



Universidad de Oviedo



Facultad de Geología

TRABAJO FIN DE MÁSTER

# **TERRENOS DEL CARBONÍFERO: PARTICULARIDADES EN LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES**

AVELINO DÍAZ CADIerno

MÁSTER EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA GEOLÓGICA  
JULIO - 2018



## Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Universidad de Oviedo



D. Avelino Díaz Cadierno, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “TERRENOS DEL CARBONÍFERO: PARTICULARIDADES EN LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 13 de julio de 2018

Fdo. Avelino Díaz Cadierno

El Dr. Rafael Rodríguez Díez, Profesor Titular adscrito al Departamento de Explotación y Prospección de Minas de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo “TERRENOS DEL CARBONÍFERO: PARTICULARIDADES EN LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES”, realizado por D. Avelino Díaz Cadierno, y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 13 de Julio de 2018

Fdo. Rafael Rodríguez Díez



**Agradecimientos:**

En primer lugar quiero agradecer la paciencia que han tenido mis tutores, Miny Díaz Aguado y Rafael Rodríguez, que me han acompañado desde que nos conocimos en Mieres hace casi una década. Aunque no siempre le he prestado a la universidad la atención que requiere, ellos siempre han estado ahí apoyándome cuando volvía a acordarme. Por ello, y por lo que me habéis enseñado, muchas gracias.

También quiero agradecer a mi familia y amigos la persistencia recordándome que el trabajo no estaba terminado. Con su insistencia han conseguido que finalmente termine este máster, que tanto sacrificio me costó el primer año, y del que prácticamente me olvidé los siguientes. Gracias por ayudarme a decir hasta luego a la que sin duda ha sido una de las mejores experiencias de mi vida. Quién sabe, quizás algún día vuelva a esta universidad, que tanto me ha ayudado a ser el profesional que soy hoy en día.



## Índice

Índice.....	4
1. Resumen.....	6
2. Abstract.....	7
3. Introducción y Objetivos.....	8
4. Terrenos del Carbonífero.....	10
4.1. Generalidades.....	10
4.2. Importancia.....	10
5. Obra civil: Túneles.....	12
5.1. Excavación.....	12
5.2. Ventilación.....	16
5.2.1. Presencia de gases peligrosos.....	16
5.2.2. Fuentes de gas.....	17
5.2.3. Estratificación del gas (gas layering).....	17
5.2.4. Dilución de capas estratificadas de gas.....	18
5.2.5. Desprendimientos instantáneos (sudden outburst).....	19
5.2.6. Incendios y explosiones.....	19
5.2.7. Efectos de una explosión.....	20
5.2.8. Factores que afectan a la explosividad.....	21
5.2.9. Polvo en suspensión.....	22
5.3. Sistema de ventilación.....	23
5.4. Seguridad.....	26
5.4.1. Monitorización.....	26
5.4.2. Prevención.....	27
5.4.3. Protección.....	30
6. Caso práctico.....	32
6.1. Presentación de caso.....	32
6.2. Breve descripción de la obra.....	32
6.3. Geología atravesada.....	33
6.4. Geometría del túnel.....	34
6.5. Selección del sistema de avance.....	35
6.6. Definición del caudal.....	35
6.7. Soluciones para la ventilación.....	36
6.8. Conclusiones del caso práctico.....	37
7. Conclusiones.....	38
8. Bibliografía.....	39
8.1. Normativa.....	39



8.2. Material bibliográfico .....	39
8.3. Artículos .....	39
ANEXO 1: Ignición del metano, combustión y explosión (Caso particular).....	41
ANEXO 2: Explosiones de metano y polvo de carbón (Caso particular).....	42
ANEXO 3: Ejemplo túnel tradicional .....	45
ANEXO 4: Ejemplo túnel con presencia de metano.....	50
ANEXO 5: Ejemplo túnel con presencia de metano y ventilación aspirante.....	55
ANEXO 6: Estudios de ventilación para el caso práctico.....	60

## Índice de Tablas

Tabla 1. Límites de detonabilidad para el Hidrógeno y el Metano .....	20
Tabla 2. Comparativa ejemplos ventilación túnel.....	24
Tabla 3. Caudal requerido .....	36
Tabla 4. Resumen cálculos de ventilación .....	37

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Usos y tipos del carbón. Cortesía de <a href="http://www.adelaleiro.com">http://www.adelaleiro.com</a> .....	11
Ilustración 2. Izq. imagen de una rotopala. Der. imagen de un cielo abierto banquetado. ....	13
Ilustración 3. Imagen de una rozadora trabajando sobre una capa de carbón. Se aprecia la rozadora, el panzer, y la automarchante.....	13
Ilustración 4. Esquema de una TBM. Se muestra la cabeza, el back-up y el almacén de dovelas en la superficie. ....	14
Ilustración 5. Ejemplo de posicionamiento de barrera de polvo inerte. Cortesía de Engineer Live.....	29
Ilustración 6. Refugio de seguridad. Cortesía de Strata Worldwide .....	31
Ilustración 7. Fotografía del túnel principal durante la instalación del equipamiento. ....	32
Ilustración 8. Mapa geológico de Glasgow y Ayrshire. Glasgow and Ayrshire: a landscape fashioned by geology, British Geological Survey & Scottish Natural Heritage. 2006.....	33
Ilustración 9. Mapa de yacimientos de carbón en el subsuelo de la ciudad de Glasgow.....	34



## 1. Resumen

En la historia reciente se han explotado los yacimientos de carbonífero como fuente de combustibles fósiles, tanto mediante explotaciones a cielo abierto, como muy frecuentemente con minas subterráneas que se acomodan mejor a la naturaleza de las capas de carbón.

Con el paso de los años, la minería se ha ido adaptando a los retos específicos de este tipo particular de explotaciones. La constante presencia de elementos inflamables, combustibles y algunos casos incluso explosivos terminó por derivar en métodos específicos, herramientas especiales, y personal altamente cualificado y concienciado con los riesgos de su trabajo.

Sin embargo, con el progresivo cierre de estas explotaciones y el continuo avance de nuestra sociedad, cada vez es más frecuente la necesidad de, por unos motivos o por otros, ejecutar trabajos civiles atravesando explotaciones mineras a menudo abandonadas, o cortando capas, que, si bien no son explotables, presentan las mismas peculiaridades que las dadas en las minas.

En cambio, el personal de obra civil a menudo no cuenta con la experiencia y el conocimiento que durante generaciones fue adquirido con sudor y sangre en la mina, por lo que la ejecución de los trabajos presenta retos especiales y riesgos muy altos.

A lo largo de este trabajo, se revisan algunas peculiaridades, centradas en la ejecución, la ventilación y la seguridad en la obra, que por la naturaleza de las zonas por las que transcurre, en algunos casos deberá considerarse más un avance de una galería en una mina de carbón, que la construcción de un túnel.

Se revisarán algunos casos particulares, analizando como estos cambios en las condiciones de trabajo pueden requerir grandes modificaciones en los equipos requeridos, las medidas de seguridad e incluso la propia filosofía de trabajo o de diseño, y se analizará un caso de estudio a partir de un túnel proyectado para ejecución con los condicionantes analizados en este texto.



## 2. Abstract

In the recent history coal seams have been mined as a source of fossil combustibles, both through open pit and more often underground mines.

As years went by, mining industry has been able to adapt to the specific challenges of these type of sites. The constant presence of flammable, combustible and even explosive materials as part of the ore helped to develop methods, special tools and high qualified personnel who are very aware of the risks of their jobs.

However, the progressive shut down of these mines, along with the continuous evolution of our society have made necessary, by one reason or another, to execute civil constructions such as tunnels through abandoned mines, cutting through strata that, even if it is not profitable, they represent the same peculiarities as the ones we all know from the coal seams.

Whereas civil construction workers usually don't have either the experience nor the knowledge acquire by generations through sweat and blood down inside the mines, and because of that the job is presented with special challenges and very high risks.

Through this paper several of this situation will be reviewed, with special focus on execution, ventilation and safety at site, that because of the nature of some areas, it shall be consider more like the excavation of a gallery inside a coal mine than a tunnel construction site.

Additionally, some cases will be revised, analyzing how changing the conditions off the site can require heavy modifications in the equipment to be used, safety measures to be implemented, and even maybe work or design philosophy. Finally, an specific case about a tunnel to be excavated in this conditions is analyzed.

### 3. Introducción y Objetivos

Este trabajo se centra en las peculiaridades que tiene la ejecución de obras civiles, principalmente túneles, en terrenos asociados al Carbonífero.

Habiendo cursado mis estudios en el ámbito de la minería, los recursos energéticos y la geología, y considerando el origen de la Asturias moderna en la minería y el carbón, parece un buen cierre revisar como las peculiaridades de lo que durante tantos años alimentó el motor de nuestra comunidad, se extiende ahora a otras áreas.

En este aspecto, cada vez es más frecuente que las infraestructuras asociadas al crecimiento requieran de la aplicación de tecnologías que proceden del mundo minero, y que se tienen que aplicar a obra civil al presentarse condicionantes específicos que por su peligrosidad requieren de acciones contundentes.

Por nuestro origen minero, y sobre todo de la minería del carbón, somos muy conscientes de la peligrosidad que presentan los trabajos en terrenos donde hay presencia de sustancias combustibles, inflamables e incluso explosivas. Desgraciadamente nuestra historia, sin duda con más accidentes de los que debieran haber ocurrido, y en algunos de ellos con fatalidades, nos han enseñado ciertas formas de proceder, que si bien no eliminan la peligrosidad de estos trabajos, si que incrementan la seguridad de aquellos que deciden arriesgar su vida todos los días por realizar un trabajo necesario para el progreso de todos.

Antaño el riesgo se encontraba principalmente en la minería, más aún en la subterránea, donde la naturaleza de los estratos, y el contenido en grisú del carbón, hacían que el trabajo tuviese que ser manual y muy cuidados.

Con el paso del tiempo se ha ido acotando la permisibilidad con las sustancias peligrosas, haciendo que los condicionantes que antes solo aplicaban a las minas de carbón, se hayan ido extendiendo a sectores de otros tipos de minas subterráneas a fin de aumentar la seguridad.

Por último, aunque muchas labores mineras subterráneas de carbón hayan sido o estén siendo abandonadas, no solo en Asturias, si no también en otros países como Alemania, Escocia o Gales, frecuentemente estas explotaciones se encontraban en las cercanías de núcleos urbanos que crecieron junto con la industria, y que ahora requieren una serie de infraestructuras, como túneles viarios, conductos para agua, canalizaciones de electricidad y comunicaciones, o una infraestructura de transporte público como puede ser el metro.

Aunque los trabajos a realizar en estas ocasiones no son una labor minera continuada en el tiempo, a menudo requieren de atravesar labores abandonadas, minas que han estado inactivas por largos periodos, o simplemente son ejecutadas por personal que desconoce las peculiaridades de un mundo en el que la falta de atención, o la simple utilización de una





herramienta inadecuada pueden significar un accidente muy grave, e incluso la muerte de seres humanos.

El principal objetivo de esta memoria es resumir las peculiaridades que presenta una excavación en terrenos de estas características, revisando varios apartados claves en toda obra subterránea:

- Excavación: breve repaso a la filosofía de trabajo y algunos los métodos a utilizar
- Ventilación: análisis de las diferentes opciones, configuraciones y equipos
- Seguridad: análisis de diferentes opciones activas y pasivas para incrementar la seguridad operacional

Si bien es cierto que cada mina es un mundo, cada obra también lo es, y los operarios que en ella trabajan seguro que dirán que son quienes mejor conocen sus riesgos. Sin embargo, puesto que el exceso de confianza es una de las mayores causales de accidentes laborales, y este tipo de trabajos se llevan a cabo en ámbitos que ha menudo son implacables con las consecuencias cuando se produce un accidente, el primer curso de acción es la prevención, siendo el segundo la contención para reducir las posibles consecuencias. Una obra subterránea, de forma parecida a un barco en alta mar, es un ámbito laboral en el que las cosas puede ir muy mal muy rápido y con un precio altísimo para la vida.

## **4. Terrenos del Carbonífero**

### **4.1. Generalidades**

El Carbonífero es un periodo del Paleozoico, quinto entre el Devónico y el Pérmico, que abarca desde hace 360 millones de años hasta aproximadamente 300 millones de años.

El nombre significa “portador de carbón”, bautizado por los geólogos William Conybeare y William Phillips en 1822, basándose en un estudio de las rocas británicas. El nombre refleja el hecho de que muchas capas de carbón se formaron a nivel mundial durante ese tiempo.

Durante este periodo tanto la fauna como sobre todo la flora proliferan abundantemente, dando lugar a bosques frondosos. Además es una época de la historia de la Tierra con una elevada actividad tectónica, produciendo la orogenia hercínica que culmina con la formación del supercontinente Pangea.

El Carbonífero se caracteriza porque grandes extensiones de bosques quedaron sucesivamente sepultadas, dando origen a estratos sedimentarios entre los que aparecen las capas de carbón.

Al tratarse de estratos sedimentarios, con alto contenido en materia orgánica en algunos de ellos, la presencia de fósiles es común. Además, con el paso del tiempo, se han ido generando depósitos de gas y otras sustancias que, bajo las condiciones apropiadas, pueden resultar muy peligrosas.

### **4.2. Importancia**

La importancia del periodo Carbonífero viene a raíz de la roca que le da nombre, el carbón. Durante la revolución industrial fue la fuente básica de energía para los motores a vapor, tanto en trenes como en barcos, y sirvió de alimentación para la industria, sobre todo en lo que se refiere a metalurgia. Con el paso del tiempo también se convirtió en combustible para la generación de electricidad.

Sin embargo, en muchos casos el carbón se presenta en capas de poca potencia, plegadas, y de difícil acceso por la orografía tanto en superficie, como la profundidad a la que se encuentra. Los tiempos modernos también han puesto cota a los yacimientos a cielo abierto, y no podemos olvidarnos de los gases que acompañan al carbón, típicamente metano en concentraciones variables, que complican su extracción subterránea.

## USOS DOS DISTINTOS TIPOS DE CARBÓN

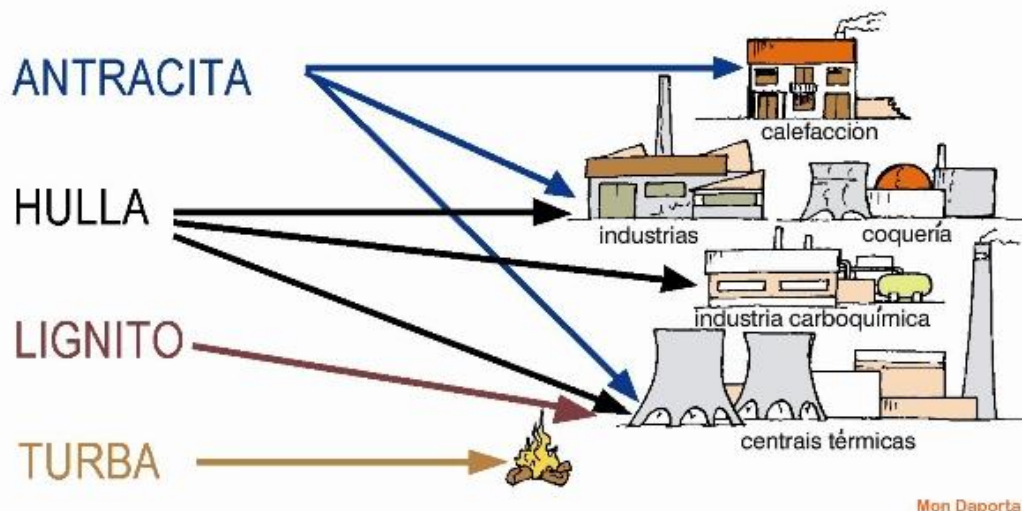


Ilustración 1. Usos y tipos del carbón. Cortesía de <http://www.adelaleiro.com>

Finalmente, el mercado global, la presión medioambiental por la contaminación derivada de los combustibles fósiles, y la aparición de métodos para obtener energías renovables han terminado por reducir sino condenar la actividad minera asociada al carbón. En los últimos años ha habido grandes avances para la obtención del gas asociado al carbón, o para la reutilización de las antiguas labores mineras como fuente de energía geotérmica, pero estos temas no son objeto de este trabajo.

Sin embargo, aunque la actividad minera asociada a estas explotaciones se reduzca, no se puede negar su existencia, habitualmente en las inmediaciones de grandes núcleos urbanos o industriales, y en los que por el crecimiento de la sociedad se requiere de infraestructuras subterráneas, túneles, canales... que en muchos casos cortan estratos de este periodo, o atraviesan labores mineras abandonadas.

## 5. Obra civil: Túneles

La minería y la obra civil comparten ciertos aspectos, sobre todo en los trabajos subterráneos, aunque el objetivo es bien diferente:

- La minería busca instalarse en un yacimiento, y mediante la ejecución de galerías, piques y planos inclinados llegar a los talleres de trabajo, donde se extraerá toda la roca de utilidad, dejando lo mínimo indispensable para garantizar la estabilidad de la zona.
- La obra civil busca una actuación puntual, siguiendo una traza, para llegar del punto A al punto B, cruzando y eliminando todo lo que se ponga en el camino.

Puesto que la minería convive a diario con las características del yacimiento, el conocimiento de sus características, su peligrosidad, y una mayor infraestructura subterránea permiten incrementar la seguridad focalizando también los trabajos en un mismo tipo de roca.

Sin embargo, en la obra civil, por ejemplo, en la ejecución de un túnel, lo habitual es ir cambiando de estrato, si cabe con cierta frecuencia, y en algunos casos con la sorpresa de encontrar lo inesperado. En estas situaciones, donde la obra abarca muchos kilómetros, se debe optimizar el conocimiento de los terrenos por los que transcurre el proyecto, con la adecuada caracterización mediante sondeos y estudios del terreno, de forma que se pueda saber en la medida de lo posible, no solo donde estamos excavando, son también que tenemos tanto alrededor como delante. Una capa inesperada, una falla imprevista o una bolsa de agua colgada pueden poner en peligro no solo el proyecto, sino también la vida de los trabajadores.

### 5.1. Excavación

Ya desde la profesionalización de la minería del carbón, en el ámbito subterráneo siempre pareció que se iba unos pasos por detrás de otros tipos de minería, como la polimetálica, y sin duda muy por detrás de los cielos abiertos. Esto solo sería aplicable a la producción neta.

Si bien productivamente cualquier mina subterránea tiene complicado competir con un cielo abierto (aunque los últimos métodos se quieren aproximar), el impacto ambiental y el ratio de roca excavada son muy favorables. Sin embargo, volviendo al mundo del carbón, los métodos aplicables son muy diferentes:

- En la minería a cielo abierto se pueden emplear métodos tradicionales en función de la resistencia del yacimiento. Al tratarse de una roca blanda, típicamente se emplean medios mecánicos como grandes rotopalas y dragalinas, que acompañados de complejos sistemas de transporte permiten altas producciones y bajo riesgo. En

algunos casos donde la roca es más dura o la geometría de las capas no rentabiliza estos métodos, se procede al banqueo en taludes y voladura (tratando de emplear explosivos seguros).



