	1,8	0,8498	7,06	1460	$8,92 \cdot 10^{11}$	$6,34 \cdot 10^5$	2,22	$5,50 \cdot 10^{11}$
	V288_333_d1_v12	226,93	32,17	1,8	0,8498	7,05	1457	$7,18 \cdot 10^{11}$	$6,34 \cdot 10^5$	1,79	$4,43 \cdot 10^{11}$
	V288_323_d1_v12	172,26	24,36	1,8	0,8498	7,07	1460	$5,43 \cdot 10^{11}$	$6,34 \cdot 10^5$	1,35	$3,35 \cdot 10^{11}$
	V288_313_d1_v12	117,29	16,56	1,8	0,8498	7,08	1463	$3,69 \cdot 10^{11}$	$6,34 \cdot 10^5$	0,92	$2,28 \cdot 10^{11}$

5.2.2. Interpretación de los parámetros adimensionales de la transferencia de calor

Con estos datos se puede hacer un análisis e interpretación de los números adimensionales de la transferencia de calor para caracterizar los fenómenos que aparecen en el modelo.

Número adimensional de Prandtl:

El valor de Prandtl es la mejor forma para describir el espesor relativo de la capa límite térmica y la capa límite de velocidad:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (5.3)$$

Donde μ (kg/m·s), es la viscosidad dinámica del fluido; C_p (J/kg·K), es el calor específico del aire; k (W/m·K), la conductividad térmica del aire y ν (m²/s), viscosidad cinemática del aire; α (°C⁻¹), es la difusividad térmica.

En todas las simulaciones realizadas el valor de Prandtl es inferior a la unidad, $Pr \approx 0,8498$, por lo que se asume que el espesor de la capa límite térmica es mayor que el de la capa límite de velocidad, esta última está más desarrollada que la capa térmica, por lo que ambas se desarrollan con independencia.

Coefficiente global de transferencia de calor por convección

El valor del coeficiente de transferencia por convección, h (W/m²K), en el interior de la galería se obtiene de la relación:

$$h = \frac{q''}{(T_{pared} - T_m)} \quad (5.4)$$

Donde q'' (W/m²), es el flujo de calor que penetra en la galería; T_{pared} (K), es la temperatura superficial de la pared de la galería en contacto con el aire; T_m (K), temperatura media del fluido.

Los resultados para el caso de temperatura de fluido de ventilación 20°C (293 K), presentan valores de h entre 6,61 y 7,67 W/m²K; en las simulaciones con temperatura de ventilación 15°C (288 K) los valores para el coeficiente global de transferencia varían entre 7,08 y 7,10 W/m²K.

Que la diferencia porcentual del parámetro, h , sea tan pequeña ($\approx 16\%$) implica que su valor es independiente de la temperatura superficial de las paredes de la galería, por lo que sería asumible una independencia entre la ecuación del flujo y la de la energía al resolver el modelo acoplado, es decir, podría resolverse un modelo global en el que imponer un coeficiente de convección y una temperatura como condiciones de contorno para el fluido interior de la galería siendo válida e independiente de la temperatura que alcance la pared de la galería.

Número de Nusselt

El número de Nusselt, Nu , es representativo del valor de la transferencia de calor y sirve para adimensionalizar el valor de, h , mediante la ecuación:

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (5.5)$$

Los valores de Nusselt obtenidos en todas las simulaciones varían poco, entre 1350 y 1470, debido a que el coeficiente de convección apenas se ve alterado en valor ante las distintas

temperaturas de pared. Que los valores de Nusselt sean tan altos implica que la transferencia de calor por convección es predominante sobre la transferencia por conducción.

Llegar a esta conclusión, precisa de un estudio detallado del tipo de convección que se produce en el interior de la galería. A primera vista se asume una convección forzada ya que están en funcionamiento las soplantes en cada uno de los cross-cuts.

Número de Grashof

El cálculo de Grashof, Gr, consiste en averiguar la relación existente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas del fluido, es decir, cuantificar las fuerzas que se oponen al movimiento, da una idea de la medida en que existe turbulencia en la convección natural (análogo a Reynolds en convección forzada):

$$Gr = \frac{g\beta(T_{pared}-T_m)L^3}{\nu^2} \approx 10^{11} \quad (5.6)$$

Donde, g (m/s^2), es la aceleración de la gravedad; β ($^{\circ}C^{-1}$), coeficiente de expansión térmica del fluido; T_{pared} (K), es la temperatura superficial de la pared de la galería en contacto con el aire; T_m (K), temperatura media del fluido; L (m), es la longitud característica del conducto en que se evalúa esta propiedad; ν (m^2/s), viscosidad cinemática.

Hasta realizar las simulaciones no se puede asegurar la existencia de patrones de convección mixta pero una relación de aspecto $H/L=1$ unida a velocidades medias bajas, hace suponer la aparición de este fenómeno.

Número de Richardson

Para comprobar qué tipo de convección es predominante en el aire de la galería es preciso calcular la relación entre las fuerzas cinéticas pertenecientes a la convección natural y a la convección forzada.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \approx 1 - 2,44 \quad (5.7)$$

Existen tres valores que definen el tipo de convección en el flujo interno:

$Ri \ll 1$ Convección Forzada (efectos de flotación despreciables)

$Ri \approx 1$ Convección Mixta (Celdas de Bénard)

$Ri \gg 1$ Convección Natural (efectos de flotación significativos)

En las etapas iniciales de la simulación, los efectos de flotación son más significativos pues existe un salto de temperatura mayor entre la temperatura de pared y la temperatura del aire de V-R, esta diferencia da lugar a la aparición de las recirculaciones convectivas propias de la convección mixta, alcanzando valores de Richardson entre 1-2,44.

5.2.3. Convección Mixta

En la galería el impulso del flujo de ventilación añade fuerzas de empuje al aire que estaba quieto en su interior, dando lugar a una convección forzada. Pero la relación de aspecto de la galería implica que las velocidades medias del fluido no sean muy elevadas por lo que se dan gradientes de temperatura vertical; la fuerza de empuje de las capas de aire más frío sobre las de aire más caliente ocasionan recirculaciones convectivas que se superponen de forma transversal y longitudinal sobre la vena fluida principal. Este fenómeno combinado se llama convección mixta.

Es preciso anotar que, en la convección mixta, la fuerza de empuje está directamente influenciada por el gradiente térmico que se da en el interior del fluido, pero intervienen mecanismos físicos disipadores de energía:

- 1) Arrastre viscoso: que se opone al movimiento y tiende a frenar el ascenso de una parcela de fluido caliente.
- 2) 2) Difusividad térmica: que tiende a anular la diferencia de temperatura y por lo tanto el empuje.

Dependiendo de la relación existente entre estos tres mecanismos: empuje, arrastre y difusividad el fluido permanecerá en equilibrio o inestable.

Para conocer esa relación se calcula el valor del número adimensional de Rayleigh:

$$Ra = \frac{\rho\beta(T_{pared}-T_m)L^3}{\nu\alpha} Pr \approx 10^{11} \quad (5.8)$$

Donde, ρ (kg/m^3), es la densidad del fluido; β ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), coeficiente de expansión térmica del fluido;

Los altos valores de Rayleigh obtenidos ($Ra > 10^{11}$), indican que se ha superado el valor crítico de este parámetro ($Ra > 1708$) por lo cual existe un desequilibrio entre las fuerzas descritas en el seno fluido ocasionando gradientes de velocidad vertical $V_y \approx 0,42$ m/s, dando lugar a recirculaciones convectivas para equilibrarse originando las denominadas celdas de Bénard. Estas estructuras son recirculaciones del flujo paralelas entre sí y con dirección de giro entre ellas opuesta.

En las zonas donde mejor se aprecian son las secciones transversales de la galería principal que se encuentran a poca distancia de la intersección con los cross-cuts, por ejemplo, en $x=30$ metros, tal como se aprecia en la figura 5.6.

Cuando la pared de la galería se encuentra a 86°C (353 K) existe una mayor diferencia de temperaturas entre el aire que hay en la galería y el aire de ventilación, produciéndose corrientes de convección con velocidades a lo largo del plano YZ que varían hasta 0,5 m/s, debido a este gradiente de velocidades aparecen las estructuras de Bénard; ocurre de igual forma cuando $T_{pared} = 40^{\circ}\text{C}$, aparecen flujos convectivos que al producirse a más baja temperatura alcanzan velocidades entre -0,1 y 0,2 m/s que atenúan el fenómeno de la convección mixta

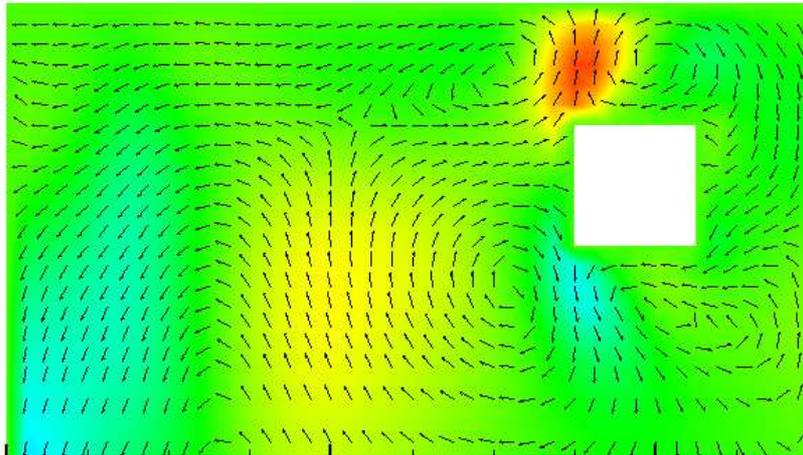


Figura 5.6 Patrones de convección mixta. Celdas de Bénard.

Estas secciones se ven afectadas por los fenómenos de flotación que aparecen bajo la influencia de la gravedad, y por los flujos de aire procedentes de los cross-cuts. Comparando la sección obtenida en esta simulación y la misma sección procedente del ensayo sin activación de la gravedad, se observa como en el segundo caso no se capta la aparición de las celdas de Bénard propias de los efectos de flotación, sólo la vorticidad inherente a la convección forzada dentro del conducto, figura 5.7:

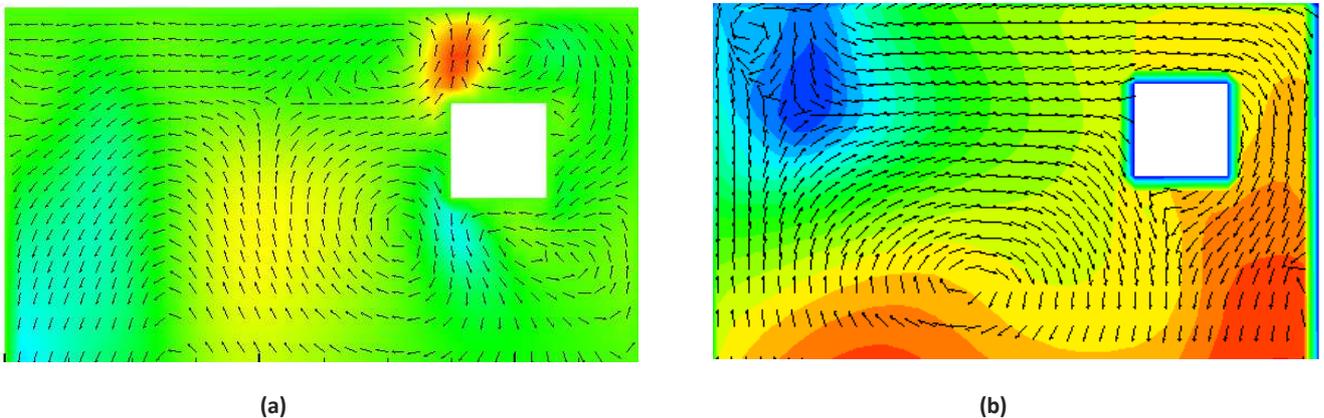


Figura 5.7 (a) Patrones de flujo simulaciones con influencia de la gravedad. (b) Patrones de flujo sin influencia de la gravedad.

En la figura 5.8 se aprecia como para el cross-cut de la galería con temperatura de pared a 86°C la velocidad vertical alcanza un valor más alto tanto en dirección $+Y$ como $-Y$ respecto a la galería con temperatura de pared 40°C . Sin embargo, en el caso con temperatura de pared 40° los valores promedio de las velocidades en ambos sentidos son menores, entre $0,2\text{ m/s}$ y $-0,2\text{ m/s}$.

