

Guía de mejores prácticas para un drenaje y uso eficaz del metano en las minas de carbón

SERIE CEPE ENERGÍA, núm. 47

**Segunda edición
Diciembre de 2016**



NACIONES UNIDAS

Nota

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Secretaría de las Naciones Unidas, juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

La mención de cualquier empresa, procedimiento autorizado o producto comercial no implica el respaldo de las Naciones Unidas.

ECE/ENERGY/105

PUBLICACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS

e-ISBN: 978-92-1-059948-1

ISSN: 2078-5887

Índice

Prólogo	9
Agradecimientos	11
Siglas y abreviaciones	15
Glosario de términos	17
Resumen	21
Capítulo 1. Introducción	29
Mensajes clave.....	29
1.1 Objetivos de este documento de orientación	29
1.2 Problemas.....	29
1.3 Drenaje, captura, uso y reducción del gas.....	31
Capítulo 2. Elementos fundamentales del control de gases	35
Mensajes clave.....	35
2.1 Objetivos del control del gas de las minas	35
2.2 Riesgos que generan los gases.....	35
Ignición de las mezclas de metano explosivas	37
2.3 Reducción del riesgo de explosión	37
2.4 Principios de regulación y gestión	38
Marco efectivo de regulación de la seguridad.....	38
Ejecución	39
Concentraciones permisibles de gas para trabajar en condiciones seguras	39
Seguridad del transporte y uso del gas.....	39
Normas para reducir el riesgo de ignición	40
Capítulo 3. Incidencia, escapes y predicción de las emisiones de gases en las minas de carbón	43
Mensajes clave.....	43
3.1 Introducción	43
3.2 Presencia de gas en las capas de carbón	43
3.3 Proceso de liberación del gas.....	44
3.4 Grisuosidad relativa de las minas de carbón	44
3.5 Entender las características de las emisiones de gas de las minas de carbón.....	44
3.6 Medición del contenido de gas <i>in situ</i> del carbón	46
3.7 Estimación práctica de los flujos de gas en las minas de carbón.....	46

Capítulo 4. Ventilación de las minas	49
Mensajes clave.....	49
4.1 Dificultades de la ventilación	49
4.2 Principales características del diseño de los sistemas de ventilación	49
4.3 Ventilación de los frentes de arranque grisuosos.....	50
4.4 Requisitos de potencia del sistema de ventilación	52
4.5 Ventilación de las galerías de avance de las minas de carbón.....	52
4.6 Medición del flujo del aire de ventilación.....	52
4.7 Control de la ventilación	53
Capítulo 5. Drenaje del metano	57
Mensajes clave.....	57
5.1 Drenaje del metano y dificultades asociadas.....	57
5.2 Principios básicos de las prácticas de drenaje del metano empleadas en el mundo.....	57
5.3 Principios básicos del predrenaje	57
5.4 Principios básicos del posdrenaje	58
5.5 Consideraciones sobre el diseño de los sistemas de drenaje de metano.....	61
5.6 Infraestructura de gasoductos subterráneos	62
5.7 Vigilancia de los sistemas de drenaje de gas.....	63
Capítulo 6. Aprovechamiento y reducción del metano	65
Mensajes clave.....	65
6.1 El metano de las minas de carbón y la mitigación del cambio climático.....	65
6.2 El metano de las minas como fuente de energía.....	65
6.2.1 El metano de las minas subterráneas	65
6.2.2 El metano de las minas de superficie	66
6.3 Posibles usos	67
6.4 Reducción y aprovechamiento del metano drenado.....	69
6.4.1 MMC con concentración de metano media-alta.....	69
6.4.2 Gas drenado con baja concentración de metano.....	69
6.4.3 Tecnologías de depuración del gas drenado con baja concentración de metano.....	69
6.4.4 Quema en antorcha	71
6.5 Reducción o aprovechamiento del metano del aire de ventilación (VAM) en concentración baja	71
6.6 Control del metano.....	74
6.7 Aprovechamiento del metano de las minas cerradas y abandonadas	75

Capítulo 7. Costos y aspectos económicos	79
Mensaje clave.....	79
7.1 Argumentos económicos a favor del drenaje de metano	79
7.2 Costos comparativos del drenaje de metano.....	79
7.3 Aspectos económicos de la utilización del metano.....	81
7.4 Finanzas del carbono y otros incentivos.....	83
7.5 Costo de oportunidad de la utilización	86
7.6 Costos ambientales.....	86
Capítulo 8. Conclusiones y resumen para responsables de políticas.....	89
Capítulo 9. Estudios de casos	93
Estudio de caso 1: Obtención de la producción de carbón prevista de un tajo largo grisoso explotado en retirada en una capa de carbón propensa a la combustión espontánea con estratos que soportan una gran tensión (Reino Unido).....	94
Estudio de caso 2: Explotación por tajo largo de alto rendimiento en zonas con niveles elevados de emisiones de gas (Alemania).....	95
Estudio de caso 3: Explotación por tajo largo de alto rendimiento en zonas con niveles elevados de emisiones de gas (Australia)	96
Estudio de caso 4: Seguridad en las actividades de extracción en una capa de carbón propensa a los derrabes (Australia)	99
Estudio de caso 5: Elaboración de un programa de cogeneración de energía eléctrica con MMC y de reducción de las emisiones de MMC (China).....	99
Estudio de caso 6: Utilización del MMC y mitigación de las emisiones de metano en tres grandes minas de carbón (China)	100
Estudio de caso 7: VAM (China).....	104
Estudio de caso 8: VAM (Australia).....	105
Estudio de caso 9: Reducción del riesgo de explosión en minas explotadas por cámaras y pilares (Sudáfrica)	107
Estudio de caso 10: Explosiones de gas en la mina de carbón de Pike River (Nueva Zelandia).....	108
Apéndice 1. Comparación de los métodos de drenaje de gas (adaptado de Creedy, 2001)	113
Referencias.....	119
Recursos adicionales	122

Lista de figuras

Figura ES-1 Distribución de los usos del MMC en proyectos mundiales. Esta figura muestra todos los proyectos de MMC activos que se han comunicado a la GMI, clasificados por tipo y uso final	24
Figura 1.1 Esquema del sistema de drenaje de una mina de carbón subterránea y de las instalaciones de superficie para la recuperación de energía y la reducción de MMC.....	32
Figura 2.1 Formación de mezclas explosivas	36
Figura 3.1 Modelo de sección paralela al frente del tajo largo que muestra los estratos fracturados al extraer el carbón, formando el macizo de relleno, y el resultado de un modelo que muestra la relajación de los estratos.....	45
Figura 3.2 Equipo de medición del contenido de gas (norma australiana)	47
Figura 4.1 Flujos de aire necesarios para diluir al 2% las emisiones de metano de las explotaciones por tajo largo (calculados con margen para posibles picos).....	51
Figura 4.2 Sistema de ventilación en U convencional.....	51
Figura 4.3 Configuraciones de ventilación empleadas en frentes de arranque grisosos de explotaciones por tajo largo	51
Figura 4.4 Potencia del aire de ventilación necesaria en función del flujo de aire.....	53
Figura 5.1 Predrenaje mediante pozos laterales perforados desde la superficie.....	59
Figura 5.2 Distintos métodos de perforación para el posdrenaje	59
Figura 6.1 Optimización de la recuperación de energía en una explotación minera con emisiones de metano casi nulas.....	66
Figura 6.2 Sección transversal de una explotación al descubierto en la que se muestra el posible emplazamiento de una perforación dirigida	67
Figura 6.3 Vista seccionada de la expansión prevista de una corta de carbón con perforaciones verticales	68
Figura 6.4 Distribución mundial de los distintos tipos de proyectos de MMC	68
Figura 6.5 Instalación de procesamiento de VAM (3 OTR) de Dürr en la mina McElroy (Estados Unidos)	74
Figura 6.6 Instalación de procesamiento de VAM de Dürr Systems en la mina de Gaohe (China)	75
Figura 6.7 Curva de disminución y reserva de gas potencial de una mina muy grisosa	76
Figura 7.1 Generación de electricidad con MMC y reducción del MMC: seguimiento del rendimiento en tiempo real, que muestra un diagrama del flujo y los parámetros del rendimiento del MMC utilizado en tres motores de gas y una antorcha	82
Figura 7.2 Variaciones del flujo y la pureza del MMC drenado; capacidad y utilización optimizadas de los motores y de la antorcha	82
Figura 7.3 Ingresos dobles de la generación de energía eléctrica con MMC: 40% de gas capturado y 80% utilizado	86

Figura 9.1 Sistema de retorno hacia atrás	94
Figura 9.2 Sistema de saltos	95
Figura 9.3 Equipo de perforación inclinada.....	96
Figura 9.4 Tajo largo con un avanzado diseño de ventilación en Y y pozos de drenaje en el techo y el suelo detrás del tajo largo.....	97
Figura 9.5 Esquema de una mina y sus sistemas de ventilación y drenaje de gas	98
Figura 9.6 Fase 1 de la central de cogeneración con MMC en la mina D	103
Figura 9.7 Sistema de antorchas en la mina T	103
Figura 9.8 Sistema de reducción del VAM y recuperación de energía aplicado en China	105
Figura 9.9 Reducción del VAM y recuperación de energía para la generación de electricidad	106
Figura 9.10 Central de generación de energía eléctrica y tratamiento del VAM WestVAMP.....	106
Figura 9.11 Las instalaciones de superficie, con edificios que se integran en el bosque, reflejan la sensibilidad medioambiental de la zona.....	109
Figura 9.12 Incendio en el pozo de retorno del aire tras la tercera explosión.....	110

Lista de cuadros

Cuadro 1.1 Principales incidentes por explosiones en minas de carbón desde 2010.....	30
Cuadro 2.1 Selección de ejemplos de límites obligatorios y recomendados de concentraciones inflamables de metano	40
Cuadro 6.1 Comparativa de los usos del MMC	70
Cuadro 7.1 Costos relativos por tonelada de carbón producido en 2015 con diversos métodos de drenaje de gas (en dólares de los Estados Unidos)	80
Cuadro 9.1 Lista de estudios de casos	93
Cuadro 9.2 Calendario de ejecución	101
Cuadro 9.3 Resumen del rendimiento de los proyectos de MMC	104
Cuadro 9.4 Cantidad de energía que se puede recuperar con una instalación que trata 250.000 Nm ³ /h de aire de ventilación en diversas condiciones	106
Cuadro 9.5 Evaluación del riesgo de ignición provocado por la estratificación del metano en las minas explotadas por cámaras y pilares	108

Prólogo

A lo largo de los dos últimos siglos, el carbón ha sido una fuente importante de producción de energía primaria en todo el mundo, y seguirá siendo un componente esencial de la combinación energética mundial en los próximos decenios. Sin los recursos del carbón no podrían alcanzarse los objetivos de desarrollo de las Naciones Unidas. Este hecho no resta en modo alguno importancia a los recursos energéticos renovables y otras estrategias de baja emisión de carbono, pero sí subraya el reconocimiento pragmático de que, en un futuro próximo, el carbón será fundamental para la seguridad energética de muchos países y que seguirá desempeñando un papel importante en la erradicación de la pobreza energética en todo el mundo.

Con el reconocimiento de que se seguirá produciendo carbón a gran escala durante algún tiempo, hemos de admitir también la persistencia de los efectos para la salud, la seguridad y el medio ambiente que tiene el metano que se libera durante la extracción del carbón. A causa del metano, en muchas minas subterráneas de todo el mundo se trabaja en condiciones peligrosas y se producen accidentes que en muchas ocasiones tienen como consecuencia inaceptable la pérdida de vidas humanas. Además, es un gas de efecto invernadero (GEI). Investigaciones recientes han demostrado que el efecto del metano en la atmósfera es mayor de lo que se había pensado en un principio, y las minas de carbón son la cuarta mayor fuente de emisiones, después del petróleo y el gas, los vertederos y la ganadería.

En este período de transición en que se siguen empleando combustibles fósiles, es de vital importancia minimizar las repercusiones de la producción de carbón en el medio ambiente. Para ello, es fundamental garantizar la seguridad en la extracción, el transporte y el uso del metano en todo el ciclo de vida de la mina de carbón. Con la extracción segura del metano se salvan vidas de mineros y al usar y destruir de manera eficiente este valioso gas se obtiene un combustible asequible y más limpio para las comunidades situadas alrededor de las instalaciones mineras. Gracias a los avances tecnológicos, se han reducido considerablemente las emisiones de metano incluso en las minas más grisúas. Sin embargo, el uso de esas tecnologías y los esfuerzos dirigidos a evitar que se produzcan víctimas mortales a causa del metano y que se reduzcan las emisiones de este gas a la atmósfera no son universales y pueden verse obstaculizados por el desconocimiento de los principios rectores del drenaje y el uso del metano en las minas de carbón. Este documento tiene por objeto complementar los recursos técnicos existentes con orientaciones accesibles de alto nivel dirigidas al personal directivo en los ámbitos empresarial, gubernamental y financiero, que desempeña un papel esencial en las decisiones relativas a la aplicación de mejores prácticas.

La *Guía de mejores prácticas para un drenaje y uso eficaz del metano en las minas de carbón* resuelve una grave carencia. Con una presentación clara y breve, se establecen los principios y las normas recomendados para la captura y el uso del metano de las minas de carbón (MMC), a fin de ofrecer a los encargados de la adopción de decisiones una base sólida de conocimientos con la que orientar sus decisiones comerciales y en materia de políticas. Ese conocimiento es fundamental para alcanzar el objetivo de erradicar las víctimas mortales y las explosiones minimizando al mismo tiempo los efectos ambientales de las emisiones de MMC.

Este documento orientativo también puede servir a estudiantes y especialistas técnicos como introducción a los principios y referencias fundamentales de gestión del metano.

Esta guía de mejores prácticas no reemplaza ni sustituye a las leyes y reglamentos existentes, ni a otros instrumentos jurídicamente vinculantes, ya sean de ámbito nacional o internacional. Los principios que se esbozan en este documento tienen por objeto proporcionar orientaciones para complementar los marcos legales y reglamentarios existentes y favorecer el desarrollo de prácticas más seguras y eficaces en un contexto en que las prácticas y las normativas del sector continúan evolucionando. Si bien ha sido redactada para servir de apoyo a programas reguladores basados en principios y resultados, esta guía de mejores prácticas puede servir también de complemento para una regulación más prescriptiva y favorecer la transición a una regulación basada en los resultados.

Habida cuenta de los accidentes que se han producido en los últimos tiempos y en memoria de todos aquellos que perdieron la vida en el pasado, los autores de las ediciones de 2010 y 2016 manifiestan tener la esperanza de que su labor contribuya a que las operaciones de extracción de carbón sean cada vez más seguras.

Diciembre de 2016

Raymond C. Pilcher

Presidente, Grupo de Expertos del Metano de las Minas de Carbón
de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas

Felicia A. Ruiz

Copresidenta, Subcomité para el Carbón de la
Iniciativa Global de Metano

Agradecimientos

Organizaciones patrocinadoras

La **Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas** (CEPE) es una de las cinco comisiones regionales de las Naciones Unidas y un foro en el que se congregan 56 países de América del Norte, Europa Occidental, Central y Oriental y Asia Central para forjar los instrumentos de su cooperación económica. Las principales esferas de actividad de la CEPE son la cooperación y la integración económicas, la política ambiental, los bosques, la vivienda y la tierra, la población, las estadísticas, la energía sostenible, el comercio y el transporte. La CEPE persigue sus objetivos mediante el análisis de políticas, la elaboración de convenciones, reglamentos y normas, y la prestación de asistencia técnica (www.unece.org/energy/se/cmm.html). Los Estados miembros debaten sobre temas relacionados con la energía, como la extracción de carbón y metano de las minas de carbón, en el marco del Comité de Energía Sostenible. El Grupo de Expertos del Metano de las Minas de Carbón se reúne periódicamente como órgano subsidiario del Comité de Energía Sostenible para examinar cuestiones y promover las mejores prácticas para la gestión, captura y uso del gas metano liberado durante el ciclo de vida de las minas de carbón.

La **Iniciativa Global de Metano** (GMI) es una alianza internacional público-privada que trabaja con organismos gubernamentales de todo el mundo para facilitar la elaboración de proyectos en cinco sectores fundamentales de la producción de metano: las actividades agrícolas, las minas de carbón, los residuos sólidos municipales, los sistemas de petróleo y gas, y las aguas residuales. Desde su puesta en marcha en 2004, la GMI trabaja en sintonía con otros acuerdos internacionales, como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). A diferencia de otros GEI, el metano es el principal componente del gas natural y puede transformarse en energía aprovechable. La reducción de las emisiones de metano es un método eficiente para reducir los GEI y aumentar la seguridad energética, impulsar el crecimiento económico y mejorar la calidad del aire y la seguridad de los trabajadores. La Iniciativa Global de Metano está integrada por 42 países asociados y por la Comisión Europea, que representan aproximadamente el 70% de las emisiones antropógenas de metano. Con respecto al metano de las minas de carbón, el Subcomité para el Carbón de la GMI agrupa a los principales expertos en la recuperación y el uso del metano de las minas de carbón para que compartan información sobre las tecnologías y prácticas más novedosas mediante talleres, cursos, visitas de estudio e iniciativas de fomento de la capacidad (www.globalmethane.org).

Estructura

El documento original, publicado en febrero de 2010, fue concebido por un *Comité Directivo*, que dio ciertas pautas y una idea general, y fue redactado por un *Grupo de Expertos Técnicos* integrado por cinco expertos de renombre mundial en ventilación subterránea y drenaje del metano en las minas de carbón. El proyecto de documento lo examinó por primera vez un *Grupo Asesor de Interesados* que se aseguró de que los mensajes fueran claros y eficaces para los encargados de la adopción de decisiones, antes de someter el documento a un proceso formal de examen técnico por otros expertos. Quienes contribuyeron a la edición original de 2010 de la guía o han contribuido a esta primera revisión de dicho documento le dedicaron su tiempo de manera libre y voluntaria con el deseo de promover una mayor seguridad en la minería del carbón.