*Ilustración 2. Izq. imagen de una rotopala. Der. imagen de un cielo abierto banqueado.*

- La minería subterránea es la que más a evolucionado tratando de adaptarse a los tiempos y producciones demandadas por el mercado. En los inicios los trabajos eran manuales, luego se fueron introduciendo herramientas neumáticas y otros métodos con el fin de automatizar los trabajos. El método está muy vinculado a la disposición de la capa.
  - En los orígenes las capas inclinadas se explotaban mediante testers
  - En capas horizontales terminaron por imponerse medios mecánicos tales como rozadoras, y si la capa lo justifica cámaras y pilares.
  - En capas inclinadas o cuasi verticales se aplicaron rozadoras de plano inclinado y también sutiraje (voladura desde abajo)



*Ilustración 3. Imagen de una rozadora trabajando sobre una capa de carbón. Se aprecia la rozadora, el panzer, y la automarchante.*

De los métodos arriba indicados, pocos se asimilan a los empleados en obra civil, y todos tienen en común la utilización de equipamiento muy específico apto para las condiciones de trabajo específicas.

Es muy típico de la minería del carbón la imposibilidad de utilizar motores de combustión, predominando máquinas eléctricas muy aisladas, antideflagrantes y de diseño especial, y principalmente neumáticas. En cuanto a los explosivos, al tratarse de rocas de poca resistencia, prima la seguridad frente a la potencia.

Cuando nos trasladamos a la obra civil, donde prima el avance, y donde rara vez se justifica el uso de maquinaria tan específica es donde nos empezamos a encontrar los primeros inconvenientes.

En obra civil (construcción de túneles) se emplean, en sus diferentes variantes, los siguientes métodos:

- Perforación y voladura: este método consiste en mediante voladuras controladas ir excavando el túnel. Se aplica principalmente en túneles cortos y en zonas de alta estabilidad que apenas requieren sostenimientos.
- Medios mecánicos: consiste en excavar el túnel mediante el uso de maquinaria. Aunque se puede aplicar en túneles cortos en rocas blandas, habitualmente hace referencia a la ejecución de grandes túneles mediante el uso de grandes trenes de excavación o TBMs, que van ejecutando el avance y el sostenimiento de forma simultánea, permitiendo grandes avances de forma segura.



*Ilustración 4. Esquema de una TBM. Se muestra la cabeza, el back-up y el almacén de dovelas en la superficie.*

En lo que se refiere a su aplicación en terrenos del carbonífero, ambos métodos presentan sus riesgos, que en ninguno de los casos son menores.

La perforación y voladura presenta varios riesgos, detallados a continuación, que prácticamente la descartan:

- Durante la fase de perforación se pueden pinchar acumulaciones de gas dando lugar a la liberación repentina del gas, que además de daños en la zona del frente, fácilmente puede generar una atmosfera explosiva en parte o todo el túnel, que actuaría como un “cañón” en caso de deflagración o detonación.
- Durante la voladura se presentan varias situaciones diferentes, pero igual de peligrosas:
  - La explosión puede desembocar en una reacción en cadena incendiando materiales combustibles, e incluso iniciando explosiones de gas.
  - La propia voladura tronará el macizo rocoso, generando o agrandando, grietas, fisuras y fallas, por las que se pueden fácilmente filtrar acumulaciones de gas y otras sustancias desde áreas cercanas.
- Este método es especialmente peligroso si se aplica en zonas donde se encuentran explotaciones (tanto antiguas como modernas, y abandonadas o en uso) ya que puede, por un lado liberar acumulaciones de gases, y por otro desestabilizar el macizo o incluso derivar en derrumbes.

Las TBMs, si bien pudieran parecer la solución más favorable, presentan dos inconvenientes básicos:

- El método de arranque se basa en la fricción de los útiles de arranque contra la roca. Este rozamiento, además de generar calor, puede generar alguna chispa que desencadene la reacción. Aunque el frente presente una baja concentración de oxígeno, el tren de la TBM debe estar bien ventilador, y cuenta con amplio equipamiento eléctrico capaz de iniciar la reacción.
- Una TBM es un equipamiento eminentemente electrohidráulico, de gran potencia, y con múltiples puntos capaces de originar una chispa. Aunque quizás fuese posible construir una TBM ATEX, el coste muy posiblemente la haría no viable.
- Al atravesar excavaciones antiguas, puede perder el apoyo perdiendo la trazada y pudiendo incluso quedar atrapada.

En cuanto a los métodos mecánicos más tradicionales, aunque se podrían adaptar con maquinaria específica en las zonas comprometidas, ponen a los operarios en un riesgo inminente al tener que estar en el frente en todo momento para realizar los trabajos.

Si bien puede parecer que no hay método bueno en estas situaciones, ese es precisamente el caso, y por tanto se debe en primer lugar adaptar el método empleado a las condiciones de

trabajo de cada obra (no es lo mismo tener este condicionante en unos pocos metros que en varios kilómetros, no tener que cruzar una capa vertical de poca potencia o atravesar varias minas abandonadas), y en segundo lugar aplicar las medidas de seguridad adicionales para reducir riesgos, monitorizar las condiciones ambientes e incluso sectorizar las áreas de trabajo.

## **5.2. Ventilación**

La ventilación es la especialidad encargada de mantener las condiciones de respirabilidad y salubridad del aire dentro de una excavación subterránea.

Habitualmente se recurre a dos o tres criterios básicos para diseño, todos ellos regulados por normativas locales o internacionales.

- Velocidad mínima de retorno
- Dilución de humos diesel
- Control de la temperatura

Adicionalmente, cuando se avanza con perforación y voladura, también se debe considerar el tiempo de dilución del tapón de gases generados por los explosivos.

Sin embargo, al atravesar terrenos susceptibles de peligrosidad adicional, se deben tener presentes otros criterios adicionales, que pueden afectar incluso a la filosofía de ventilación.

Puesto que típicamente un túnel en excavación solo tienen una salida, hay que tener bien presente que el personal deberá evacuar por zonas presumiblemente comprometidas en caso de incidente.

### **5.2.1. Presencia de gases peligrosos**

Tanto en minería como en obra subterránea es frecuente la presencia de gases peligrosos diluidos en el aire. Estos gases pueden ser tanto peligrosos para la salud por ser nocivos, como problemáticos por poner en riesgo la integridad de la obra al ser explosivos bajo determinadas circunstancias. A continuación se resumen las posibles fuentes de gases peligrosos, centrándose principalmente en el metano.

Una vez identificadas las fuentes de gas, es importante conocer el comportamiento del gas para prevenir efectos adversos, así como considerar los riesgos potenciales a los que habrá que hacer frente en caso de incrementos en las concentraciones de ciertos gases. Tan importante es conocer la fuente del peligro potencial, como saber identificar las medidas más adecuadas a tomar.



Algunos gases peligrosos que se pueden encontrar son el metano (grisú), hidrógeno (también explosivo) o gases derivados del azufre (altamente nocivos/venenosos). Al ser el más común nos centraremos en el metano, aunque las mismas reglas se pueden aplicar a los demás gases.

### 5.2.2. Fuentes de gas

En un túnel o mina, las emisiones de gases tipo metano, procedentes del macizo rocoso, provienen principalmente de tres fuentes:

- Las labores de arranque. La producción de gas es proporcional a la cantidad de material extraído, sobre todo cerca o en capas de carbón.
- Emisiones a través del suelo y el techo. La emisión es proporcional al tiempo y a otros factores.
- Emisiones en cintas transportadoras o acumulaciones de material. La producción es lineal a lo largo de la cinta, y mayor en la zona de descarga o en aquellos lugares en donde el carbón sea manipulado.

### 5.2.3. Estratificación del gas (gas layering)

Habitualmente las bolsas o acumulaciones de metano y otros gases procedentes del macizo rocoso se forman a partir de un solo foco de gran pureza. Una vez que estos gases se mezclan con la corriente de aire, no es posible que el metano (ni ningún otro gas) vuelva a estratificarse. Si la atmósfera no se comportase de esta forma, debido a la diferencia de densidades de los gases que la forman, ésta sería una sucesión de capas de gases en vez de una mezcla “homogénea”.

Como el metano es más ligero que el aire, tienen tendencia a acumularse en el techo o en los puntos elevados, llenando los huecos que pueda haber en el techo. Al igual que el agua fluye cuesta abajo en el suelo, el metano se mueve hacia arriba en el techo.

Una vez mezclado con el aire, el metano no se estratificará. Sin embargo, hay cierta tensión superficial en la capa más alta de aire que tiende a reducir la dilución normal de metano en el aire cuando el metano es liberado desde el techo.

Por lo tanto, el metano puede formar una fina capa a lo largo de techo, quizás de solo un centímetro de espesor, y puede desplazarse en contra de la corriente de aire debido a su flotabilidad. La estratificación puede conducir a acumulaciones de gas en lugares inesperados y la ignición puede resultar entonces en una explosión capaz de transmitirse a largas distancias siguiendo la combustión de metano a lo largo del techo.

Cuando se mide la concentración de gas en el aire, y se comprueba que está por debajo de la concentración explosiva, es importante recordar que en algún punto entre la fuente y el lugar de medición la concentración de metano en el aire ha pasado por el rango de explosividad.

Es importante recordar que aunque en la parte central de las secciones la velocidad de la corriente de aire sea elevada, la velocidad en el perímetro de la galería es cero o casi cero, por lo que la ausencia de turbulencias también favorece la acumulación de metano. Por lo tanto, flujos altamente turbulentos mezclan mejor el metano con el aire y lo transportan fuera del túnel.

La mejor forma de evitar la estratificación de los gases emitidos por el macizo rocoso es mantener elevadas velocidades de aire en las zonas en las que los gases se pueden acumular. Aquellas áreas donde la velocidad del aire es baja (por ejemplo cerca de obstrucciones, o en zonas en fondo de saco) son particularmente susceptibles a la acumulación de gas, así que es en esas zonas donde se debe comprobar la presencia de gases.

#### **5.2.4. Dilución de capas estratificadas de gas**

La eliminación o dilución de las acumulaciones de metano en el techo se puede conseguir mediante:

- Instalación de tabiques de ventilación. A menudo esto se hace aguas arriba de la fuente de metano de modo que se aumenta la velocidad del viento en la zona y se obliga a que una mayor cantidad de aire circule cerca del techo, lo que dispersa y diluye el metano rápidamente. Este tabique cierra las secciones media e inferior de la galería. Puede ser necesario la instalación de otros tabiques posteriormente para devolver la corriente de aire a un régimen convencional.
- Efecto Venturi: se pueden instalar dispositivos ATEX que inyecten aire en el fondo de la acumulación, de forma que se disperse la concentración de gases. Estos equipos presentan la ventaja de afectar a la corriente de aire principal y a la circulación por la galería en menor medida que la instalación de tabiques.
- Incrementar el caudal local. Si esto se puede conseguir, es la mejor manera de prevenir acumulaciones y diluir los niveles de metano.
- Alteración de los circuitos de drenaje del gas: si esto fuera viable mediante el recubrimiento de ciertas secciones, es obvio que reducir las emisiones de gas reduciría las acumulaciones y concentraciones de los mismos.

En caso de que el gas sea más denso que el aire, la acumulación tendría lugar en el suelo, pero los principios básicos de actuación serían los mismos.

### **5.2.5. Desprendimientos instantáneos (sudden outburst)**

Una erupción repentina es la emisión brusca de gases con potencial peligroso debido al desprendimiento o fractura de la roca que lo contenía (carbón, pizarras, etc.). Una erupción no es una explosión, aunque si el gas es inflamable es posible que pueda originarse una atmósfera explosiva e incluso una deflagración.

Las erupciones son mucho más comunes en minería del carbón que en minas metálicas y en túneles. Sin embargo, algunos de los accidentes con múltiples muertos debido a erupciones se han dado en minas metálicas, donde también pueden tener lugar erupciones de vapor.

Algunos de los mecanismos que contribuyen a estas erupciones son la composición de la roca o estratos, la profundidad de la cobertera, el contenido y composición del gas, la porosidad, la permeabilidad, la geología local, tensiones locales, ratios de avance, etc.

Peligros derivados de las erupciones son: proyección de materiales, mezclas tóxicas, asfixiantes o inflamables de gases, desprendimientos, alteraciones en los circuitos de ventilación, etc.

Para prevenir las erupciones se pueden utilizar mapas geológicos de la zona, perforación de barrenos largos para drenar gases, monitorización micro sísmica, cambios en las emisiones del terreno, etc.

### **5.2.6. Incendios y explosiones**

Tanto en minería como en la ejecución de un túnel, más aún si se están atravesando zonas de alta peligrosidad, se pueden dar varias situaciones desfavorables en función del tipo y concentración de gases presentes.

La emisión térmica o calentamiento ocurre cuando los materiales se oxidan exotérmicamente, pero sin generar llamas. Un incendio ocurre cuando hay llamas.

Una deflagración tiene lugar cuando se produce una combustión rápida de materiales, pero sin onda de sobrepresión.

Una explosión ocurre cuando hay una combustión rápida acompañada de una onda de presión significativa. Una deflagración puede preceder a una explosión si hay una distancia suficiente para que el frente de llamas se acelere, generando de esta forma la sobrepresión.

Una detonación es una explosión en la que el frente de onda es supersónico.

En general, si un gas inflamable está limitado a una porción relativamente pequeña de la galería o no confinado, y la concentración del mismo es la “adecuada”, puede tener lugar la ignición del mismo e incluso la deflagración. Si además el gas ocupa toda la galería, podría tener lugar una explosión siempre y cuando se produzca una fuente de ignición, como una chispa, un cortocircuito, etc.

El potencial para que una explosión se convierta en detonación depende principalmente de la velocidad del frente de llamas, que es función de la concentración del gas. En la siguiente tabla se muestran los límites inferior y superior de detonabilidad (LDL y UDL por sus siglas en inglés) para el hidrógeno y el metano, y las velocidades máximas de combustión.

Límites de detonabilidad (% de gas en el aire)	Hidrógeno	Metano
LDL	11-18	6.3
UDL	59	13.5
Velocidad máxima de combustión, m/s	3.46	0.43
Concentración del gas para la velocidad máxima, %	42.5	10.2

*Tabla 1. Límites de detonabilidad para el Hidrógeno y el Metano*

Las siguientes definiciones varían entre países y jurisdicciones:

- El punto de ignición de un material es la temperatura más baja a la que el material, cuando se prueba en unas condiciones determinadas, libera vapores a un ritmo suficiente para producir una atmosfera explosiva junto con el aire que está en contacto directo con el material.
- Un material inflamable es aquel que tiene un punto de ignición inferior a 610°C.
- Un material altamente inflamable es aquel que tiene un punto de ignición inferior a 23°C.
- Un material no inflamable es aquel que tiene un punto de ignición superior a 610°C.
- Un material resistente al fuego solo arderá en contacto directo con una fuente de ignición, y se apagará una vez retirada ésta.

### **5.2.7. Efectos de una explosión**

Los peligros de una explosión en el ámbito subterráneo, muy a menudo en áreas confinadas, incluyen:

- Asfixia debido a bajas concentraciones de oxígeno después de la combustión asociada a la explosión.
- Quemaduras externas o internas debidas al frente de llamas y/o a gases calientes.
- Sobrepresiones y rachas bruscas de viento que pueden dañar equipos.

- Fuegos residuales con todas sus posibles consecuencias.
- Vapores tóxicos que pueden resultar en envenenamientos, que pueden ser letales en cuestión de segundos si las concentraciones de algunos gases (CO, HCN) son elevadas.
- Heridas y lesiones físicas debidas a materiales proyectados por la explosión, o a choque bruscos contra superficies debido al empuje de la onda de presión.
- Daños o debilitamiento de los estratos.
- Daños en los controles y los equipos de ventilación, o de los equipos de vigilancia y control
- Alteración de los circuitos de ventilación.
- Fracaso de los protocolos de evacuación.
- Dificultades en el rescate de personal o en la recuperación de áreas afectadas.

### **5.2.8. Factores que afectan a la explosividad**

Puesto que el mayor riesgo asociado a atravesar capas de carbón y labores mineras asociadas a este sector es una explosión repentina derivada de una alta concentración de gas, los factores que contribuyen a aumentar o reducir esta peligrosidad son:

#### **Fuentes y temperaturas de ignición:**

La temperatura a la que un gas inflamable arde depende del modo de ignición, la concentración del gas y la temperatura de la fuente de ignición. Además de por chispas eléctricas, las dos fuentes de ignición más comunes son las partículas incandescentes y los calentamientos friccionales.

Una partícula incandescente es un trozo de metal que se quema en el aire; ejemplos típicos de esto son partículas de los útiles de corte cuando se trabaja en rocas duras o restos de los detonadores durante las voladuras. Los calentamientos friccionales ocurren estrictamente por rozamiento entre elementos; por ejemplo, en cintas transportadoras.

#### **Impacto de la temperatura y la presión en los límites de explosividad.**

La disminución de la presión reduce ligeramente la explosividad de la mezcla de gases, mientras que el aumento de la temperatura incrementa considerablemente la explosividad de la mezcla.

#### **Influencia de la propagación en la explosividad.**

Los límites de explosividad de algunos gases dependen en gran medida de la dirección de propagación. Por ejemplo, para el hidrógeno, el LEL para una llama propagándose hacia

arriba es del 4%, mientras que si la llama se propaga hacia abajo dicho valor está entre el 9 y el 10%.

En el caso del confinamiento, en términos generales, al reducir la sección, la franja de concentraciones explosivas se estrecha ligeramente. Además también influye sustancialmente el punto en el que se inicie la ignición, o la orientación del conducto. En general, los límites de inflamabilidad se estrechan a medida que la pendiente del conducto se acentúa y la ignición se produce en la parte alta propagándose hacia abajo.

### **Confinamiento**

Si una explosión tiene lugar, a mayor grado de confinamiento, mayores daños generará la explosión. De este modo, si hay varias galerías conectadas en paralelo en la zona de la explosión, el impacto será menor que si solo hubiese una sola galería hasta la zona de explosión. Siguiendo este razonamiento, una explosión en un fondo de saco será más dañina que una explosión con múltiples vías de expansión. Del mismo modo, la presencia de obstáculos en las galerías puede acrecentar los daños de una posible explosión.

### **5.2.9. Polvo en suspensión**

De forma semejante a lo que ocurre con los gases, la presencia de polvo en suspensión, sobretodo de granulometrías finas y sustancias inflamables o combustibles, puede suponer una amenaza para la seguridad en espacios confinados, tanto por su peligrosidad intrínseca como por el riesgo de catalizar otras reacciones originadas por gases peligrosos u otro tipo de emergencias.

Las explosiones de polvo han causado numerosos accidentes con fallecidos tanto en minas de carbón como en minas metálicas, pero también son relativamente comunes en silos de cereales y plantas de procesamiento de alimentos. Una explosión de polvo puede ocurrir cuando se presentan las siguientes condiciones:

- Un combustible sólido con granulometrías muy finas se dispersa en un medio oxidante, frecuentemente el aire.
- La concentración del polvo en suspensión está dentro del rango explosivo.
- Hay presencia de una fuerte de ignición externa con suficiente energía como para inicial la combustión de la mezcla.
- La reacción tiene lugar en un espacio confinado.

Las explosiones de polvo, tanto en minas de carbón, como en minas convencionales o en túneles, pueden ser muy destructivas.

### 5.3. Sistema de ventilación

El sistema de ventilación a aplicar en la excavación de un túnel un túnel es bien sencillo, consistiendo típicamente en la instalación de un ventilador en la boca del túnel, que sopla aire fresco al frente a través de una tubería.

Sin embargo, cuando el túnel cruza zonas de mayor riesgo, bien sea porque atraviesa capas de carbón o rocas de características semejantes, o porque atraviesa explotaciones mineras, los condicionantes de diseño varían.