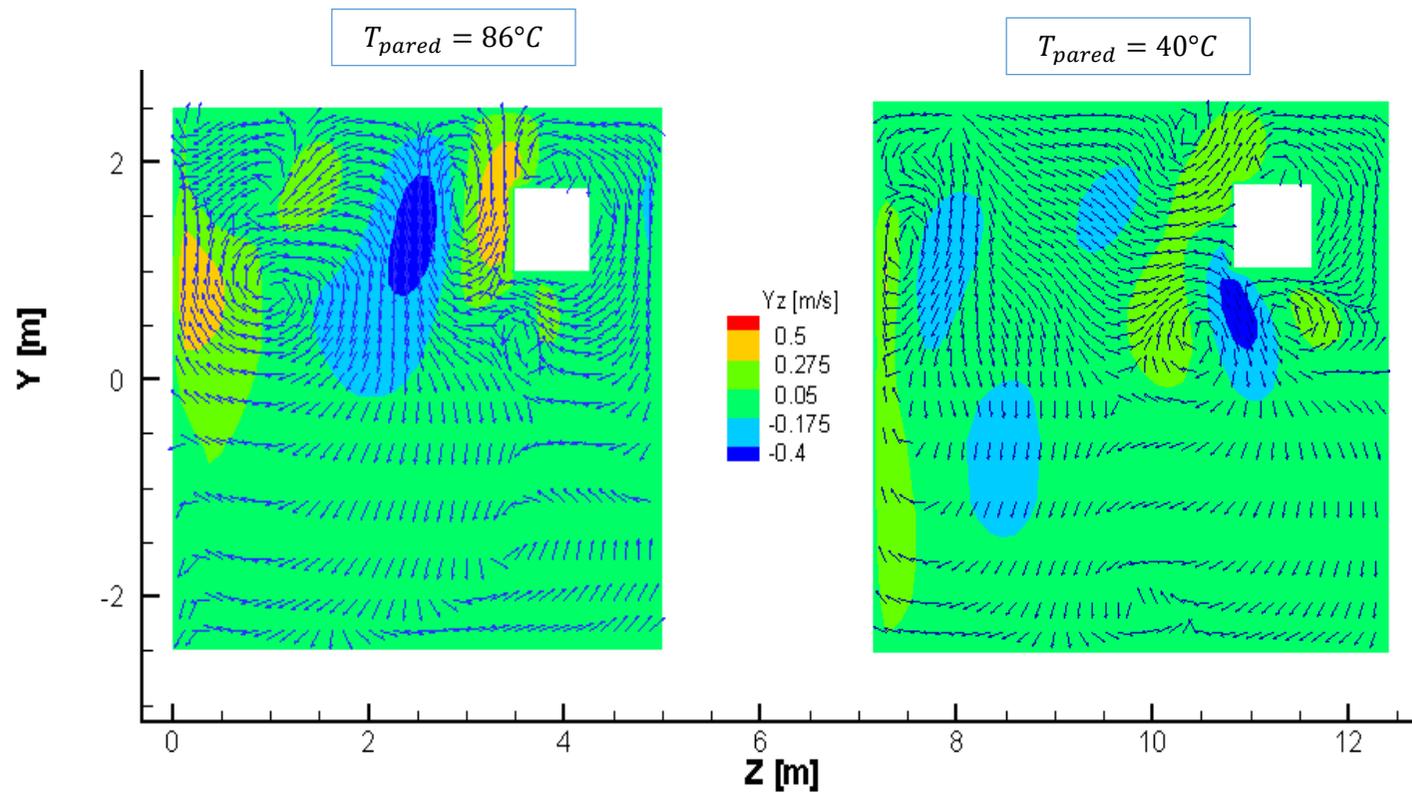


Figura 5.8 Patrones de convección mixta. Gradiente de V_y en sección transversal cross-cut1. Temperatura de ventilación 25°C .

Para las temperaturas de pared comparadas aparecen gradientes de velocidad vertical y las estructuras de Bénard, propias de la convección mixta.

Con el transcurso del tiempo el flujo de calor que entra hacia la galería y el salto de temperaturas entre pared y fluido disminuyen y se estabilizan influyendo directamente sobre el coeficiente de convección tal como se aprecia en la figura 5.9:

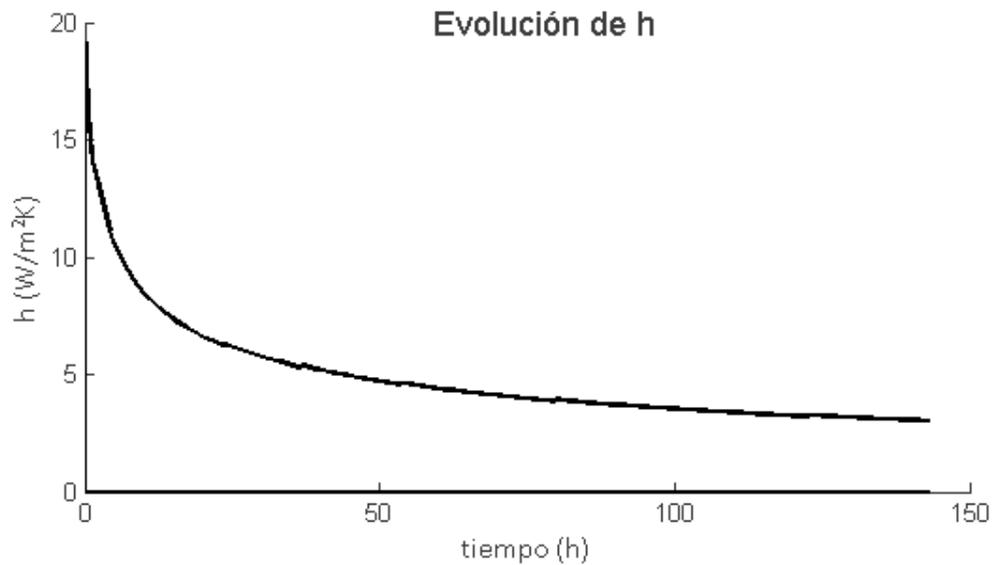


Figura 5.9 Evolución de coeficiente de convección

Se puede afirmar que los efectos de flotación se atenuarán en la misma proporción que h . En la figura 5.10 se aprecia que inicialmente las fuerzas de flotación son muy elevadas porque el salto de temperaturas entre pared y fluido es mayor; con el transcurso del tiempo este salto de temperaturas disminuye y los efectos de flotación disminuyen:

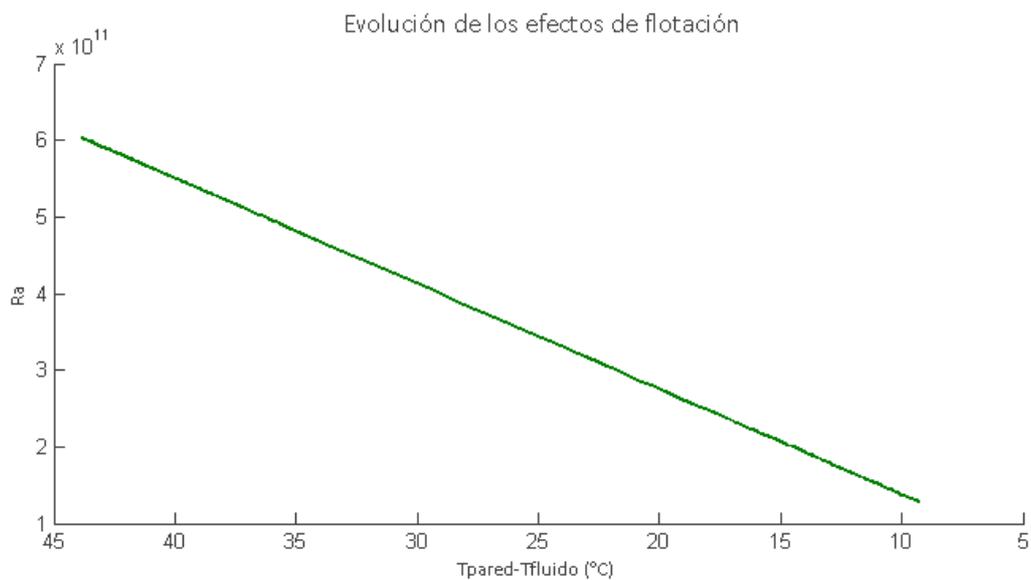


Figura 5.10 Evolución de Ra, indicador de los efectos de flotación.

5.1.4. Conclusiones del sub-modelo convectivo

El análisis cualitativo de los parámetros adimensionales de la transferencia de calor en el sub-modelo convectivo respaldan las siguientes afirmaciones:

- 1) El fluido interno de la galería alcanza el estado estacionario después de 7 minutos y la temperatura medio del fluido desciende abruptamente durante este periodo.
- 2) El valor del coeficiente global de transferencia de calor, h , es independiente de la temperatura de pared, para el intervalo de temperaturas estudiadas, luego no es necesario resolver de forma acoplada las ecuaciones de cantidad de movimiento y energía.
- 3) El fluido está gobernado por la convección forzada, aunque debido a las dimensiones de la galería las velocidades en el interior del conducto son bajas, si se añade a esto que la diferencia de temperaturas entre la pared de la galería y el aire de refrigeración es grande durante las primeras horas, se produce la aparición de convección mixta, caracterizada por las estructuras de Bénard en los planos transversal y longitudinal de la galería; hecho que resulta beneficioso para una dilución más rápida y efectiva de calor y gases anóxicos en el aire.
- 4) Una temperatura de pared más baja implica una temperatura media de fluido también menor y más cercana a la temperatura de operación que se busca obtener; ésto favorece un ahorro de consumo del sistema de V-R que debe satisfacer las demandas productivas de la explotación.

5.3. Modelo global

Una vez realizadas las simulaciones del sub-modelo convectivo se procede con las simulaciones del modelo global que abarca galería más roca. Todos los ensayos se dividen en dos etapas:

- Una etapa inicial, en la que en el volumen sólido se alcanza una distribución vertical de la temperatura debido a la influencia del gradiente geotérmico, y en la que también se resuelve el flujo interior de la galería en estado transitorio para validar el sub-modelo convectivo.
- Una etapa final, en la que se continúa simulando durante cuatro años las mismas condiciones de operación para analizar el comportamiento de las cargas térmicas que penetran en la galería cuyas paredes van a enfriarse paulatinamente por los efectos de la refrigeración constante. En esta etapa también se obtiene el volumen de roca envolvente de la galería que se encuentra afectado por el enfriamiento.

Como se indicó en el capítulo cuatro, se utilizan dos modelos numéricos globales para tres simulaciones distintas:

- pared de roca desnuda:

Las simulaciones con el primer modelo global tienen como objeto validar el análisis de la transferencia de calor que se ha hecho con el sub-modelo convectivo y estudiar el comportamiento de la temperatura de pared de la roca encajante cercana a la galería sometida

a enfriamiento por los efectos del sistema de V-R; también cuantifica y analiza las cargas térmicas que afectan la galería.

- pared de roca recubierta de hormigón aligerado:

Las simulaciones del modelo global con recubrimiento de hormigón aligerado tienen como finalidad evaluar la temperatura de pared de galería y las cargas térmicas que penetran en ella si posee aislamiento de bajo espesor, pero muy baja conductividad térmica, y compararlas con las de una galería con paredes de roca desnuda.

- pared de roca recubierta con mortero proyectado:

Las simulaciones del modelo global con recubrimiento de mortero proyectado tienen como finalidad evaluar la temperatura de pared de galería y las cargas térmicas que penetran en ella si posee aislamiento de bajo espesor y conductividad térmica media, y compararlas con las de una galería con paredes desnudas de roca y galería con recubrimiento de hormigón aligerado.

Las simulaciones realizadas se encuentran resumidas en la tabla 5.1:

Tabla 5.1 Simulaciones ensayadas para los modelos numéricos globales.

Descripción	q'' (W/m ²)	$T_{ventilación}$ (K)	$v_{ventilación}$ (m/s)	$v_{galería}$ (m/s)	Revestimiento	Tipo de revestimiento
Modelo global roca desnuda	0,013	293	12	1	NO	—
Modelo global_roca aligerado	0,013	293	12	1	SÍ	Hormigón aligerado
Modelo global_roca proyectado	0,013	293	12	1	SÍ	Hormigón proyectado

5.2.1. Simulaciones modelo global roca desnuda

5.2.1.1. Etapa inicial

En estas simulaciones el estudio de la transferencia de calor se lleva a cabo inicialmente en estado estacionario, imponiendo en la base del dominio roca un flujo de calor constante, $q=0,013$ W/m² que, resolviendo sólo la ecuación de la energía, hace que la pared de roca en la galería alcance entre 80-86° C, y obtiene una distribución vertical de la temperatura como muestra la figura 5.11 (en esta etapa no está encendido en sistema V-R):