La actualización de 2016 siguió el proceso mencionado anteriormente: el Grupo de Expertos creó un Comité Directivo Ejecutivo y se constituyó un Grupo de Expertos Técnicos para la Redacción de la Revisión integrado por voluntarios. Fueron fundamentales las contribuciones del Grupo Asesor de Interesados, que revisó el contenido del documento y el respeto de los principios pertinentes explicados.

Esta primera revisión mantiene la estructura del original, actualiza su contenido e incluye más estudios de casos para ilustrar una muestra más diversa de principios sobre mejores prácticas. Más concretamente, las modificaciones incluidas en esta impresión comprenden:

- Cambios de redacción de menor importancia y corrección de un número reducido de errores tipográficos.
- Actualización de las referencias pertinentes.
- Edición de los temas existentes que requerían más explicaciones o ejemplos para una mayor claridad.
- Inclusión del tema de la gestión del metano en minas de superficie y en minas subterráneas abandonadas.
- Costos actualizados de los proyectos de captura y uso del metano y revisión del análisis de los mercados de productos básicos ecológicos, habida cuenta de los cambios en los mercados de compensación de las emisiones de carbono con respecto a 2010.
- Actualizaciones de los estudios de casos existentes y adición de varios estudios nuevos de casos.
- Actualizaciones de otros fragmentos de texto del documento con información sobre avances importantes que han ocurrido desde 2010.

La intención de la CEPE y de la GMI es que este sea un documento "vivo", que se actualice periódicamente para tener en cuenta el entorno dinámico en que se enmarca el sector de la energía, así como la evolución de la estructura mundial del clima.

Contribuyentes a la segunda edición de la *Guía de mejores prácticas para un drenaje y uso eficaz del metano en las minas de carbón* (octubre de 2016)

Comité Directivo Ejecutivo

- Felicia A. Ruiz, Copresidenta del Subcomité para el Carbón de la Iniciativa Global de Metano
- Clark Talkington, Vicepresidente del Grupo de Expertos del Metano de las Minas de Carbón
- Jacek Skiba, Vicepresidente del Grupo de Expertos del Metano de las Minas de Carbón

Grupo de Expertos Técnicos para la Redacción de la Revisión

- David Creedy, Sindicatum Sustainable Resources
- Raymond C. Pilcher, Raven Ridge Resources
- Michael Cote, Ruby Canyon Engineering
- Richard Mattus, RM Business Consulting

Grupo Asesor de Interesados

- Bharath Belle, Anglo American Metallurgical Coal (Australia/Sudáfrica)
- Yuriy Bobrov, Asociación de Pueblos Mineros de Dombás (Ucrania)
- Martin Hahn, Organización Internacional del Trabajo
- Özgen Karacan, Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo de los Estados Unidos
- Sergei Shumkov, Ministerio de Energía (Federación de Rusia)
- Shekhar Saran, Instituto Central de Planificación y Diseño de Minas (India)
- Hu Yuhong, Administración Estatal para la Seguridad de los Trabajadores (China)

Contribuyentes a la *Guía de mejores prácticas para un drenaje y uso eficaz del metano en las minas de carbón* (febrero de 2010)

Comité Directivo Ejecutivo

- Pamela Franklin, Copresidenta del Subcomité para el Carbón de M2M
- Roland Mader, Vicepresidente del Grupo Especial de Expertos sobre el Metano de las Minas de Carbón de la CEPE
- Raymond C. Pilcher, Presidente del Grupo Especial de Expertos sobre el Metano de las Minas de Carbón de la CEPE
- Carlotta Segre, Secretaria del Grupo Especial de Expertos sobre el Metano de las Minas de Carbón de la CEPE
- Clark Talkington, ex-Secretario del Grupo Especial de Expertos sobre el Metano de las Minas de Carbón de la CEPE

Grupo de Expertos Técnicos para la Redacción

- Bharathe Belle, Anglo American
- David Creedy, Sindicatum Carbon Capital Ltd.
- Erwin Kunz, DMT GmbH & Co. KG
- Mike Pitts, Green Gas International
- Hilmar von Schoenfeldt, HVS Consulting

Grupo Asesor de Interesados

- Yuriy Bobrov, Asociación de Pueblos Mineros de Dombás (Ucrania)
- Graeme Hancock, Banco Mundial
- Martin Hahn, Organización Internacional del Trabajo
- Hu Yuhong, Administración Estatal para la Seguridad de los Trabajadores (China)
- Sergei Shumkov, Ministerio de Energía (Federación de Rusia)
- Ashok Singh, Instituto Central de Planificación y Diseño de Minas (India)
- Luke Warren, Instituto Mundial del Carbón (Reino Unido)

Grupo Técnico de Pares

- John Carras, Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (Australia)
- Hua Guo, Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (Australia)
- Li Guojun, Tiefa Coal Industry Ltd. (China)
- Glyn Pierce Jones, Trolex Ltd. (Reino Unido)
- B. N. Prasad, Instituto Central de Planificación y Diseño de Minas (India)
- Ralph Schlueter, DMT GmbH & Co. KG (Alemania)
- Karl Schultz, Green Gas International (Reino Unido)
- Jacek Skiba, Instituto Central de Minas de Katowice (Polonia)
- Trevor Stay, Anglo American Metallurgical Coal (Australia)
- Oleg Tailakov, Centro Internacional de Investigación sobre el Carbón y el Metano - Uglemetan (Federación de Rusia)

Siglas y abreviaciones

BIRF	Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento
CEPE	Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas
CH₄	Metano
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO₂	Dióxido de carbono
CO₂e	Dióxido de carbono equivalente
ESMAP	Programa de Asistencia para la Gestión en el Sector de la Energía (Banco Mundial)
GEI	Gas de efecto invernadero
GNC	Gas natural comprimido
GNL	Gas natural licuado
kWh	Kilovatio hora
l/s	Litros por segundo
m/s	Metros por segundo
m³/d	Metros cúbicos por día
m³/t	Metros cúbicos por tonelada
m³/s	Metros cúbicos por segundo
MCC	Metano de las capas de carbón
MDL	Mecanismo para un desarrollo limpio
mD	Milidarcio (en el uso común, equivale a aproximadamente 10 ⁻³ (μm) ²)
MMC	Metano de las minas de carbón
m	Metro
Mt	Megatón (10 ⁶ toneladas)
MtCO₂e	Millones de toneladas de CO ₂ equivalente
mtpa	Millones de toneladas por año
MW_e	Megavatios de capacidad eléctrica
Nm³	Metros cúbicos normales
PCA	Potencial de calentamiento atmosférico
RCE	Reducción certificada de las emisiones
RCM	Reactor catalítico monolítico
RVE	Reducción verificada de las emisiones
scfm	Pies cúbicos estándar por minuto

t/d	Toneladas por día
t	Tonelada
URE	Unidad de reducción de las emisiones
USBM	Oficina de Minas de los Estados Unidos
VAM	Metano del aire de ventilación

Glosario de términos

En la industria del carbón y el gas de mina sigue habiendo cierta confusión con respecto a los términos y abreviaturas empleados en las distintas jurisdicciones. Además de los términos que figuran a continuación, la CEPE ha preparado un *Glosario de términos y definiciones relacionados con el metano de las minas de carbón* que es más amplio y pone de relieve qué términos se emplean en las distintas regiones (www.unece.org/energy/se/pdfs/cmm/cmm4/ECE.ENERGY.GE.4.2008.3_e.pdf).

Exclusa: Configuración de puertas que permite pasar de una parte del circuito de ventilación de la mina a otra sin causar un cortocircuito.

Ventilación auxiliar: Proporción de la corriente de ventilación principal que se dirige hacia el frente de una galería de avance ciega (es decir, un acceso) mediante un ventilador y unos conductos auxiliares.

Retorno hacia atrás: Configuración temporal de la ventilación que se forma en el extremo de retorno de un tajo largo ventilado en U y que consiste en desviar una parte del aire por detrás del frente de manera que se pueda perforar para drenar el gas y evitar que se formen altas concentraciones de gases del macizo de relleno que se acumulan en el frente de arranque.

Pozo de purga: Pozo vertical a través del cual sale a la superficie el aire grisoso de los sectores de trabajo. Por lo general, no se corresponde con la caña de la mina, por la que discurre el personal y los materiales.

Galería de avance ciega: Pista de explotación con un único acceso que precisa ventilación auxiliar.

Cámaras y pilares: Método empleado en la minería para extraer carbón a través de una serie de galerías que están intercomunicadas dejando pilares de carbón sin excavar para sostener la bóveda.

Eficiencia de captura (drenaje): Proporción del metano (en términos de volumen) capturado en un sistema de drenaje de metano con respecto a la cantidad total de gas liberado. El gas liberado incluye la suma de gas drenado más el gas emitido al aire de ventilación de la mina. Por lo general, la eficiencia de captura (o de drenaje) se expresa en porcentajes y puede calcularse para un único panel de tajo largo o para toda la mina.

Gas del frente de carbón: Gas liberado del frente de arranque de la capa que está siendo explotada debido a la acción de la máquina de corte.

Metano de las capas de carbón (MCC): Término genérico para hacer alusión al gas rico en metano que está presente en las capas de carbón, que suelen contener entre un 80% y un 95% de metano y porcentajes menores de etano, propano, nitrógeno y dióxido de carbono. En el uso común internacional, este término se refiere al metano recuperado de las capas de carbón no explotadas mediante pozos perforados desde la superficie.

Metano de las minas de carbón (MMC): Gas capturado en una mina de carbón activa mediante técnicas de drenaje del metano subterráneo. El gas se compone de una mezcla de metano y otros hidrocarburos y vapor de agua. Suele estar diluido en aire y productos de la oxidación asociados, debido a las inevitables fugas de aire en los pozos o las galerías de drenaje de gas a través de fracturas inducidas por la actividad minera y a la fuga de aire por las imperfecciones de las juntas de los sistemas de tuberías subterráneas. Esta definición engloba el gas que se captura bajo la superficie, tanto si es drenado antes como después de la extracción del carbón, y también el gas drenado en los pozos de relleno de la superficie. El MMC drenado antes de la extracción del carbón puede ser de gran pureza y no se considera MMC si el pozo no ha sido explotado.

Gas inyectado: Emisiones de gas que no proceden directamente de las capas de carbón.

Drenaje del gas: Métodos para capturar el gas que se encuentra de manera natural en las capas de carbón a fin de evitar que entre en las galerías de ventilación de las minas. Se puede extraer el gas de las capas de carbón antes de explotar la mina empleando técnicas de predrenaje y se puede extraer de las capas de carbón que se han visto perturbadas por el

proceso de extracción mediante técnicas de posdrenaje. A menudo se habla de **drenaje del metano** cuando este último es el principal componente gaseoso que se quiere capturar. También se hace referencia a este proceso con la expresión "desgasificación" de minas.

Relleno: Suelo roto y permeable en el que se ha empleado el método de tajo largo para extraer carbón y se ha permitido el hundimiento de la bóveda, lo que ha generado la fracturación y relajación de los estratos situados justo encima y también, en menor medida, de los situados por debajo de la capa explotada.

Drenaje del metano: Véase **Drenaje del gas**.

Gas natural: Normalmente se refiere al gas extraído de estratos geológicos que no sean capas de carbón (es decir, de yacimientos de gas "convencionales"). Puede estar compuesto en su mayoría de metano y es posible que originalmente migrase desde capas de carbón.

Derrabe: Proyección violenta de carbón o roca acompañada de grandes volúmenes de gas (metano, dióxido de carbono o una mezcla de ambos) de un frente que acaba de quedar expuesto en una operación minera.

Predrenaje: Extracción de gas del carbón antes de la actividad minera.

Posdrenaje: Extracción del gas liberado como consecuencia de la actividad minera.

Polvo respirable: Partículas microscópicas de polvo que pueden entrar en los pulmones y dañarlos.

Metano de minas de superficie: Metano contenido en depósitos minerales y estratos circundantes y que se libera como consecuencia de las operaciones de minería en superficie.

Metano del aire de ventilación (VAM): Metano que emiten las capas de carbón y que entra en el aire de la ventilación y sale por el pozo de ventilación en concentraciones bajas, por lo general de entre el 0,1% y el 1,0% por volumen.

Resumen

Desde la Revolución Industrial, una parte significativa de la producción mundial de energía primaria se ha basado en el carbón y la economía mundial dependerá de los recursos energéticos del carbón en el futuro inmediato. En la actualidad, el carbón representa aproximadamente el 30% de la energía primaria, el 40% de la electricidad mundial, y casi el 70% de la industria mundial del acero y el aluminio. La Agencia Internacional de la Energía (IEA) prevé una desaceleración gradual de la demanda mundial de carbón; sin embargo, las economías emergentes de Asia, y en particular China y la India, siguen impulsando la demanda mundial, que podría llegar a 9.000 millones de toneladas en todo el mundo en 2019, a pesar de los intentos de China de reducir su dependencia del carbón (IEA, 2014). La producción mundial de carbón en 2013 fue de 7.800 millones de toneladas (Asociación Mundial del Carbón).

Puesto que se sigue dependiendo de la producción de carbón, se prevé que su extracción sea cada vez más difícil en muchas partes del mundo a medida que se agoten las reservas superficiales y se exploten capas más profundas y más grisúosas. Sin embargo, las sociedades exigen y esperan de la industria del carbón que las condiciones de trabajo sean más seguras y que haya una mayor ordenación ambiental. La aplicación de mejores prácticas de drenaje y utilización del metano es fundamental para reducir los accidentes y las explosiones asociados a ese gas que a menudo se producen en la minería de carbón, y para contribuir a la protección del medio ambiente al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

El metano de las minas de carbón plantea desafíos en materia de seguridad y medio ambiente

A la industria del carbón mundial, así como a los Gobiernos nacionales, los sindicatos y los defensores de la seguridad de los trabajadores, les preocupa lo inaceptablemente elevadas que son la frecuencia y la gravedad de las explosiones de metano, especialmente en las economías emergentes. Las buenas prácticas de la minería deben trasladarse a todos los países a fin de garantizar que los riesgos se gestionen de manera profesional y eficaz. Ninguna mina, ni siquiera las de los países más desarrollados, está exenta de riesgos de seguridad. Independientemente de su ubicación o de las condiciones de extracción, es posible reducir considerablemente el riesgo de incidentes y explosiones relacionados con el metano.

El metano es un gas que resulta explosivo cuando su concentración oscila entre el 5% y el 15% en el aire. Su transporte, recuperación o uso en esa concentración, o de hecho con un factor de seguridad de al menos 2,5 veces su límite inferior de explosividad (2,0%) y como mínimo dos veces el límite superior (30%) se considera en general inaceptable por el riesgo inherente de explosión.

Gestionar de manera efectiva los riesgos que entraña el metano en las minas de carbón puede también tener la ventaja de contribuir a la reducción de las emisiones de GEI. Las minas de carbón constituyen una importante fuente de emisiones de metano, un potente GEI con un potencial de calentamiento atmosférico (PCA) entre 28 y 34 veces mayor que el de las emisiones de dióxido de carbono (IPCC, 2014). El metano supone el 20% de las emisiones antropógenas de GEI utilizando el PCA para el metano que figura en el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) y las minas de carbón liberan el 8% de las emisiones antropógenas de metano de todo el mundo (USEPA, 2012). Se prevé que las emisiones de MMC aumenten y, según las estimaciones de demanda de carbón de la IEA mencionadas anteriormente, las emisiones mundiales de metano procedentes de las minas de carbón podrían superar los 1.000 millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e) para 2019 (PCA = 25; Densidad = 0,716 kg/m³; emisiones específicas de metano = 9 m³/t).

Presencia y control del metano

Los gases ricos en metano, que por lo general contienen entre un 80% y un 95% de metano en las profundidades de las minas subterráneas, se encuentran de manera natural en las capas de carbón y se liberan como MMC cuando las actividades mineras perturban esas capas. El MMC únicamente es inflamable y presenta riesgo de explosión cuando entra en contacto con el aire.

En las minas de carbón de ciertos entornos geológicos (como Australia, Sudáfrica, Francia y Europa Central y Oriental) también se liberan emisiones de grandes volúmenes de dióxido de carbono, lo que puede tener implicaciones importantes para las estrategias generales de gestión de la desgasificación. Cuando se produce un derrabe, la proyección rápida de roca o carbón puede ir acompañada de emisiones de grandes volúmenes de metano, dióxido de carbono, o de una mezcla de ambos. El riesgo puede verse agravado por efectos secundarios como la explosión y la asfixia. El predrenaje sistemático destinado a reducir los niveles iniciales de gas puede prevenir esos peligrosos sucesos.

Una buena práctica de seguridad en las minas de carbón consiste en reducir el riesgo de explosión evitando que se produzcan mezclas explosivas y, cuando sea factible, vigilando y diluyendo con rapidez tales mezclas a concentraciones seguras (por ejemplo, mediante sistemas de ventilación) cuando se detecten niveles anormales de metano. Cuando los flujos de gas son tan elevados que exceden la capacidad del sistema de ventilación para garantizar que el metano se diluya debidamente en el aire de la mina, hay que recuperar el gas con un sistema de drenaje antes de que entre en las galerías de ventilación de la mina.

Aplicar buenas prácticas en los sistemas de drenaje de metano en las minas implica tanto escoger un método adecuado para la captura del gas como aplicar y ejecutar debidamente el sistema de drenaje de la mina. Al aplicar las buenas prácticas, se garantizará que el MMC se pueda capturar, transportar y (en caso oportuno) utilizar, en concentraciones que como mínimo dupliquen el límite superior de explosividad (es decir, de al menos un 30% de metano).

Enfoques normativos para el control del metano

Emplear un enfoque de evaluación de los riesgos para reducir al mínimo el riesgo de explosión —además de aplicar con firmeza una reglamentación sólida en materia de ventilación y seguridad de uso— puede mejorar la seguridad en las minas y conllevar una mejora sustancial en la cantidad y la calidad del gas capturado.