En primer lugar los requisitos de velocidad mínima de retorno, en función de la normativa aplicable, pueden hasta cuadruplicarse.

En segundo lugar, hay que tener en cuenta las posibles sobreexcavaciones derivadas de terrenos de menor resistencia o galerías preexistentes. En estos casos se deben evaluar medidas puntuales para garantizar la correcta ventilación de estas zonas.

En tercer lugar, se debe considerar la posibilidad de tener presencia de gases peligrosos en el retorno de ventilación, con todo lo que esto conlleva.

Dependiendo de la situación, se requerirán unas u otras acciones. En casos sencillos, donde el problema es puntual, se puede solucionar simplemente aumentando el caudal de aire para garantizar las condiciones de seguridad. Esta actuación puede servir en túneles pequeños, con poca presencia de sustancias peligrosas; o cuando el aporte es muy puntual en un sector determinado del túnel.

Sin embargo, si la situación se prolonga en el tiempo, o se agrava en un sector concreto, puede requerirse un cambio en la filosofía de ventilación, pasando a un sistema aspirante para una parte o todo el túnel, capturando los gases y conduciéndolos a través de la tubería hasta el exterior. Esta configuración, que es útil cuando la fuente de gases se encuentra en el frente, permite mantener el túnel en aire fresco, penalizando tanto en la tubería, como en el propio ventilador, que deberá ser de mayor capacidad y características especiales para operar de forma segura mientras extrae gases inflamables.

Por último, si el aporte se produce todo a lo largo del túnel, y no es posible impermeabilizarlo, las condiciones no solo afectan a la ventilación, sino a todos los equipos presentes en la obra, que debería ser considerada como una mina de carbón, actuando en consecuencia con su índice de peligrosidad.

En general, y a modo de resumen, en lo que se refiere a la ventilación de la obra, la presencia de gases peligrosos en primer lugar requerirá de equipos de mayor capacidad. Si la situación se agravase o fuese un constante en toda la obra, requerirá de equipos especiales.

Por último, si la distribución de la obra lo permitiese, por ejemplo, disponiendo de pozos de ventilación intermedios, se podrían buscar sistemas mixtos soplantes y aspirantes que permitan extraer los gases peligrosos lo antes posible sin comprometer la ventilación del resto del túnel.

En función del escenario considerado, el sistema de ventilación varía. En los anexos 3, 4 y 5 se puede ver el resultado de tres ejemplos comparativos para un mismo túnel ideal, considerando normativa británica.

	Caudal Requerido	Caudal Ventilador	Presión Ventilador	Diámetro Tubería	Potencia Instalada
Túnel en condiciones estándar	20 m <sup>3</sup> /s	24.55 m <sup>3</sup> /s	988 Pa	2000 mm	45 kW
Túnel con presencia de CH <sub>4</sub>	80 m <sup>3</sup> /s	93.01 m <sup>3</sup> /s	4442 Pa	2500 mm	630 kW
Túnel con presencia de CH <sub>4</sub> y ventilación aspirante	80 m <sup>3</sup> /s	103.37 m <sup>3</sup> /s	5328 Pa	3000 mm	900 kW

Tabla 2. Comparativa ejemplos ventilación túnel

Como se puede ver en la tabla resumen, la cuadruplicar la velocidad de retorno de 0.5 a 2 m/s según indica la normativa BS-6164:2001, el caudal requerido se dispara, y con el tanto la presión requerida, como el diámetro de la tubería y la potencia instalada.

Todo va enlazado, un mayor caudal requiere una mayor tubería, que será más susceptible de daños durante el desarrollo de la obra. Además, como la tubería tiene un límite permitido, el diámetro y la potencia de los equipos instalados también aumenta, lo que se traduce tanto en una mayor inversión inicial como en un mayor coste operativo. No olvidemos que durante la ejecución de un túnel el sistema de ventilación deberá estar operativo en todo momento, y aunque la carga sea variable, alcanzando el máximo al final de la obra, esto es una teoría que múltiples obras han demostrado incorrecta, bien sea por imprevistos, o por daños en la tubería de ventilación.





Más adelante veremos la segunda parte de las peculiaridades de ejecutar túneles en zonas con presencia de sustancias peligrosas, caso típico de los terrenos del carbonífero donde abundan las capas de carbón y los depósitos de gas en rocas sedimentarias.

También en el apartado 6 de este proyecto se describe un caso práctico real sobre el análisis para el proyecto de ejecución de una obra en estas condiciones.

## 5.4. Seguridad

En toda obra o explotación minera la seguridad es un aspecto crítico. Uno de los puntos más importantes es que los trabajadores regresen a casa con sus familias cada día. Y cuando a un trabajo ya peligroso le añades las particularidades que aportan rocas como el carbón, la prevención debe tomar el mando para maximizar las medidas de seguridad.

Desde el punto de vista de la seguridad, hay tres escalones:

- **Monitorización:** Consisten en vigilar parámetros clave para prevenir posibles riesgos
- **Medidas paliativas:** Consisten en mitigar o sectorizar los efectos de un posible desastre.
- **Sistemas de protección:** Consisten en implementar sistemas o zonas seguras

Desde la operatividad de una obra, lo arriba indicado funciona en cierta medida en cascada, estando el monitorización enfocado a prevenir la emergencia, las medidas paliativas a contenerla, y los sistemas de protección a proteger a los trabajadores.

Sin embargo, en todo momento se debe concienciar a los trabajadores de que nunca están a salvo de un imprevisto, y de que la primera medida de seguridad son ellos mismos a través de un trabajo realizado con las condiciones de seguridad adecuadas.

### 5.4.1. Monitorización

Debido a la naturaleza de este tipo de obras, trabajando en ambientes potencialmente peligrosos, se hace necesario un control exhaustivo de la ventilación. Para ello se encuentra disponibles en el mercado una amplia gama de sensores que permiten monitorear uno o varios parámetros críticos, y que por diseño y certificación, son aptos para trabajar en zonas peligrosas. A continuación se detallan algunos de los principales parámetros a monitorizar:

#### **Velocidad de aire - Anemómetros**

Los anemómetros se instalarán para mantener un control continuo de la velocidad del aire. Se recomienda instalarlos en zonas críticas, típicamente cerca del frente, y en zonas con una sección mayor, así como después de ramales.

La principal función de los anemómetros será controlar que la velocidad de retorno sea adecuada a los requerimientos. También servirán para monitorear el estado de la tubería, ya que cuanto peor se encuentre esta, menos aire llegará al frente.

### **Concentración de CH<sub>4</sub> - Metanómetros**

Debido a la posible presencia de gases explosivos en el túnel, recomienda la instalación de sensores de CH<sub>4</sub> que no solo detecten la presencia, sino también midan la concentración a fin de poder analizar patrones.

Estos equipos monitorearán la concentración de metano en el aire, alertando al personal si la concentración supera los límites de seguridad, permitiéndoles evacuar el área antes de que se produzca un accidente.

### **Medidores de presión**

Debido a las longitudes de la tubería que pueden llegar a alcanzarse, y a la posible presencia de un ambiente ATEX, controlar el correcto funcionamiento del sistema de ventilación es un aspecto crítico para este proyecto. Por este motivo, además de los anemómetros, también se recomienda instalar medidores de presión, para controlar la presión y las fugas de la tubería, detectando tan pronto como sea posible las caídas bruscas de presión para repararlas lo más rápido posible.

## **5.4.2. Prevención**

Toda vez que el monitorización puede ser efectivo, y sin duda ayudar a la seguridad en obra, lo cierto es que vigilar puede no ser suficiente, requiriéndose medidas adicionales para prevenir o limitar los efectos de una posible emergencia.

Si bien el riesgo de que un accidente o fuente de ignición genere una reacción en cadena entre el metano y el polvo de carbón en suspensión es algo a tener muy en cuenta por las consecuencias que puede acarrear, hasta el momento no se ha encontrado una forma de evitar estos riesgos. Desde el punto de vista del metano, sí que se tiene un control más preciso de los factores que pueden desencadenar la tragedia para minimizarlos (evitar fuentes de ignición, mantener la concentración fuera de los rangos de máxima peligrosidad...), pero aún con estos controles siguen produciéndose accidentes relacionados con súbitas liberaciones de metano y otros causas derivadas de la propia actividad.

Sin embargo, en el caso de la presencia de polvo, la única medida que evitaría este tipo de situaciones sería la ausencia de polvo, que a efectos prácticos no es factible. Por este motivo, en lo que se refiere a control del polvo, las medidas se centran en evitar la propagación de la explosión para contener el área afectada en una zona del menor tamaño posible, protegiendo de este modo el resto de las instalaciones y reduciendo el efecto de una reacción en cadena.

## **Control de polvo**

El control del polvo en minería y obra civil se consigue mediante uno o varios de los siguientes métodos:

**Prevención:** algunos métodos para prevenir la generación de polvo son la utilización de aspersores de agua (tanto comunes como nebulizadores), la perforación con inyección de agua o lodos, el riego de las pilas de acopio de materiales para minimizar los efectos del viento, o regar las pistas de circulación.

**Captura:** La captura de polvo se puede conseguir mediante el uso de filtros (tanto húmedos como secos). Para su correcto funcionamiento, los filtros deben estar bien conservados, con el adecuado mantenimiento y limpieza, para evitar un aumento excesivo en la pérdida de carga que generan, y que podría afectar o anular el sistema de ventilación.

**Extracción:** extraer el polvo es la mejor estrategia en aquellas zonas donde se generan grandes cantidades de polvo y la captura o la supresión no son suficientemente efectivas o posibles. En estos casos la dilución sería inefectiva y extremadamente costosa. La mejor estrategia es diseñar los sistemas para que el polvo vaya directamente a la extracción. Una forma de extracción es utilizar el efecto Venturi para alejar el polvo del operador y dirigirlo hacia la zona de captura de polvo.

**Dilución:** el polvo que se escapa es habitualmente diluido con aire fresco para asegurar que la concentración de polvo en el ambiente se encuentra dentro de los límites permisibles. Esta estrategia es a menudo usada, por ejemplo, en rampas donde el aire debe ser reusado (no recirculado) tras haber viajado a lo largo de la rampa.

**Equipo de protección personal:** esto se refiere al uso de mascarillas para reducir el contenido de polvo del aire que llega a los pulmones. Todas las mascarillas son incómodas, especialmente si se tienen que utilizar durante largos periodos de tiempo. Deben ser ligeras, fáciles de poner, ajustar bien y ser capaces de soportar las peculiaridades del ambiente subterráneo. No necesitan ser altamente eficientes, basta con que sellen bien y limiten el contenido en polvo del aire respirado a los límites permitidos. El casco con respirador puede ser una alternativa a las mascarillas en muchas circunstancias.

## **Barreras de polvo inerte**

El polvo inerte es una caliza inerte pulverizada. Es importante resaltar que no inhibe las explosiones de metano, solo las de polvo de carbón.

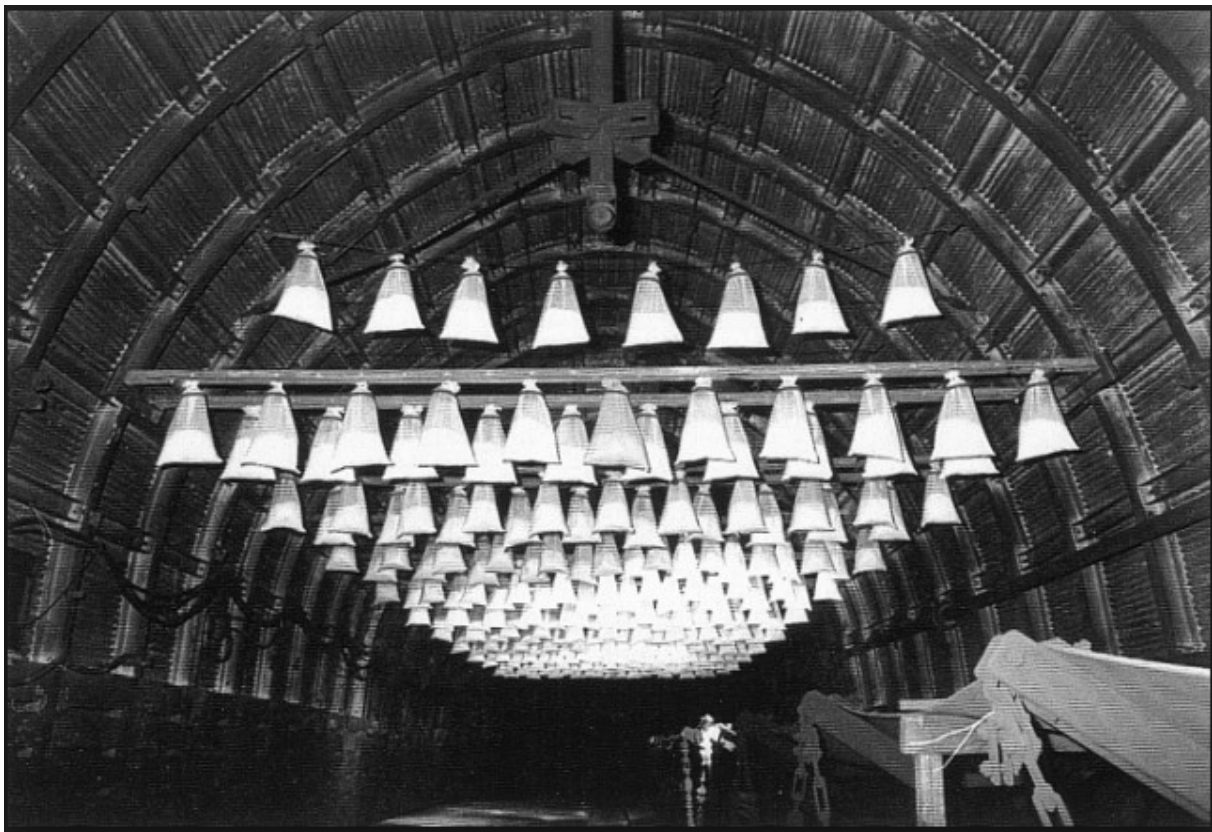
Las barreras de polvo inerte ralentizan la propagación de las llamas absorbiendo calor, y en concentraciones adecuadas pueden hacer que el polvo de carbón sea no inflamable, y por tanto no explosivo.

Las barreras de polvo inerte son esencialmente un método para prevenir la propagación de una explosión una vez se ha producido, tratando de contenerla en un área determinada.

El mejor momento para mezclar el polvo inerte con el polvo de carbón es mientras se está produciendo y aún se encuentra suspendido en el aire. Los espolvoreadores están diseñados para conseguir la mejor dispersión del polvo inerte en el polvo de carbón.

La efectividad de las barreras de polvo se basa en que la onda de choque asociada a la explosión viaja por delante del frente de llamas. La barrera se diseña para que libere su contenido al paso de la onda de choque, generando una densa nube de polvo inerte que extingue el frente de llamas cuando este intenta atravesar dicha barrera y evita que la explosión continúe propagándose.

Sin embargo, este tipo de barreras requiere unas condiciones mínimas de activación para ser efectivas. Si la explosión de polvo de carbón se comportase como una deflagración, que no permite que haya el suficiente espacio / tiempo entre la onda de choque y el frente de llamas, las barreras de polvo no se podrán desplegar adecuadamente.



*Ilustración 5. Ejemplo de posicionamiento de barrera de polvo inerte. Cortesía de Engineer Live.*

Las barreras de polvo deben ser fácilmente activables por la onda de choque y deben generar una densa nube de polvo inerte. A menudo son necesarias sucesivas filas de estos elementos

para alcanzar los objetivos deseados. Los siguientes factores deben tenerse en cuenta para el correcto diseño y operatividad de estas barreras:

- Ubicación
- Tamaño
- Cantidad de elementos por estantería y número de estanterías sucesivas
- Tipo de barrera
- Requerimientos de inspección y mantenimientos.

La experiencia indica que algunos factores clave son:

- Cantidad total de polvo inerte requerido
- Estabilidad de los dispositivos de anclaje
- Ubicación de los elementos para que no queden zonas desprotegidas
- La ubicación de la barrera no debe estar ni muy lejos ni muy cerca de la fuente de la explosión

### **Barreras de agua**

Las barreras de agua son barreras estáticas con muchas similitudes a las anteriormente mencionadas barreras de polvo inerte. En este caso la onda de presión debe destrozar los recipientes y repartir el agua por la sección. El efecto refrigerante del agua mientras se vaporiza, junto con la disminución de la concentración de oxígeno en la zona (desplazado por el vapor de agua) ayuda a sofocar el frente de llama.

Los recipientes de agua habitualmente son de PVC o poliestireno expandido, sujetos en soportes rígidos y colocados en filas en zonas estratégicas, como codos o ángulos cerrados. Además, estos recipientes tienen tapa para evitar contaminaciones o pérdidas por evaporación.

### **5.4.3. Protección**

Si bien las medidas de monitorización y prevención ciertamente pueden resultar útiles, la naturaleza de la emergencia, o la tipología de la obra pueden hacer inviable la evacuación del personal de forma segura o en tiempo y forma.



*Ilustración 6. Refugio de seguridad. Cortesía de Strata Worlwide*

Por este motivo es cada vez más frecuente que en determinados sectores de las obras, y sobre todo cerca de los puntos donde más trabajadores realizan sus labores, se instalen refugios diseñados para proteger, acomodar, y resguardar a los trabajadores durante cierto tiempo. Estos refugios, además de ser de ubicación conocida cuenta con soporte vital básico, alimentos, bebida, y una serie de opcionales que permiten adaptarlos a casi cualquier ambiente.

Estos dispositivos se demuestran de especial utilidad en los túneles, cuando solo hay una salida y la emergencia se sitúa entre los trabajadores y la zona de evacuación.

## 6. Caso práctico

### 6.1. Presentación de caso

A continuación se describe un caso práctico surgido del estudio en detalle de un túnel auxiliar para la ampliación de la red de gestión de aguas bajo una ciudad.



*Ilustración 7. Fotografía del túnel principal durante la instalación del equipamiento.*

En primer lugar se describirá brevemente la obra y la geología de la zona. Posteriormente, con los condicionantes que se presentan se revisará la geometría del túnel y la selección del sistema de avance. Una vez conocida la forma de ejecutar el túnel se evaluará la ventilación durante la ejecución del mismo. Por último se presentan las conclusiones.

### 6.2. Breve descripción de la obra

La obra consiste en la ejecución de un túnel auxiliar de apoyo para un túnel principal de más de 5 km de longitud que contribuirá a mejorar los servicios de canalización y distribución de aguas bajo la ciudad de Glasgow.

Este túnel se plantea como continuación al éxito obtenido con la excavación del túnel principal, a fin de mejorar los servicios de la ciudad.

Los principales retos que se manejan son mejorar lo aprendido y aplicado en la ejecución del túnel principal, reduciendo costes notablemente. Todo ello considerando que al tratarse de una infraestructura de mucha menor dimensión las prioridades, y el apoyo al proyecto son menores que las que tuvo la primera ejecución.

Del mismo modo, aunque más contenido en el espacio, el proyecto comparte desafíos, problemática y riesgos con su hermano mayor, ya que el subsuelo de esta ciudad se encuentra plagado de antiguas explotaciones de carbón abandonadas, con presencia de capas con alto contenido en metano y riesgo de presencia de galerías abandonadas, acumulaciones



localizadas de gas e incluso liberaciones repentinas que pueden condicionar el desarrollo de la obra y tener gran impacto en superficie.