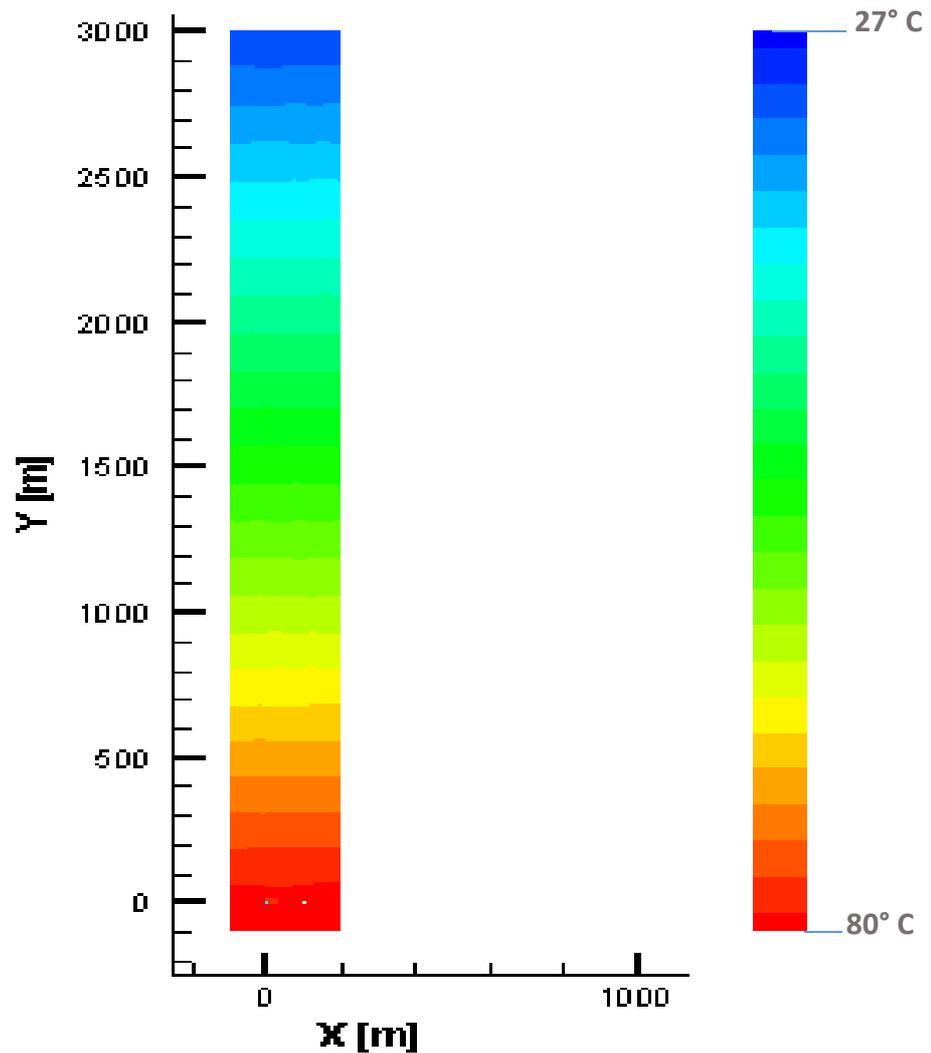


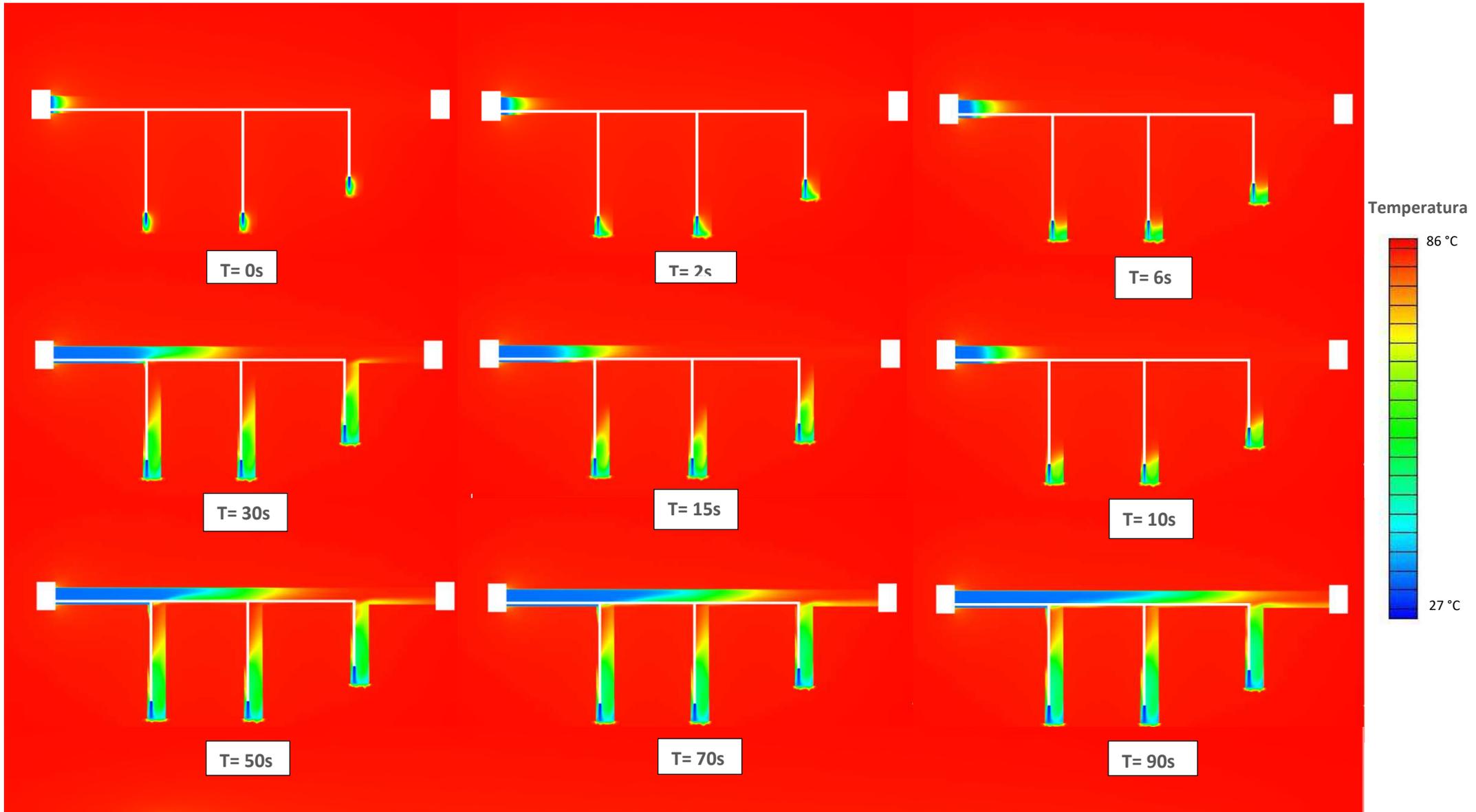
Figura 5.11 Distribución vertical de la temperatura en el volumen completo. Estado estacionario.

La cota $y=0$ metros, corresponde al emplazamiento de la galería en estudio. Toda esta zona permanece a una temperatura aproximada de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Conforme se asciende en dirección $+Y$ la temperatura de la roca va disminuyendo hasta llegar a la temperatura que existe en la superficie. Este fenómeno es el gradiente geotérmico que habitualmente se asume como un incremento de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura cada 100 metros de aumento de profundidad.

Partiendo de esta situación, se pone en marcha el sistema de V-R y se resuelven en estado transitorio las ecuaciones de la masa, momento y energía en la galería y roca durante cuatro años. La evolución de la temperatura en el campo fluido durante los primeros minutos de simulación, puede apreciarse cualitativamente en las figuras 5.13 y 5.14:

- En los primeros instantes el aire en el interior de la galería está a la misma temperatura que la roca que lo rodea, constituyendo un volumen isoterma.

- Una vez encendido el sistema V-R el aire frío comienza a empujar hacia el exterior el aire caliente de los fondos de saco y entremezclarse con él reduciendo su temperatura media.
- Tras unos minutos, la galería alcanza una temperatura media de 33-36°C (306-309 K) que irá disminuyendo conforme disminuye la temperatura de pared.
- La temperatura de la pared de la galería comienza a disminuir por los efectos del aire de V-R.
- La evolución de la temperatura media del fluido en el interior de la galería concuerda con los resultados obtenidos con el sub-modelo convectivo.



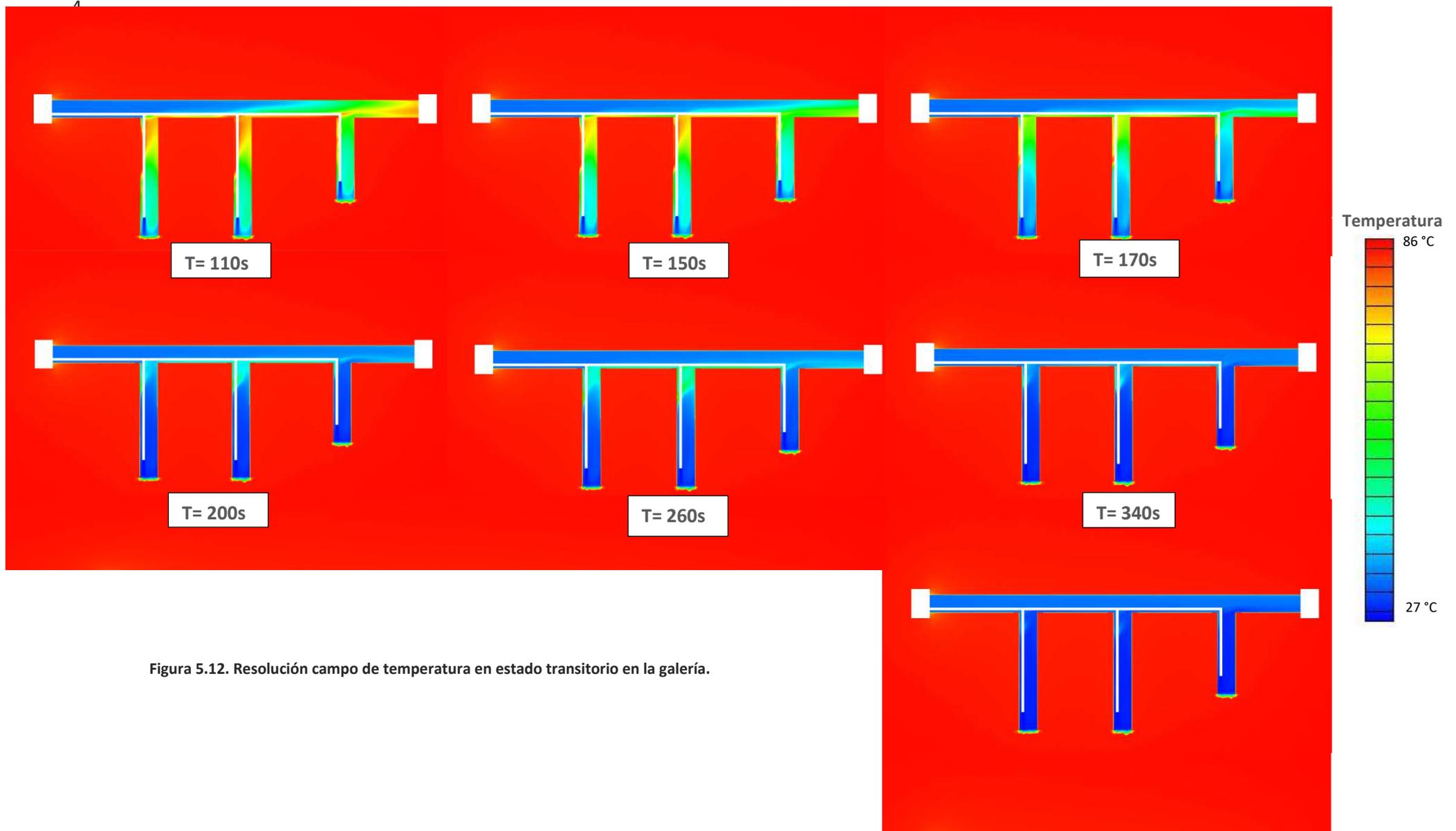


Figura 5.12. Resolución campo de temperatura en estado transitorio en la galería.

La gráfica de la figura 5.13 representa la evolución de la temperatura media del fluido, arrojando una mejor idea de la resolución casi inmediata del flujo en el interior de la galería y su estrecha relación con la temperatura de la pared de la galería, que va disminuyendo progresivamente y enfriando un espesor de roca encajante considerable.

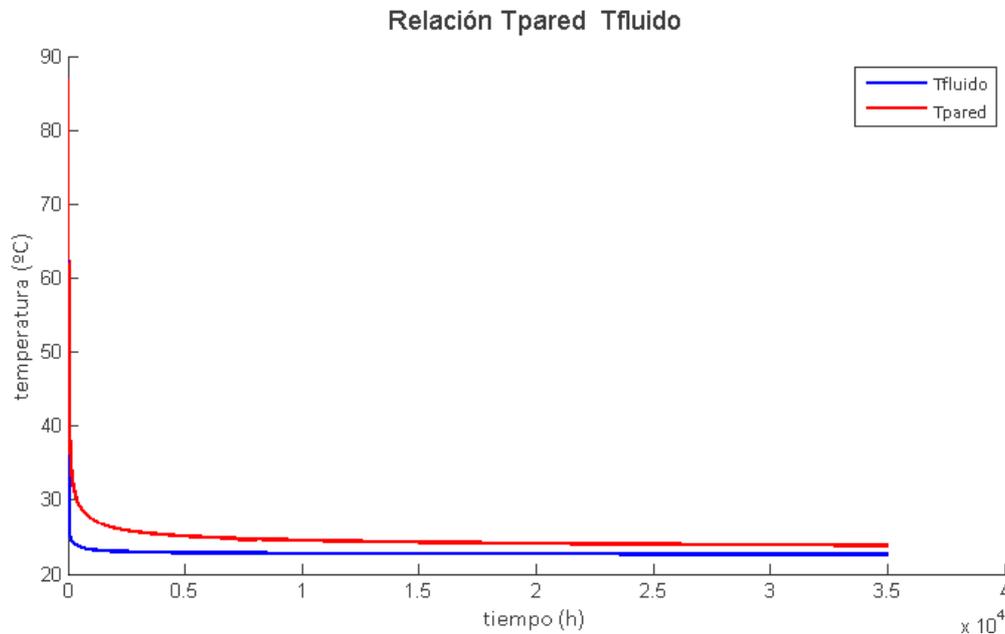


Figura 5.13 Evolución de la temperatura media del fluido y la temperatura de pared.

La temperatura del fluido desciende inicialmente de forma abrupta mientras que la de la pared de la galería también la sigue, pero de forma más moderada para estabilizarse ambas en una diferencia de aproximadamente 3°C después de varios meses de simulación.

Una vez validados los resultados de este modelo con el sub-modelo convectivo, se centra la atención en los cuatro años posteriores de simulación del modelo global.