Además, la redacción y aplicación de reglamentos de seguridad para regular la extracción, el transporte y el uso de gas favorecerán la existencia de normas más rigurosas para el drenaje del metano y el aumento de la producción de energía limpia y de las reducciones de las emisiones.

Predicción de fugas de metano subterráneo

Los flujos de gases en las minas subterráneas de carbón en condiciones normales y estables son relativamente predecibles en determinadas condiciones geológicas y mineras, si bien puede haber variaciones notables de un país a otro. La falta de métodos de predicción fiables para minas profundas o con múltiples capas sigue suponiendo un reto importante, debido a las complejas interacciones inducidas por las actividades mineras entre estratos, acuíferos y fuentes de gases. No obstante, se puede acceder fácilmente a métodos que han demostrado su eficacia para generar proyecciones de flujos de gases, captura de gases, requisitos de ventilación y potencial de uso, y deberían emplearse de manera habitual en la planificación de minas.

Por su propia naturaleza, las emisiones inusuales y los derrabes no son fáciles de predecir, si bien las condiciones en las que se producen se conocen razonablemente bien. Por consiguiente, la aplicación de buenas prácticas permite gestionar de manera más eficaz esos riesgos.

En ciertas ocasiones, la actividad minera puede alterar yacimientos adyacentes de gas natural, lo que provoca fugas de metano que podrían ser de hasta el doble de lo que cabría esperar si se tratara únicamente de capas de carbón. Esas situaciones pueden detectarse en sus primeras etapas al comparar las mediciones de datos con las predicciones de resultados.

Función de los sistemas de ventilación

El ritmo máximo de extracción de carbón que se puede lograr con seguridad en un frente de arranque de carbón grisoso se determina principalmente por la combinación de dos factores: por un lado, la capacidad del sistema de ventilación de la mina para diluir los contaminantes gaseosos hasta unas concentraciones aceptables y, por otro, la eficiencia del sistema de drenaje de metano de la mina.

Los costos de explotación son un factor clave en el diseño del plan general de desgasificación de una mina. La energía consumida para ventilar una mina subterránea está entre los costos de explotación más caros de una mina; es proporcional al volumen del flujo de aire cubicado. Así pues, introducir un sistema de drenaje de gas (o aumentar la efectividad del sistema existente) constituye a menudo una opción más barata que aumentar los volúmenes de aire de ventilación.

Drenaje del metano

El drenaje del metano consiste en capturar gas de gran pureza en su fuente antes de que se introduzca en las galerías de ventilación de la mina. Desde una perspectiva estrictamente de reglamentación, solo se ha de capturar gas suficiente para que no se supere la capacidad del aire de ventilación de diluir los contaminantes gaseosos. Sin embargo, existen importantes razones para maximizar la captura del gas a fin de mejorar la seguridad, la mitigación ambiental y la recuperación de energía.

El metano se puede capturar antes, durante y después de la extracción del carbón, empleando en cada caso técnicas específicas para cada momento. El predrenaje es el único medio de reducir el flujo de gas directamente en la capa explotada. Por esa razón, es particularmente importante si la capa de la que se extrae es la principal fuente de emisión del gas, si bien por lo general es más factible en capas de permeabilidad media o alta, salvo que se aumente la permeabilidad del carbón en el área próxima al pozo y hacia el interior de la capa mediante técnicas de estimulación, como la fracturación hidráulica. Los métodos de posdrenaje consisten en interceptar el metano que se ha liberado con las perturbaciones causadas por la actividad minera antes de que dicho gas pueda introducirse en las galerías de ventilación de la mina. Con todas las técnicas de posdrenaje se ha de acceder a la zona de perturbación situada por encima (y a veces también por debajo) de la capa de carbón que se ha explotado y puede que haya que perforar desde la superficie o desde el subsuelo.

La baja eficiencia de la captura de gases del sistema de drenaje y la excesiva entrada de aire a los tajos de las minas pueden deberse a que no se han escogido los métodos de drenaje idóneos o a que estos no se han aplicado debidamente. Esto, a su vez, repercute negativamente en el transporte y el uso de gas, al generar concentraciones gaseosas que en ocasiones alcanzan niveles que no se consideran seguros (por ejemplo, por debajo del 30% de metano).

Se puede mejorar notablemente el rendimiento de los sistemas de drenaje de metano existentes si se combina una correcta instalación y un mantenimiento adecuado, la vigilancia del flujo y una perforación sistemática.

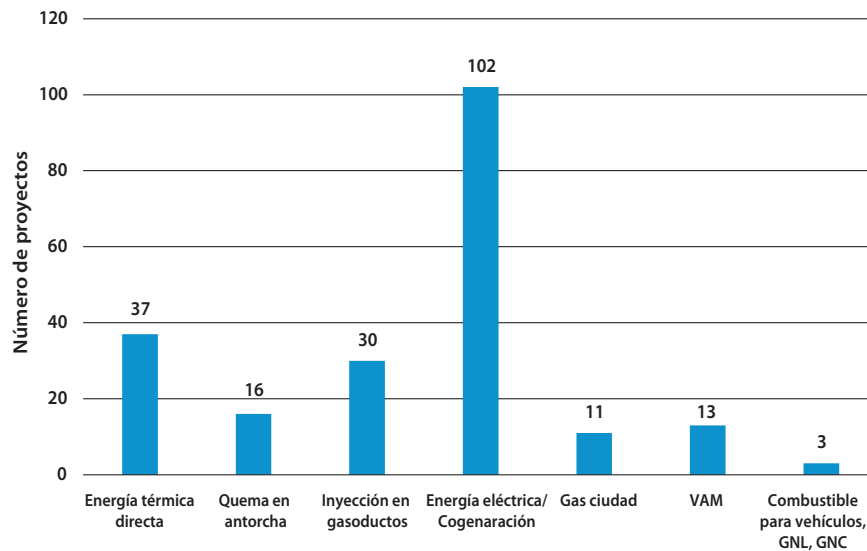
Resulta muy rentable instalar y emplear sistemas de drenaje de metano de alta eficiencia. Controlar efectivamente los gases es un factor fundamental para la rentabilidad de las minas de carbón subterráneas grisosas.

Según muestran las experiencias de minas de carbón de todo el mundo, invertir en "buenas prácticas" en los sistemas de drenaje de gases supone reducir el tiempo de inactividad por problemas de emisiones de gases, disponer de entornos más seguros para desarrollar la actividad minera y tener la oportunidad de utilizar más metano de minas de carbón y reducir las emisiones de GEI.

Utilización y reducción del metano

El MMC capturado es un recurso energético limpio que tiene múltiples usos. En la figura ES-1 se resume la distribución de los proyectos operacionales de MMC que se conocen en todo el mundo. Las cifras se basan en una base de datos compilada por la Iniciativa Global de Metano (GMI). Como se desprende de la figura, los tipos de proyectos predominantes (por número de proyectos) son los de generación de energía eléctrica, inyección en gasoductos de gas natural y calderas.

Figura ES-1 Distribución de los usos del MMC en proyectos mundiales. Esta figura muestra todos los proyectos de MMC activos que se han comunicado a la GMI, clasificados por tipo y uso final



(Fuente: Base de datos de proyectos de metano de minas de carbón de la Iniciativa Global de Metano, agosto de 2015.)

Se han desarrollado tecnologías de purificación cuyo uso está muy extendido (por ejemplo, en los Estados Unidos) para eliminar los contaminantes del MMC de gran calidad (por lo general, capturado mediante predrenaje) a fin de cumplir las estrictas normas de calidad de los gasoductos (USEPA, 2009). En el caso de muchas otras aplicaciones de uso final del gas, es probable que no haya que asumir los elevados costos asociados a la purificación del gas drenado, que pueden evitarse mejorando las normas para el drenaje del metano subterráneo.

Con el equipo y los procedimientos adecuados, el gas drenado que no se utilice puede quemarse en condiciones seguras para minimizar las emisiones de GEI. La quema en antorcha transforma el metano, que tiene un PCA de 28 a 34, en dióxido de carbono, que tiene un PCA de 1 (IPCC, 2014).

El metano que no se captura con el sistema de drenaje se diluye en el aire de ventilación de la mina y se libera a la atmósfera como metano del aire de ventilación (VAM) en concentraciones del 1% o inferiores. Si bien se libera en concentraciones muy bajas, en conjunto el VAM supone la principal fuente de emisiones de metano de las minas a nivel mundial. En varios emplazamientos de todo el mundo (como Australia, China y los Estados Unidos) se han introducido tecnologías de oxidación térmica a escala de demostración y también a escala comercial para reducir esas emisiones (y, en dos casos, para producir electricidad a partir del metano diluido). Asimismo, están emergiendo y desarrollándose otras tecnologías para mitigar las emisiones de VAM (por ejemplo, la oxidación catalítica, la combustión de combustible improductivo y los hornos rotatorios).

Costos y cuestiones económicas

Un drenaje eficaz del gas reduce el riesgo de desprendimientos de gas, explosiones de metano y, en última instancia, accidentes. A su vez, reducir esos riesgos implica disminuir los costos asociados a ellos. Los costos de los accidentes relacionados con el metano son elevados, si bien varían mucho de un país a otro. Por ejemplo, un 10% de inactividad o paralización de los trabajos en una mina debido a incidentes o accidentes relacionados con el gas podría suponer unas pérdidas de ingresos anuales de entre 8 y 16 millones de dólares de los Estados Unidos en una mina ordinaria de tajo largo muy productiva. Los costos adicionales que supondría un solo accidente mortal en una gran explotación minera

podrían oscilar entre los 2 y los 8 millones de dólares entre pérdidas de producción, costas legales, indemnizaciones, multas punitivas e incluso el cierre de la mina. En un caso que se produjo en los Estados Unidos, una empresa minera pagó 220 millones de dólares en concepto de multas y sanciones¹.

Al mismo tiempo, el drenaje del gas constituye una oportunidad para su recuperación y uso. Esos proyectos de recuperación de energía pueden resultar económicos en sí mismos con la venta del gas o su transformación en electricidad, combustible para vehículos u otras valiosas materias primas de gas.

Asimismo, los proyectos de recuperación y utilización del gas también incluyen cada vez con mayor frecuencia ingresos procedentes de créditos de reducción de las emisiones de carbono en forma de reducciones verificadas de las emisiones (RVE), reducciones certificadas de las emisiones (RCE) u otros créditos, como unidades de reducción de las emisiones (URE). Estas posibles opciones de financiación del carbono podrían ser un factor decisivo para conseguir que determinados proyectos de utilización del MMC, que de otro modo no tendrían interés financiero, sean viables económicamente. Además, la financiación de los créditos del carbono puede constituir la única fuente de ingresos para los proyectos con fines únicamente de reducción del gas, como los de oxidación de VAM (sin recuperación de energía) o la quema en antorcha de MMC.

El VAM también se puede utilizar para generar energía eléctrica. Actualmente, la generación de energía derivada del MMC no es viable comercialmente sin ingresos procedentes del carbono u otros incentivos, como la fijación de precios preferenciales o normas de cartera para la electricidad.

En la actualidad, en la mayoría de las minas las decisiones de inversión van más encaminadas a favorecer la expansión de la producción de carbón que a desarrollar proyectos de utilización de MMC (en particular, para la generación de electricidad) debido al elevado costo de oportunidad de invertir en bienes de equipo e infraestructuras para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, para cumplir los objetivos de protección del medio ambiente en el futuro, es probable que a los propietarios de las minas se les exija que mejoren el rendimiento del drenaje de gas más allá del nivel estrictamente necesario para satisfacer las necesidades de seguridad de las minas. Esas mejoras en el sistema de drenaje, que producirán gases de una calidad relativamente alta, pueden suponer un incentivo adicional para la inversión en proyectos de recuperación y utilización del gas.

Conclusiones

Un enfoque holístico para gestionar las fugas de metano en las minas de carbón y las subsiguientes emisiones de metano a la atmósfera repercutirá positivamente en la seguridad general de la mina, su productividad y los efectos en el medio ambiente, particularmente en lo relativo a las emisiones de GEI.

- La puesta en práctica en todo el mundo de los conocimientos acumulados sobre la presencia de metano, la predicción de fugas de metano y el control y el manejo de ese gas mejorará la seguridad en las minas. La aplicación

¹ Dos ejemplos recientes son las explosiones en las minas Pike River, en Nueva Zelanda, y Upper Big Branch (UBB), en el estado de Virginia Occidental (Estados Unidos), que tuvieron lugar en 2010. La mina UBB sufrió una explosión catastrófica en abril de 2010 que supuso la pérdida de 29 vidas y causó daños importantes a la mina. Las consecuencias del accidente fueron considerables. Tras el accidente, la mina se cerró y quedó abandonada de manera permanente; Massey Energy, una de las principales empresas del carbón de los Estados Unidos, quebró y Alpha Natural Resources adquirió sus activos. Varios de los antiguos directivos de Massey fueron declarados culpables y condenados a prisión, entre ellos Don Blankenship, antiguo consejero delegado de Massey Energy. En total, las multas y sanciones ascendieron a 220 millones de dólares: una multa civil de 10,8 millones impuesta por la Administración de Seguridad y Salud en las Minas de los Estados Unidos y 209 millones que el Departamento de Justicia exigió a la empresa, cantidad que incluía 46,5 millones en concepto de pagos de restitución, 34,8 millones de multas por infracciones de seguridad, 48 millones para llevar a cabo una investigación sobre seguridad y salud y crear un fondo fiduciario de desarrollo, y 80 millones para efectuar mejoras de seguridad en el plazo de dos años. La explosión de Pike River tuvo lugar en noviembre de 2010, y provocó también la muerte de 29 mineros. Una Comisión Real de Investigación sobre la tragedia determinó que la mina explotada por la empresa era insegura y que la normativa y la inspección de la mina llevada a cabo por el Departamento de Trabajo no habían logrado prevenir el accidente. La mina, en la que se habían invertido 195 millones de dólares, está a día de hoy sellada y la zona ha pasado a formar parte de un parque nacional. Pike River Coal se declaró en quiebra pocas semanas después del incidente; fue condenada a pagar una multa de cerca de medio millón de dólares y unos 3,2 millones en concepto de indemnizaciones a las familias de las víctimas. Cinco años después del incidente nadie ha sido enjuiciado.

de buenas prácticas para el drenaje de metano podría reducir considerablemente los riesgos de explosión a causa del metano en las minas de carbón.

- En las minas de carbón subterráneas, se generan emisiones de metano —potente GEI y recurso energético— que pueden reducirse considerablemente usando el gas drenado, quemando el gas que no pueda usarse y mitigando las emisiones de VAM mediante la oxidación.
- También puede ser muy rentable explotar y recuperar la energía del gas capturado, puesto que con esos sistemas aumentará el volumen de MMC de buena calidad disponible.

Capítulo 1. Introducción

Mensajes clave

Con independencia de las limitaciones existentes, la seguridad de los trabajadores de las minas es fundamental y no debe ponerse en peligro.

El enfoque de evaluación del riesgo para minimizar los riesgos de explosión ha de ir acompañado de la firme aplicación de una reglamentación sólida en materia de ventilación y seguridad de uso.

Lo ideal sería que las empresas modernas de extracción de carbón reconocieran los beneficios que supone adoptar un sistema integral de gestión de gases que integre constructivamente el control de los gases subterráneos, la utilización del metano y las reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

1.1 Objetivos de este documento de orientación

El presente documento tiene por objeto proporcionar orientaciones a los propietarios y explotadores de minas, así como a los reguladores gubernamentales y a los encargados de la formulación de las políticas, para la preparación y la aplicación de métodos seguros y eficaces de captura y control del metano en las minas de carbón subterráneas. Su principal objetivo es fomentar unas prácticas mineras más seguras para reducir las muertes, lesiones y pérdidas de bienes relacionadas con el metano.

Un importante beneficio colateral que aporta el drenaje efectivo del metano en las minas de carbón es la recuperación de metano para optimizar el uso de recursos energéticos que de otro modo se malgastarían. Así pues, uno de los motivos importantes para redactar este documento orientativo era facilitar y estimular el uso y la reducción del metano de las minas de carbón (MMC) a fin de reducir las emisiones de GEI. En última instancia, incorporar esas prácticas en los procedimientos de explotación de las minas contribuirá a mejorar la sostenibilidad y la situación financiera a largo plazo de las minas de carbón a nivel global:

- Aspirando al objetivo de que no se produzcan víctimas mortales, ni daños físicos o materiales.
- Demostrando el compromiso global del sector del carbón con la seguridad en las minas, la mitigación del

cambio climático, la responsabilidad social corporativa y el civismo.

- Entablando un diálogo global sobre la captura y el uso de MMC.
- Estableciendo vínculos esenciales entre la industria del carbón, los Gobiernos y los funcionarios responsables de la reglamentación.
- Incorporando la captura efectiva de MMC en la cartera de gestión efectiva del riesgo.

Este documento de orientación es un texto deliberadamente "basado en principios". Es decir, no pretende presentar un enfoque integral y prescriptivo, que podría no ilustrar debidamente las condiciones, la geología y las prácticas mineras específicas de una determinada explotación. Los autores reconocen que no existe una solución universal y por ello han establecido un conjunto amplio de principios que pueden adaptarse, según corresponda, a las circunstancias particulares de cada caso. En general, las tecnologías para aplicar esos principios siguen evolucionando y mejorando con el tiempo. En este documento se describen, según proceda, las mejores prácticas del sector en el ámbito internacional.

El documento no pretende ser un manual técnico exhaustivo y detallado sobre el drenaje del metano. Al final del documento y en la página dedicada al metano de las minas de carbón del sitio web de la CEPE² se incluyen referencias y recursos adicionales.