### 6.3. Geología atravesada

Aunque la actividad geológica en Escocia se remonta al Precámbrico, y se prolongó hasta el holoceno, en lo que se refiere a este proyecto, el periodo más interesante es el carbonífero. La siguiente imagen muestra el mapa geológico general de la zona de Glasgow, donde se observa el predominio de los materiales del carbonífero (azul, violeta y gris).

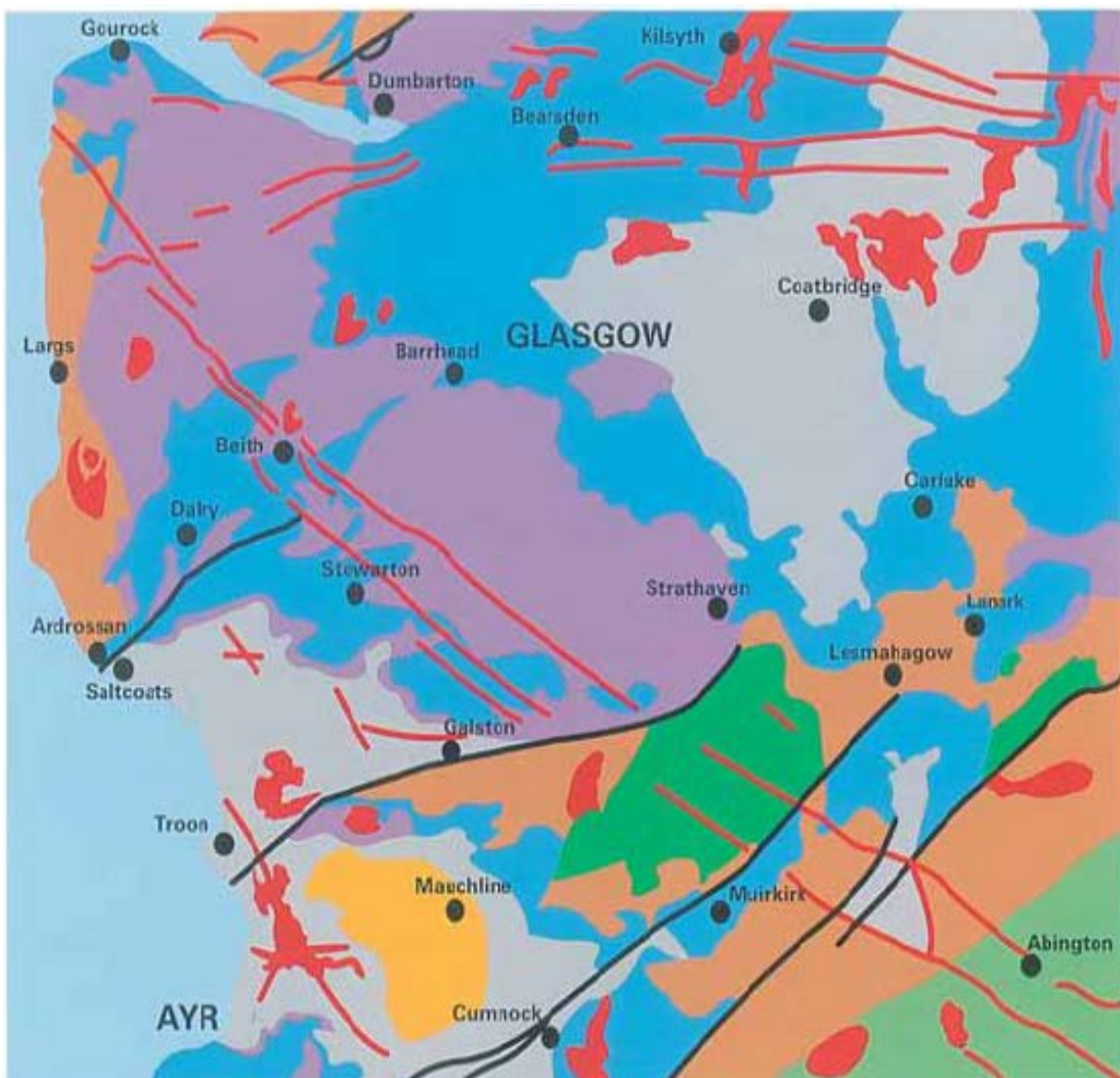


Ilustración 8. Mapa geológico de Glasgow y Ayrshire. *Glasgow and Ayrshire: a landscape fashioned by geology*, British Geological Survey & Scottish Natural Heritage, 2006

Durante el carbonífero (359–299 Ma) Escocia se encontraba cerca de latitudes ecuatoriales. En este periodo se produjeron varios cambios en el nivel del mar, lo que dio lugar a la

formación de depósitos de carbón, calizas e hidrocarburos no convencionales, que propiciaron el desarrollo de la industria durante el siglo XIX.

Centrándonos en la zona de interés, Glasgow se asienta sobre los restos fosilizados de un bosque del carbonífero. Es esta materia orgánica la que originó la actividad minera en la zona, y la que genera el metano objeto de preocupación durante la ejecución del túnel.

La siguiente figura muestra la ubicación de betas y capas de carbón en el subsuelo del área urbana de Glasgow. Parte de estas estructuras, afectadas por explotaciones mineras del siglo pasado, serán cruzadas por la tuneladora durante la excavación del túnel.

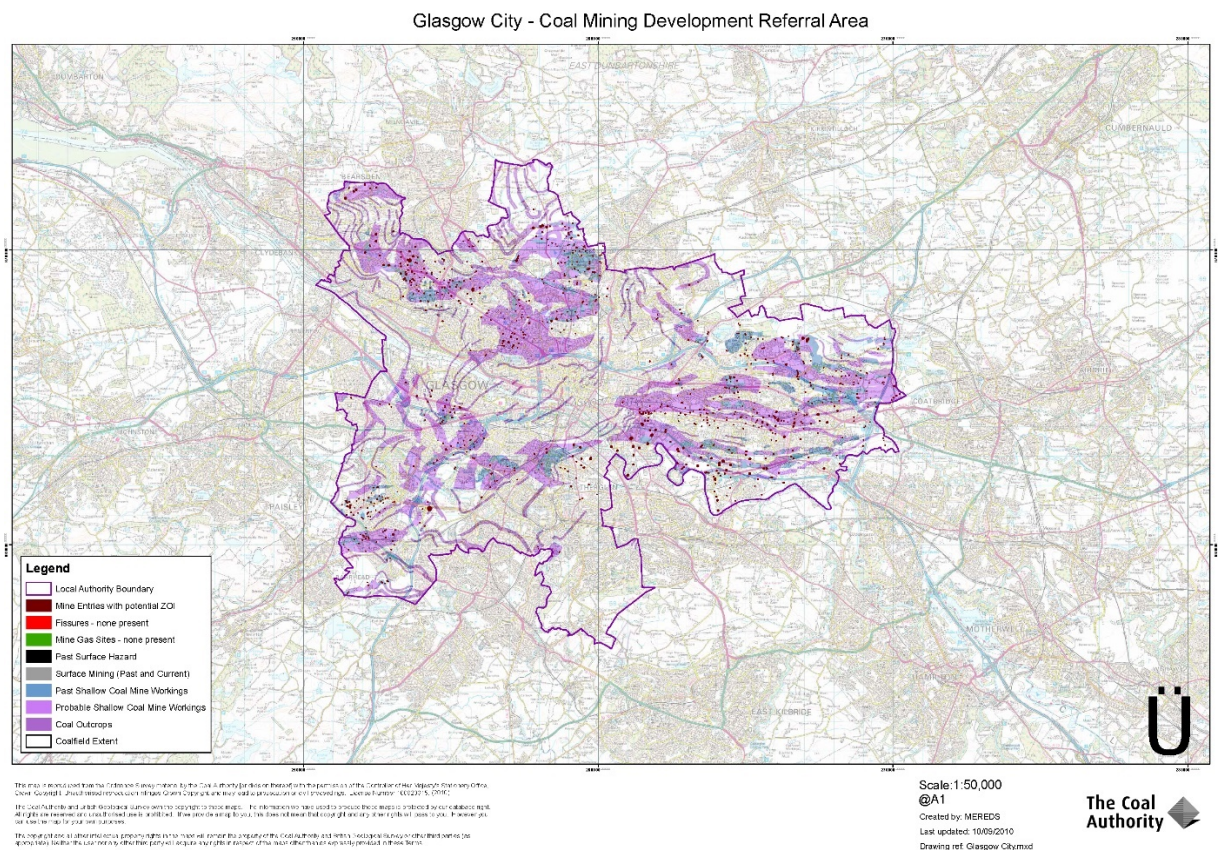


Ilustración 9. Mapa de yacimientos de carbón en el subsuelo de la ciudad de Glasgow.

## 6.4. Geometría del túnel

La geometría del túnel es sencilla. El túnel debe tener sección circular, con 2.5 metros de diámetro y 4.9 m<sup>2</sup> de sección de paso.

La longitud del túnel es de apenas 1050 metros, terminando en un enlace con el túnel principal.

La pendiente del túnel, aunque ligeramente descendente hacia el túnel principal, a efectos de este caso práctico no se considerará por no ser representativa.

## 6.5. Selección del sistema de avance

Para la selección del sistema de avance se evalúan varias opciones.

La perforación y voladura se ha descartado por los condicionantes adicionales que añade a una obra ya de por sí compleja. Al tratarse de una infraestructura a ejecutar en terrenos débiles, minados, con posible presencia de sustancias peligrosas (metano, polvo de carbón...) se requerirá el uso de explosivos específicos aptos para estas condiciones, y al transcurrir bajo una zona urbana tampoco se quiere generar daños a las propiedades en superficie ni discordia con los vecinos.

La utilización de medios mecánicos tradicionales se descarta por la tipología y sección del túnel, muy reducida. El análisis de riesgos también desaconseja este método al haber un elevado riesgo de desprendimientos, además del riesgo de explosión en caso de fuga de metano al encontrarse vehículos con motor de combustión en el interior de la obra.

Por último, no queda más remedio que regresar a la opción utilizada en el túnel principal, una TBM. Este método permite simultanear el avance con el sostenimiento, contribuyendo a conservar la estabilidad de la zona, y presenta un riesgo más reducido frente a las condiciones de la obra al disminuir los vehículos presentes en obra, y facilitar la posibilidad de proteger a los trabajadores, que principalmente se encontraran en el frente de trabajo.

Para la ejecución de los trabajos se empleará una TBM compacta de doble escudo, con back-up reducido para disminuir el impacto y facilitar su montaje y desmontaje al terminar la obra.

## 6.6. Definición del caudal

Para definir el caudal de aire fresco se deben tener en cuenta varios criterios, siendo los básicos:

- Velocidad de retorno de aire en el túnel
- Caudal de aire requerido por los trabajadores
- Disipación del calor producido por la maquina instalada en la TBM.

Al tratarse de una obra en Reino Unido, debe cumplirse lo indicado en la norma BS 6164. Esta norma plantea los siguientes mínimos a cumplir:

- 0.3 m<sup>3</sup>/min por persona.
- 3.0 m<sup>3</sup>/min por kW diesel funcionando.
- Velocidad mínima de retorno en el túnel: 0.5 m/s para evitar que se deposite polvo.
- Velocidad mínima de retorno en el túnel: 2.0 m/s para prevenir la estratificación del metano.

Además, la obra discurre por terrenos con posible presencia de metano y otros gases peligrosos en el ambiente, por lo que se debe evaluar este escenario para asegurarse que el sistema de ventilación quede dimensionado adecuadamente. Puesto que es imposible predecir la presencia y concentración de estos gases en obra, se decide acudir a la norma y dimensionar el sistema basándose en una velocidad de retorno elevada para evitar la concentración y acumulación de gases, e instalar detectores y un refugio en las inmediaciones de los trabajadores, para que en caso riesgo se resguarden hasta que las concentraciones de gases peligrosos disminuyan.

Para efectos comparativos, se calculan los caudales requeridos tanto para el caso en el que el túnel esté libre de gases, como para el caso de que hubiese presencia de metano. La siguiente tabla recoge los resultados. Los estudios completos se pueden ver en el anexo 6.

	Escenario sin presencia de metano	Escenario sin presencia de metano
Velocidad de retorno	2.5 m <sup>3</sup> /s (0.5 m/s)	10 m <sup>3</sup> /s (2 m/s)
Caudal requerido por los trabajadores	0.4 m <sup>3</sup> /s	0.4 m <sup>3</sup> /s
Caudal requerido para disipación de calor	3.5 m <sup>3</sup> /s	3.5 m <sup>3</sup> /s
Caudal total requerido	3.5 m <sup>3</sup> /s	9.8 m <sup>3</sup> /s

*Tabla 3. Caudal requerido*

Como se puede comprobar, en presencia de metano el caudal requerido es mucho más elevado. A continuación veremos el impacto de este incremento sobre el equipamiento requerido.

### **6.7. Soluciones para la ventilación**

El sistema de ventilación para la ejecución de este túnel puede ejecutarse siguiendo varias configuraciones, que se analizan a continuación.

**Sistema de ventilación soplante.** El ventilador instalado en la boca del túnel inyectando aire fresco al frente a través de tubería lisa.

**Sistema de ventilación aspirante.** El ventilador instalado en la boca del túnel aspira y extrae aire contaminado del frente a través de tubería helicoidal reforzada.

**Sistema de ventilación mixto.** Se inyecta aire fresco por una tubería de ventilación y se extrae aire contaminado por otra manga.

La opción 3, debido a la geometría del túnel, queda descartada al no disponerse del espacio requerido para instalar 2 tuberías de ventilación simultáneamente.

Respecto a la tubería, se presentan los siguientes condicionantes sobre su diámetro. Diámetro óptimo requerido 700 mm. Por encima de ese diámetro se dificulta la circulación hasta el frente con el abastecimiento de materiales requeridos.

Los cálculos completos se pueden ver en el anexo 6, resumiéndose en la siguiente tabla. Se han calculado 3 escenarios:

- Escenario A: No se considera presencia de metano (rechazo por las autoridades por motivos de seguridad)
- Escenario B: Presencia de metano, ventilación soplante
- Escenario C: Presencia de metano, ventilación aspirante

	Caudal frente	Caudal ventilador	Presión total	Diámetro tubería	Potencia total instalada	Modelo ventilador
Escenario 1	3.5 m <sup>3</sup> /s	3.91 m <sup>3</sup> /s	1467 Pa	700 mm (SL)	11 kW	ZVN 1-6-11/2
Escenario 2	9.8 m <sup>3</sup> /s	10.82 m <sup>3</sup> /s	5268 Pa	800 mm (SL)	90 kW	2xZVN 1-9-45/2
Escenario 3	9.8 m <sup>3</sup> /s	13.54 m <sup>3</sup> /s	10508 Pa	900 mm (AR)	300 kW	4xZVN 1-9-75/2

*Tabla 4. Resumen cálculos de ventilación*

Como se comprueba en los resultados, la ventilación se complica a medida que aumenta la demanda de caudal. No es posible mantener los diámetros de tubería, y los equipos de ventilación requeridos van aumentando de tamaño y potencia a medida que se van restringiendo los condicionantes.

## 6.8. Conclusiones del caso práctico

Como se ha visto a lo largo del caso de estudio, la ejecución del túnel presenta desafíos. En primer lugar la geología y la geografía condicionan totalmente la forma de ejecutar el túnel.

Además, la posible presencia de metano supone un desafío particular ya que se requiere un sobredimensionamiento de los equipos respecto a los estándares para este tipo de túneles.

En base a los resultados, y a la normativa vigente, el escenario 1 se autodescarta al no cumplir con los requerimientos de las autoridades para estas situaciones, y el escenario 3 presenta complicaciones extremas tanto por el diámetro de la tubería, como por los equipos de ventilación requeridos, que se escapan tanto en tamaño como en potencia.

Por lo tanto, por descarte, solo queda una opción, ventilación soplante con caudal elevado. Este escenario presenta la problemática de extraer los gases por el propio túnel, lo que supondrá un riesgo adicional para toda la obra, que deberá mitigarse con medidas compensatorias como las comentadas anteriormente, a fin de sectorizar el túnel y contener o mitigar posibles emergencias.

## 7. Conclusiones

Algunos terrenos del Carbonífero presentan particularidades especiales (materiales combustibles, presencia de gases peligrosos...) que si bien en minería ya están asimilados, en obra civil a menudo significan un incremento notable en el riesgo de la obra.

La evolución de las necesidades de la sociedad, y el endurecimiento de normativas ha hecho que cada vez con mayor frecuencia la obra civil y la ejecución de túneles se encuentren ante mayores desafíos, siendo uno de los más difíciles la ejecución de obras subterráneas en cuencas carboníferas o a través de antiguas explotaciones mineras.

Estas condiciones especiales requieren a menudo medidas adicionales, maquinarias especiales, y en ocasiones una conceptualización totalmente diferente sobre cómo realizar los trabajos. Además, a la hora de realizar la excavación se requerirán medidas especiales, sistemas de ventilación más potentes, sistemas de monitorización en tiempo real e incluso refugios especiales para salvaguardar la vida de los trabajadores.

Realizar cualquier obra subterránea es una actividad peligrosa, si a esto se le suma terrenos alterados, presencia de sustancias peligrosas y riesgo de explosiones inesperadas, las precauciones han de ser máximas, revisando cada punto de acción desde varios ángulos para anticipar cualquier situación desfavorable.

La ejecución de estas obras especiales no podrá nunca realizarse con los mismos criterios con los que se realizan otras obras convencionales. Los profesionales deben estar especializados en los retos que se les presentarán. Se requerirán mejores equipamientos, mayor flexibilidad en la operación y en algunos casos maquinaria específica para desarrollar los trabajos con seguridad.

Aunque el progreso de la sociedad tiene un precio, y la ejecución de cualquier obra un presupuesto, la seguridad no debe ser objeto de recortes, sino una prioridad. La excavación de túneles en terrenos del Carbonífero presenta sobre todo un reto para la seguridad de los trabajadores, que como bien saben los que conocen la minería del carbón, deberán realizar su trabajo bajo la sombra de un riesgo incierto e inminente, tomando todas las precauciones posibles para prevenir o mitigar el accidente. La tecnología, desarrollada a menudo como reacción a un accidente, ha puesto medios al alcance, solo resta utilizarlos adecuadamente y seguir avanzando.

## 8. Bibliografía

### 8.1. Normativa

- British Standard, BS 6164 "Code of practice for safety in tunneling in the construction industry". Edición 2001.
- Swiss Standard, SIA 196 "Ventilation des chantiers souterrains". Edición 1998.

### 8.2. Material bibliográfico

- Albuerne, Jaime. (2010) Conferencias sobre ventilación de minas. Gijón.
- Idelchik, I.E. (2005) Handbook of hydraulic resistance. Jaico Publishing House, 3ª edición.