5.2.1.2. Etapa final

El gradiente geotérmico es un flujo constante de calor que afecta la galería aportando a su interior cargas térmicas de refrigeración. El largo periodo de estudio abordado en esta etapa permite observar la evolución de estas cargas que afectan las zonas de trabajo y analizar el comportamiento del volumen de roca envolvente de la galería que está sometido a un enfriamiento paulatino derivado de la refrigeración y cuyo efecto podría dar lugar a fenómenos mecánicos de distensión produciendo desprendimientos.

El primer indicio del periodo de enfriamiento de la roca es la disminución de la temperatura de la pared de la galería. La figura 5.16 representa la evolución de la temperatura de una superficie trazada en el plano 'Y' que abarca desde $y=10$ metros hasta $y=-10$ metros pasando por la pared de la galería. Un análisis detallado revela que:

- Las partes superior e inferior de la gráfica, representan los siete metros y medio de roca que se encuentran por encima y por debajo de la galería. Conforme avanza los años estas capas de roca se enfrían, pero apenas $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ desde su temperatura inicial $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- La zona central corresponde a la pared de la galería. Se puede apreciar como durante el primer año la temperatura de la pared que inicialmente se encontraba a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, desciende hasta los $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Entre el primer y segundo año la temperatura de pared vuelve a descender de forma significativa desde $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Se puede observar como durante los años posteriores la temperatura de pared sólo descenderá entre $1\text{-}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ más. Este efecto se debe a que la temperatura de pared se mantiene muy próxima a la temperatura del aire en el interior de la galería, $\approx 25\text{-}27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($298\text{-}300\text{ K}$).

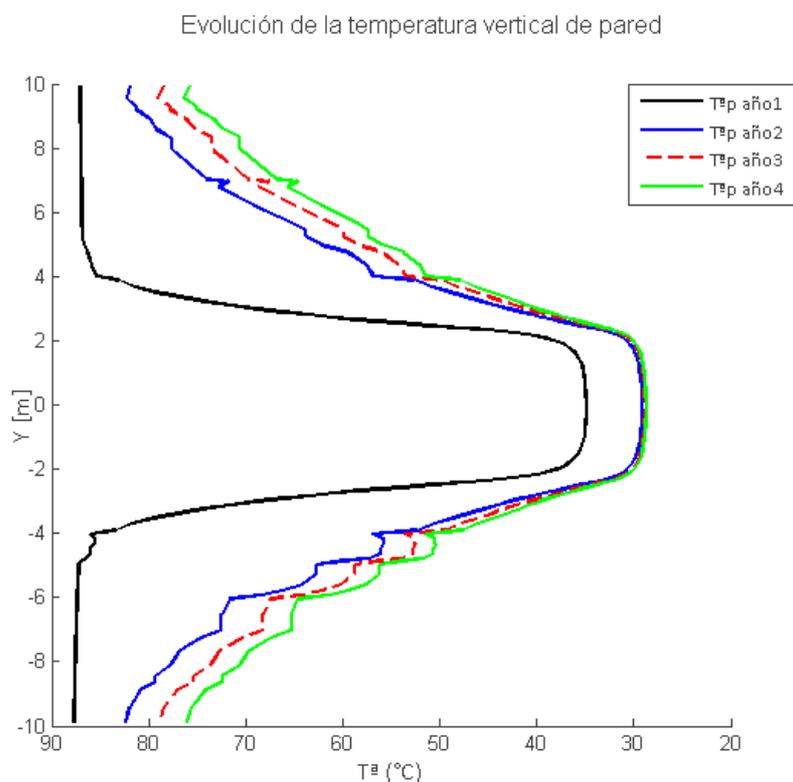


Figura 5.14 Evolución de temperatura de pared durante 4 primeros años de producción.

La figura 5.14 representa las cargas térmicas de refrigeración con respecto a la variación de la temperatura de pared de la galería:

- En los primeros instantes el valor del calor por unidad de tiempo es de $24,83\text{ kW}$, y cuando se pone en funcionamiento el sistema V-R, su valor asciende hasta $823,75\text{ kW}$, lo que supone unas altas solicitaciones del sistema de V-R hasta que se consigue alcanzar la temperatura del aire óptima para realizar los trabajos.

- Este calor disminuye con el transcurso del tiempo, conforme la superficie de la pared y el dominio de roca envolvente se van enfriando, hasta que se estabilizan en un valor de 65,24 kW.
- El enfriamiento del volumen de roca envolvente de la galería es muy importante ya que implica un fenómeno paradójico en el volumen sólido; los efectos de la ventilación hacen que la roca se enfríe hasta unos límites a partir de los cuales no es capaz de enfriarse más, aunque tampoco de volver calentarse, constituyendo una zona de equilibrio dinámico-térmico en la que un flujo de calor (inferior al valor inicial) sigue penetrando en la galería y un volumen específico de la roca permanece a menor temperatura de la inicial (80°C).

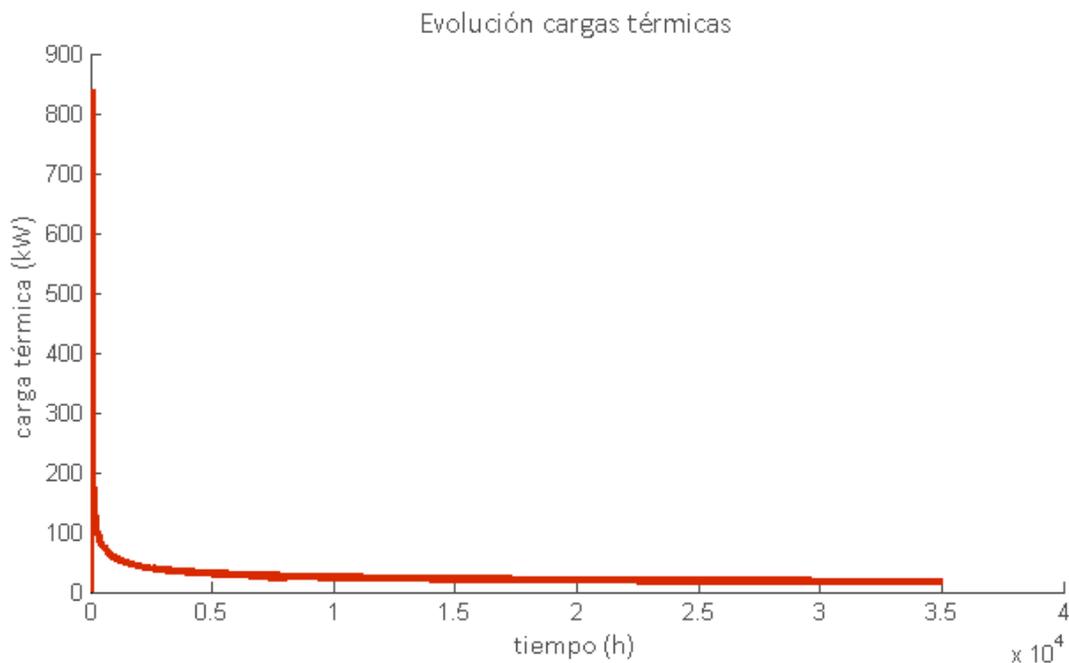
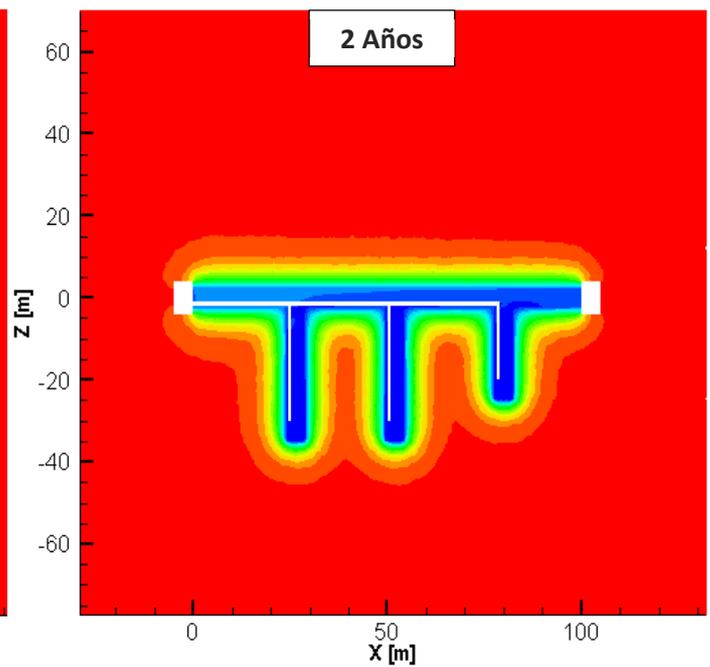
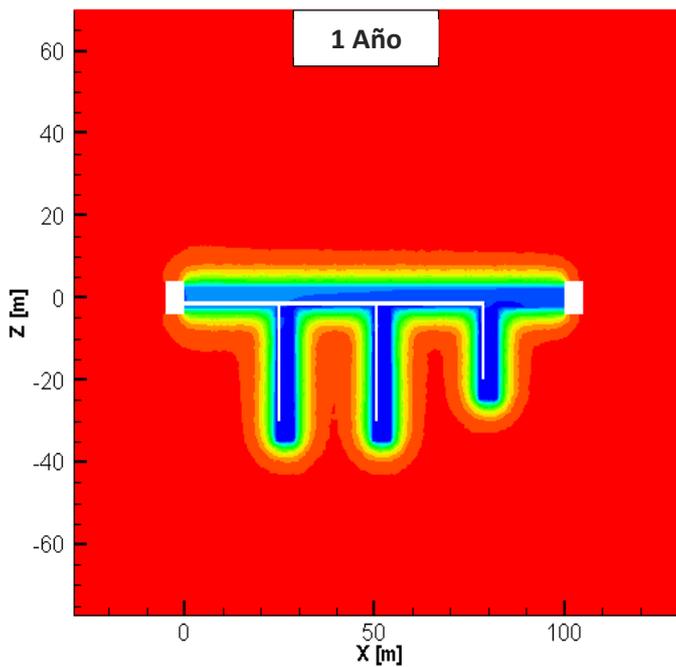
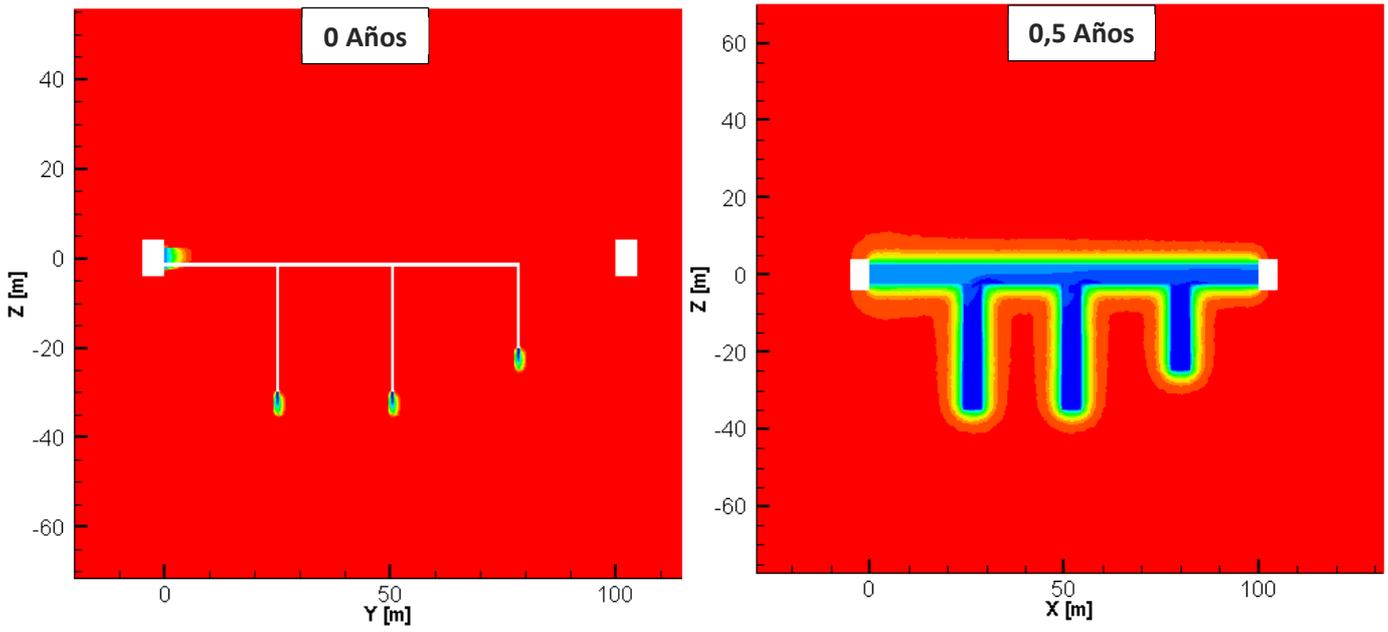


Figura 5.15 Evolución cargas térmicas que penetran en la galería. Simulación durante 4 años.