1.2 Problemas

El carbón es un recurso energético esencial tanto en los países industrializados como en las economías emergentes. Satisfacer la voraz demanda de energía, en particular en algunas economías de rápido crecimiento, ha supuesto una presión impuesta a las minas de carbón para que aumenten su producción, en ocasiones hasta límites que exceden del nivel que se podría mantener en condiciones de seguridad, lo que ha generado tensiones en las explotaciones mineras en general y ha puesto en peligro la seguridad. La presencia de metano en las minas de carbón supone una grave preocupación de seguridad que debe gestionarse de manera profesional y eficaz. Si

² <http://www.unece.org/energy/se/cmm.html>.

bien las explosiones de metano en las minas de carbón subterráneas son poco habituales en muchos de los países que se dedican a la extracción del carbón, siguen causando miles de muertos y heridos en las minas cada año.

Un solo incidente puede provocar muchas muertes. El cuadro 1.1 muestra algunas de las explosiones más graves de minas de carbón con víctimas mortales que se han producido en varios países desde 2010. Si se gestionara eficazmente el metano de las minas, se podría eliminar una de las causas fundamentales de esas tragedias.

Se pueden producir accidentes cuando el metano entra en el espacio de la mina procedente de la capa de carbón y los estratos circundantes como resultado de una perturbación causada por la actividad minera. La cantidad de gas liberado en la mina depende tanto del ritmo de extracción del carbón como del contenido de gas *in situ* del carbón y de los estratos circundantes.

Los organismos reguladores de cada país fijan límites máximos para la concentración de metano en las galerías de ventilación subterráneas. Por tanto, los escapes de metano en los tajos de las minas pueden ser un factor que restrinja la producción de carbón³.

Se han producido derrabes con eyecciones violentas de carbón y grandes volúmenes de gas desde frentes de arranque recién expuestos que han supuesto pérdidas de equipos, de producción de carbón, de minas enteras y de muchas vidas. Por ejemplo, el 20 de octubre de 2004 en la mina de carbón de Daping, situada en la ciudad de Xinmi, en la provincia de Henan (China), se produjo

³ La causa de la explosión y el incendio de la mina de Soma está todavía por determinar dos años después del incidente.

un derrabe seguido de una explosión que provocó 148 víctimas mortales (Xu y otros, 2006). Entre los principales derrabes de los que se tiene constancia, destaca el que se produjo en la mina de carbón de Gagarin, en la cuenca carbonífera de Donetsk (Ucrania), en el que se eyectaron 14.500 t de carbón con cerca de 600.000 m³ de metano. La mayoría de los derrabes se han producido en las galerías de avance, aunque también se han registrado incidentes en los tajos largos. Desde el primer incidente de que se tuvo constancia, que se produjo en Francia en 1843, se han registrado cerca de 30.000 derrabes en todo el mundo; más de un tercio de ellos, en China.

Se necesitan urgentemente pautas para ayudar a los Gobiernos a aplicar con prontitud prácticas de trabajo que reduzcan el riesgo que supone el metano en las minas de carbón subterráneas. Según muestran los datos disponibles, hay una gran variación en la tasa de letalidad de las minas de carbón subterráneas de distintos países de todo el mundo. Por ejemplo, el porcentaje de víctimas mortales por cada millón de toneladas de carbón extraído puede ser incluso más de cinco veces superior en un país que en otro⁴. No obstante, este dato estadístico depende en gran medida del grado de mecanización y la mejor manera de medir la seguridad consiste en relacionar los

⁴ Según datos (estadísticas oficiales) de víctimas mortales en la minería subterránea de carbón en China (2015) y los Estados Unidos (2014). En 2015, en China se registraron 598 muertes por 3.600 millones de toneladas de carbón subterráneo extraído (asumiendo que el 97% del total de la producción registrada procedía de minas de carbón subterráneas), lo que supone un índice de 0,17 muertes por cada millón de toneladas de carbón subterráneo extraído (SAWS, 2016). En 2014, en los Estados Unidos se registraron diez muertes en minas de carbón subterráneas, con una producción de 346,9 millones de toneladas, lo que equivale a 0,03 muertes por cada millón de toneladas de carbón subterráneo extraído (Asociación Nacional de Minería, febrero de 2016).

Cuadro 1.1 Principales incidentes por explosiones en minas de carbón desde 2010

País	Fecha	Mina de carbón	Número de víctimas
China	29 de marzo de 2013	Babao, Jilin	52
Columbia	16 de junio de 2010	San Fernando	73
Estados Unidos	5 de abril de 2010	Upper Big Branch	29
Nueva Zelanda	19 de noviembre de 2010	Pike River	29
Pakistán	20 de marzo de 2011	Sorange, Quetta	52
Rusia	25 de febrero de 2016	Vorkuta	36
Rusia	8 de mayo de 2010	Raspadskaya	90
Turquía ³	13 de mayo de 2014	Soma	301
Ucrania	4 de marzo de 2015	Zasyadko	34

Explosiones de gas en la mina de carbón de Pike River (Nueva Zelanda)

Situación. No se había tenido en cuenta el peligro que podía suponer el gas. Durante la exploración y el desarrollo, no se obtuvieron datos sistemáticos sobre la capa gasífera y sobre las características de las emisiones del yacimiento de carbón. Solo cuando el gas se convirtió en un problema se hizo un intento precipitado por controlarlo. Además, ni el diseño ni la instalación del equipo eléctrico de una parte de la mina subterránea cumplían las normas de protección frente a explosiones en las minas. Durante varios días, hubo una serie de explosiones seguidas de un incendio. Perdieron la vida 29 mineros.

Solución. Se creó una Comisión Real para investigar la tragedia. Esta recomendó que se incluyeran cambios importantes en las reglamentaciones de salud y seguridad en las minas de carbón de Nueva Zelanda; que se mejorase la gobernanza empresarial, que se adoptasen mejores prácticas de control del gas, citando la *Guía de mejores prácticas para un drenaje y uso eficaz del metano en las minas de carbón*; y que los trabajadores participasen más activamente en los programas de salud y seguridad.

Véase más información en el estudio de caso 10.

cuasiaccidentes, los heridos y las víctimas mortales con el número de turnos u horas trabajados.

Ninguna mina de carbón está exenta de riesgos de seguridad. Se pueden producir incidentes relacionados con el gas incluso en las minas de carbón subterráneas más modernas. Los avances tecnológicos reducen el riesgo de que se produzcan víctimas mortales a causa de explosiones, pero la tecnología por sí sola no basta para resolver el problema. La cultura de gestión, la estructura organizativa, la participación de los trabajadores, la capacitación y los sistemas de reglamentación y aplicación de la ley son componentes esenciales de un proceso eficaz de gestión de riesgos. Conocer y entender los principios básicos del control del metano es fundamental para diseñar controles y sistemas efectivos. En última instancia, todas las explosiones accidentales son la demostración de que no se han aplicado de manera efectiva prácticas y procedimientos seguros.

Las minas de carbón constituyen una importante fuente de emisiones de metano, un potente GEI con un potencial de calentamiento atmosférico (PCA) entre 28 y 34 veces mayor que el del dióxido de carbono en un período de

100 años (IPCC, 2014). El metano supone el 20% de las emisiones antropógenas de GEI si se utiliza el PCA para el metano que figura en el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) y el 16% si se utiliza el PCA para el metano del Cuarto Informe de Evaluación (2007). Las minas de carbón liberan el 8% de las emisiones antropógenas de metano (USEPA, 2012). Se prevé que las emisiones de MMC aumenten y, según la estimación de demanda de carbón que la IEA fija en 9.000 millones de toneladas (IEA, 2014), las emisiones mundiales de metano procedentes de las minas de carbón podrían superar los 1.000 millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e) para 2019 (PCA = 25; Densidad = 0,716 kg/m³; emisiones específicas de metano = 9 m³/t).

Se estima que más del 90% de estas emisiones de MMC procede de minas subterráneas y que entre el 70% y el 80% de ese porcentaje se emite en concentraciones muy diluidas (por lo general, menos de un 1% de metano) a través del aire de ventilación de la mina.

Ya existen tecnologías que podrían reducir considerablemente las emisiones de metano procedentes de la extracción de carbón. Para aplicarlas con éxito, es necesario contar con el liderazgo y el apoyo de los Gobiernos, disponer de mecanismos de financiación adecuados y contar con el compromiso de la industria de la minería del carbón a nivel mundial.

1.3 Drenaje, captura, uso y reducción del gas

El drenaje, la captura y el uso del gas en las minas de carbón no suponen ninguna novedad, si bien se han ido introduciendo mejoras notables en las tecnologías empleadas y en su aplicación a lo largo de varios siglos. El primer drenaje de metano del que se tiene constancia tuvo lugar en el Reino Unido en 1730. Durante la primera mitad del siglo XX se introdujeron en Europa sistemas de drenaje del metano más modernos y controlados⁵. Probablemente en el siglo XVIII ya se usó el gas procedente de las minas para el alumbrado, algo de lo que se tuvo constancia en la década de 1880.

En la década de 1950, se extendió por toda Europa el uso de los métodos sistemáticos y efectivos de captura del gas que se habían desarrollado en Alemania. Desde los años sesenta del siglo XX, ha ido en aumento el uso del gas drenado, que se destinó al principio a calderas y procesos

⁵ Entre ellos figuran los sistemas de la cuenca de la Alta Silesia en Polonia en 1937 y en Alemania en 1943.

industriales y más adelante a la generación de energía eléctrica, el gas de gasoductos y el gas ciudad.

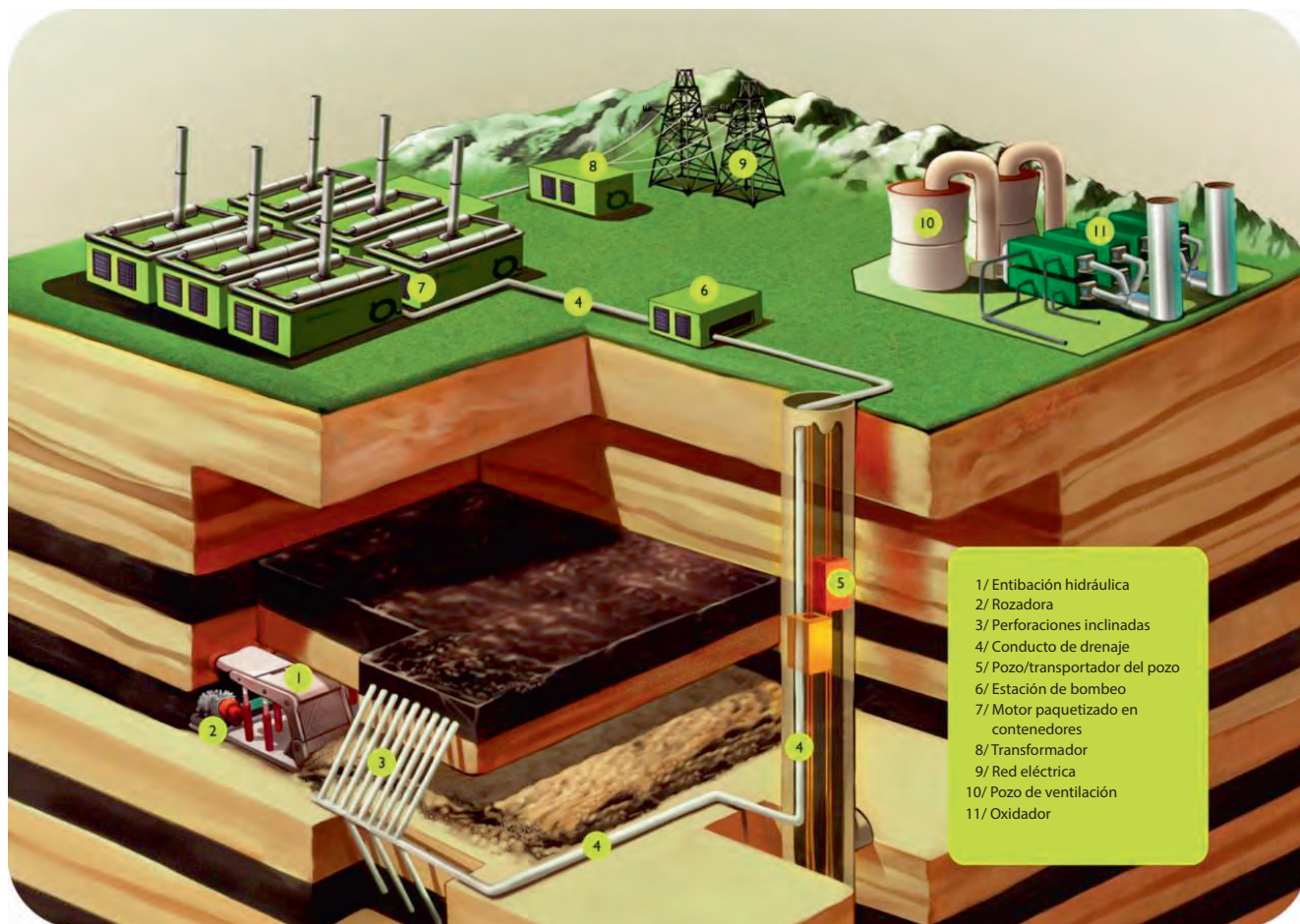
La figura 1.1 ilustra una perspectiva seccional esquemática y tridimensional de las labores de una mina de carbón subterránea y de las instalaciones de superficie. El gráfico muestra la complejidad y los aspectos interrelacionados de los sistemas de drenaje y recogida de gas de las minas subterráneas con las instalaciones de superficie que son necesarias para transformar el MMC en electricidad. También muestra la reducción simultánea de metano del aire de ventilación (VAM) de los pozos de ventilación de la mina.

En la actualidad, hay más de 200 proyectos de recuperación y utilización de gas MMC operativos en todo el mundo (GMI, 2015). El MMC se destina predominantemente a

la generación de energía eléctrica, si bien también se dedica a otros usos, como el combustible para calderas, la inyección en gasoductos de gas natural, el gas ciudad, la energía base que se convertirá en combustible para vehículos como el gas natural licuado (GNL) o el gas natural comprimido (GNC).

En algunos casos, el metano que no puede ser recuperado y utilizado de manera económica debido a la impracticabilidad de las condiciones del lugar o de los mercados es destruido (por ejemplo, se quema y se transforma en dióxido de carbono). Esto reduce el PCA de las emisiones. Esas reducciones de emisiones también tienen el potencial de generar ingresos procedentes de los créditos de carbono en algunos países, a través de los mercados del carbono, tanto regulados como voluntarios.

Figura 1.1 Esquema del sistema de drenaje de una mina de carbón subterránea y de las instalaciones de superficie para la recuperación de energía y la reducción de MMC



(Cortesía de Green Gas International.)

Capítulo 2. Elementos fundamentales del control de gases

Mensajes clave

El establecimiento y la aplicación de normas para la extracción, el transporte y el uso de gas en condiciones de seguridad favorecen un drenaje más riguroso del metano, así como el aumento de la producción de energía limpia y de las reducciones de las emisiones.

A nivel global, el sector conoce bien los riesgos que entrañan las explosiones de metano y tiene mucha experiencia gestionándolos.

No obstante, ni las leyes ni la más avanzada tecnología bastan por sí solas para conseguir unas condiciones de trabajo seguras en entornos de minas grisuosas. Para la seguridad de su funcionamiento, es fundamental contar con unos sistemas, una organización y unas prácticas de gestión racionales y efectivos. Asimismo, es fundamental para la seguridad en las minas formar y capacitar debidamente tanto a los gerentes como a los trabajadores, además de fomentar la participación de estos últimos en la adopción y revisión periódica de prácticas de seguridad.

2.1 Objetivos del control del gas de las minas

Los sistemas de control de gases tienen como principales objetivos la prevención de los desprendimientos de gas, las explosiones de metano y los riesgos de asfixia en las minas de carbón subterráneas. En algunas minas de carbón, el metano liberado en un frente activo de tajo largo puede diluirse eficazmente por debajo de las concentraciones máximas permisibles con solo utilizar técnicas de ventilación. Sin embargo, si se prevé que los flujos de metano desde el frente de arranque sean mayores, habrá que combinar la ventilación con el drenaje del metano. El uso de mejores prácticas para el control de gases no solo mejorará la seguridad, sino también las perspectivas de utilización del gas.

Existen medidas de protección para reducir la propagación de una explosión cuando esta se produce, y son importantes como segunda línea de defensa. Sin embargo, la mitigación del metano tras un accidente no sustituye a la prevención, en la que se centra la presente guía.

2.2 Riesgos que generan los gases

En las capas de carbón se encuentran de manera natural gases con un alto contenido de metano, por lo general entre un 80% y un 95%, que se liberan con las perturbaciones causadas por la actividad minera. El gas de las capas de carbón solo es inflamable y presenta riesgo de explosión cuando entra en contacto con el aire.

En las minas de carbón de ciertos entornos geológicos también se generan emisiones de grandes volúmenes de dióxido de carbono. En algunos países se producen desprendimientos de dióxido de carbono, y estos suelen ser más violentos, peligrosos y difíciles de controlar que los de metano, debido a que el carbón tiene una mayor capacidad de adsorción de dióxido de carbono y también a la toxicidad del gas. El dióxido de carbono es más pesado que el aire y resulta tóxico en concentraciones superiores al 5% en el aire, si bien se pueden experimentar sus efectos fisiológicos en concentraciones de incluso un 1%.