### 8.3. Artículos

- R. Rodríguez; C. Lombardía. Analysis of methane emissions in a tunnel excavated through Carboniferous strata based on underground coal mining experience. International Journal of Tunnelling and Underground Space Technology. 25 - 4, pp. 456 - 468. Elsevier, 01/07/2010. ISSN 0886-7798
- R. Rodríguez; C. Lombardía. La experiencia minera en la predicción del desprendimiento de metano de túneles excavados en terreno Carbonífero. En: Jornadas Técnicas Variante de Pajares, Eds. Pando, López y de la Rubia, ADIF y Universidad de Oviedo. pp. 105-114.
- Rodríguez R., Díaz-Aguado M.B., Lombardía C. Advantages of oversizing the ventilation system in case of large diameter tunnels excavated with TBM through Carboniferous strata. Proc. Of the Association Francaise des Tunnels et de l'Espace Souterraine AFTES International Congress, Lyon, France, october 2014.
- London Councils and the Greater London Authority. Noviembre 2006. "The control of dust and emissions from construction and demolition"
- Mine Safety operation Division, New South Wales, Department of Primary Industries. Diciembre 2001. "Guideline for coal dust explosion prevention and supervision"
- MinEx Health and Safety Council. Febrero 2010. "Guidelines for the ventilation of underground mines and tunnels"



- Cashdollar, Kenneth L. “Overview of dust explosibility characteristics”.
- Zou, D. H. (Steve); Panawalage S. Septiembre 2001. “Passive and Triggered Explosion Barriers in Underground Coal Mines”.
- von Glehn, F.H. and Bluhm, S.J. Diciembre 2000. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. "Practical aspects of the ventilation of high-speed developing tunnels in hot working environments"
- Blazek, Christopher. Marzo 2001. “The influence of moisture on the spontaneous combustion of coal”.





## **ANEXO 1: Ignición del metano, combustión y explosión (Caso particular)**

El metano arde a 650 °C, lo que significa que se necesita una fuente de calor importante para iniciar la combustión. Cualquier concentración de metano en el aire arderá en contacto con una llama. Sin embargo, si la concentración es baja, la energía liberada por una molécula es insuficiente para iniciar la reacción de la siguiente, por lo que la combustión solo continúa mientras que la fuente de ignición está presente. Sin embargo, si la concentración es suficientemente alta, el calor generado por la combustión inicial de las moléculas es suficiente para propagar la reacción. Si además dicha concentración se encuentra en el rango entre el 5 y el 14 %, la producción de calor es suficiente para generar una explosión. Si la concentración es demasiado alta, el metano desplaza al oxígeno, por lo que la combustión es más lenta, siendo incapaz de generar una explosión.

Para generar una explosión de metano, el metano debe acumularse en una zona sin ventilar o pobremente ventilada. Hay peligro de explosión en zonas selladas, abandonadas, etc., por lo que suele ser común monitorear los contenidos de gases de estas zonas, y en caso de volver a estar en activo, se suele evacuar la zona durante 48 horas después de identificar y de dar parte de la zona peligrosa.

Como datos de referencia de la peligrosidad del metano, 0,3 m<sup>3</sup> de metano mezclados adecuadamente con el aire, pueden producir una explosión equivalente a 4 kg de ANFO. Además, las explosiones de metano pueden dar lugar a explosiones de polvo, que se analizarán en el siguiente apartado.

## ANEXO 2: Explosiones de metano y polvo de carbón (Caso particular)

En una explosión de metano, la mezcla metano-aire se calienta rápidamente hasta aproximadamente 2000 °C. Este calentamiento conlleva la dilatación de la mezcla hasta un volumen 7 veces superior al inicial, lo que resulta en una onda de choque por delante del frente de llama.

Las explosiones de polvo normalmente tienen lugar después de que una explosión de metano haya removido grandes volúmenes de polvo muy fino dejándolo en suspensión. Sin embargo, el polvo de carbón se puede depositar en los conductos eléctricos en una sub-estación, transformador, celda de media tensión, o incluso en cables; un cortocircuito puede tener suficiente energía para dispersar el polvo en el aire y, simultáneamente, proporcionar una fuente de ignición suficientemente fuerte para iniciar la explosión del polvo de carbón.

El polvo muy fino (polvo de carbón menor de 240  $\mu\text{m}$ ) con una gran superficie de contacto puede arder e incluso ser explosivo. En ese caso, la explosión se retroalimenta a sí misma mientras que haya fuentes de polvo de carbón disponibles. Sin embargo, es posible que se origine una explosión de polvo de carbón sin presencia de metano si se forma la nube de polvo y hay presente una fuente de ignición. La concentración mínima de polvo para que se origine una explosión es 50 g/m<sup>3</sup>, y el rango de máxima explosividad oscila entre 150 y 350 g/m<sup>3</sup>.

La cantidad de polvo de carbón requerida para generar una explosión es muy pequeña; aproximadamente el espesor de una capa de papel sirve una superficie de 16 m<sup>2</sup>, y una pequeña explosión de metano sirve para desencadenar la explosión del polvo.

Habitualmente el metano es encendido por un sobrecalentamiento, una fuente de fricción o una chispa. La explosión continuará propagándose, normalmente incrementándose su violencia, hasta que se consuma todo el metano. En el frente de la llama habrá una mezcla de metano, carbón y roca en polvo formando una nube en el aire. Una vez que el metano se ha consumido, quedando concentraciones inferiores al 1%, cualquier propagación adicional de la llama dependerá de las propiedades del polvo y de la distribución de la mina, equipos, etc. Un factor importante es el grado de confinamiento de la explosión. Cuanto más se confina el frente de llamas, la presión aumenta más y se propaga con mayor fuerza.

Las explosiones tienden a propagarse en la dirección de la fuente de combustible, ya sea gas o polvo.

Galerías de menor sección o largas distancias si aportes de aire fresco tienden a dificultar el inicio de la explosión, pero una vez desencadenada, cualquier reducción en la sección de paso conllevará una explosión mucho más violenta. Por lo tanto, obstáculos a lo largo de las

labores conllevarán menores posibilidades de explosión, pero mayores daños si estas se producen.

La presencia de incluso pequeñas cantidades de metano (por debajo del límite de explosividad) en la corriente de aire aumenta considerablemente la explosividad de cualquier nube de polvo de carbón. Este metano podría ser parte de la propia corriente de aire, o dispersarse a partir de acumulaciones a lo largo del techo.

Una explosión de polvo de carbón viajando a lo largo de una galería puede dividirse en varias zonas:

- Por delante de la explosión, el aire está en calma.
- A medida que la explosión se desarrolla, el frente de onda se convierte en una onda de choque, similar a la generada por los aviones al sobrepasar la velocidad del sonido. Como viaja más rápido que el sonido, es imposible oírlo llegar. La velocidad de la onda de choque comienza aproximadamente a 360 m/s para explosiones débiles, y puede alcanzar los 700 m/s para las fuertes, pudiendo ser incluso mayores.
- La zona posterior a la onda de choque, por delante de la llama, experimenta turbulencias ciclónicas y el aire está lleno de polvo removido de todas las superficies expuestas. La concentración de polvo en el aire lo hace irrespirable. Las velocidades del viento varían entre 30 y 450 m/s en función de la fuerza de las explosiones. A esas velocidades nada está a salvo, vuelcan equipos pesados, se desplazan equipos con ruedas, las tuberías de ventilación se hacen trizas y pequeños objetos se convierten en proyectiles. Y todo esto ocurre en la oscuridad debido al elevado contenido en polvo. La distancia entre la onda de choque y el frente de llamas aumenta a medida que la explosión viaja más lejos, ya que la onda de choque es considerablemente más rápida que el frente de llama.

La llama viaja a una velocidad ligeramente superior a la del viento, pero muy inferior a la de la onda de choque, lo que significa que se desplaza en la nube de polvo en vez de en sus propios productos de combustión. Las velocidades se encuentran en el rango de 30 a 530 m/s.

Tras la llama el aire está relativamente calmado, pero muy caliente. Rápidamente comenzará a enfriarse y contraerse, tendiendo a arrastrar gases de vuelta.

El polvo inerte mezclado con polvo de carbón tiene el efecto de diluir el combustible y frenar la propagación de la llama. Si hay suficiente material inerte presente en la nube de polvo, entonces la nube puede convertirse en no inflamable. Este es el principio de funcionamiento de las barreras de polvo inerte. Sin embargo, el uso de estas barreras presenta problemas para prevenir las explosiones de polvo de carbón. En primer lugar, debido a que el polvo de carbón es más ligero que el polvo inerte, es más fácil que se ponga en suspensión generando nubes potencialmente peligrosas. En segundo lugar, debido a los obstáculos que puede haber en la



galería, y al polvo de carbón depositado sobre ellos, puede ser que aunque el polvo inerte esté bien distribuido, los depósitos de polvo de carbón sean lo suficientemente grandes como para transmitir la explosión.

En zonas particularmente susceptibles de tener grandes concentraciones de polvo de carbón, por ejemplo puntos de carga, la contaminación puede extenderse a las zonas circundantes. Por tanto, estas ubicaciones requieren particular atención, instalando en ellas barreras adicionales, o retirando el polvo de carbón acumulado con frecuencia.

Tanto las barreras de polvo inerte como las de agua son métodos que tratan de inhibir la propagación de la explosión, mitigando o apagando el frente de llama.



### **ANEXO 3: Ejemplo túnel tradicional**

Para el ejemplo comparativo mencionado en el apartado 5.3 se ha considerado un túnel de 3 km de largo y 40 m<sup>2</sup> de sección. Como criterio básico de diseño se considera solamente la velocidad de retorno. Para esta comparativa no se han tenido en cuenta los métodos de explotación y la maquinaria empleada en el túnel. Los cálculos se han realizado con el software Zitron Vensec.



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	1 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 3 TUNEL CONDICIONES NORMALES		Cliente:	
<b>Equipo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Caudal</b>	<b>Presión</b>
ZVN 1-12-45/4	PK 0+000	24.55 m <sup>3</sup> /s	988.02 Pa
			<b>Instalación</b>
			Soplante

### Entrada datos

#### Parámetros generales de entrada

Longitud del túnel	3,000 m
Sección del túnel	40 m <sup>2</sup>
Caudal	20.00 m <sup>3</sup> /s
Densidad del aire	1.20 Kg/m <sup>3</sup>

#### Detalle de cálculo de caudales

#### Detalle de criterios

Criterio de velocidad mínima	20.00 m <sup>3</sup> /s
------------------------------	-------------------------

#### Criterio de velocidad mínima

Sección del túnel	40 m <sup>2</sup>
Velocidad	0.5 m/s
Caudal	20.00 m <sup>3</sup> /s
Criterio adoptado	BS-6164:2001 Code of practice for safety in tunneling in the construction industry. Para tuneles con polvo.

#### Características de la tubería

#### Soplante

	Ubicación	Longitud	Diámetro	Fugas	Resistencia	Tipo
Ventilador	PK 0+000		1,200 mm			
Pieza de adaptación	PK 0+000	<i>transición de 1,200 mm Ø a 2,000 mm Ø</i>				
Tubería	PK 0+000 - PK 3+000	3,000 m	2,000 mm	10 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.018	

#### Parámetros de trabajo de los ventiladores

#### Instalación soplante

Equipo	Ubicación	Caudal	Presión	Potencia	Velocidad
ZVN 1-12-45/4	PK 0+000	24.55 m <sup>3</sup> /s	988.02 Pa	45 kW	1,500 rpm

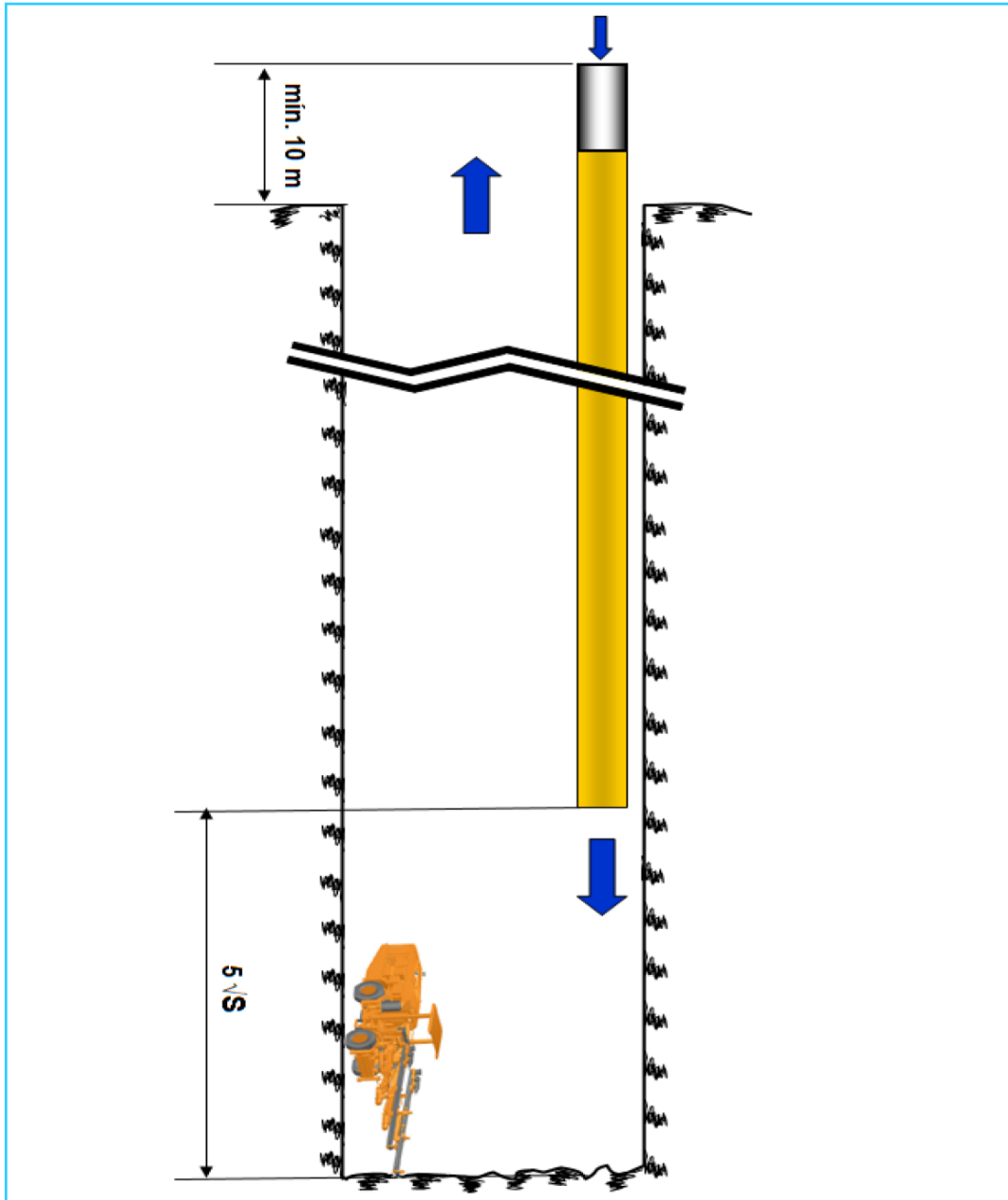
Talleres Zitrón, S.A

Autor: AVELINO DIAZ



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	2 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 3 TUNEL CONDICIONES NORMALES		Cliente:	
<b>Parámetros generales</b>			
Densidad de trabajo		1.20 kg/m <sup>3</sup>	
Altitud		0 m.s.n.m.	
Frecuencia de red		50 Hz	
<b>Pérdidas en el sistema de ventilación</b>			
<b>ZVN 1-12-45/4</b>	<b>PK 0+000 (Soplante)</b>		
Pérdidas en rejilla		56.55 Pa	
Pérdidas en silencioso		5.66 Pa	
Pieza de ampliación		115.82 Pa	
Perdidas en tubería		785.68 Pa	
Presión dinámica		24.32 Pa	
<b>Total:</b>		<b>988.02 Pa</b>	
<i>Los cálculos de ventilación están basados en la Norma suiza "Swiss SIA standard 196, Underground Ventilation (edition 1998)".</i>			

<b>zitrón</b>	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	3 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 3 TUNEL CONDICIONES NORMALES		Cliente:	



Talleres Zitrón, S.A

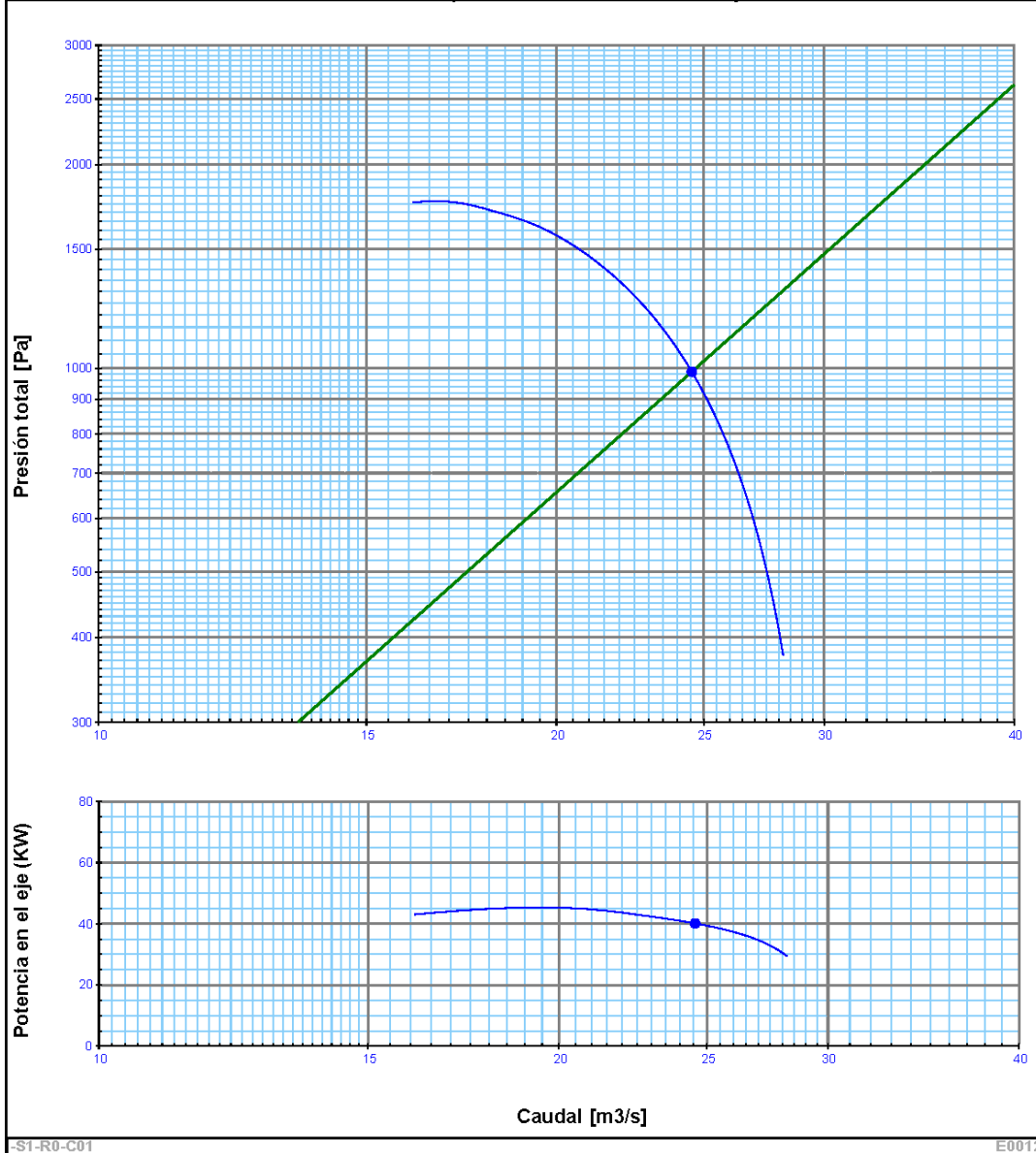
Autor: AVELINO DIAZ





	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	4 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 3 TUNEL CONDICIONES NORMALES		Cliente:	

<b>Parámetros de diseño</b>			Fecha: 26/06/2018	
Presión: 988.02 Pa	Frecuencia: 50 Hz	Diámetro: 1,200 mm	Usuario	
Caudal: 24.55 m <sup>3</sup> /s	Velocidad: 1,600 rpm	Potencia: 45 kW		
Densidad: 1.2 kg/m <sup>3</sup>	Potencia en el eje: 40.13 kW	Tipo: Unidireccional		
<b>Curvas del ventilador</b>			Temperatura: 20 °C	Diám. Salida Pd: 1,200 mm
<b>ZVN 1-12-45/4</b>			Altitud: 0 m.s.n.m.	Resistencia: 1.34 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>



Talleres Zitrón, S.A

Autor: AVELINO DIAZ



## **ANEXO 4: Ejemplo túnel con presencia de metano**

Para el ejemplo comparativo mencionado en el apartado 5.3 se ha considerado un túnel de 3 km de largo y 40 m<sup>2</sup> de sección. Para esta comparativa no se han tenido en cuenta los métodos de explotación y la maquinaria empleada en el túnel. Adicionalmente se considera la presencia de metano (CH<sub>4</sub>) en el túnel. Como criterio básico de diseño se considera solamente la velocidad de retorno. Los cálculos se han realizado con el software Zitron Vensec.