Este fenómeno se recoge en la figura 5.18 donde se muestra la evolución del enfriamiento del dominio roca durante los 4 años simulados:



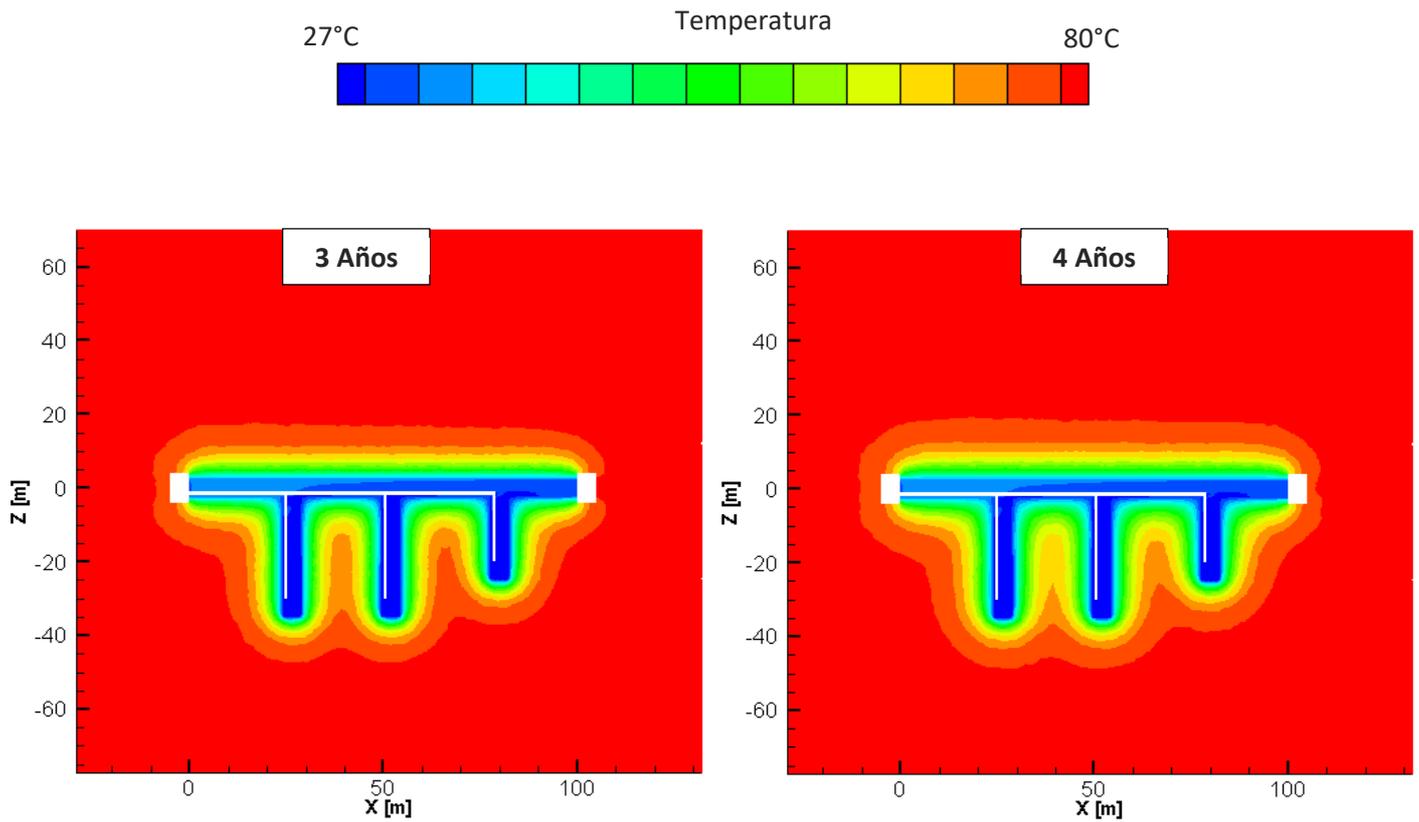
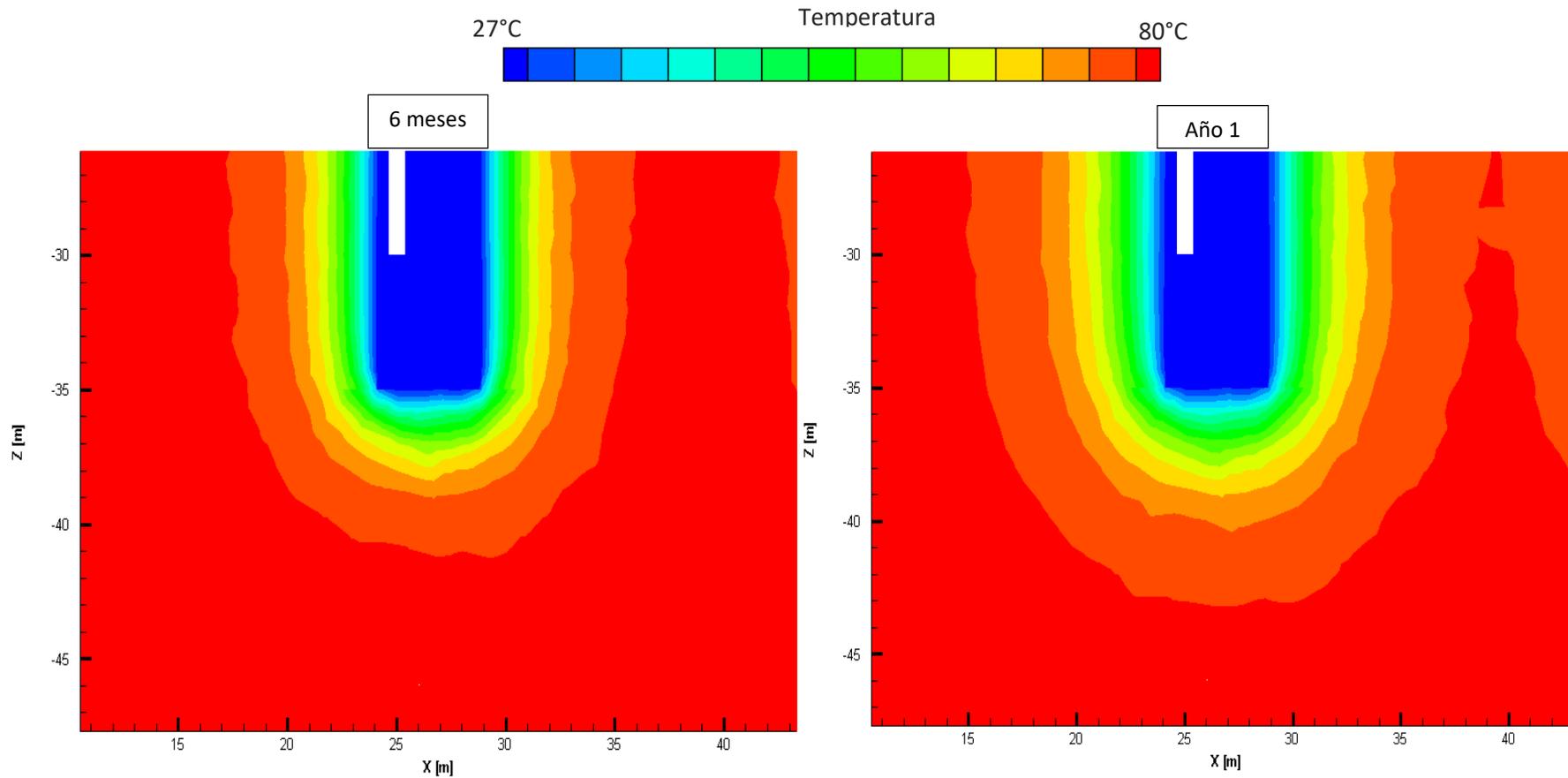


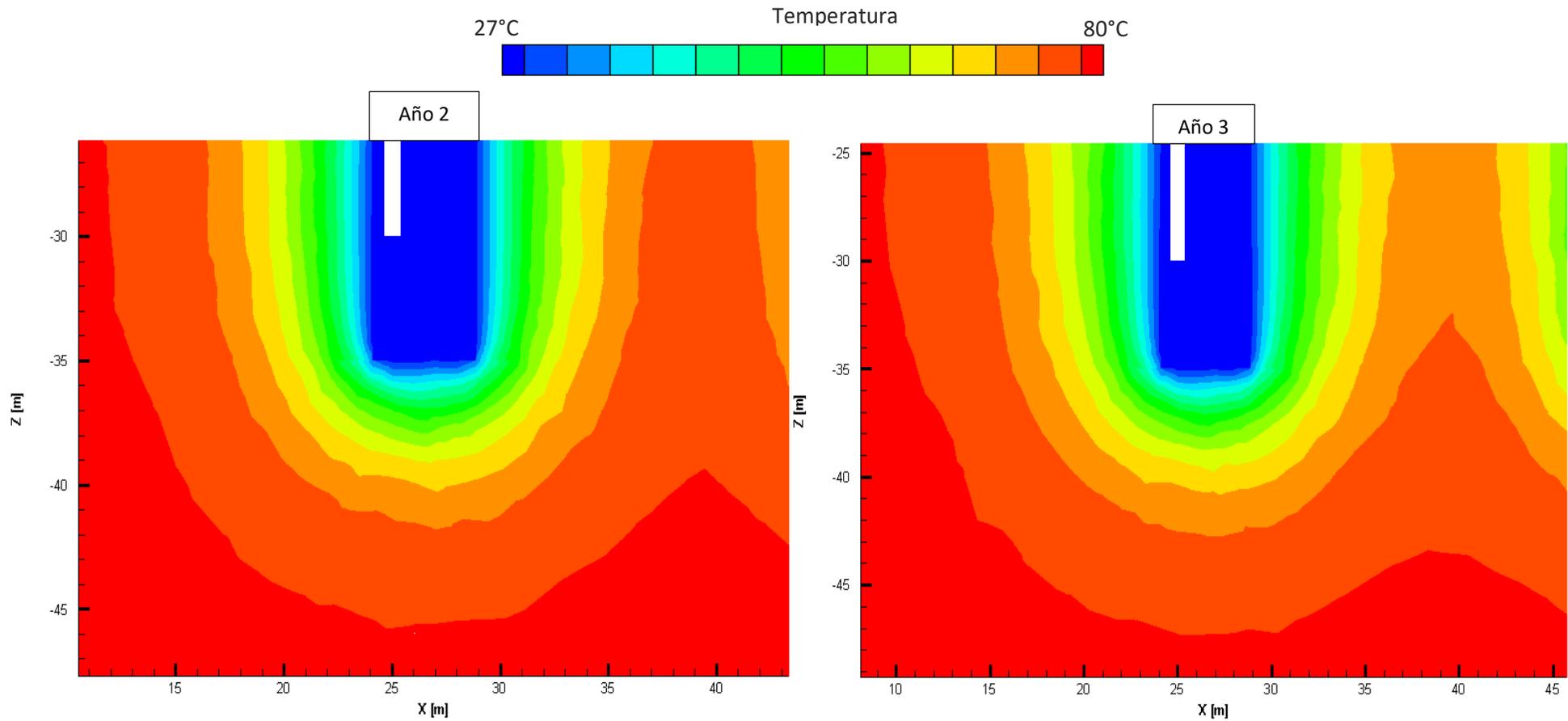
Figura 5.16 Evolución del enfriamiento global de la roca envolvente de la galería durante los 4 primeros años de simulación.

En la figura anterior se puede apreciar como la temperatura alrededor de la roca va descendiendo con el paso del tiempo. En la figura 5.19 se recogen visualizaciones detalladas en las que se cuantifica el espesor afectado por este enfriamiento y la progresión en que se produce.



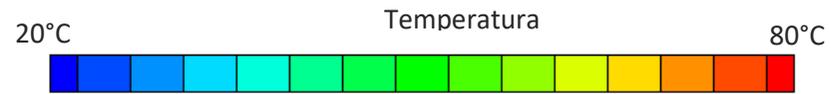
0,5 años: Tras 6 meses de simulación los primeros centímetros de roca alrededor de la galería se han enfriado 20°C con respecto a los 80°C iniciales.

1 año: Tras el primer año un espesor de 2 metros de roca encajante desde el fondo de saco, alcanza un descenso máximo de temperatura de 26°C con respecto a la temperatura inicial de 80°C. La zona de afectación térmica se extiende hasta 8 metros de espesor desde el fondo de saco y lateralmente 1,5 metros hacia el cross-cut vecino.

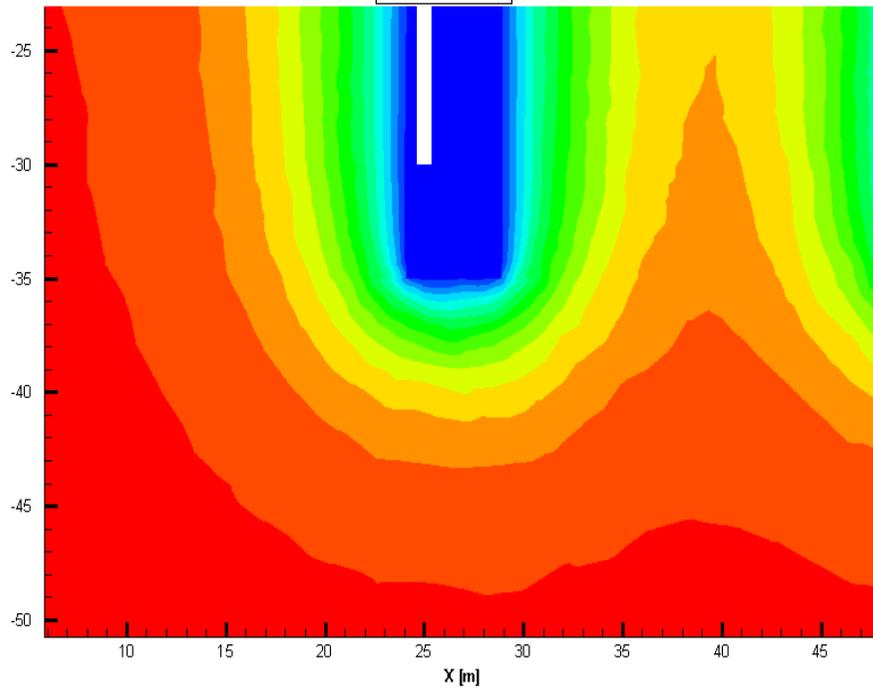


2 años: El segundo año el rango de roca a 26°C es de 3 metros y las capas circundantes también baja su temperatura ~13°C. La afectación térmica, aunque tenue alcanza los 10 metros de espesor dese el fondo de saco.