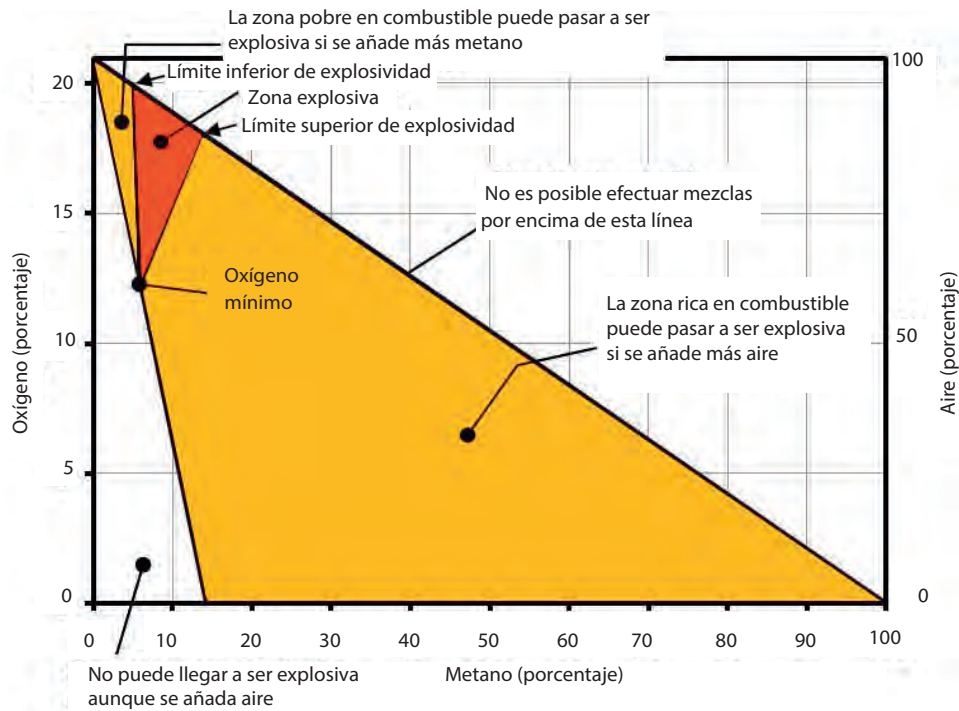
El metano es incoloro, inodoro e insípido, por lo que es necesario un dispositivo de medición para confirmar su presencia. Es explosivo cuando se mezcla con oxígeno en un determinado rango de concentraciones, como se muestra en la figura 2.1.

En condiciones de presión atmosférica, la concentración más explosiva del metano en el aire es del 9,5% por volumen. En las condiciones de encierro del subsuelo, la presión máxima de explosión puede aumentar a medida que se va comprimiendo el gas sin quemar delante del frente de llama.

En entornos sin oxígeno, como pueden ser los huecos sellados con relleno, solo pueden formarse mezclas explosivas si se les añade aire. Cuando se encuentra en concentraciones más elevadas, el metano es asfixiante debido al desplazamiento del aire. Puesto que las minas de carbón son lugares cerrados, la ignición de una acumulación sustancial de metano genera invariablemente una explosión.

El metano tiende a estratificarse y formar capas horizontales cerca de la bóveda del tajo donde la velocidad de ventilación es baja. Este fenómeno se produce porque el metano es más ligero que el aire: su

Figura 2.1 Formación de mezclas explosivas



(Fuente: Moreby, 2009; basado en Coward, 1928.)

densidad es de 0,55 con respecto a la del aire. En muchos casos, una velocidad del aire de 0,5 metros por segundo (m/s) impedirá la estratificación, pero hay circunstancias en las que esa velocidad del aire será insuficiente. Quienes diseñen los sistemas de ventilación han de ser conscientes de las variables que inhiben la estratificación del metano, como el grosor del estrato, la inclinación de la galería, la tasa de emisión de gases, y el caudal del aire (Creedy & Phillips, 1997; Kissell, 2006).

En algunas circunstancias, cuando no se produce la mezcla porque la velocidad del aire es insuficiente, se pueden formar estratos de metano que fluirán a favor o en contra de la corriente de ventilación. Estas capas de metano pueden propagar la llama con rapidez, lo que aumenta el riesgo y la gravedad de las explosiones, al conectar las fuentes de ignición con grandes acumulaciones de mezclas inflamables (por ejemplo, en rellenos de tajos largos). Sin embargo, una vez que el metano se ha mezclado con el aire, ya no se separará de manera espontánea. En cualquier caso, la composición de los estratos de metano atravesará una fase de transición: al principio, los porcentajes de metano serán elevados, pasarán por el rango explosivo y finalmente llegarán a ser bajos. Así pues, es importante evitar la estratificación del metano en las zonas especialmente activas de las minas.

Seguridad en las actividades de extracción en una capa de carbón propensa a los derrabes (Australia)

Situación. En la década de 1990, se exigió a ciertas minas australianas que elaborasen planes de gestión de derrabes. Los procedimientos que se habían aplicado con éxito en zonas ricas en metano no conseguían resultados positivos en algunas minas de zonas ricas en dióxido de carbono. La aplicación de esos planes resultó ser desigual y, en 1994, un derrabe que causó una víctima mortal en la mina Westcliff Colliery puso de manifiesto la necesidad de adoptar un enfoque más riguroso.

Solución. El plan de gestión de derrabes ha de incluir una descripción de las responsabilidades, procedimientos y protocolos para facilitar la seguridad laboral. El proceso de gestión de derrabes implica el análisis de la vigilancia del contenido de gas de las capas de carbón, la estructura geológica y los resultados de la perforación en las capas. El drenaje de gases es el principal mecanismo de prevención, pues reduce el contenido de gas en la capa explotada por debajo del umbral de concentración que se considera mínimo para suponer un riesgo de derrabe. Los procedimientos para trabajar en minas en condiciones en las que se puedan producir derrabes se ponen en práctica cuando se hace evidente que no se puede continuar con la mitigación o que no se obtendrán más datos significativos aunque se siga perforando.

Véase el estudio de caso núm. 4 para más información.

Las empresas explotadoras aíslan activamente del sistema de ventilación de las minas aquellas zonas en las que ya no se trabaja (por ejemplo, los tajos largos agotados y a veces los rellenos de los tajos largos activos) mediante la construcción de barreras o diques de cierre. Estas barreras o diques de ventilación son invariablemente imperfectos debido al movimiento del suelo y no impedirán por completo que las emisiones de gas lleguen a los tajos activos de la mina. Tras los diques de ventilación, se pueden acumular mezclas gaseosas explosivas que pueden acceder a las galerías de ventilación a causa de las fluctuaciones de la ventilación o de la caída de la presión barométrica.

Las zonas de las minas de carbón que pueden suponer un riesgo elevado (allí donde el metano de las capas de carbón se encuentra en el rango explosivo) se encuentran en el relleno (estéril) situado tras los frentes de los tajos largos, en las zonas con una ventilación ineficaz y en la zona de corte de las máquinas de corte mecanizado del carbón, así como en los tabiques de ventilación. También se pueden formar mezclas explosivas en sistemas de drenaje de metano que presenten problemas de diseño o funcionen indebidamente cuando la cantidad de aire aspirado sea excesiva.

En las explotaciones por cámaras y pilares (sin recuperación de pilares) el volumen de los estratos adyacentes perturbados tiende a ser considerablemente inferior que con los métodos de tajo largo; por lo tanto, suelen ser menos grisosas que las minas de tajo largo. Sin embargo, eso no implica que las minas explotadas por cámaras y pilares presenten menos riesgo de sufrir explosiones, debido a las dificultades de conseguir ventilar adecuadamente los frentes de trabajo. La fuente predominante de metano en este tipo de minas es la capa de carbón que se está explotando. Se pueden generar capas de mezclas de gases inflamables en la bóveda debido a la ventilación inadecuada de las galerías de avance ciegas y a las emisiones procedentes de la bóveda (véase el estudio de caso núm. 9).

Ignición de las mezclas de metano explosivas

Hay una serie de elementos que pueden desencadenar la ignición de las mezclas de metano y aire: las chispas eléctricas, las altas temperaturas que se generan cuando el acero golpea la roca cuarcítica, los desprendimientos de la bóveda, los impactos del aluminio en el hierro, los rayos,

los artículos para fumar, los explosivos y detonadores, la combustión espontánea y las llamas desnudas.

El uso de maquinaria cada vez más potente para el corte de roca y carbón en las minas de carbón modernas ha generado un problema grave a causa de las igniciones por fricción que se generan cuando el cabezal de corte golpea roca y minerales que pueden producir chispas con la elevada temperatura. La elevada frecuencia de las igniciones de metano causadas por las herramientas de corte de roca y carbón en comparación con otras fuentes ilustra la dificultad técnica de conseguir controlar por completo los peligros de los gases.

2.3 Reducción del riesgo de explosión

Uno de los principales objetivos de esta guía es poner de relieve los principios subyacentes de la prevención de explosiones. Conocerlos es esencial para diseñar programas efectivos para controlar los riesgos que entrañan los gases en las minas de carbón. Los principios que se describen en el presente documento son equivalentes a los que se incluyen en los sistemas de gestión del riesgo que han aplicado las empresas mineras modernas para alcanzar el objetivo de que no se produzca ningún accidente ni explosión.

Gestionar los riesgos de explosión de gas en las minas de carbón implica multitud de actividades distintas (véase el recuadro 2.1), lo que requiere una buena organización y una asignación clara de las responsabilidades.

Las mejores prácticas de seguridad en las minas de carbón consisten en reducir el riesgo de explosión evitando que se generen mezclas explosivas siempre que sea posible y adoptando medidas para garantizar que tales mezclas estén alejadas de las posibles fuentes de ignición.

Es fundamental controlar la dilución, la dispersión y la distribución de gases inflamables en las minas de carbón para minimizar la cantidad de combustible que pueda arder. Los riesgos relacionados con los gases inflamables en las minas subterráneas de carbón se pueden reducir de varias maneras: diluyéndolos con el aire de la ventilación hasta alcanzar concentraciones seguras; empleando dispositivos propios para ventilar las máquinas de corte de carbón; desviando gas fuera de las zonas de trabajo; y, cuando sea necesario, capturando gas de las perforaciones o las galerías de drenaje de gas antes de que este pueda acceder a las galerías de ventilación de las minas.

Recuadro 2.1 Controles y procedimientos habituales relacionados con el riesgo de explosiones de gas en las minas de carbón

- Utilización de cables y equipo eléctrico ignífugos
- Control de explosivos y su uso subterráneo
- Dotación de los medios adecuados para casos de incendios y rescates
- Planificación, diseño y aplicación del drenaje del gas
- Control de las emanaciones del gas metano drenado
- Control de acceso a la mina y a sus zonas de trabajo
- Restricción de la introducción en el entorno subterráneo de artículos no permitidos
- Inspección de los tajos subterráneos
- Dotación de materiales antiestáticos
- Supervisión de las operaciones mineras
- Uso y mantenimiento de instalaciones mecánicas y eléctricas
- Disposición que restrinja el uso de equipos inadecuados
- Supervisión de las operaciones mecánicas y eléctricas
- Restricción de artículos para el consumo de tabaco bajo la superficie
- Plan de gestión del gas
- Plan de gestión de derrabes
- Planificación de la ventilación
- Control de la ventilación de la mina
- Monitoreo y medición de las concentraciones de gas de mina
- Uso de ventilación auxiliar
- Desgasificación de las capas de carbón superpuestas con la debida secuencia de extracción
- Desgasificación de galerías de avance
- Precauciones para evitar la ignición por fricción
- Uso de parallamas
- Dotación de detectores de metano
- Cualificación de los empleados
- Capacitación en materia de seguridad
- Dotación de barreras para la supresión de explosiones
- Colocación de avisos y señales de advertencia

Los principios fundamentales de la reducción del riesgo de explosión son los siguientes:

- Siempre que sea posible, evitar que se generen mezclas explosivas de gases (por ejemplo, empleando métodos de drenaje de gran eficiencia y evitando la formación de estratos de metano y dispersándolos con la velocidad de la ventilación).
- Si no se puede evitar que se generen mezclas de gases, hay que minimizar los volúmenes de las

mezclas explosivas (por ejemplo, diluyéndolas rápidamente en el aire de la ventilación hasta alcanzar concentraciones de metano permisibles).

- Separar las mezclas de gases que no se hayan podido evitar de las posibles fuentes de ignición (por ejemplo, empleando sistemas específicamente diseñados para ventilar el extremo del frente, a fin de evitar que se acumule gas cerca de los motores eléctricos o evitando el uso de la electricidad en las galerías de retorno de la ventilación del sector del tajo largo).
- Evitar las fuentes de ignición (por ejemplo, dispositivos eléctricos inseguros, llamas desnudas, tabaco).
- Controlar las emisiones de gas de zonas agotadas y selladas de la mina empleando métodos de drenaje de gases regulados para mantener la pureza del gas y drenando el gas para ajustarse a las fluctuaciones de la presión barométrica.

2.4 Principios de regulación y gestión

Marco efectivo de regulación de la seguridad

La creación de un marco efectivo de regulación de la seguridad aportará pautas coherentes y claras al sector bajo el mando de una autoridad principal encargada de la seguridad, que habrá de tener unas funciones y responsabilidades claramente definidas que no se solapen con las de otras autoridades.

La existencia de reglamentos exhaustivos sobre seguridad del gas de las minas de carbón no supone ninguna garantía de que se trabaje en condiciones seguras. Para que resulten eficaces, tales reglamentos han de ser entendidos, aplicados y ejecutados por los inspectores de minas, la dirección de la mina, su personal supervisor y sus trabajadores. Las claves para la prevención de accidentes relacionados con el gas son una gestión proactiva del riesgo y la asunción de responsabilidades en materia de seguridad desde el personal de base hasta los más altos cargos. Los funcionarios y los mineros solo pueden ser proactivos si comprenden los principios básicos de los procesos de emisión y control de gases. La capacitación y la transferencia de conocimientos son, por tanto, elementos necesarios para el éxito del programa de seguridad, además de la facilidad de acceso a informes fácticos sobre incidentes relacionados con el gas y sus causas. La gestión de la seguridad y la capacitación deberían incluir tanto a los empleados de las minas como a los contratistas.

Ejecución

Los inspectores gubernamentales que llevan a cabo su trabajo de manera eficaz examinan las condiciones de seguridad de las minas mediante inspecciones subterráneas minuciosas, ofreciendo orientación como expertos a los gerentes de las minas, revisando la eficacia de los reglamentos y garantizando su cumplimiento en colaboración con las empresas explotadoras para corregir cualquier deficiencia o sancionar a aquellos que de manera manifiesta ignoren los reglamentos y pongan en riesgo su propia vida o la de los demás.

Los sistemas eficaces para la gestión de la seguridad y los reglamentos son aquellos en los que también participan las personas que resultan más afectadas cuando no se controla el gas: los propios mineros. Todos los incidentes, incluidos los cuasiaccidentes, han de ser investigados y se ha de informar de ellos abiertamente a fin de mejorar los resultados de seguridad. Esto se consigue con más éxito en aquellas organizaciones en las que no se sanciona a los empleados que refieren problemas de salud y seguridad, es decir, aquellas que no se centran en encontrar culpables. Para gestionar con la mayor eficacia el riesgo en una organización, debe hacerse hincapié en la prevención de accidentes o incidentes.

Gestionar con éxito los riesgos para la salud y la seguridad implica no solamente la participación de las autoridades reguladoras y la empresa explotadora de la mina, sino también la de los trabajadores en condiciones de igualdad. Como se señala en el Convenio sobre Seguridad y Salud en las Minas, 1995 (núm. 176) de la Organización Internacional del Trabajo y en el *Repertorio de recomendaciones prácticas sobre seguridad y salud en las minas de carbón subterráneas* (OIT, 2006), los trabajadores tienen derecho a participar y a disfrutar de un entorno de trabajo seguro, lo que incluye poder notificar los posibles peligros sin temor a represalias. Además, puesto que intervienen en el desarrollo de unas condiciones laborales seguras, los trabajadores tienen la obligación de apoyar la aplicación de prácticas de trabajo seguras y de preservar la seguridad del entorno en que se desarrolla la actividad minera.

Concentraciones permisibles de gas para trabajar en condiciones seguras

Los reglamentos prescriptivos deben utilizarse con prudencia, pues pueden ahogar la innovación, inhibir el criterio de los profesionales, crear una falsa sensación de

seguridad y dar coartada a decisiones poco acertadas. Están justificados por imperativos físicos, como el rango explosivo de los gases inflamables de las minas en el aire. Todos los países que tienen minas de carbón establecen límites máximos para las concentraciones permisibles de metano o gases inflamables que no deben superarse en los conductos de ventilación de las minas. En algunos, se fijan distintos límites obligatorios de gases para las diferentes partes de la mina de carbón, en función de la actividad que allí se desarrolle y del riesgo de que se alcancen niveles explosivos, y se establecen concentraciones mínimas de seguridad para el transporte y el uso del gas, con objeto de minimizar el riesgo de que se produzcan explosiones subterráneas (cuadro 2.1).

Para que se alcancen ciertas condiciones de seguridad en las minas, no basta solo con establecer determinados niveles de actuación para las distintas concentraciones de gases. Es igualmente importante identificar cuáles son los emplazamientos adecuados para medir tales concentraciones, qué procedimientos han de utilizarse para llevar a cabo esas mediciones y qué medidas deben adoptarse como consecuencia de ellas. La legislación minera en los países industrializados se centra por lo general en las actividades de monitoreo y control en función del grado de riesgo previsto.

Seguridad del transporte y uso del gas

Transportar y utilizar mezclas explosivas de gases es peligroso, ya que se corre el riesgo de propagar una explosión en las zonas de trabajo de una mina. Los reglamentos de seguridad de los distintos países presentan divergencias en cuanto a la evaluación de la concentración mínima de metano que se considera segura a efectos de su transporte y uso, que oscila entre el 25% y el 40% de un país a otro. Por lo general, se estima que un factor de seguridad de al menos dos veces el límite superior de explosividad (es decir, una concentración mínima del 30% de metano) es un buen mínimo⁶. Los accidentes que afectan a gasoductos en los que se transporta metano en concentraciones muy superiores al límite superior de inflamabilidad no generan explosiones porque la pureza del gas es demasiado elevada como para arder; en esos casos, si se genera fuego en la interfaz entre el gas y el aire, puede extinguirse empleando técnicas

⁶ Un factor de seguridad de al menos 2,5 veces por debajo del límite de explosividad inferior del metano (es decir, de menos del 2% de metano) es un buen máximo, siempre que no haya electricidad; si se emplea electricidad, es necesario un factor de seguridad mayor.