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	1 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 4 TUNEL CON CH4		Cliente:	
<b>Equipo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Caudal</b>	<b>Presión</b>
2xZVN 1-18-315/4	PK 0+000	93.01m <sup>3</sup> /s	4,442.25 Pa
			<b>Instalación</b>
			Soplante

### Entrada datos

#### Parámetros generales de entrada

Longitud del túnel	3,000 m
Sección del túnel	40 m <sup>2</sup>
Caudal	80.00 m <sup>3</sup> /s
Densidad del aire	1.20 Kg/m <sup>3</sup>

#### Detalle de cálculo de caudales

##### Detalle de criterios

Criterio de velocidad mínima	80.00 m <sup>3</sup> /s
------------------------------	-------------------------

##### Criterio de velocidad mínima

Sección del túnel	40 m <sup>2</sup>
Velocidad	2 m/s
Caudal	80.00 m <sup>3</sup> /s
Criterio adoptado	BS-6164:2001 Code of practice for safety in tunneling in the construction industry. Evitar estratificación de CH4

#### Características de la tubería

##### Soplante

	Ubicación	Longitud	Diámetro	Fugas	Resistencia	Tipo
Ventilador	PK 0+000		1,800 mm			
Pieza de adaptación	PK 0+000	<i>transición de 1,800 mm Ø a 2,500 mm Ø</i>				
Tubería	PK 0+000 - PK 3+000	3,000 m	2,500 mm	10 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.018	

#### Parámetros de trabajo de los ventiladores

##### Instalación soplante

Equipo	Ubicación	Caudal	Presión	Potencia	Velocidad
2xZVN 1-18-315/4	PK 0+000	93.01m <sup>3</sup> /s	4,442.25 Pa	315 kW	1,500 rpm

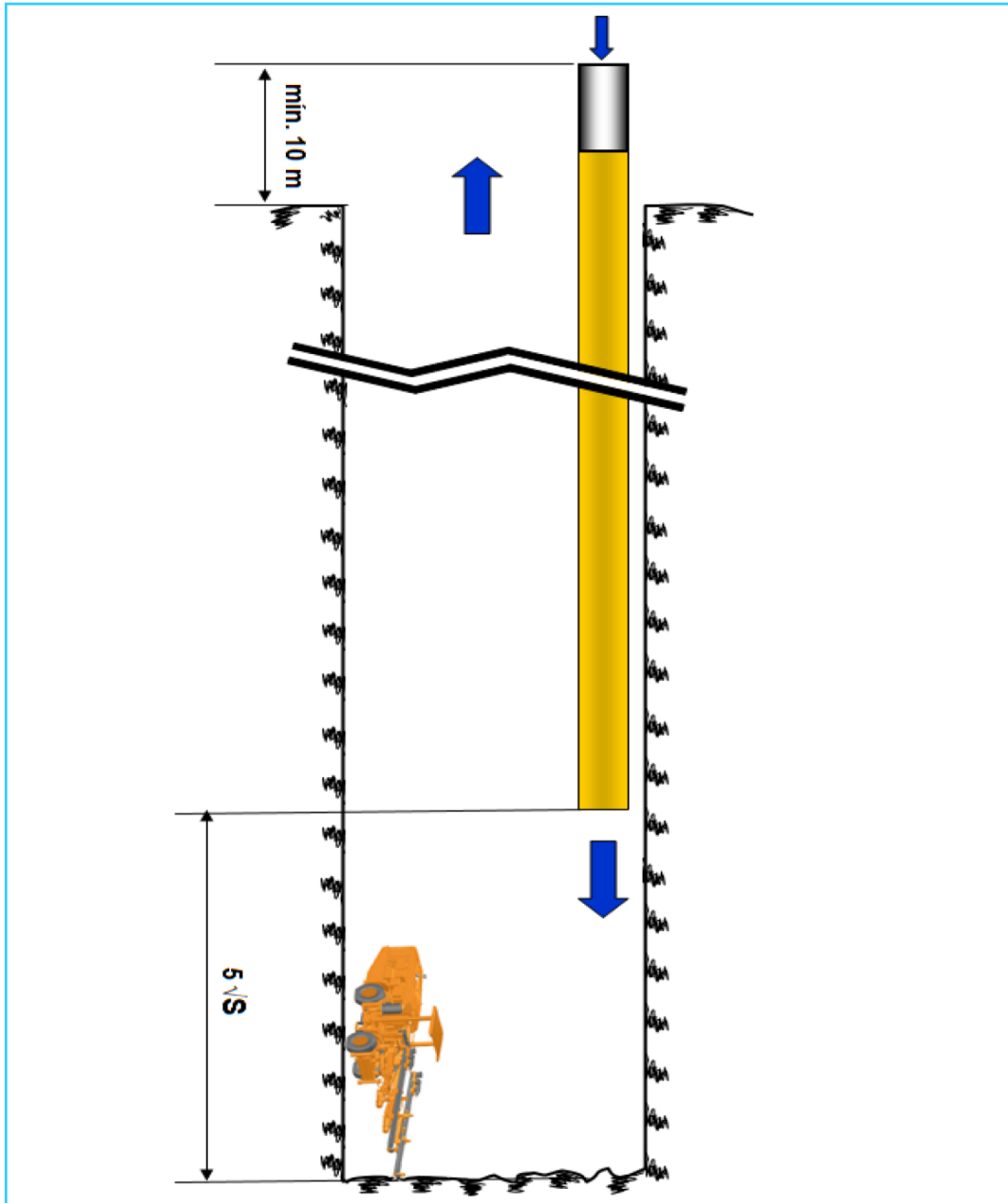
Talleres Zitrón, S.A

Autor: AVELINO DIAZ



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	2 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 4 TUNEL CON CH4		Cliente:	
<b>Parámetros generales</b>			
Densidad de trabajo		1.20 kg/m <sup>3</sup>	
Altitud		0 m.s.n.m.	
Frecuencia de red		50 Hz	
<b>Pérdidas en el sistema de ventilación</b>			
<b>2xZVN 1-18-315/4</b>		<b>PK 0+000 (Soplante)</b>	
Pérdidas en rejilla		160.31 Pa	
Pérdidas en silencioso		16.03 Pa	
Pieza de ampliación		185.91 Pa	
Pérdidas en tubería		3,920.64 Pa	
Presión dinámica		159.36 Pa	
<b>Total:</b>		<b>4,442.25 Pa</b>	
<i>Los cálculos de ventilación están basados en la Norma suiza "Swiss SIA standard 196, Underground Ventilation (edition 1998)".</i>			


<b>zitrón</b>	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	3 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 4 TUNEL CON CH4		Cliente:	



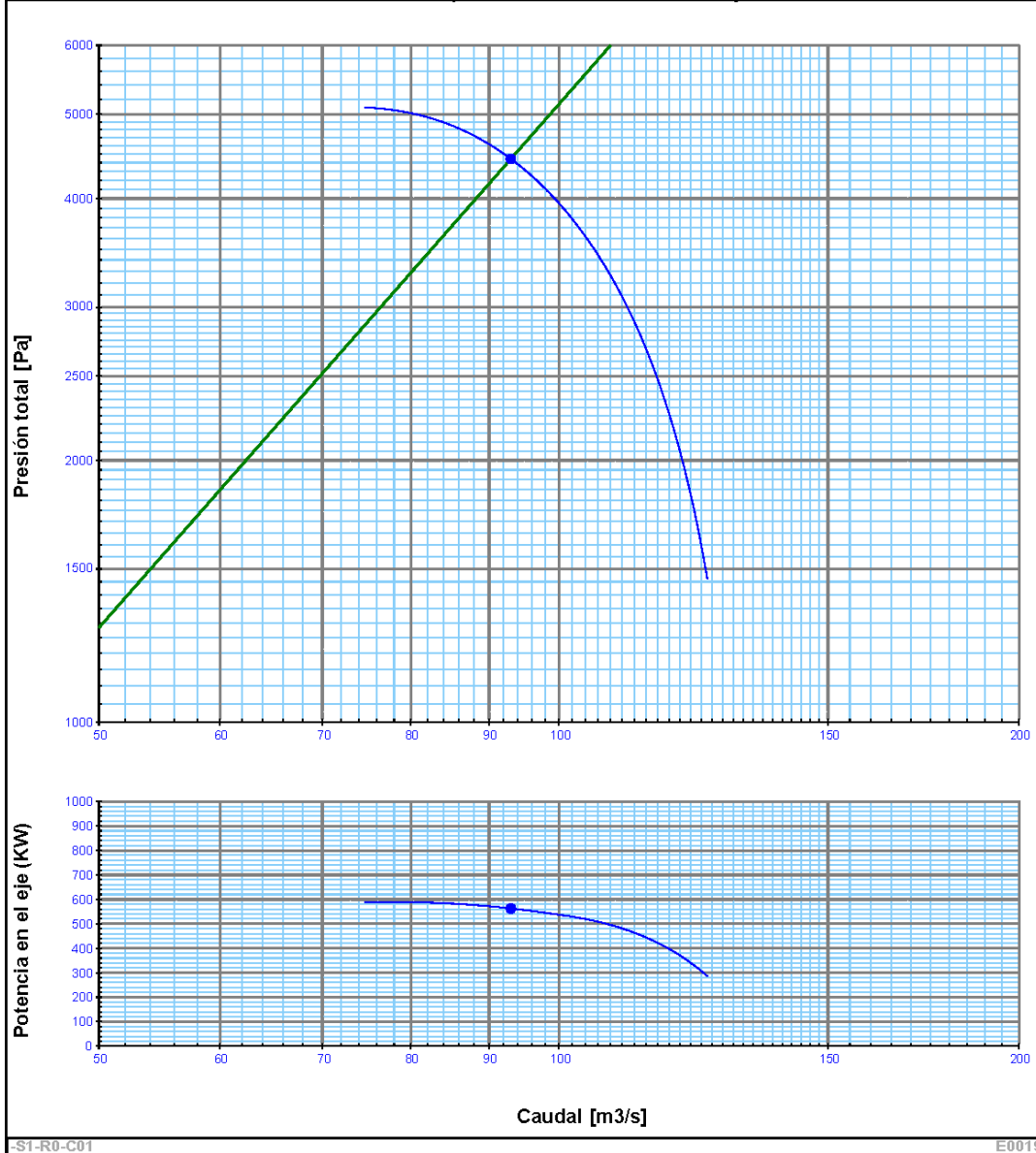
Talleres Zitrón, S.A

Autor: AVELINO DIAZ



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	4 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 4 TUNEL CON CH4		Cliente:	

<b>Parámetros de diseño</b>			Fecha: 26/06/2018	
Presión: 4,442.25 Pa	Frecuencia: 50 Hz	Diámetro: 1,800 mm	Usuario	
Caudal: 93.01 m <sup>3</sup> /s	Velocidad: 1,500 rpm	Potencia: 2x 315 kW		
Densidad: 1.2 kg/m <sup>3</sup>	Potencia en el eje: 2x 281.49 kW	Tipo: Unidireccional		
<b>Curvas del ventilador</b> 2xZVN 1-18-315/4			Temperatura: 20 °C	Diám. Salida Pd: 1,800 mm
			Altitud: 0 m.s.n.m.	Resistencia: 0.47 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>



Talleres Zitrón, S.A

Autor: AVELINO DIAZ



## **ANEXO 5: Ejemplo túnel con presencia de metano y ventilación aspirante**

Para el ejemplo comparativo mencionado en el apartado 5.3 se ha considerado un túnel de 3 km de largo y 40 m<sup>2</sup> de sección. Para esta comparativa no se han tenido en cuenta los métodos de explotación y la maquinaria empleada en el túnel. Adicionalmente se considera la presencia de metano (CH<sub>4</sub>) en el túnel y un sistema de ventilación aspirante con extracción masiva desde el frente de trabajo. Como criterio básico de diseño se considera solamente la velocidad de retorno. Los cálculos se han realizado con el software Zitron Vensec.



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	1 de 4	
		Referencia:	Rev: 0	
Proyecto: ANEXO 5 TUNEL CON CH4 VENTILACION ASPIRANTE		Cliente:		
<b>Equipo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Caudal</b>	<b>Presión</b>	<b>Instalación</b>
2xZEL 1-20-450/4	PK 0+000	103.37 m <sup>3</sup> /s	5,328.15 Pa	Aspirante

### Entrada datos

#### Parámetros generales de entrada

Longitud del túnel	3,000 m
Sección del túnel	40 m <sup>2</sup>
Caudal	80.00 m <sup>3</sup> /s
Densidad del aire	1.20 Kg/m <sup>3</sup>

#### Detalle de cálculo de caudales

##### Detalle de criterios

Criterio de velocidad mínima	80.00 m <sup>3</sup> /s
------------------------------	-------------------------

##### Criterio de velocidad mínima

Sección del túnel	40 m <sup>2</sup>
Velocidad	2 m/s
Caudal	80.00 m <sup>3</sup> /s
Criterio adoptado	BS-6164:2001 Code of practice for safety in tunneling in the construction industry. Evitar estratificación de CH4

#### Características de la tubería

##### Aspirante

	Ubicación	Longitud	Diámetro	Fugas	Resistencia	Tipo
Ventilador	PK 0+000		2,000 mm			
Pieza de adaptación	PK 0+000	<i>transición de 2,000 mm Ø a 3,000 mm Ø</i>				
Tubería	PK 0+000 - PK 3+000	3,000 m	3,000 mm	15 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.045	Refor.

#### Parámetros de trabajo de los ventiladores

##### Instalación aspirante


Equipo	Ubicación	Caudal	Presión	Potencia	Velocidad
2xZEL 1-20-450/4	PK 0+000	103.37m <sup>3</sup> /s	5,328.15 Pa	450 kW	1,500 rpm

Talleres Zitrón, S.A

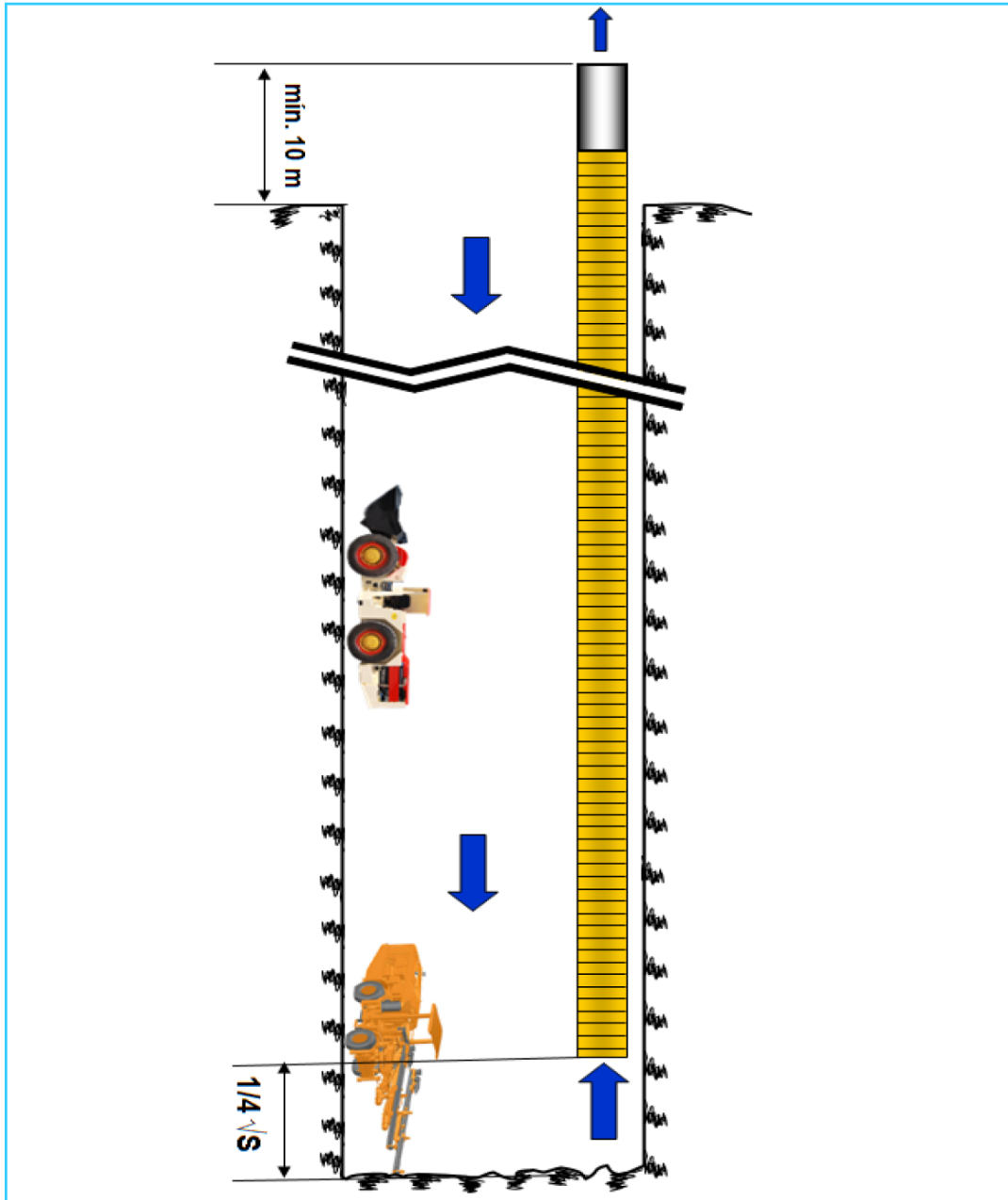
Autor: AVELINO DIAZ





	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	2 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 5 TUNEL CON CH4 VENTILACION ASPIRANTE		Cliente:	
<b>Parámetros generales</b>			
Densidad de trabajo		1.20 kg/m <sup>3</sup>	
Altitud		0 m.s.n.m.	
Frecuencia de red		50 Hz	
<b>Pérdidas en el sistema de ventilación</b>			
<b>2xZEL 1-20-450/4</b>	<b>PK 0+000 (Aspirante)</b>		
Pérdidas en rejilla		129.92 Pa	
Pérdidas en silencioso		12.99 Pa	
Pieza de ampliación		200.49 Pa	
Perdidas en tubería		4,335.15 Pa	
Presión dinámica		649.60 Pa	
<b>Total:</b>		<b>5,328.15 Pa</b>	
<i>Los cálculos de ventilación están basados en la Norma suiza "Swiss SIA standard 196, Underground Ventilation (edition 1998)".</i>			