3 años: Continúa el enfriamiento paulatino, la afectación térmica se extiende 12 metros desde el fondo de saco.



Año 4



4 años: El segundo año el rango de roca a 26°C es de 4 metros. La afectación térmica se extiende 14 metros desde el fondo de saco, constituyendo un volumen de roca global alrededor de todas las galerías (principal y transversales).

Se observa que el enfriamiento del volumen de roca después de los cuatro años de simulación no se propaga de forma tan efectiva como inicialmente. El fenómeno de enfriamiento conservará esta tendencia en los años posteriores, no excediendo los 20 metros de espesor desde los fondos de saco y la cara trasera de la galería principal dentro de los primeros 6 años desde que se enciende la V-R.

Figura 5.17 Planos detalle del volumen de roca encajante afectados por el proceso de enfriamiento

La gráfica de la figura 5.18 muestra la representación en planta de una superficie trazada en el interior de la roca situada a 10 metros de los fondos de saco ($Z=-40$ m) y que abarca toda la longitud horizontal del dominio roca, en ella se ha monitorizado la temperatura durante el periodo de simulación:

- Las dos prominencias centrales que se aprecian en la gráfica representan los cross-cuts de mayor longitud, 30 metros; en ellos la temperatura de la línea de superficie situada a 10 metros del fondo de saco varía significativamente año tras año; la temperatura de la roca desciende unos 3°C cada vez.
- A la derecha de estos cross-cuts se encuentra el tercero que posee una longitud inferior, 25 metros. Por lo tanto, la superficie lineal trazada está a 15 metros de este fondo de saco, ese hecho ocasiona que en la gráfica se refleje como una afectación térmica de la zona muy inferior a la de los cross-cuts mayores, sufriendo apenas un descenso de 2°C durante cuatro años (esto mismo se aprecia en las visualizaciones de la figura 5.17).

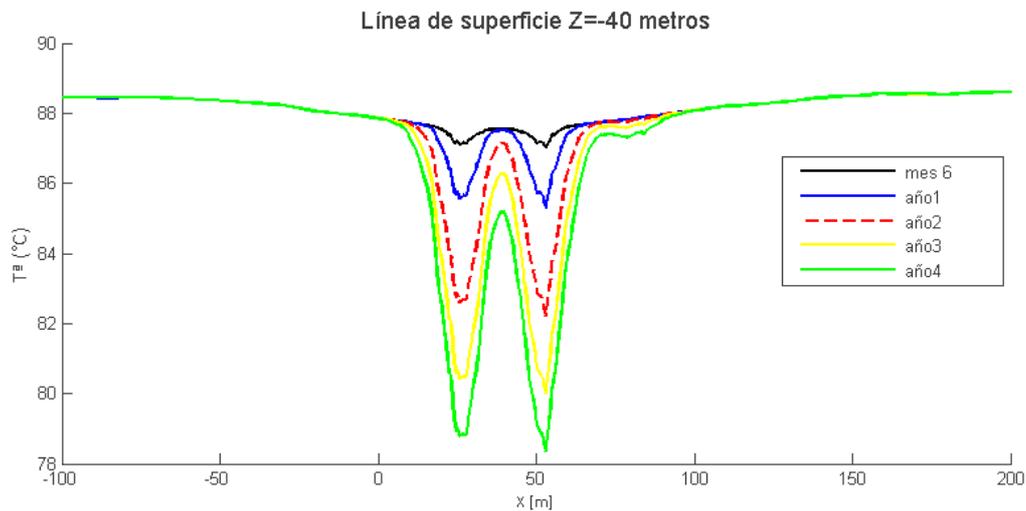


Figura 5.18 Evolución de la temperatura en superficie lineal $z=-40$ metros.

Estos resultados pueden compararse con los aportados por la línea de superficie situada al otro lado de la galería, donde no hay cross-cuts, observando en qué medida se enfría la roca en esa parte del volumen. La figura 5.19 representa esta evolución:

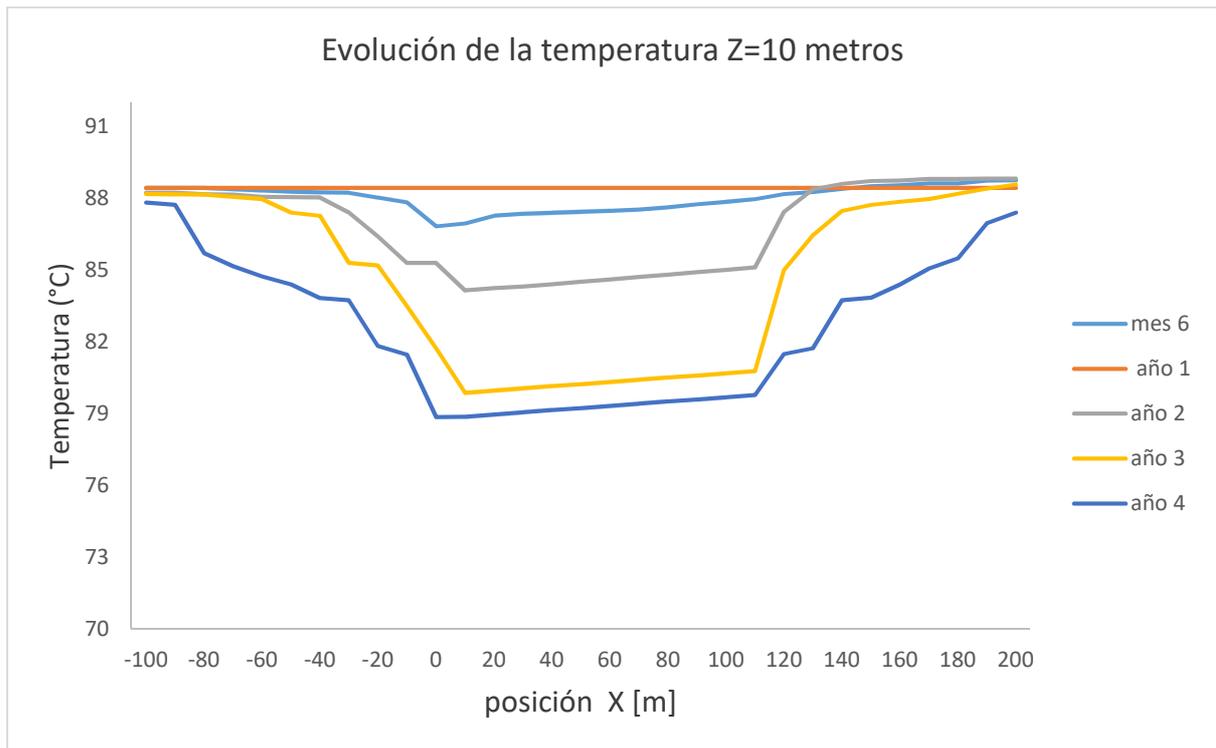


Figura 5.19 Evolución de la temperatura en superficie lineal z=10 metros

La temperatura a 10 metros de la pared desciende hasta 12°C durante los primeros 4 años. En los primeros 3 años el descenso es más importante, bajando de 88°C hasta los 80°C, para continuar disminuyendo su temperatura en los años siguientes a ritmo de 1°C anual. En el caso del volumen de roca encajante situado encima de la galería ocurre igual a los anteriores. La figura 5.20 muestra la evolución de la temperatura de roca en una línea superficial situada diez metros ($y=10$) por encima de la galería:

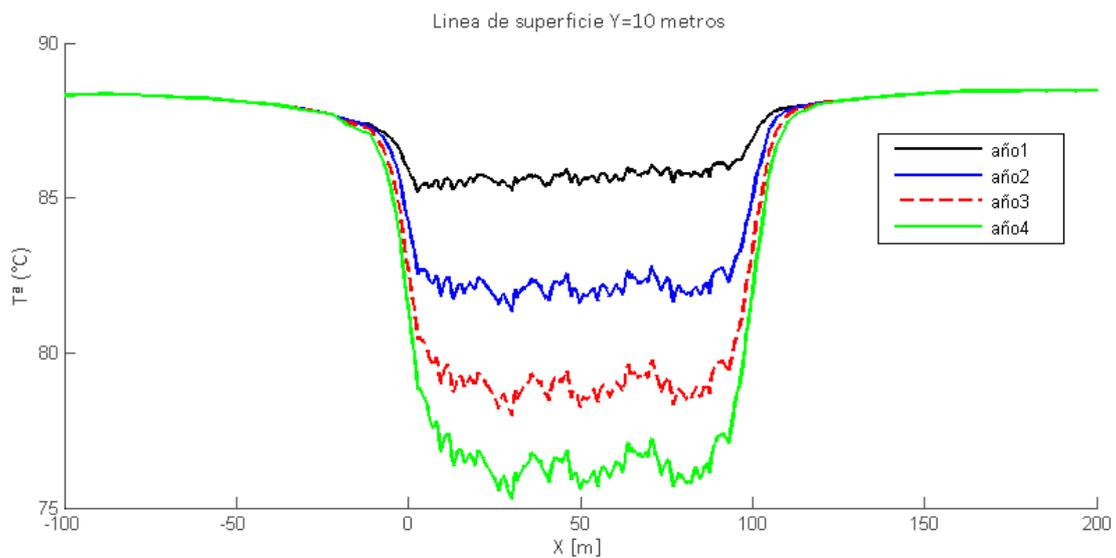


Figura 5.20 Evolución de la temperatura en la superficie lineal y=10 metros.

Se puede afirmar que a ambos lados y por encima de la galería, a la misma distancia desde el foco de enfriamiento (superficie interior de pared de galería), la zona de afectación térmica abarca hasta 10 metros de espesor no presentando cambios de temperatura bruscos o importantes en el volumen de roca encajante en un rango de distancia mayor.

El modelo numérico global simulado constituye un dominio lo suficientemente grande para ser representativo del sólido infinito que es la roca en la que se encuentra encastrada la galería subterránea. Este hecho es influyente sobre los resultados de la evolución de temperatura de la roca. Un volumen de roca encajante insuficiente daría valores de enfriamiento a más bajas temperaturas y más rápido, ya que el espesor a través del que se propaga el flujo de calor por conducción influye sobre el valor, en términos absolutos, del calor por unidad de tiempo que es captado en la superficie de la galería y a la inversa, el espesor de roca que se enfría por efectos de la ventilación.

5.2.2. Simulaciones modelo global roca con revestimiento

El estudio realizado para el modelo global de roca desnuda se ha repetido para los modelos globales con recubrimiento de hormigón aligerado y mortero proyectado en las paredes de la galería.

En este apartado, para no volver a explicar los fenómenos que aparecen en los modelos con revestimiento, que son los mismos que en el modelo de galería desnuda, se van a analizar y comparar los valores hallados en los periodos $t=1s$, $t=7$ minutos y $t= \infty$ para la temperatura de pared, fluido y flujos térmicos que penetran en la galería entre los modelos con revestimiento y el modelo global roca desnuda. El objetivo es estudiar la influencia que tiene el revestimiento sobre los valores de los parámetros estudiados y por extensión sobre las demandas de refrigeración.

En la gráfica de la figura 5.21 se observa como inicialmente la temperatura superficial de la pared en contacto con el aire de la galería disminuye de forma sensible, con respecto a la pared de roca desnuda, 86 °C (359K), cuando se encuentra revestida de mortero proyectado, 74° C (347 K), y notablemente cuando lo está con hormigón aligerado, 70°C (344 K). Unas temperaturas de pared más bajas implican una disminución en el valor medio de la temperatura de fluido lo que significa un salto de temperaturas inicial más bajo y por tanto más cercano a la temperatura de operación deseada.