Cuadro 2.1 Selección de ejemplos de límites obligatorios y recomendados de concentraciones inflamables de metano

Límite de la concentración inflamable de metano [porcentaje]	Australia	China	Alemania	India ^b	Sudáfrica	Reino Unido	Estados Unidos de América	Factores de seguridad ^a
Máximo por debajo del cual se permite trabajar en general	1,25	1,0	1,0	1,25	1,4	1,25	1,0	3,6 – 5,0
Máximo por debajo del cual se permite trabajar en galerías de retorno de la ventilación	2,0 ^b	1,5 ^g	1,5	0,75	1,4	2,0 ^b	2,0 ^b	2,5 – 6,7
Mínimo permitido para el uso de gas	n.d. ^e	n.d. ⁱ	25	n.d. ^f	n.d. ^f	40	25 ^c	1,7 – 2,7
Mínimo para el transporte por tuberías subterráneas	n.d. ^e	n.d.	22	n.d. ^f	n.d. ^f	n.d. ^e	n.d. ^d	1,5

- a) Los factores de seguridad indican el intervalo de múltiplos por debajo del límite inferior de explosividad del 5% o por encima del límite superior de explosividad del 15% de metano en el aire;
- b) Si no hay electricidad;
- c) Los Estados Unidos incluyen la desgasificación de metano en el plan de ventilación; no existen códigos ni reglamentos;
- d) No se considera un problema, puesto que los gases del relleno, que se encuentran en concentraciones más bajas, se suelen drenar en los pozos de superficie;
- e) Determinado mediante una evaluación local del riesgo;
- f) Su aplicación es muy escasa o inexistente, de modo que no se ha examinado;
- g) 2,5% para un retorno sin circulación;
- h) En la India, las normas que establecen los niveles de metano se especifican en el Reglamento sobre las Minas de Carbón de la India de 1957, que está basado en la Ley de Minas de 1952;
- i) Ministerio de Protección del Medio Ambiente y Administración Central de Supervisión de la Calidad, Inspección y Cuarentena de la República Popular China: la norma que regula las emisiones de metano de las capas de carbón/metano de las minas de carbón (GB 21522-2008) establece que se utilice el metano drenado en concentraciones de al menos un 30%, si bien también pueden utilizarse concentraciones más bajas en determinadas condiciones.

contra incendios. Por el contrario, la ignición de gas de baja pureza (es decir, en el rango de entre el 5% y el 15%) en un gasoducto puede generar un frente de llama que se acelere en ambos sentidos del gasoducto, creando unas intensas fuerzas explosivas y poniendo en peligro toda la mina.

Normas para reducir el riesgo de ignición

La mayoría de los países que tienen explotaciones mineras regulan el tipo de materiales permitidos en entornos subterráneos y el uso que se hace de ellos, a fin de minimizar los riesgos de ignición. Sin embargo, no se pueden eliminar todas las posibles fuentes de ignición.

La electricidad es necesaria para alimentar los equipos que se emplean en la actividad minera. Utilizarla de manera segura depende de la aprobación de normas de seguridad intrínseca y de protección antideflagrante, del uso de cables blindados y conectores de seguridad y de la aplicación de unos procedimientos rigurosos de inspección y mantenimiento. Por lo general, los reglamentos prohíben el uso de electricidad en ciertas galerías de los sectores de tajo largo donde se pueden generar concentraciones de metano elevadas, aunque dentro de los límites permitidos.

Los riesgos de ignición por fricción en las máquinas de corte de carbón se minimizan empleando brocas de corte afiladas, sistemas de aspersión de agua debidamente

colocados y sistemas de ventilación de la maquinaria. Los transportadores también pueden ser una fuente de ignición debido al sobrecalentamiento de los motores de impulsión y los rodillos, pero ese riesgo se puede reducir notablemente llevando a cabo inspecciones y labores

de mantenimiento de forma periódica, y eliminando las partículas y el polvo del carbón de los componentes que se calientan. Por último, se sabe que ciertas conductas humanas indebidas, como encender un cigarrillo bajo la superficie, son también causa de explosiones en las minas.

Capítulo 3. Incidencia, escapes y predicción de las emisiones de gases en las minas de carbón

Mensajes clave

En general, los flujos de metano de las minas de carbón son predecibles en condiciones normales y estables.

Las emisiones y los derrabes inusuales no son fáciles de predecir, si bien las condiciones en las que se pueden producir se conocen razonablemente bien. Se han desarrollado métodos pormenorizados para reducir los riesgos en esas condiciones, y deberían aplicarse siempre que se detecte la aparición de riesgos importantes. En esas circunstancias, la seguridad de las condiciones de trabajo depende del rigor del monitoreo y de la aplicación de métodos de control de gases.

No se puede subestimar la importancia, no solo de instalar sistemas de monitoreo subterráneo por razones de seguridad operacional de la mina, sino también de recopilar y emplear los datos obtenidos para la planificación de la seguridad.

3.1 Introducción

En las minas de carbón modernas y altamente productivas, se encuentran cada vez mayores flujos de gas, pues sus ritmos de extracción son más elevados, los tamaños de los paneles aumentan y se trabaja a una mayor profundidad en capas de carbón posiblemente más ricas en gases y entornos geológicos con distintas fuentes de gases. Con los métodos de extracción de carbón de tajo largo se libera bastante más gas que con los métodos de extracción parcial, como las explotaciones por cámaras y pilares, debido a que el proceso de hundimiento perturba múltiples estratos. Asimismo, al eliminar la montera durante las operaciones mineras de superficie se alivia la presión en las capas de carbón y otros estratos, lo que supone un aumento de la permeabilidad y de la liberación de metano a la atmósfera. El volumen del flujo de gas en las minas de superficie depende de la cantidad de gas de los estratos carboníferos y del ritmo de extracción y desagüe. Si bien los flujos pueden ser menores en las minas de superficie, con el tiempo el volumen de gas liberado puede llegar a ser considerable. Es fundamental conocer la presencia de gas, las características de las emisiones y los flujos de gas previstos de una mina de carbón en función del ritmo de producción de carbón de esta a efectos de seguridad, planificación de la mina, ventilación, utilización del gas y control de las emisiones de GEI. Otros factores

que influyen en la producción de gas son el diseño, las características geológicas y las operaciones de las minas.

3.2 Presencia de gas en las capas de carbón

El gas que se encuentra de manera natural en las capas de carbón está formado principalmente por metano (por lo general, de un 80% a un 95%) con proporciones menores de gases hidrocarbonados más pesados, nitrógeno y dióxido de carbono. Las mezclas de metano, vapor de agua, aire y los productos asociados a la oxidación que se encuentran en las minas de carbón suelen denominarse colectivamente "gas de mina".

La formación de metano en las capas de carbón se debe a las reacciones químicas que se produjeron al quedar sepultado el carbón en profundidad. Los residuos vegetales como los que se encuentran en los pantanos actuales se transforman lentamente de turba y detritus orgánicos a carbón si se entierran a suficiente profundidad y el material permanece sepultado mientras se produce el proceso conocido como carbonización. Cuanto mayor sea la temperatura, la presión y el tiempo que el carbón permanece sepultado, mayor será la madurez de este (es decir, su rango) y la cantidad de gas generada. Durante el proceso de carbonización se generó mucho más gas del que ahora se encuentra en las capas de carbón. El gas perdido durante el proceso de carbonización se liberó al quedar expuestos los estratos gasíferos de las antiguas superficies terrestres, se eliminó disuelto en agua subterránea o migró o quedó atrapado en las estructuras y los espacios porosos de las rocas circundantes. Es probable que ese gas se haya acumulado en estratos porosos adyacentes, como la arenisca, o que haya sido adsorbido por el esquisto orgánico. Estos yacimientos rocosos pueden convertirse en importantes fuentes de entrada de gas a la mina si las capas gasíferas quedan selladas por los estratos impermeables circundantes y permanecen inalteradas hasta que se desarrolle la actividad minera. El metano se encuentra más concentrado en el carbón que en cualquier otro tipo de roca a causa del proceso de adsorción, que permite que las moléculas de metano se adhieran a la superficie interna del carbón en una densidad casi similar a la de un líquido. En una secuencia vertical de capas de carbón, el contenido de metano suele

aumentar sistemáticamente con la profundidad y el rango. Los gradientes de contenido del gas y profundidad varían de un yacimiento carbonífero a otro y reflejan la historia geológica de la cuenca en que se formó el carbón. En algunas cuencas de carbón, el metano que este último contiene aumenta con la profundidad hasta alcanzar un cierto máximo y luego disminuye.

3.3 *Proceso de liberación del gas*

El gas que se produce y se almacena de forma natural en el carbón y los estratos circundantes puede liberarse con las perturbaciones causadas por la actividad minera. El caudal y la cantidad de gas liberado dependen de la cantidad de gas presente inicialmente en el carbón (el contenido de gas), de la distribución y el grosor de las capas de carbón perturbadas por la actividad minera, de la solidez de los estratos carboníferos, de la geometría de las labores, del ritmo de producción de carbón y de la permeabilidad de las capas de carbón. El total de gas liberado varía en proporción de la magnitud de la perturbación de los estratos causada por la actividad minera. Así pues, en un entorno geológico determinado, los flujos de gas liberado con la minería aumentan en proporción al incremento del ritmo de extracción del carbón.

No obstante, en determinadas circunstancias se pueden producir desprendimientos rápidos de carbón y gas (derrabes), así como emisiones repentinas de gas. Algunas capas de carbón contienen cantidades sustanciales de dióxido de carbono y metano. Cuando persisten las condiciones para que se produzca un derrabe, la presencia de dióxido de carbono puede reducir el contenido de gas total *in situ* con el que se puede producir un derrabe por debajo del que se da en una capa que contenga únicamente metano. Por tanto, para evaluar la necesidad de efectuar un predrenaje debe medirse el contenido *in situ* de ambos gases.

Varios estudios europeos (Creedy y otros, abril de 1997) han demostrado que se forma un arco o zona de perturbación que se relaja y donde se libera gas; por lo general, se adentra entre 160 y 200 m en la bóveda, por encima del tajo largo, y entre 40 y 70 m en el piso, por debajo de este. La figura 3.1 muestra un modelo de escayola que ilustra la relajación del material superpuesto después de generar un espacio vacío. Este procedimiento de modelización resulta útil para visualizar la zona de relajación que se forma y la altura por encima del vacío en la que se genera la separación apreciable de la capa, la formación de fracturas

y otras formas de relajación de los estratos, que aumentan la permeabilidad y abren vías para la migración del gas. Se han desarrollado varias teorías y modelos empíricos para representar este proceso.

La extracción de capas de carbón produce subsidencia en la superficie. Si bien resultarán perturbadas todas las capas que existan entre el tajo largo y la superficie, solo el gas que se encuentre dentro del arco de relajación se introducirá en las labores de la mina. A veces, en las perforaciones efectuadas desde la superficie o en excavaciones superficiales se encuentra gas que normalmente no se liberaría con la actividad minera y, en ese caso se puede producir gas. Sin embargo, la perforación o la excavación puede servir también como una vía de migración para el gas que no es capturado, lo que implica riesgos en la superficie y la subsuperficie.

3.4 *Grisuosidad relativa de las minas de carbón*

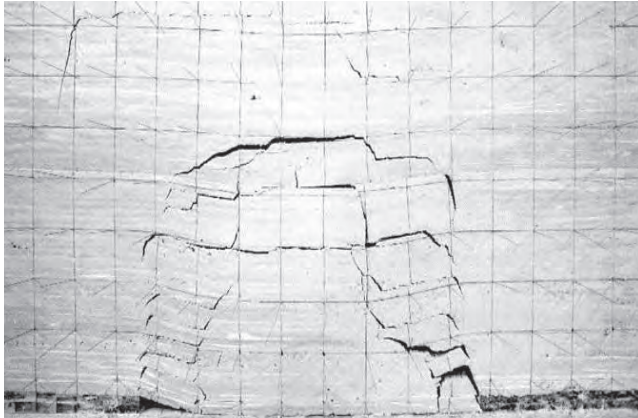
Por lo general, la tasa de emisión "específica" (o "relativa") se emplea para representar la grisuosidad de una mina o de un sector de tajo largo. Se mide con las mismas unidades que el contenido de gas (es decir, metros cúbicos de metano emitido por tonelada de carbón, o m^3/t), pero son dos conceptos muy distintos⁷. Las emisiones específicas representan el volumen total de metano liberado de todas las fuentes dividido por la cantidad total de carbón producido durante un período de tiempo de referencia, que en condiciones ideales ha de ser de al menos una semana. Dicho de otro modo, la grisuosidad equivale en realidad a los metros cúbicos (m^3) de metano emitido por tonelada (t) de carbón extraído durante un período determinado. El gas que se emite y se mide no procede solo del carbón extraído, sino de todos los estratos que resultan perturbados y se relajan cuando el hueco que deja el proceso de extracción de carbón se derrumba. Por lo general, se consideran grisuosas las minas de carbón con emisiones específicas de al menos $10 \text{ m}^3/\text{t}$. En algunas minas de ciertos países, como el Reino Unido y los Estados Unidos, se han registrado emisiones específicas de incluso entre 50 y $100 \text{ m}^3/\text{t}$, pero son niveles excepcionales (Kissell y otros, 1973).

3.5 *Entender las características de las emisiones de gas de las minas de carbón*

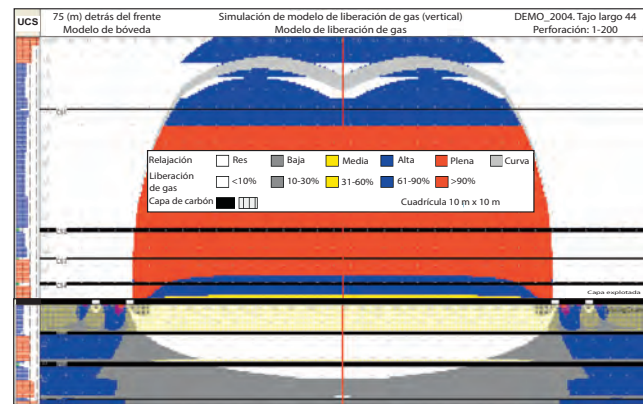
En las galerías de retorno de la ventilación de los sectores de trabajo se producen picos en los flujos de gas durante

⁷ El contenido de gas se define y se describe en la sección 3.6.

Figura 3.1 Modelo de sección paralela al frente del tajo largo que muestra los estratos fracturados al extraer el carbón, formando el macizo de relleno, y el resultado de un modelo que muestra la relajación de los estratos



(Modelo obtenido a partir de Gaskell, 1989.)



(Cortesía de Lunagas Pty Limited.)

el ciclo de corte del frente de arranque y después del hundimiento de la bóveda, cuando se avanzan las entibaciones del tajo largo. Varios estudios estadísticos han demostrado que esos picos suelen elevarse hasta un 50% por encima de la media (Creedy y otros, abril de 1997). Los métodos de predicción de gases desarrollados en Europa y de uso común en ese continente emplean esa relación para calcular el volumen de aire que será necesario para cumplir los requisitos obligatorios de disolución del gas.

Si bien el volumen de gas liberado desde la capa de carbón y los estratos circundantes perturbados por la actividad minera disminuye con el tiempo, continuar con la extracción de carbón genera nuevas fuentes de gas. Por consiguiente, las emisiones resultantes están determinadas por la suma de todas las fuentes a lo largo del tiempo. Así pues, la emisión específica (es decir, la cantidad de gas emitido por tonelada de carbón extraído) puede aumentar a lo largo de la vida útil de un tajo largo. Cuando la producción de carbón se detiene, persiste la desorción del gas de la capa de carbón y el gas sigue fluyendo desde los estratos que no contienen carbón, aunque a un ritmo menor. Cuando en una mina se empieza a extraer carbón tras unos días sin actividad, las emisiones de gases serán al principio menores que con una producción constante.

En la mayoría de los cálculos empíricos de las emisiones se asume que la producción de carbón se da a un ritmo constante y que las características de las emisiones son uniformes. Si bien este enfoque se adapta a la mayoría de las necesidades de planificación, las empresas explotadoras han de tener en cuenta también otros factores menos

predecibles. Por lo tanto, los métodos de control de riesgos son fundamentales para reducir la probabilidad de que se produzcan sucesos graves. Por ejemplo, en algunas capas de carbón con alto contenido de gas, en zonas con baja permeabilidad y en áreas con ciertas características estructurales geológicas como fallas o zonas de cizalla, que debilitan localmente el carbón, se producen derrabes repentinos de gas y carbón (y a veces de roca). A menudo pueden identificarse los principales factores geológicos y mineros que generan el mayor riesgo de derrabe, si bien la incidencia real de estos últimos no puede predecirse con certeza. La gestión de las minas de carbón puede resolver este problema de seguridad aplicando métodos rigurosos de prevención y control de derrabes. Por lo general, esos métodos engloban el drenaje del gas antes de la extracción del carbón para reducir el contenido de gas del carbón por debajo de un punto crítico. A veces se puede contribuir a ese proceso con la perforación de la capa adyacente para relajar la capa propensa a los derrabes y, por lo tanto, aumentar su permeabilidad, facilitando de ese modo el drenaje efectivo del gas.

Se pueden producir emisiones repentinas de gas procedente del piso de una labor de un tajo largo, ya sea en el frente o en las galerías cercanas a este, como consecuencia del hinchamiento del piso. Este tipo de emisión se considera especialmente probable cuando el piso tiene un lecho sólido de arenisca y existe otra capa de carbón situada a unos 40 o 60 m por debajo de la capa en la que se está trabajando. Si bien es complicado predecir la aparición de gas, por lo general se puede prevenir

perforando una serie regular de agujeros en el piso para evitar la acumulación de presión del gas.

Las emisiones y los derrabes repentinos pueden causar daños considerables y provocar heridos y muertos. Si la mezcla de aire y metano se encuentra dentro del rango inflamable, las chispas causadas por los instrumentos metálicos al golpear la roca pueden inflamar el gas de mina.