	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	3 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 5 TUNEL CON CH4 VENTILACION ASPIRANTE		Cliente:	



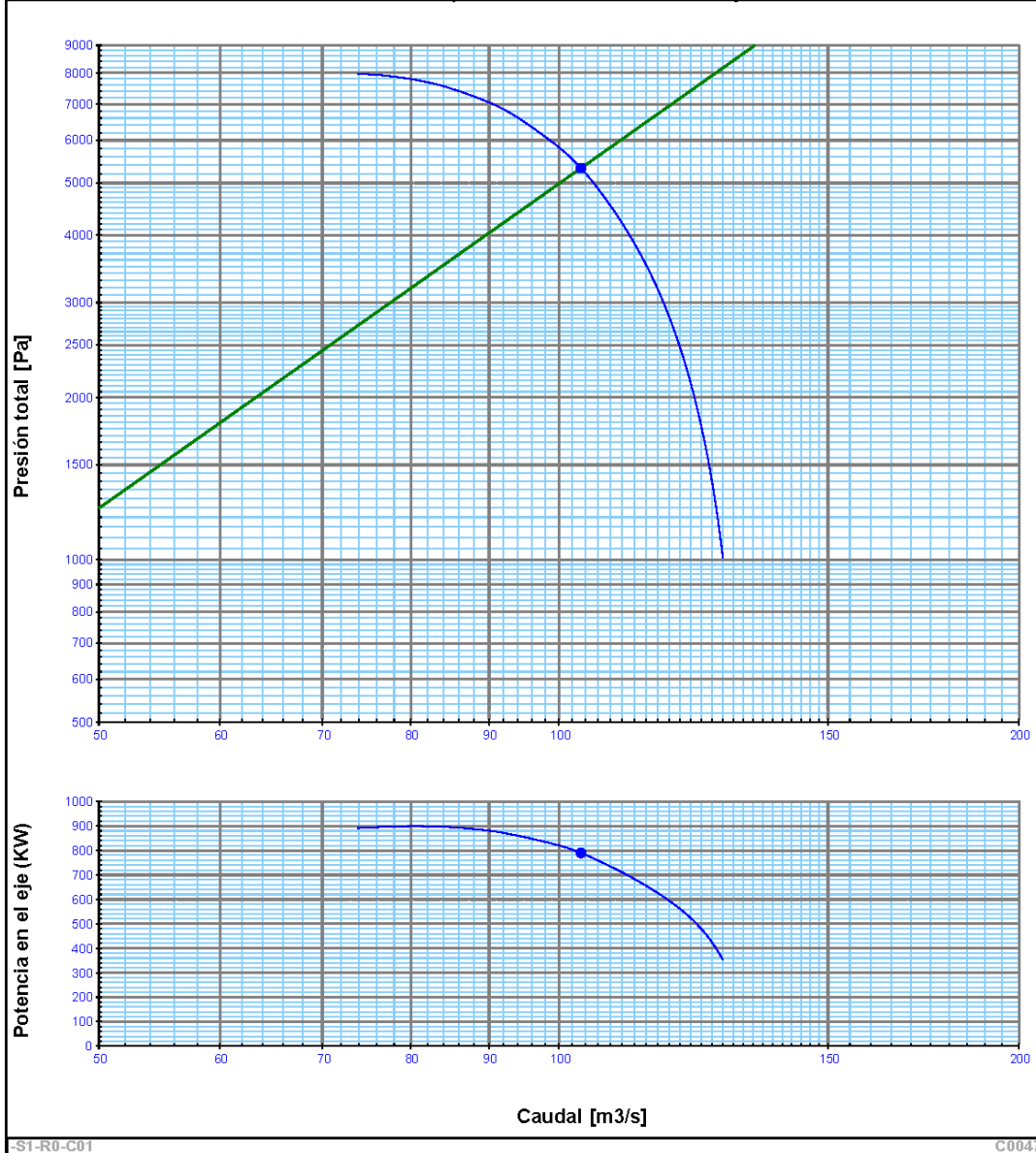
Talleres Zitrón, S.A

Autor: AVELINO DIAZ



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 26/06/2018	4 de 4
		Referencia:	Rev: 0
Proyecto: ANEXO 5 TUNEL CON CH4 VENTILACION ASPIRANTE		Cliente:	

<b>Parámetros de diseño</b>			Fecha: 26/06/2018	
Presión: 5,328.15 Pa	Frecuencia: 50 Hz	Diámetro: 2,000 mm	Usuario	
Caudal: 103.37 m <sup>3</sup> /s	Velocidad: 1,600 rpm	Potencia: 2x 450 kW		
Densidad: 1.2 kg/m <sup>3</sup>	Potencia en el eje: 2x 394.79 kW	Tipo: Unidireccional		
<b>Curvas del ventilador</b> 2xZEL 1-20-450/4			Temperatura: 20 °C	Diám. Salida Pd: 2,000 mm
			Altitud: 0 m.s.n.m.	Resistencia: 0.41 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>




Talleres Zitrón, S.A

Autor: AVELINO DIAZ

## ANEXO 6: Estudios de ventilación para el caso práctico

Escenario 1: Ventilación soplante. Sin metano

	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	1 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 1 Túnel Auxiliar		Cliente:	
<b>Equipo</b> ZVN 1-6-11/2	<b>Ubicación</b> PK 0+000	<b>Caudal</b> 3.91m <sup>3</sup> /s	<b>Presión</b> 1,465.28 Pa
			<b>Instalación</b> Soplante

### Entrada datos

#### Parámetros generales de entrada

Longitud del túnel	1,050 m
Sección del túnel	4.9 m <sup>2</sup>
Caudal	3.50 m <sup>3</sup> /s
Densidad del aire	1.20 Kg/m <sup>3</sup>
Presión de salida	150 Pa

#### Detalle de cálculo de caudales

##### Detalle de criterios

Criterio de velocidad mínima		2.45 m <sup>3</sup> /s
Disipación de calor de máquinas		3.50 m <sup>3</sup> /s [*]
Caudal debido a personal (Incluidos en [*])	10 Personas	0.40 m <sup>3</sup> /s

##### Criterio de velocidad mínima

Sección del túnel	4.9 m <sup>2</sup>
Velocidad	0.5 m/s
Caudal	2.45 m <sup>3</sup> /s
Criterio adoptado	BS-6164:2001 Code of practice for safety in tunneling in the construction industry. Para tuneles con polvo.



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	2 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 1 Túnel Auxiliar		Cliente:	

#### Disipación de Calor de Máquinas Diesel y de Máquinas Eléctricas

Temperatura exterior	20 °C
Temperatura límite máxima	28.50 °C
Calor a disipar	35.00 kW
Caudal para disipación	3.10 m <sup>3</sup> /s
Caudal total disipación calor	3.10 m <sup>3</sup> /s
Caudal considerado	3.50 m <sup>3</sup> /s
<i>(Incluido caudal debido a personal trabajando)</i>	

#### Máquinas eléctricas consideradas

Potencia eléctrica instalada	1,000.00 kW
Factor de simultaneidad	70.00 %
Potencia equivalente	700.00 kW
Eficiencia promedio de los motores	95.00 %
Calor a Disipar	35.00 kW

#### Renovación de aire

Tiempo de re-entrada	60
Renovaciones de aire / hora	0.00
Renovaciones de aire 60 /min	0.00
Caudal	0.00 m <sup>3</sup> /s
Criterio adoptado	

#### Características de la tubería

##### Soplante


	Ubicación	Longitud	Diámetro	Fugas	Resistencia	Tipo
Ventilador	PK 0+000		600 mm			
Pieza de adaptación	PK 0+000	<i>transición de 600 mm Ø a 700 mm Ø</i>				
Tubería	PK 0+000 - PK 1+050	1,050 m	700 mm	5 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.015	

#### Parámetros de trabajo de los ventiladores

##### Instalación soplante

Equipo	Ubicación	Caudal	Presión	Potencia	Velocidad
ZVN 1-6-11/2	PK 0+000	3.91m <sup>3</sup> /s	1,465.28 Pa	11 kW	3,000 rpm

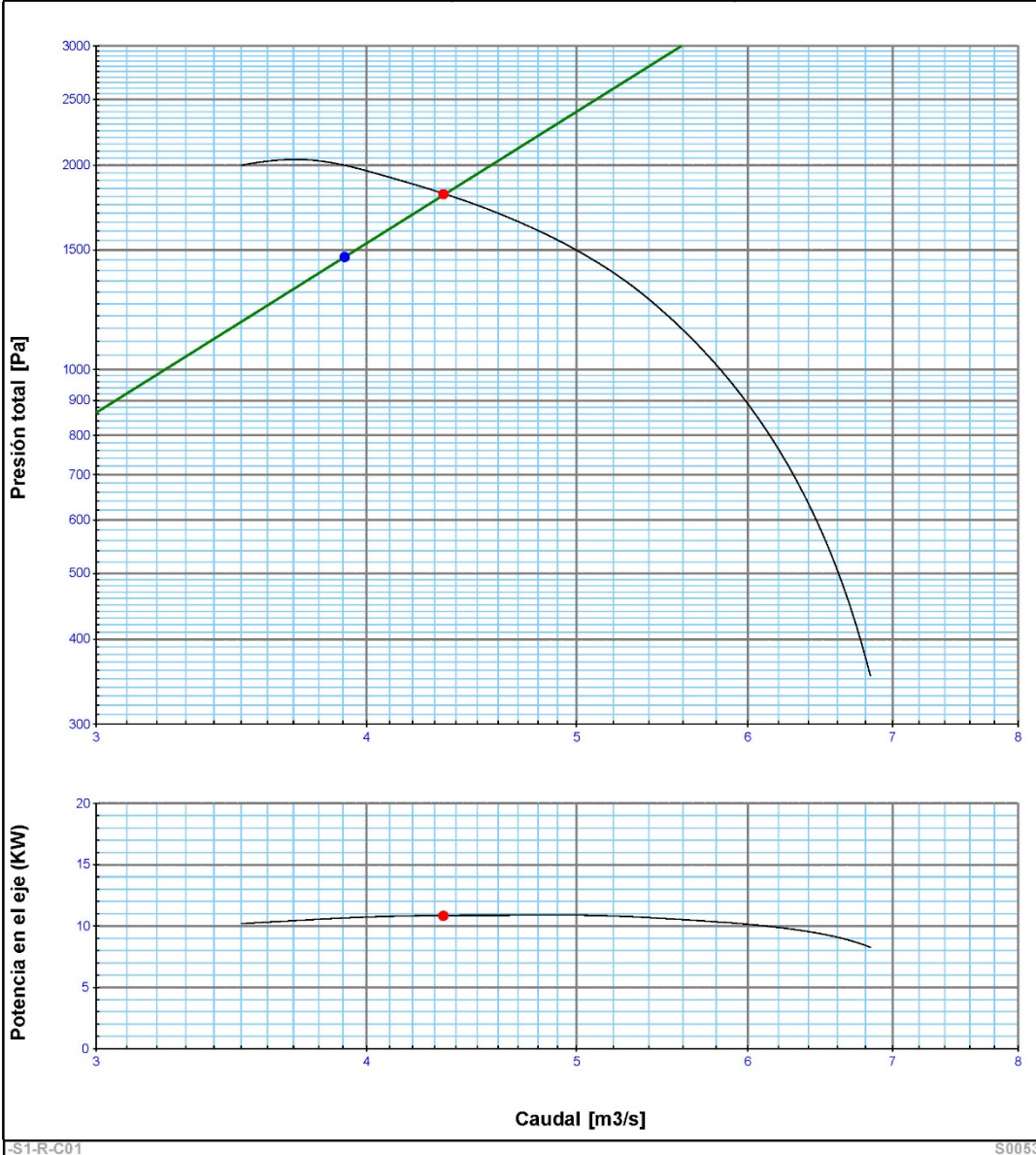


	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	3 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 1 Túnel Auxiliar		Cliente:	
<b>Parámetros generales</b>			
Densidad de trabajo		1.20 kg/m <sup>3</sup>	
Altitud		0 m.s.n.m.	
Frecuencia de red		50 Hz	
<b>Pérdidas en el sistema de ventilación</b>			
<b>ZVN 1-6-11/2</b>	<b>PK 0+000 (Soplante)</b>		
Pérdidas en rejilla		22.92 Pa	
Pérdidas en silencioso		2.29 Pa	
Pieza de ampliación		8.07 Pa	
Perdidas en tubería		1,382.37 Pa	
Presión dinámica		49.63 Pa	
<b>Total:</b>		<b>1,465.28 Pa</b>	
<i>Los cálculos de ventilación están basados en la Norma suiza "Swiss SIA standard 196, Underground Ventilation (edition 1998)".</i>			



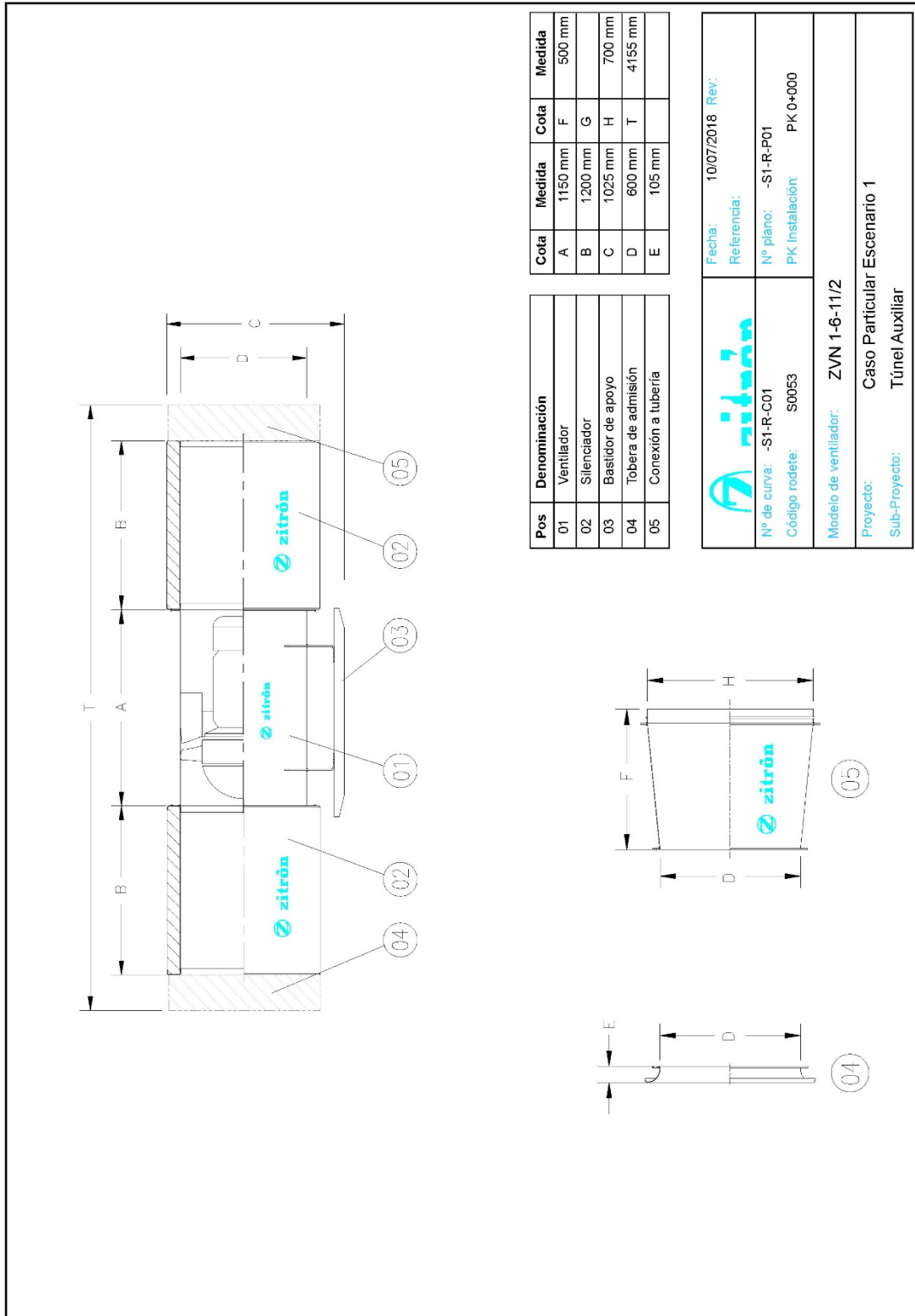
	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	4 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 1 Túnel Auxiliar		Cliente:	

<b>Parámetros de diseño</b>			Fecha: 10/07/2018	
Presión: 1,813.38 Pa	Frecuencia: 50 Hz	Diámetro: 600 mm	Usuario	
Caudal: 4.34 m <sup>3</sup> /s	Velocidad: 3,000 rpm	Potencia: 11 kW		
Densidad: 1.2 kg/m <sup>3</sup>	Potencia en el eje: 10.84 kW	Tipo: Unidireccional		
<b>Curvas del ventilador</b> ZVN 1-6-11/2			Temperatura: 20 °C	Diám. Salida Pd: 600 mm
			Altitud: 0 m.s.n.m.	Resistencia: 93.78 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>



Talleres Zitrón, S.A


Autor: Avelino Diaz







Escenario 2: Ventilación soplante. Con metano

	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	1 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 2 Túnel Auxiliar		Cliente:	
<b>Equipo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Caudal</b>	<b>Presión</b>
2xZVN 1-9-45/2	PK 0+000	10.65 m <sup>3</sup> /s	5,268.3 Pa
			<b>Instalación</b>
			Soplante

Entrada datos

Parámetros generales de entrada

Longitud del túnel	1,050 m
Sección del túnel	4.9 m <sup>2</sup>
Caudal	9.80 m <sup>3</sup> /s
Densidad del aire	1.20 Kg/m <sup>3</sup>
Presión de salida	150 Pa

Detalle de cálculo de caudales

Detalle de criterios

Criterio de velocidad mínima	9.80 m <sup>3</sup> /s
Disipación de calor de máquinas	3.50 m <sup>3</sup> /s [*]
Caudal debido a personal (Incluidos en [*])	10 Personas 0.40 m <sup>3</sup> /s

Criterio de velocidad mínima

Sección del túnel	4.9 m <sup>2</sup>
Velocidad	2 m/s
Caudal	9.80 m <sup>3</sup> /s
Criterio adoptado	BS-6164:2001 Code of practice for safety in tunneling in the construction industry. Evitar estratificación de CH <sub>4</sub>



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	2 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 2 Túnel Auxiliar		Cliente:	

#### Disipación de Calor de Máquinas Diesel y de Máquinas Eléctricas

Temperatura exterior	20 °C
Temperatura límite máxima	28.50 °C
Calor a disipar	35.00 kW
Caudal para disipación	3.10 m <sup>3</sup> /s
Caudal total disipación calor	3.10 m <sup>3</sup> /s
Caudal considerado	3.50 m <sup>3</sup> /s
<i>(Incluido caudal debido a personal trabajando)</i>	

#### Máquinas eléctricas consideradas

Potencia eléctrica instalada	1,000.00 kW
Factor de simultaneidad	70.00 %
Potencia equivalente	700.00 kW
Eficiencia promedio de los motores	95.00 %
Calor a Disipar	35.00 kW