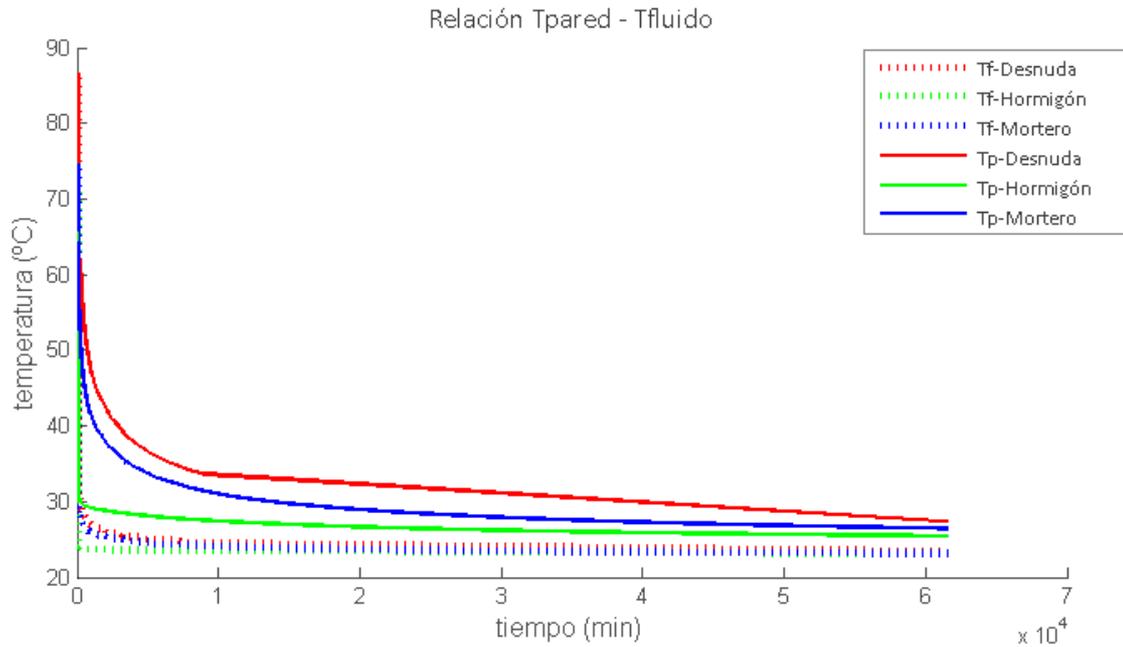


Figura 5.21 Gráfica comparativa de la relación de entre temperatura de pared y temperatura media del fluido obtenida en los modelos globales.

La tabla 5.21 recoge los resultados clave de este análisis:

- En los primeros segundos la temperatura del aire es muy similar a la de la superficie de pared en contacto con él, en los casos con revestimiento esta temperatura difiere del caso de roca desnuda de 10-15 °C.
- Tras 7 minutos, tiempo que se considera que el estado transitorio en el fluido arroja resultados lo suficientemente estables, la temperatura de pared del revestimiento de mortero proyectado con respecto a la roca desnuda abarca una diferencia de 10 °C menor, mientras que el revestimiento de hormigón aligerado supone un descenso de 48°C.
- Debido a estas condiciones superficiales de pared, para el modelo con revestimiento de hormigón aligerado el aire posee una temperatura más cercana a la de consigna para operación.
- El modelo con revestimiento de mortero proyectado también proporciona valores de disminución de temperatura media del fluido significativos con respecto a la roca desnuda tras 7 minutos de operación.
- Tras un periodo no superior a un mes, en todos los modelos, la temperatura de pared desciende igualándose a la del fluido, obteniendo diferencias entre los modelos de 1-2°C en la pared y varias décimas de grado en el fluido.

Tabla 5.2 Resumen comparativo de temperaturas de fluido y pared de los modelos numéricos globales

	Etapa inicial (t = 1s)		Etapa intermedia (t = 420s)		Etapa final (t ≈ ∞)	
	T ^a media pared(°C)	T ^a media fluido(°C)	T ^a media pared(°C)	T ^a media fluido(°C)	T ^a media pared(°C)	T ^a media fluido(°C)
Roca desnuda	86,86	86,04	78,67	35,23	27,54	23,43
Revestimiento mortero	74,65	74,01	67,63	33,80	26,58	23,28
Revestimiento hormigón	71,39	70,99	30,56	24,13	25,57	23,10

Derivado de la disminución de temperatura de la pared y la atenuación de ésta en un espesor de roca encajante de unos 10 metros, el calor que entra en la galería por unidad de tiempo también va a verse afectado.

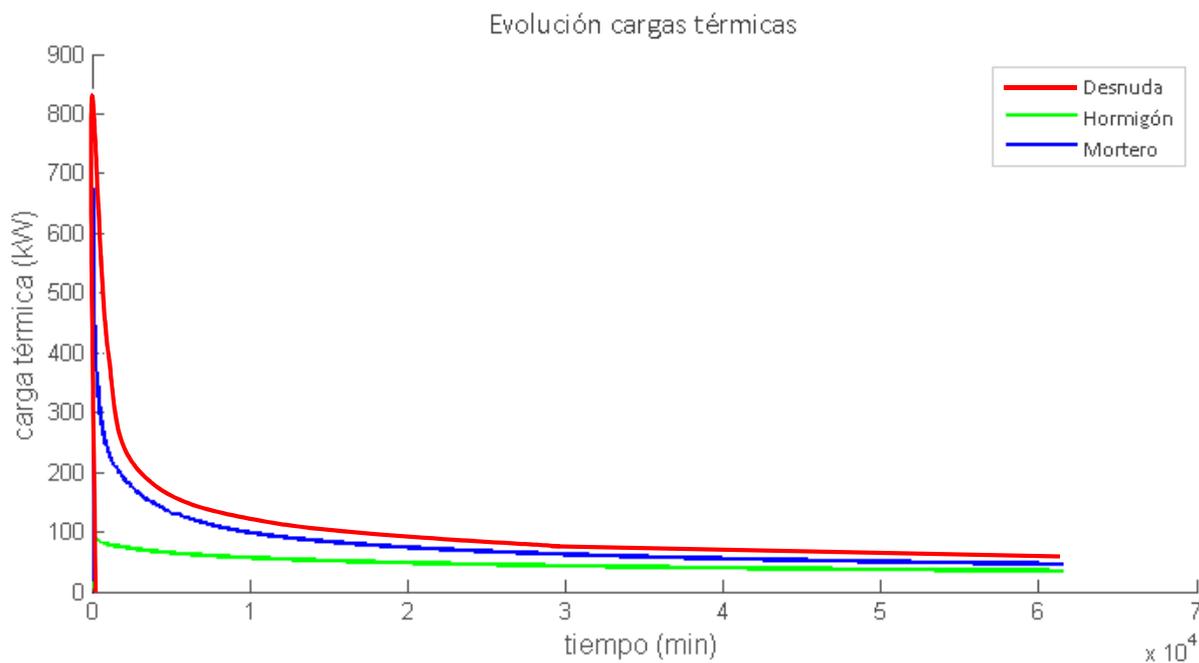


Figura 5.22 Evolución de las cargas térmicas obtenidas en los modelos globales.

En la figura 5.2 se observa que las cargas térmicas que penetran en toda la superficie que constituyen galería y los cross-cuts ($\approx 3.570 \text{ m}^2$) en los primeros instantes del transitorio es muy alta en el caso de la roca desnuda, $\approx 24,83 \text{ kW}$; En el modelo con revestimiento de mortero, para el mismo instante, las cargas son de $\approx 19,68 \text{ kW}$, mientras que el descenso más significativo en las cargas térmicas que afectan a la galería se encuentran en el modelo con revestimiento de hormigón aligerado alcanzando valores de $\approx 7,67 \text{ kW}$. Por lo tanto, el calor por unidad de tiempo que entra en la galería con revestimiento de mortero se reduce en un 20%

con respecto a la roca sin revestimiento y en el caso de hormigón aligerado la reducción es del 69%.

Tabla 5.3 Resumen comparativo cargas térmicas aportadas a la galería en las simulaciones de los modelos numéricos globales

	Etapa inicial ($t = 1s$)	Etapa intermedia ($t = 420s$)	Etapa final ($t \approx \infty$)
	Cargas térmicas (kW)	Cargas térmicas (kW)	Cargas térmicas (kW)
Roca desnuda	24,83	823,75	65,24
Revestimiento mortero	19,68	657,27	45,97
Revestimiento hormigón	7,67	92,18	34,68

Aunque en una etapa intermedia las cargas térmicas adquieren valores muy altos por los grandes saltos de temperatura entre fluido y pared, en las horas posteriores, $t \approx \infty$, las cargas que penetran en la galería se estabilizan e igualan tras varios meses de transitorio.

El hecho más importante que implican estos resultados es una disminución significativa de las demandas que recaen sobre el sistema de V-R de la explotación en las etapas iniciales del transitorio.

5.2.3. Conclusiones modelos globales

Mediante el análisis de resultados de los tres modelos globales y la comparación de éstos con los del sub-modelo convectivo, se puede afirmar que:

- El análisis y simulación numéricos son las herramientas más adecuadas y precisas para resolver este tipo de problemas complejos en los que intervienen transferencia de calor y mecánica de fluidos.
- La creación de un sub-modelo convectivo para el análisis del campo fluido es una metodología apropiada y un modo seguro de validar paso a paso la resolución de modelos numéricos complejos.
- El funcionamiento del sistema de refrigeración a lo largo de los años ocasiona un enfriamiento paulatino de la roca envolvente del hueco subterráneo que no supera los 15 metros de espesor en todas las direcciones del espacio.
- El conocimiento del volumen de roca térmicamente afectado da la posibilidad de predecir los volúmenes de roca susceptibles de estudio mecánico durante su enfriamiento(retracción) y su calentamiento (dilatación) una vez cesen las operaciones subterráneas.
- Las cargas térmicas de refrigeración que penetran en la galería subterránea disminuyen en el tiempo conforme se va enfriando el espesor de roca que envuelve la galería desnuda.

-
- Estas cargas térmicas se pueden reducir hasta en un 89 % en el periodo inicial revistiendo las paredes de la galería con material aislante, hormigón aligerado, de muy baja conductividad térmica. En el caso del mortero proyectado se reducen hasta en un 20% respecto a los valores de la roca desnuda.
- Se valida la metodología de análisis del problema como una nueva herramienta complementaria para el estudio global de los fenómenos que afectan al clima de una mina subterránea profunda.
- La disminución inicial de las cargas térmicas de refrigeración supone un ahorro en las demandas energéticas iniciales del sistema de V-R que constituye el 60% de los costes de producción de la explotación subterránea.
- Una reducción del consumo energético de la explotación implica una reducción en la producción de CO₂ generado haciendo la explotación más ambientalmente eficiente.

6. Estudios posteriores

Este estudio abre una nueva vía de investigación en el campo de la ingeniería térmica y mecánica de fluidos aplicado a la ventilación en cavidades subterráneas y los fenómenos de transferencia de calor y masa en casos que se precise la promoción de mezclado del flujo interno a ellas.

Existen varias líneas de investigación posibles atendiendo al carácter de las variables que se quieran estudiar:

- Estudio térmico:
 - Estudios de sensibilidad de malla para análisis de espesor y desprendimiento de la capa límite en conductos con una relación de aspecto alta, sometidos a flujo turbulento.
 - Estudio cuantitativo de los fenómenos de convección mixta que aparecen en la galería.
 - Estudios psicométricos del aire (transferencia de calor y masa)
 - Estudios de variación de la difusividad térmica de la roca encajante en función del periodo y espesor afectado térmicamente.

- Estudios fluido-dinámicos
 - Simulación numérica en CFD con gas trazador para análisis de la proporción y medida de la dilución de gases anóxicos presentes en la galería.
 - Influencia de la influencia de las emisiones de humos procedentes del parque de maquinaria.

- Estudios mecánicos
 - Comportamiento mecánico de la roca encajante ante el salto de temperatura propiciado por el sistema de V-R.
 - Estudios de estabilidad de pared

ANEXO I. PROGRAMACIÓN FICHEROS JOURNAL

Anexo I

- Creación de ficheros journal para simulaciones transitorias

Par las simulaciones realizadas ha sido preciso utilizar la interfaz textual de comandos de usuario de FLUENT, programando mediante ficheros 'journal' los tipos de Solver, condiciones de contorno e iteraciones temporales que fueron necesarias para cada caso.

La metodología de preparación consiste en:

- Programación de los ficheros journal
- Lanzamiento de los casos en el servidor de la Universidad politécnica de Cartagena, 'Labmach'.

A continuación, se muestran dos ejemplos de los ficheros programados para el sub-modelo convectivo y los modelos globales.