En ocasiones, las labores de las minas de carbón pueden perturbar yacimientos de gas natural, con lo que se generan unas emisiones muy superiores a las que cabría esperar de haber únicamente capas carboníferas. Estos yacimientos de gas natural pueden estar en estratos intercalados con capas de carbón como parte normal de la secuencia carbonífera, pero con la obstrucción o el sellado de las vías de migración del gas causados por los procesos geológicos, el gas que quedó atrapado en ese momento se libera posteriormente con la explotación de la mina. No es fácil detectar este tipo de situaciones antes de iniciar la extracción de carbón, pero las empresas explotadoras han de estar alerta ante esta posibilidad comparando las mediciones y las previsiones. No se puede subestimar la importancia no solo de instalar sistemas de monitoreo subterráneo por razones de seguridad operacional de la mina, sino también de recopilar y emplear los datos obtenidos para la planificación de seguridad. Puede que esté justificado llevar a cabo nuevas prospecciones al desarrollar o ampliar una mina en una zona en la que ya se hayan registrado flujos de gas inesperadamente elevados.

3.6 Medición del contenido de gas in situ del carbón

Planificar los sistemas de drenaje de gas y de ventilación para extraer carbón en condiciones de seguridad exige conocer la cantidad de gas adsorbido en el carbón puro y, hasta una proporción insignificante, la cantidad de gas comprimido en los espacios porosos más grandes. El contenido de gas se expresa como el volumen de gas contenido por la masa de carbón puro *in situ* (m^3/t) y no debe confundirse con las emisiones específicas⁸. El enfoque general empleado para medir el contenido de gas consiste en obtener testigos de carbón de los barrenos de exploración en un estado tan fresco como sea posible y sellar las muestras de carbón en recipientes estancos a los gases. Las muestras se mantienen a una temperatura similar a la del yacimiento mientras que se permite la desorción

⁸ Medición del gas emitido durante las actividades mineras en comparación con la cantidad de carbón producido.

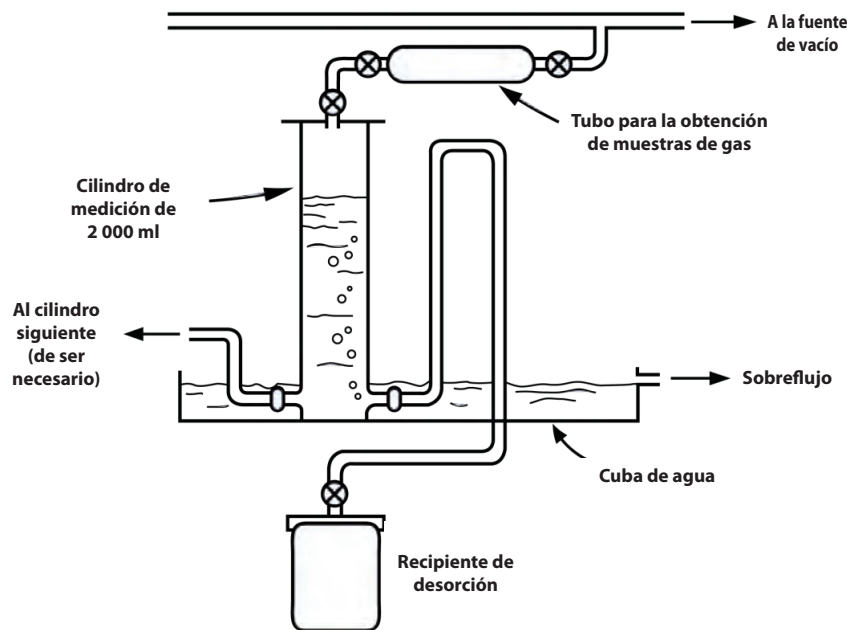
del gas. La medición de la velocidad de desgasificación permite calcular el gas que se ha perdido antes de obtener la muestra. La figura 3.2 muestra un diagrama de un sistema ideado para captar y medir el gas que se desorbe del carbón contenido en un recipiente estanco. Periódicamente, se permite que el gas del recipiente fluya en el cilindro de medición y entonces se mide y se registra el volumen de gas. La composición del gas puede analizarse capturando una muestra y enviándola para analizar su composición química. Para establecer cuánto gas queda en el carbón tras las pruebas iniciales, este se tritura y se mide la cantidad liberada. El método para medir el contenido de gas que emplea la Oficina de Minas de los Estados Unidos es una de las técnicas empleadas con más frecuencia y por lo general requiere un período que oscila entre unos días y varias semanas (Diamond y Levine, 1981)⁹. En Europa y Australia se han desarrollado métodos de desorción rápida para obtener resultados rápidos a fin de ajustarse a las necesidades operacionales de la actividad minera (Janas y Opahle, 1986). Además, también se han ideado métodos estadísticos y de presión parcial para los carbones de permeabilidad baja (Creedy, 1986). Puesto que las capas de carbón contienen materia mineral y carbón puro (el gas es adsorbido predominantemente en sustancias orgánicas), los contenidos de gas se ajustan como si se hubiesen analizado sin cenizas. A veces se miden los componentes gaseosos por separado; en la mayoría de los casos, el gas es predominantemente metano. Por lo general, el contenido de metano en las capas de carbón que se encuentra en la naturaleza oscila entre niveles de trazas y de hasta $30 m^3/t$.

3.7 Estimación práctica de los flujos de gas en las minas de carbón

Se han desarrollado modelos rigurosos de simulación y de representación teórica de los flujos de emisión de gases en el ámbito académico y en institutos de investigación. A efectos prácticos, las minas suelen utilizar modelos empíricos de emisiones de gases que han demostrado su fiabilidad al combinarlos con el conocimiento y la

⁹ Hasta 1995, la Oficina de Minas de los Estados Unidos (USBM) era el principal organismo del Gobierno de los Estados Unidos que realizaba investigaciones científicas sobre el carbón y la minería metálica y no metálica. La Oficina de Minas cerró en 1995 y sus funciones fueron transferidas a otros organismos del Gobierno estadounidense. El programa de investigación en seguridad y salud es en la actualidad la Oficina de Investigación de Seguridad y Salud en las Minas del Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional, una división de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades.

Figura 3.2 Equipo de medición del contenido de gas (norma australiana)



(Basado en Diamond & Schatzel, 1998.)

experiencia locales. Estos modelos precisan la introducción de parámetros como el contenido de gas de las capas, las propiedades mecánicas de los estratos de roca y carbón, la geometría de la mina y los ritmos de producción de carbón. Los usuarios pueden crear sus propios modelos utilizando la información publicada, o pueden adquirir programas informáticos patentados. Los cálculos del flujo se expresan en términos relativos de metros cúbicos de gas liberado por tonelada de carbón extraído (emisiones específicas en m^3/t) o en términos absolutos, como el caudal en estado constante de metros cúbicos por minuto (m^3/min) o litros por segundo (l/s).

Los modelos pueden predecir los efectos del aumento de los ritmos de producción del carbón sobre los flujos de gas. También pueden predecir el flujo máximo controlable de

gas y la producción máxima de carbón asociada a este, que se ven afectados por los siguientes parámetros:

- El límite reglamentario de concentración de gases inflamables en las galerías de retorno de la ventilación del sector del tajo largo.
- Las cantidades de aire de ventilación disponibles y los volúmenes de flujo de aire que pueden circular por los sectores de trabajo. El volumen del flujo de aire que puede entrar en un tajo largo que se está explotando depende del número de galerías, de la configuración de la ventilación del sector de producción y de la velocidad máxima aceptable para la comodidad de los mineros.
- La captura de drenaje de gas que se puede mantener de manera constante, si se emplea el drenaje de gas.

Capítulo 4. Ventilación de las minas

Mensajes clave

Los sistemas de ventilación resultan fundamentales en las minas para eliminar eficazmente el metano de las labores. Sus objetivos son tres: 1) el suministro de aire fresco respirable a los trabajadores; 2) el control de la temperatura y la humedad del aire de la mina; y 3) la dilución o eliminación eficaz de los gases nocivos y el polvo en suspensión respirable.

Para mitigar los riesgos que plantea el gas de mina suele resultar más rápido y económico mejorar los sistemas de drenaje de metano que aumentar el flujo de aire suministrado.

4.1 Dificultades de la ventilación

La producción de carbón en una mina depende, en última instancia, del mantenimiento de una ventilación eficaz. El índice de extracción máximo que se puede alcanzar de forma segura en un frente de arranque grisoso viene determinado por la combinación de dos factores: la capacidad de ventilación para la dilución de los contaminantes a concentraciones aceptables y la eficacia del drenaje del metano.

La ventilación es el principal medio utilizado para diluir y dispersar los gases nocivos en las galerías de las minas subterráneas. La cantidad y la velocidad del aire se ajustan para garantizar la dilución del gas y el polvo y para controlar el calor. Cuanto mayor sea la cantidad de aire fresco suministrado al frente de arranque, mayor será la cantidad de gas que se puede diluir. Este proceso de dilución está limitado naturalmente por la disponibilidad de aire dentro de la mina y por las velocidades máximas tolerables del aire.

La presión de ventilación es proporcional al cuadrado del volumen del flujo de aire. Por consiguiente, un leve incremento de la cantidad de aire requiere un aumento significativo de la presión, lo que se traduce en mayores fugas a través de los rellenos y las puertas de ventilación. Un nivel excesivo de fugas a través de los rellenos puede aumentar los riesgos de combustión espontánea y dañar los sistemas de drenaje de gas.

El volumen de aire necesario para la ventilación de las labores subterráneas y el nivel de contaminantes permitido suelen ser fijados por las autoridades locales. Un sistema de ventilación que no permita alcanzar velocidades o

flujos de aire superiores a los mínimos requeridos por ley puede resultar insuficiente para mantener un entorno seguro y satisfactorio en una mina activa. Por tanto, el diseño del sistema de ventilación debe planificarse en función de los mayores niveles de contaminantes que se podrían registrar en las circunstancias más desfavorables.

A efectos del diseño de los sistemas de ventilación, el metano se considera el principal contaminante y el gas más peligroso. Si el diseño seleccionado para el sistema de ventilación permite eliminar o controlar satisfactoriamente el contaminante de mayor importancia, cabe suponer que los demás contaminantes también podrán ser eliminados o controlados de forma adecuada.

4.2 Principales características del diseño de los sistemas de ventilación

Generalmente se utilizan ventiladores de extracción situados en la superficie para extraer (aspirar) el aire de la mina. Por tanto, la presión del aire dentro de la mina es inferior a la presión atmosférica. Si se avería un ventilador, aumenta la presión de ventilación en la mina, lo que impide la liberación repentina de gas de las zonas explotadas.

Las minas más profundas y extensas suelen requerir circuitos de ventilación más complejos, en los que es más probable que se produzcan fugas a través de las puertas que separan las vías de entrada y de retorno del aire. Por consiguiente, en las minas complejas y más extensas se dispone de cantidades de aire fresco limitadas para ventilar las galerías de avance ciegas y los frentes de arranque, por lo que se necesitan conductos de ventilación auxiliares. En cualquier caso, el aire suministrado debe ser suficiente para permitir una ventilación en paralelo, y no en serie, de las galerías, ya que, si se libera gas, en una disposición en serie el gas liberado se propagará rápidamente de una galería a otra. Lo más conveniente es prever un mecanismo que interrumpa el suministro de electricidad en todos los lugares de trabajo siguientes cuando en un lugar de trabajo la concentración de metano supere el máximo legal.

Las necesidades de ventilación no son constantes: la cantidad de aire requerido aumenta a medida que se avanza en la explotación y se expande el área que hay que ventilar, por lo que en ocasiones es necesario crear

pozos de ventilación adicionales, instalar ventiladores más potentes o ampliar los conductos de ventilación existentes.

Existe *software* privativo para la modelización de redes de ventilación. Deben medirse periódicamente la presión y el flujo reales para calibrar el modelo y analizar el comportamiento del sistema a medida que se introducen cambios.

Siempre que resulte posible, el sistema de ventilación debe diseñarse de manera que se establezca naturalmente un equilibrio entre las distintas secciones del circuito. Así se reduce la necesidad de instalar esclusas u otros dispositivos para el control del flujo de aire, que pueden alterar sustancialmente los flujos de la sección (entrada de aire) cuando se abren y cierran para permitir el paso del personal.

El ventilador o los ventiladores de superficie deben poder satisfacer las necesidades de ventilación de la mina. Por lo general, pueden ajustarse dentro de ciertos límites para cubrir esas necesidades sin sufrir inestabilidad aerodinámica. Los ventiladores de superficie más viejos instalados en algunas minas antiguas suelen funcionar ya a su capacidad máxima, por lo que el único modo de aumentar los flujos dirigidos hacia las zonas más remotas de la mina es mejorar la red de ventilación.

4.3 Ventilación de los frentes de arranque grisuosos

Adoptando diferentes configuraciones de ventilación se obtienen distintos grados de eficacia en el control del gas, el polvo y el calor que se liberan cuando se extrae el carbón. Los mayores riesgos de liberación de gas se dan en zonas de extracción en las que el carbón se ha extraído total o parcialmente de la capa (mediante explotación por tajo largo o por cámaras y pilares) y a las que ya no se puede acceder en condiciones de seguridad (rellenos). Todas las actividades de explotación por tajo largo o por recuperación de pilares se llevan a cabo en contacto directo con áreas completamente explotadas en las que se pueden acumular metano, aire pobre en oxígeno y otros gases nocivos (por ejemplo, el metano no drenado o los gases que siguen emanando del carbón remanente en el relleno).

Estos gases se pueden tratar de dos maneras distintas desde el punto de vista del control de la ventilación. En primer lugar, se puede permitir que se incorporen a la corriente de aire de la mina cuando la cantidad de aire disponible sea suficiente para que los flujos máximos previstos se diluyan en los conductos de ventilación y las concentraciones de los gases no sobrepasen los niveles máximos de seguridad

(figura 4.1). Por ejemplo, en una explotación por tajo largo con un sistema de ventilación en "U" (figura 4.2), con una eficacia de captura de metano del 50%, se puede admitir un flujo total de 800 l/s (48 m³/min) de metano puro¹⁰. En una explotación por tajo largo con entradas múltiples en la que se apliquen las mejores prácticas y en la que la eficacia de captura de metano alcance el 70% se pueden admitir 5.333 l/s (320 m³/min) de metano puro, lo que representa un aumento de más de seis veces^{11 12}.

En segundo lugar, cuando el grado de propensión a la combustión espontánea y el comportamiento de las capas lo permitan, una parte del gas puede ser dirigida hacia una vía de purga situada tras el frente, o entre rellenos antiguos, para ser liberada a vías de retorno principales o a pozos de purga (pozos verticales por las que se libera aire cargado de gas de los sectores de trabajo, de uso corriente en los Estados Unidos). La eficacia de estos sistemas de "purga" depende de la distribución de los valores de la presión del aire de ventilación, los cuales se ajustan mediante el uso de obstrucciones parciales (reguladores) en los conductos de ventilación. En algunos países, las concentraciones de metano permitidas en las vías de purga están limitadas por ley a menos del 2% para reducir el riesgo de explosión.

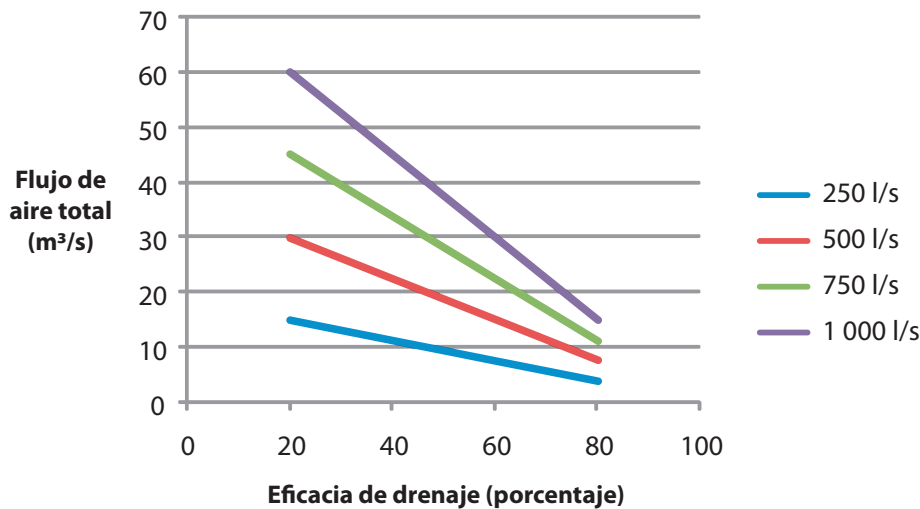
En la práctica, la cantidad de aire que puede circular por un frente de arranque sin que se cree un entorno de trabajo inadecuado es limitada, debido principalmente a la concentración de partículas de polvo en suspensión. Las limitaciones del flujo de aire restringen el nivel de ventilación que se puede alcanzar en un sistema convencional en "U" (figura 4.2). Cuando el flujo de aire disponible resulta insuficiente para diluir las emisiones de gases de las labores, se puede suministrar aire adicional de forma independiente adoptando distintas configuraciones, como el sistema de "tres vías" o el sistema en "Y" (figura 4.3). Sin embargo, estos sistemas de ventilación requieren mayores inversiones, por ejemplo, para la creación de una galería adicional, la construcción de un dique junto a la galería (muro de sostén) y el refuerzo de las galerías que queden abiertas en el relleno detrás del tajo. En las figuras 4.2 y 4.3, las flechas gruesas de color azul muestran el sentido en que avanza la explotación, las flechas de color azul claro muestran el sentido del flujo de aire entrante y las flechas rojas muestran el sentido del flujo de aire de retorno.

¹⁰ Vía de entrada única y vía de retorno única, 2% máximo de metano y 30 m³/s de aire.

¹¹ Entradas múltiples, 2% máximo de metano y 120 m³/s de aire.

¹² Ambos valores se han calculado dejando margen para picos del 50% por encima de la media.

Figura 4.1 Flujos de aire necesarios para diluir al 2% las emisiones de metano de las explotaciones por tajo largo (calculados con margen para posibles picos)



(Cortesía de Sindicatum Sustainable Resources.)