#### Renovación de aire

Tiempo de re-entrada	60
Renovaciones de aire / hora	0.00
Renovaciones de aire 60 /min	0.00
Caudal	0.00 m <sup>3</sup> /s
Criterio adoptado	

#### Características de la tubería

##### Soplante


	Ubicación	Longitud	Diámetro	Fugas	Resistencia	Tipo
Ventilador	PK 0+000		900 mm			
Pieza de adaptación	PK 0+000	<i>transición de 900 mm Ø a 800 mm Ø</i>				
Tubería	PK 0+000 - PK 1+050	1,050 m	800 mm	5 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.015	

#### Parámetros de trabajo de los ventiladores


##### Instalación soplante

Equipo	Ubicación	Caudal	Presión	Potencia	Velocidad
2xZVN 1-9-45/2	PK 0+000	10.65m <sup>3</sup> /s	5,268.3 Pa	45 kW	3,000 rpm

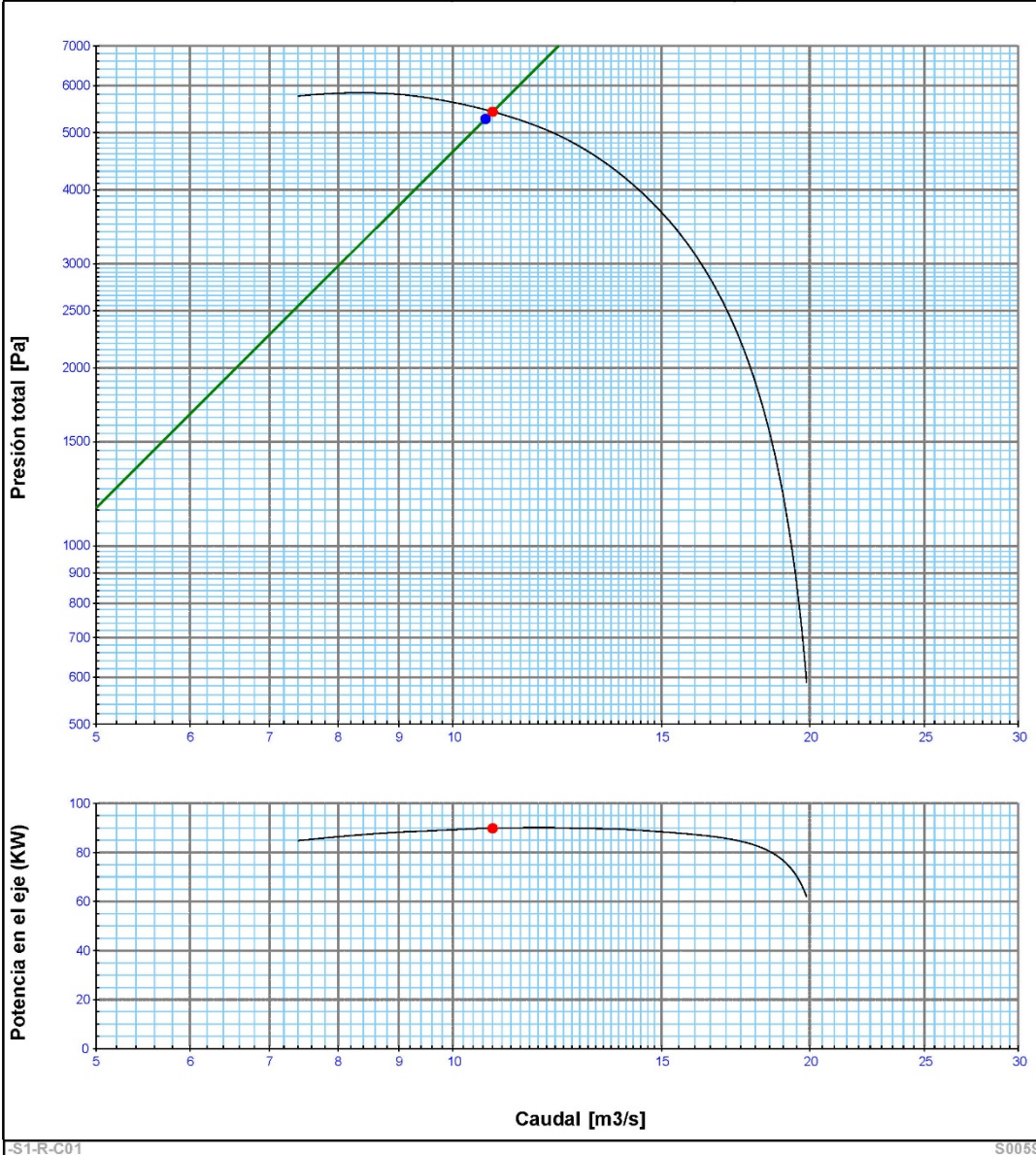


	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	3 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 2 Túnel Auxiliar		Cliente:	
<b>Parámetros generales</b>			
Densidad de trabajo		1.20 kg/m <sup>3</sup>	
Altitud		0 m.s.n.m.	
Frecuencia de red		50 Hz	
<b>Pérdidas en el sistema de ventilación</b>			
<b>2xZVN 1-9-45/2</b>	<b>PK 0+000 (Soplante)</b>		
Pérdidas en rejilla		33.65 Pa	
Pérdidas en silencioso		3.37 Pa	
Pieza de reducción		28.28 Pa	
Perdidas en tubería		4,974.93 Pa	
Presión dinámica		228.07 Pa	
<b>Total:</b>		<b>5,268.30 Pa</b>	
<i>Los cálculos de ventilación están basados en la Norma suiza "Swiss SIA standard 196, Underground Ventilation (edition 1998)".</i>			



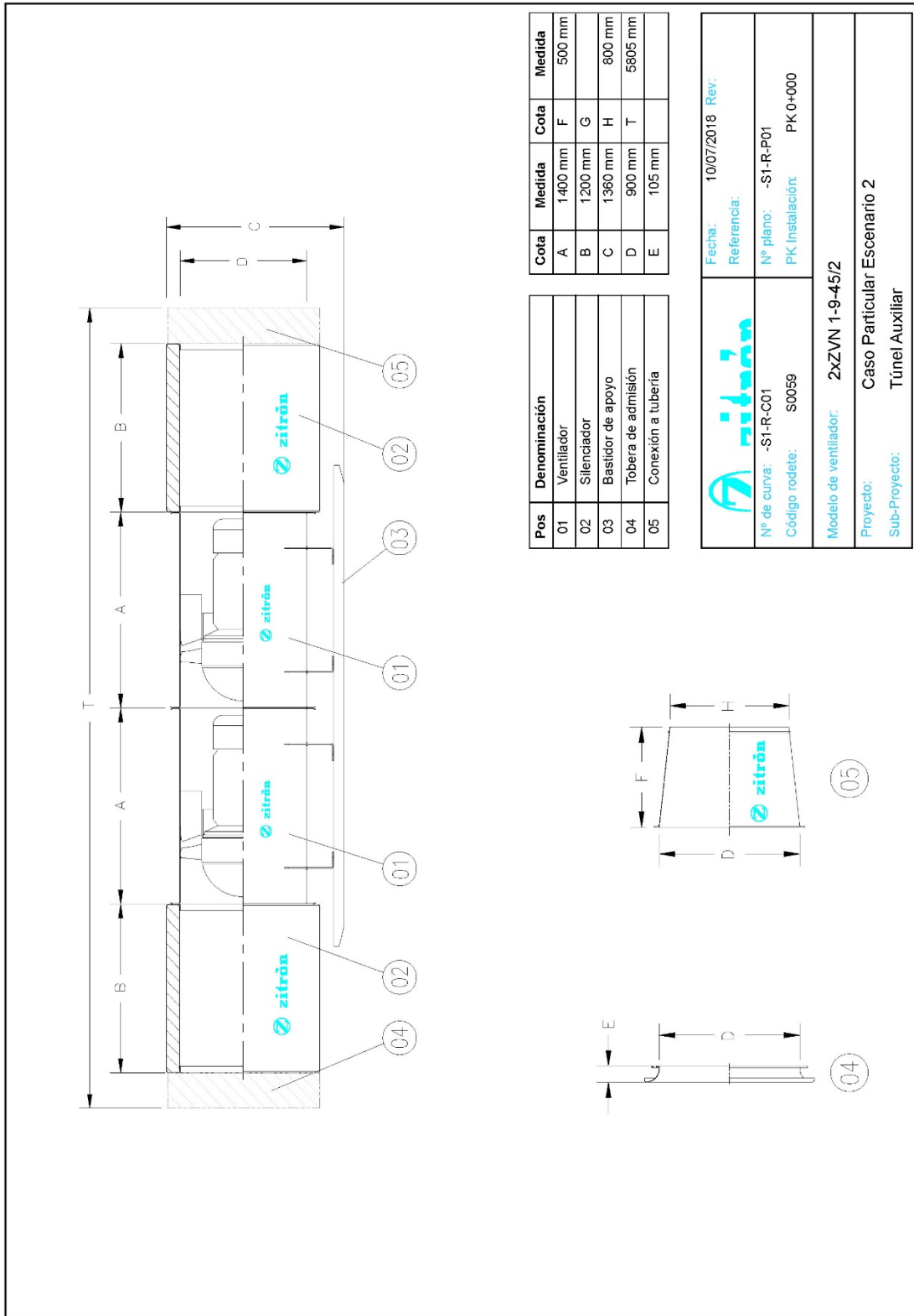
	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	4 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 2 Túnel Auxiliar		Cliente:	

<b>Parámetros de diseño</b>			Fecha: 10/07/2018	
Presión: 5,417.76 Pa	Frecuencia: 50 Hz	Diámetro: 900 mm	Usuario	
Caudal: 10.8 m <sup>3</sup> /s	Velocidad: 3,000 rpm	Potencia: 2x 45 kW		
Densidad: 1.2 kg/m <sup>3</sup>	Potencia en el eje: 2x 44.93 kW	Tipo: Unidireccional		
<b>Curvas del ventilador</b> <b>2xZVN 1-9-45/2</b>			Temperatura: 20 °C	Diám. Salida Pd: 900 mm
			Altitud: 0 m.s.n.m.	Resistencia: 45.84 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>



Talleres Zitrón, S.A

Autor: Avelino Diaz



Pos	Denominación	Cota	Medida	Cota	Medida
01	Ventilador	A	1400 mm	F	500 mm
02	Silenciador	B	1200 mm	G	
03	Basidor de apoyo	C	1360 mm	H	800 mm
04	Tobera de admisión	D	900 mm	T	5805 mm
05	Conexión a tubería	E	105 mm		

Pos	Denominación
01	Ventilador
02	Silenciador
03	Basidor de apoyo
04	Tobera de admisión
05	Conexión a tubería

	Fecha: 10/07/2018 Rev.
Nº de curva: -S1-R-C01	Referencia:
Código rodete: S0059	Nº plano: -S1-R-P01
Modelo de ventilador: 2xZVN 1-9-45/2	PK Instalación: PK.0+000
Proyecto: Caso Particular Escenario 2	
Sub-Proyecto: Túnel Auxiliar	



Escenario 3: Ventilación aspirante. Con metano

	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha:	10/07/2018	1 de 5
		Referencia:		Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 3 Túnel Auxiliar		Cliente:		
<b>Equipo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Caudal</b>	<b>Presión</b>	<b>Instalación</b>
4xZVN 1-9-75/2	PK 0+000	13.54 m <sup>3</sup> /s	10,508.12 Pa	Aspirante

Entrada datos

Parámetros generales de entrada

Longitud del túnel	1,050 m
Sección del túnel	4.9 m <sup>2</sup>
Caudal	9.80 m <sup>3</sup> /s
Densidad del aire	1.20 Kg/m <sup>3</sup>
Presión de salida	150 Pa

Detalle de cálculo de caudales

Detalle de criterios

Criterio de velocidad mínima	9.80 m <sup>3</sup> /s
Disipación de calor de máquinas	3.50 m <sup>3</sup> /s [*]
Caudal debido a personal (Incluidos en [*])	10 Personas 0.40 m <sup>3</sup> /s

Criterio de velocidad mínima

Sección del túnel	4.9 m <sup>2</sup>
Velocidad	2 m/s
Caudal	9.80 m <sup>3</sup> /s
Criterio adoptado	BS-6164:2001 Code of practice for safety in tunneling in the construction industry. Evitar estratificación de CH4



	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	2 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 3 Túnel Auxiliar		Cliente:	

#### Disipación de Calor de Máquinas Diesel y de Máquinas Eléctricas

Temperatura exterior	20 °C
Temperatura límite máxima	28.50 °C
Calor a disipar	35.00 kW
Caudal para disipación	3.10 m <sup>3</sup> /s
Caudal total disipación calor	3.10 m <sup>3</sup> /s
Caudal considerado	3.50 m <sup>3</sup> /s
<i>(Incluido caudal debido a personal trabajando)</i>	

#### Máquinas eléctricas consideradas

Potencia eléctrica instalada	1,000.00 kW
Factor de simultaneidad	70.00 %
Potencia equivalente	700.00 kW
Eficiencia promedio de los motores	95.00 %
Calor a Disipar	35.00 kW

#### Renovación de aire

Tiempo de re-entrada	60
Renovaciones de aire / hora	0.00
Renovaciones de aire 60 /min	0.00
Caudal	0.00 m <sup>3</sup> /s
Criterio adoptado	

#### Características de la tubería

##### Aspirante


	Ubicación	Longitud	Diámetro	Fugas	Resistencia	Tipo
Ventilador	PK 0+000		900 mm			
Tubería	PK 0+000 - PK 1+050	1,050 m	900 mm	15 mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.045	Refor.

#### Parámetros de trabajo de los ventiladores

##### Instalación aspirante


Equipo	Ubicación	Caudal	Presión	Potencia	Velocidad
4xZVN 1-9-75/2	PK 0+000	13.54m <sup>3</sup> /s	10,508.12 Pa	75 kW	3,000 rpm



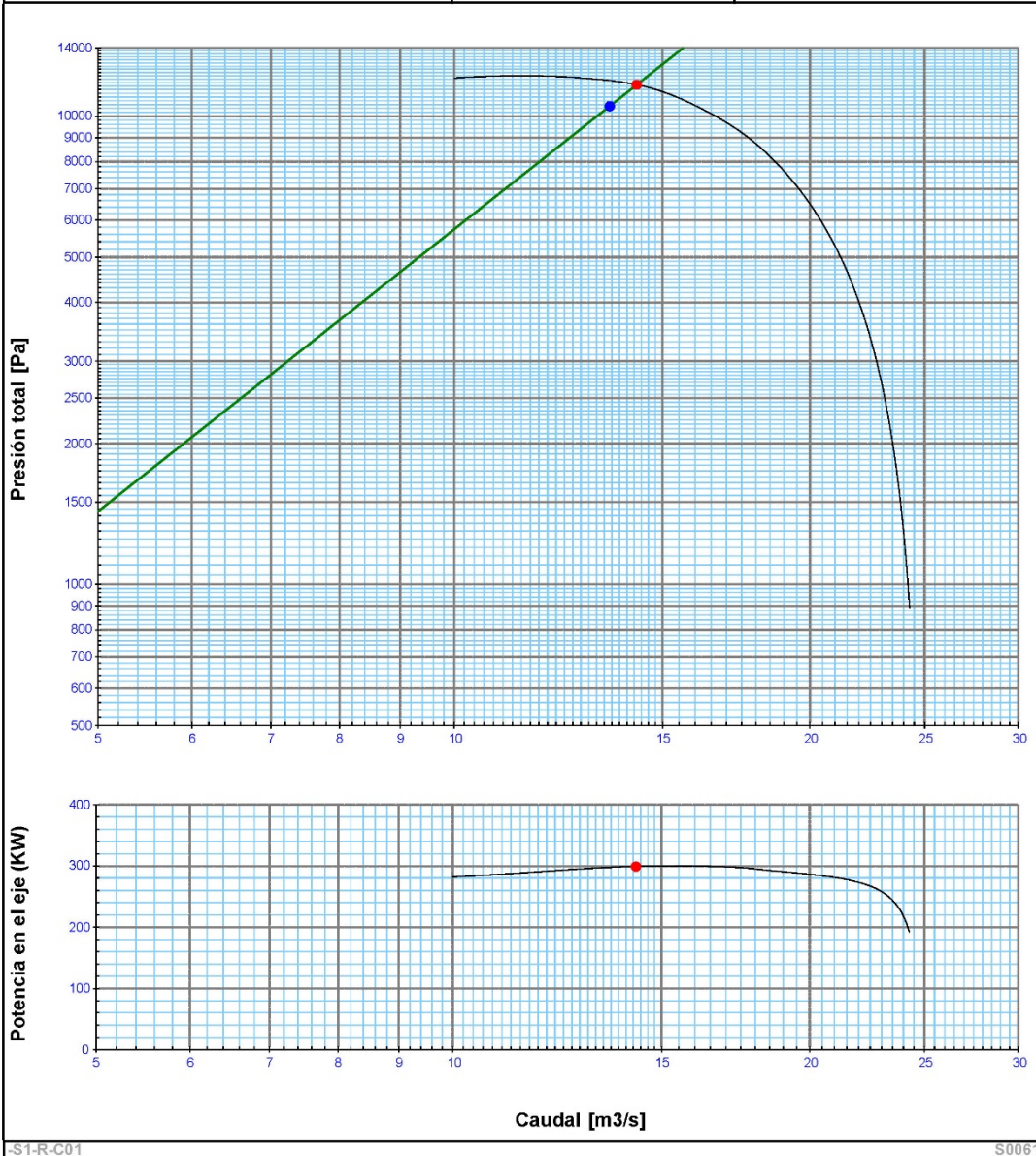
	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	3 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 3 Túnel Auxiliar		Cliente:	
<b>Parámetros generales</b>			
Densidad de trabajo		1.20 kg/m <sup>3</sup>	
Altitud		0 m.s.n.m.	
Frecuencia de red		50 Hz	
<b>Pérdidas en el sistema de ventilación</b>			
<b>4xZVN 1-9-75/2</b>	<b>PK 0+000 (Aspirante)</b>		
Pérdidas en rejilla		54.34 Pa	
Pérdidas en silencioso		5.43 Pa	
Pérdidas en tubería		10,176.62 Pa	
Presión dinámica		271.72 Pa	
<b>Total:</b>		<b>10,508.12 Pa</b>	
<i>Los cálculos de ventilación están basados en la Norma suiza "Swiss SIA standard 196, Underground Ventilation (edition 1998)".</i>			





	<b>Ventilación de obra</b>	Fecha: 10/07/2018	4 de 5
		Referencia:	Rev:
Proyecto: Caso Particular Escenario 3 Túnel Auxiliar		Cliente:	

<b>Parámetros de diseño</b>			Fecha: 10/07/2018	
Presión: 11.678.4 Pa	Frecuencia: 50 Hz	Diámetro: 900 mm	Usuario	
Caudal: 14.27 m <sup>3</sup> /s	Velocidad: 3.000 rpm	Potencia: 4 x 75 kW		
Densidad: 1.2 kg/m <sup>3</sup>	Potencia en el eje: 4 x 74.79 kW	Tipo: Unidireccional		
<b>Curvas del ventilador</b> 4xZVN 1-9-75/2			Temperatura: 20 °C	Diám. Salida Pd: 900 mm
			Altitud: 0 m.s.n.m.	Resistencia: 55.52 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>



Talleres Zitrón, S.A

Autor: Avelino Diaz