- Programación sub-modelo convectivo:

```
%%definición de las condiciones de contorno%%
define/boundary-conditions/wall
izq-temp
0
no
0
no
yes
temperature
no
343
no
no
no
no
no

;
define/boundary-conditions/wall
der-temp
0
no
0
no
yes
temperature
no
343
no
no
no
no
no
no
```

```
;
define/boundary-conditions/wall
arriba-temp
0
no
0
no
yes
temperature
no
343
no
no
no
no
no

no

;
define/boundary-conditions/wall
abajo-temp
0
no
0
no
yes
temperature
no
343
no
no
no
no
no

no

;
%activación del modelo de turbulencia k-w y estado transitorio%%
define/models/viscous/kw-sst
yes
;
define/models/unsteady-2nd-order
yes
;*****
;*****                                TEMP 343K
;*****
;*****
;*****
%inicialización del caso a temperatura de pared y comienzo de
iteraciones%%
solve/initialize/set-defaults/temperature
343
;
solve/initialize/initialize-flow
;
```

```
%%definición de los intervalos de tiempo en estado transitorio
correspondientes a 7 minutos%%

solve/set/time-step 0.001
solve/dual-time-iterate 10 20
;
solve/set/time-step 0.01
solve/dual-time-iterate 10 20
;
solve/set/time-step 0.1
solve/dual-time-iterate 10 20
;
solve/set/time-step 1
solve/dual-time-iterate 200 20
;
solve/set/time-step 10
solve/dual-time-iterate 200 20
;
define/models/steady
yes
;
%% una vez los resultados no varían, se prosiguen las
iteraciones en estacionario para ahorro computacional%%
solve/iterate
200
;
%%creación de informes en formato texto de las propiedades de
fluido y pared, en cada caso%%
report/surface-integrals/area-weighted-avg
arriba-temp
abajo-temp
izq-temp
der-temp
()
temperature
yes
global_report.txt
yes
;
report/surface-integrals/area-weighted-avg
arriba-temp
abajo-temp
izq-temp
der-temp
()
heat-flux
yes
global_report.txt
yes
;
report/surface-integrals/area-weighted-avg
drift_inlet
drift_outlet
()
```

```
temperature
yes
global_report.txt
yes
;
%escritura del caso resuelto%
wcd 343_d1_v12.cas.gz
```

- **Programación modelo-global roca desnuda**

Resolución inicial en estado estacionario para obtención de la distribución de temperatura vertical en la roca originada por el gradiente geotérmico.

```
% lectura del caso inicial con las condiciones de contorno
programadas previamente%%

rc gal_completa.cas.gz

%definición de superficies de monitorización de temperatura de
sólido y propiedades del fluido%
surface/line-surface
hotline1
-100
6
2.5
300
6
2.5
surface/line-surface
hotline2
-100
6
15
300
6
15
surface/line-surface
hotline3
-100
6
40
300
6
40
surface/line-surface
hotline4
-100
10
2.5
300
```

```
10
2.5
surface/line-surface
hotline5
-100
6
-15
300
6
-15
surface/line-surface
hotline6
-100
6
-40
300
6
-40
surface/line-surface
temp_pared_vertical
50
-10
2.5
50
10
2.5
;
surface/plane-point-n-normal
horizontal_fan
0
1.5
0
0
1
0
;
surface/plane-point-n-normal
horizontal_dwn
0
0
0
0
1
0
;
surface/plane-point-n-normal
horizontal_up
0
2
0
0
1
0
;
```

```
surface/plane-point-n-normal
vertical
50
-30
0
0
0
0
1
;
surface/plane-point-n-normal
CDS
0
0
-20
0
0
0
1
;
surface/plane-point-n-normal
cross-cut1
35
0
0
0
1
0
0
0
;
surface/plane-point-n-normal
cross-cut2
65
0
0
0
1
0
0
0
;
surface/plane-point-n-normal
cross-cut3
90
0
0
0
1
0
0
0
;
surface/plane-point-n-normal
sección_entrada
15
0
0
0
1
0
0
0
;
```

```

surface/plane-point-n-normal
sección_salida
95
0
0
1
0
0
;
;
solve/monitors/residual/convergence-criteria
1e-8
;
%%resolución en estado estacionario%%
solve/initialize initialize-flow
solve/iterate
25
;
%%escritura del resultado obtenido%
wcd galcompleta_steady.cas.gz

```

Programación de cuatro años en estado transitorio para observar la evolución de los parámetros que definen el fluido y el comportamiento de la roca encajante ante la afectación térmica del sistema V-R.

```

%%lectura del caso calculado en estado estacionario en el paso anterior%%
rcd galcompleta_steady.cas.gz
;
%%definición de modelo d eturbulencia y estado transitorio de
cálculo. Activación de ecuaciones de energía y flujo y
definición de criterios de convergencia de las ecuaciones
calculadas%%
define/models/viscous kw-sst
yes
define/models/unsteady-2nd-order
yes
solve/set/equations temperature
yes
solve/set/equations flow
yes
;
solve/monitors/residual/convergence-criteria
1e-9
1e-8
1e-8
1e-8
1e-8
1e-8
1e-8
;
%%definición de superficies de monitorización y control%%
surface/line-surface

```

```
hotline1
-100
6
2.5
300
6
2.5
surface/line-surface
hotline2
-100
6
15
300
6
15
surface/line-surface
hotline3
-100
6
40
300
6
40
surface/line-surface
hotline4
-100
10
2.5
300
10
2.5
surface/line-surface
hotline5
-100
6
-15
300
6
-15
surface/line-surface
hotline6
-100
6
-40
300
6
-40
surface/line-surface
temp_pared_vertical
50
-10
2.5
50
10
```

```
2.5
;
surface/plane-point-n-normal
horizontal_fan
0
1.5
0
0
1
0
;
surface/plane-point-n-normal
horizontal_dwn
0
0
0
0
1
0
;
surface/plane-point-n-normal
horizontal_up
0
2
0
0
1
0
;
surface/plane-point-n-normal
vertical
50
-30
0
0
0
1
;
surface/plane-point-n-normal
CDS
0
0
-20
0
0
1
;
surface/plane-point-n-normal
cross-cut1
35
0
0
1
0
```

```
0
;
surface/plane-point-n-normal
cross-cut2
65
0
0
1
0
0
;
surface/plane-point-n-normal
cross-cut3
90
0
0
1
0
0
;
surface/plane-point-n-normal
sección_entrada
15
0
0
1
0
0
;
surface/plane-point-n-normal
sección_salida
95
0
0
1
0
0
;
%%definición de las nuevas condiciones de contorno%%
define/boundary-conditions/velocity-inlet
entrada
no
no
yes
yes
no
1
yes
no
300
yes
no
1
no
```

```
1
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet
fan1
no
no
yes
yes
no
12
yes
no
293
yes
no
1
no
1
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet
fan2
no
no
yes
yes
no
12
yes
no
293
yes
no
1
no
1
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet
fan3
no
no
yes
yes
no
12
yes
no
293
yes
no
1
no
1
;
```

```
%%programación de archivos tipo texto con monitorización de
parámetros el fluido en zonas críticas%%
solve/monitors/surface/set-monitor
temp_wout
"Area-Weighted Average"
temperature
9

no
no
yes
"temp_wout.out"
1
yes
flow-time
;
solve/monitors/surface/set-monitor
hflux_wout
"Area-Weighted Average"
heat-flux
9

no
no
yes
"hflux-wout.out"
1
yes
flow-time
;
solve/monitors/surface/set-monitor
heat_wout
"Integral"
heat-flux
9

no
no
yes
"heat-wout.out"
1
yes
flow-time
;
solve/monitors/volume/set-monitor
fluid_temp
"Mass-Average"
temperature
fluid

no
no
yes
"temp_fluid.out"
```

```
1
yes
flow-time
;
%inicio de iteraciones transitorias con generación de ficheros
con valores de temperatura para las superficies definidas al
inicio del fichero journal%%

solve/set/time-step 1
solve/dual-time-iterate 10 20
;
plot/plot
yes
hotline1_01.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline1

;
plot/plot
yes
hotline2_01.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline2

;
plot/plot
yes
hotline3_01.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline3

;
plot/plot
```

```
yes
hotline4_01.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline4

;
plot/plot
yes
hotline5_01.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline5

;
plot/plot
yes
hotline6_01.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline6

;
%escritura del primer paso de tiempo del estado transitorio%
wcd rockcube_uns1.cas.gz
;
%%una vez resueltos los primeros 7 minutos del transitorio para
obtener los resultados comprobables con sub-modelo convectivo, se
programan las iteraciones con intervalos de tiempo diarios (de
24 hrs)%%

solve/set/time-step 3600
solve/dual-time-iterate 24 20
;
plot/plot
no
```

```
linea_vertical1_d1_m1_y1.out
yes
no
no
temperature
yes
0
1
0
temp_pared_vertical

;
plot/plot
yes
hotline1_d1_m1_y1.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline1

;
plot/plot
yes
hotline2_d1_m1_y1.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline2

;
plot/plot
yes
hotline3_d1_m1_y1.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline3

;
```

```
plot/plot
yes
hotline4_d1_m1_y1.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline4

;
plot/plot
yes
hotline5_d1_m1_y1.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline5

;
plot/plot
yes
hotline6_d1_m1_y1.out
yes
no
no
temperature
yes
1
0
0
hotline6

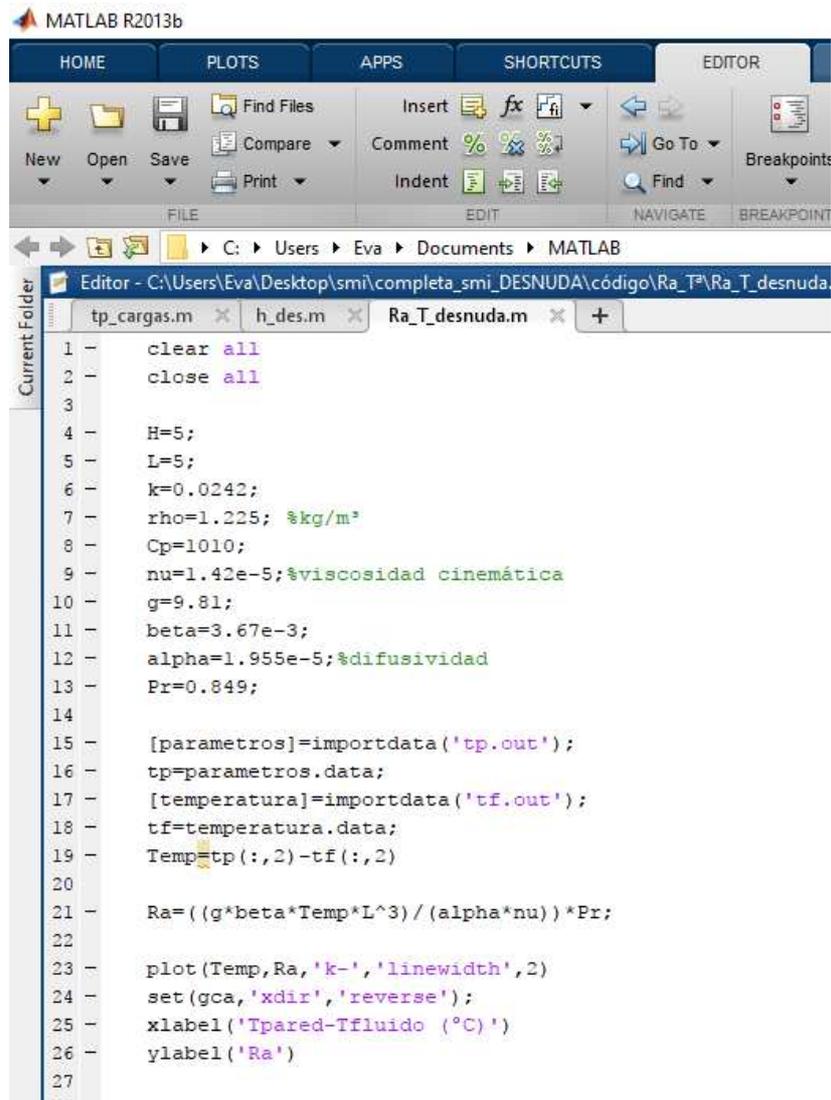
;
wcd rockcube_d1_m1_y1.cas.gz
;
```

ANEXO II. PROGRAMACIÓN CÓDIGO MATLAB

ANEXO II

Para la representación gráfica y comparativa de los resultados monitorizados en los modelos numéricos se ha empleado la herramienta de cálculo matemático, Matlab.

También se ha programado el código para hallar los valores de los parámetros adimensionales de la transferencia de calor como ; Nusselt o Rayleigh.



```
1 - clear all
2 - close all
3
4 - H=5;
5 - L=5;
6 - k=0.0242;
7 - rho=1.225; %kg/m³
8 - Cp=1010;
9 - nu=1.42e-5;%viscosidad cinemática
10 - g=9.81;
11 - beta=3.67e-3;
12 - alpha=1.955e-5;%difusividad
13 - Pr=0.849;
14
15 - [parametros]=importdata('tp.out');
16 - tp=parametros.data;
17 - [temperatura]=importdata('tf.out');
18 - tf=temperatura.data;
19 - Temp=tp(:,2)-tf(:,2)
20
21 - Ra=((g*beta*Temp*L^3)/(alpha*nu))*Pr;
22
23 - plot(Temp,Ra,'k-', 'linewidth',2)
24 - set(gca,'xdir','reverse');
25 - xlabel('Tpared-Tfluido (°C)')
26 - ylabel('Ra')
27
```

Figura a. Código Matlab para cálculo de Ra en función de Tpared-Tfluido.

Bibliografía

- Adrian Bejan, A. D. (2003). *Heat Transfer Handbook*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.,
- Europea, C. (s.f.). *Comisión Europea*. Obtenido de https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_es
- Frank P. Incropera, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor, 4ª Ed.* México: Prentice Hall.
- Hargreaves D.M., L. I. (2007). The computational modeling of ventilation flows within a rapid development drive. *Tunnelling and underground Space Technology*(22), 150-160.
- Herrin M. James, D. D. (1996). Thermal conductivity of U.S. Coals. *Journal of geophysical research*, 101(B11), 25381-25386.
- Mcperson, M. (1993). *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. New York: Chapman & Hall.
- Ministerio de Energía, T. y. (12 de 06 de 1985). Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento general de Normas Básicas de Seguridad Minera. (140). Madrid, España. Recuperado el 2017, de Ministerio de Energía, Turismo y Agenda digital: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1985-10836>
- P. Sasmito Agus, E. B. (2013). Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines- A computational fluid dynamic study. *Tunnelling and Underground Space Technology*(34), 82-95.
- P. Sasmito Agus, K. C. (2015). Computational evaluation of thermal management strategies in an. *Applied Thermal Engineering*(90), 1144-1150.
- Ramakrisna D., B. T. (2012). A complete heatline analysis on mixed convection within a square cavity: Effect of thermal boundary conditions via thermal aspect ratio. *International journal of thermal Sciences*(57), 97-111.
- Xiaojie Yang, Q. H. (2011). Progress of heat-hazard treatment in deep mines. *Mining Science and technology*(21), 295-299.
- Xu Guang, C. E. (2015). Remote characterization of ventilation systems using tracer gas and CFD in an underground mine. *Safety Science*(74), 140-149.