Figura 4.2 Sistema de ventilación en U convencional

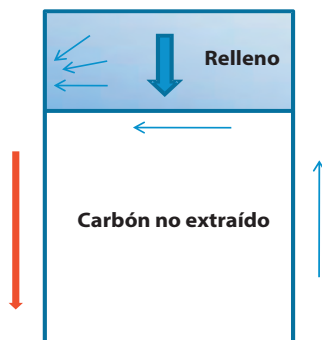
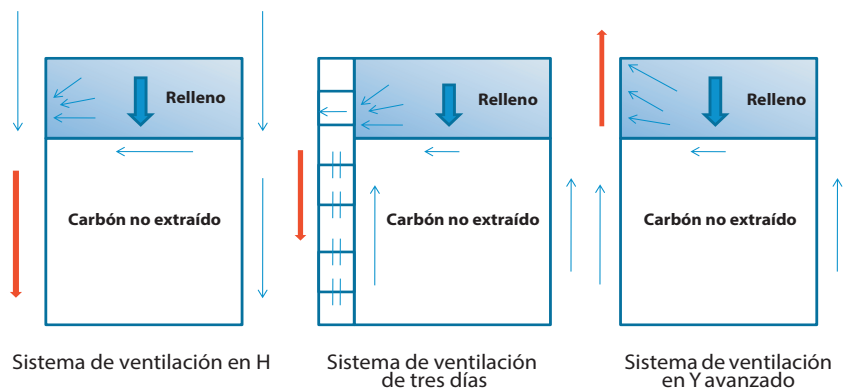


Figura 4.3 Configuraciones de ventilación empleadas en frentes de arranque grisúos de explotaciones por tajo largo



Explotación por tajo largo de alto rendimiento en zonas con niveles elevados de emisiones de gases-Alemania

Situación: Con el flujo de aire máximo permitido de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ en el frente de arranque de la explotación, solo se podría diluir un flujo de gas de $0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ ($22,2 \text{ m}^3/\text{min}$), pese a la medida atenuante aprobada por la autoridad minera, que elevó la concentración máxima permitida de metano del 1,0% al 1,5% (reducción del coeficiente de seguridad de 5,0 a 3,3). Se estudió la opción del predrenaje y se concluyó que resultaría ineficaz.

Solución: Se diseñó un sistema de ventilación en Y para aportar $50 \text{ m}^3/\text{s}$ de aire adicionales y sumarlos a los $25 \text{ m}^3/\text{s}$ que circulaban por el frente. Ese flujo combinado circula por detrás del frente y diluye el metano liberado del frente y del relleno. La configuración de ventilación permite que se realicen perforaciones inclinadas y que esas perforaciones se conecten al sistema de drenaje y se controlen y regulen individualmente.

Veáse más información en el estudio de caso 2.

Independientemente del sistema o la disposición que se adopten, debe llegar un volumen de aire fresco suficiente, de conformidad con los límites reglamentarios locales, tanto a la rozadora, para la dilución del gas del frente de carbón (liberado del contenido remanente en la capa tras el predrenaje), como al extremo de retorno (esquina de la galería de cabeza) del frente de la explotación por tajo largo. La disposición elegida debe poder ofrecer un buen nivel de ventilación en los lugares en que la perforación para el drenaje de metano resulte más eficaz. Si no se alcanza un nivel de ventilación suficiente, la eficacia del drenaje será menor, se necesitará más aire de ventilación y disminuirá la producción de carbón.

El control del gas y el acceso para la perforación y para la regulación de las perforaciones de drenaje inclinadas resultan más sencillos en las explotaciones por tajo largo en avance que en las explotaciones por tajo largo en retirada. Sin embargo, la mayor parte de la producción mundial de carbón obtenida de explotaciones por tajo largo procede de frentes de arranque en retirada, ya que resultan más productivos. Se ha intentado combinar las ventajas de ambos tipos de explotaciones adoptando configuraciones en que la ventilación se suministra desde detrás del frente de arranque, como los sistemas en "Y", los sistemas en "H" y los sistemas de retorno hacia atrás¹³. El sistema de ventilación debe integrar un mecanismo que permita generar un gradiente de presión en los extremos del frente de arranque a fin de impedir la circulación de mezclas de gases inflamables hacia el frente. Puede recurrirse, por ejemplo, al uso de reguladores (obstrucciones parciales) en las galerías y a la disposición de soluciones de ventilación especiales en los extremos del frente para desviar el flujo de aire a lo largo de la pila de residuos acumulada tras el frente de arranque.

4.4 Requisitos de potencia del sistema de ventilación

Un leve aumento del volumen de aire impulsado por el sistema de ventilación de la mina requiere un incremento mucho mayor del consumo de energía y, por consiguiente, entraña un fuerte aumento de los costes de ventilación. El consumo de energía del sistema de ventilación, que representa uno de los principales gastos de explotación de una mina, es proporcional al cubo del volumen del flujo de aire (figura 4.4). Por tanto, implantar un mecanismo de drenaje de gas, o mejorar la eficacia del mecanismo

de drenaje existente, suele resultar más económico que aumentar los volúmenes de aire de ventilación, lo que puede requerir además una importante labor de habilitación de infraestructura en la mina.

4.5 Ventilación de las galerías de avance de las minas de carbón

Un método eficaz para controlar el gas en las galerías de avance ciegas y en las minas de cámaras y pilares es la combinación del suministro de ventilación auxiliar con la utilización de dispositivos de ventilación acoplados a las rozadoras para diluir el gas liberado al extraer el carbón.

Las galerías de avance de las minas de carbón se ventilan, por lo general, utilizando sistemas auxiliares de ventilador y conductos, que pueden ser aspirantes, soplantes o mixtos. Si el sistema de ventilación auxiliar falla, se puede generar rápidamente un entorno peligroso. Una vez que se ha acumulado gas, se deben seguir procedimientos especiales para eliminarlo de forma segura antes de que se pueda volver a acceder sin riesgo a la galería. Para reducir el riesgo de acumulación de gas, los sistemas de algunas minas están programados de manera que, en determinadas condiciones, los ventiladores subterráneos se reinician automáticamente tras interrupciones breves. Cuando a causa de un fallo del sistema de ventilación se acumula metano en una galería de avance, se debe seguir un procedimiento de desgasificación minuciosamente estructurado para impedir la liberación incontrolada de una bolsa de metano de alta concentración al sistema de ventilación principal.

En muchos accidentes graves relacionados con el gas han sido factores coadyuvantes los fallos del sistema de ventilación causados por interrupciones del suministro de energía, problemas mecánicos y defectos de los conductos del sistema auxiliar. Previendo una fuente de alimentación doble e instalando ventiladores auxiliares de reserva subterráneos y de superficie se garantiza un sistema de repuesto para casos de fallo del sistema de ventilación principal.

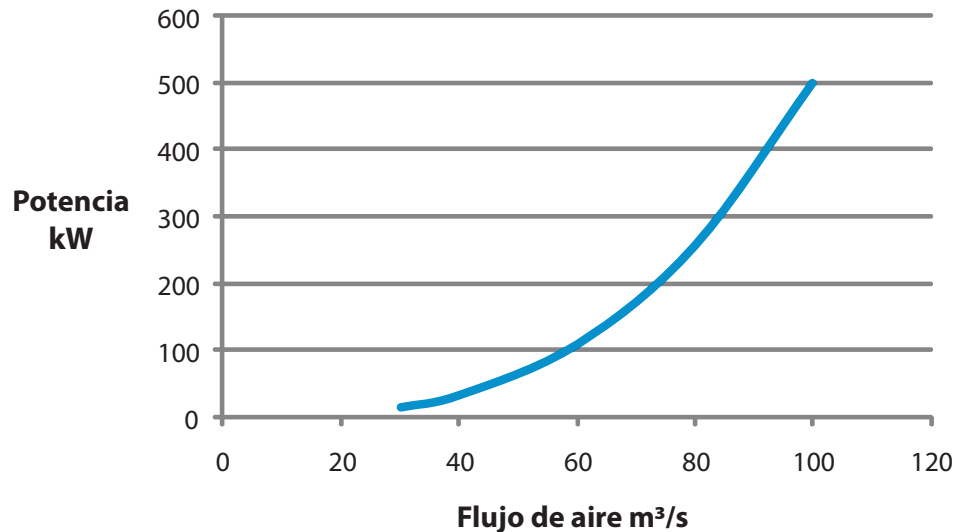
4.6 Medición del flujo del aire de ventilación

La medición del flujo del aire de ventilación puede realizarse principalmente de dos formas: 1) utilizando transductores de velocidad del aire fijos que transmiten constantemente datos a la superficie, o 2) utilizando periódicamente equipos manuales calibrados.

El grado de precisión de la medición continua del flujo depende de varios factores, a saber, la ubicación de los

¹³ En la figura 9.1 del estudio de caso 1 se muestra un ejemplo de un sistema de retorno hacia atrás.

Figura 4.4 Potencia del aire de ventilación necesaria en función del flujo de aire



(Cortesía de Sindicatum Sustainable Resources.)

Reducción del riesgo de explosión en minas de cámaras y pilares-Sudáfrica

Situación. No se pueden ventilar eficazmente las zonas ya explotadas porque se requieren cantidades ingentes de aire y resulta difícil distribuir el aire de manera uniforme. Para garantizar que los flujos de ventilación principales lleguen a los frentes de arranque, las zonas ya explotadas se cierran con pantallas provisionales, de modo que el gas se acumula en las zonas cerradas tras el frente.

Solución. Se recomendaron, entre otras, las siguientes medidas: 1) suministrar ventilación auxiliar eficaz a las galerías de avance (ventilación secundaria), 2) medir y registrar regularmente datos importantes sobre la ventilación, 3) analizar las condiciones de las zonas grisuosas a intervalos que no excedan de una hora, y 4) realizar un seguimiento continuo de la concentración de gas en la galería que se esté explotando.

Veáse más información en el estudio de caso 9.

transductores, la exactitud de la calibración y la extensión de la sección transversal de la galería, que puede variar con el tiempo a consecuencia de la perturbación generada por la actividad minera. Se debe realizar un seguimiento constante de los flujos de aire que circulan

por los sectores de trabajo y las galerías de avance, ya que son determinantes tanto para el mantenimiento de la seguridad como para la producción de carbón.

Los lugares de medición no deben situarse cerca de obstrucciones, como locomotoras u otros vehículos estacionados, que producen variaciones intermitentes de la velocidad local del aire.

Los anemómetros portátiles de paletas pueden utilizarse en cualquier lugar de la mina, incluidas las zonas de actividad dinámica, ya que es posible medir las dimensiones de la galería de ventilación cada vez que se mida la velocidad del aire. Los dispositivos de medición del aire se deben recalibrar periódicamente para garantizar la precisión.

4.7 Control de la ventilación

El control de la distribución del aire de ventilación entraña, entre otras cosas, reorientar el flujo hacia un lugar determinado reduciendo otras corrientes. La relación entre la resistencia aerodinámica, la presión del aire y el caudal del aire es bien conocida, y puede utilizarse para predecir el resultado de las redistribuciones del flujo de aire.

El control general del sistema de ventilación de una mina está determinado principalmente por el ventilador o los ventiladores de superficie. Aumentar la presión diferencial de la ventilación de superficie puede tener

un efecto mínimo en los flujos de aire que circulan por las secciones más remotas de la mina, de modo que no siempre resultará eficaz para subsanar déficits en las zonas de trabajo de esas secciones. Las presiones de los estratos pueden hacer que la bóveda, las paredes y el suelo converjan y, por consiguiente, el flujo de aire se enfrente a mayor resistencia, por lo que es fundamental mantener las galerías en buen estado para facilitar una ventilación eficaz y conforme al diseño del sistema.

No es recomendable controlar y ajustar constantemente el ventilador principal. En las minas dotadas de un sistema doble de ventiladores de superficie (uno o más ventiladores en funcionamiento y uno o más ventiladores de reserva) es conveniente disponer de un mecanismo que active los ventiladores de reserva a fin de evitar que se interrumpan los flujos de aire cuando se detengan los ventiladores de superficie para realizar labores de inspección o mantenimiento.

Capítulo 5. Drenaje del metano

Mensajes clave

En los países industrializados, la experiencia ha demostrado que invertir en buenas prácticas de drenaje contribuye a reducir el tiempo de inactividad debido a la presencia de grisú en las minas, así como a mejorar la seguridad de las explotaciones mineras, y permite aprovechar una mayor cantidad de gas y reducir las emisiones de metano de las minas.

Por lo general, los problemas prácticos del drenaje de gas de las minas de carbón pueden resolverse aplicando los conocimientos y técnicas existentes. La adopción de tecnologías nuevas y novedosas debería considerarse únicamente cuando la aplicación de las técnicas habituales no haya proporcionado una solución satisfactoria. La introducción de una nueva tecnología en una explotación minera debe ir precedida de un riguroso proceso de prueba para garantizar la seguridad y la observancia de mejores prácticas.

El rendimiento del sistema de drenaje del metano mejora cuando se realiza una instalación adecuada, se lleva a cabo una labor de mantenimiento, se efectúa un seguimiento periódico y se aplican planes de perforación sistemáticos.

Resulta peligroso, y debería estar prohibido, transportar por las minas de carbón mezclas de aire y metano en concentraciones comprendidas dentro del rango de explosividad, o cercanas a ese rango.

5.1 Drenaje del metano y dificultades asociadas

La finalidad del drenaje del metano es capturar el gas de alta pureza en su origen, antes de que pueda entrar en las galerías de ventilación de las minas. De conformidad con la normativa aplicable, la cantidad de gas que se libera al flujo de aire no debe superar el máximo que pueda diluir el aire de ventilación utilizado para mantener la concentración de contaminantes gaseosos dentro de los niveles de seguridad establecidos. No obstante, resulta interesante maximizar la extracción de gas, ya que contribuye a reforzar la seguridad y a mitigar los efectos ambientales y permite recuperar energía.

Existe una amplia gama de métodos de captura de gas. La selección de un método inadecuado o la aplicación

deficiente del método elegido dará lugar a eficiencias de drenaje bajas y a entradas de aire excesivas, por lo que el gas capturado presentará concentraciones de metano débiles. Cuando la concentración de metano se sitúa en el rango de explosividad o se acerca a ese rango, resulta peligroso transportar el gas y procesarlo para su aprovechamiento.

5.2 Principios básicos de las prácticas de drenaje del metano empleadas en el mundo

Las distintas condiciones geológicas y mineras de las cuencas de carbón del mundo han llevado al desarrollo de diversas técnicas de drenaje del metano.

Los métodos de *drenaje del metano* se clasifican habitualmente en función de si su aplicación es previa o posterior a la extracción del carbón. El *predrenaje* consiste en intervenir antes del minado para eliminar el metano de la capa que se va a explotar, mientras que el *posdrenaje* consiste en capturar el metano y otros gases que se liberan de las capas adyacentes a consecuencia del movimiento y la relajación de los estratos y el aumento de la permeabilidad inducidos por la actividad minera. En el anexo 1 se resumen los métodos de drenaje del metano más comunes. En este capítulo se analiza el predrenaje del metano en el contexto de las minas subterráneas; los aspectos específicos del predrenaje del metano en las minas de superficie se tratan en el capítulo 6.

Por lo general, cuando no existen condiciones geológicas inusuales, mediante la aplicación correcta de las técnicas de posdrenaje se puede extraer entre el 50% y el 80% del contenido de gas de un sector explotado por tajo largo. En la mayoría de los casos se puede alcanzar una captura del 50% del contenido total de gas de la mina. Salvo en condiciones de explotación extremadamente difíciles, los sistemas de posdrenaje deberían permitir obtener concentraciones de metano del 30% como mínimo. Los métodos de predrenaje deberían permitir obtener concentraciones del 60% como mínimo.

5.3 Principios básicos del predrenaje

El *predrenaje* se puede llevar a cabo tanto perforando la capa como realizando perforaciones desde la superficie. Es

el único método que permite reducir directamente el flujo de gas emitido de la capa que se está explotando, lo que reviste importancia cuando la capa es la principal fuente de emisión. Además, en ocasiones el predrenaje es necesario para reducir el riesgo de desprendimiento instantáneo (véase el estudio de caso 3). Dado que el drenaje se lleva a cabo antes del inicio de la actividad minera, no es probable que los sistemas de captura se vean afectados por movimientos del terreno, y, por lo general, cuando resulta viable, este método permite extraer gas de pureza relativamente alta. Normalmente, al drenar gas de bloques de carbón antes de comenzar la extracción se obtienen flujos uniformes de alto nivel de pureza, pero el predrenaje solo suele dar buenos resultados cuando la permeabilidad y el contenido de gas del carbón son suficientes para que el flujo de gas sea importante. Cuando fluyen cantidades significativas de gas hacia un frente todavía no explotado, cabe suponer que la permeabilidad por fractura es media o alta y, por consiguiente, el predrenaje resultará eficaz y se podrá aprovechar el gas.

El tiempo necesario para drenar una capa depende directamente de la permeabilidad del carbón. Cuanto menor sea la permeabilidad, más tiempo se necesitará para drenar el gas hasta reducir su contenido al valor medio requerido. El proceso se puede acelerar aumentando el número de perforaciones. El tiempo disponible para la desgasificación y los costes de las actividades de perforación determinan en última instancia si, en las condiciones específicas del emplazamiento, resulta viable realizar la desgasificación antes del inicio de la actividad extractiva.

Actualmente en el mundo se utilizan diversas técnicas de predrenaje. Por lo general se emplean perforadoras rotativas para realizar perforaciones subterráneas de 100 a 200 m en las capas, aunque se pueden realizar perforaciones de 1.000 m o de mayor longitud aplicando técnicas de perforación subterránea dirigida, lo que permite aumentar la eficiencia de la desgasificación. Además, cuando las minas no son excesivamente profundas, es posible perforar las capas y llevar a cabo la desgasificación en gran medida desde la superficie. Las técnicas de perforación dirigida desde la superficie a la capa han resultado eficaces para el predrenaje de capas de carbón con un rango de permeabilidad aproximado de 0,5 milidarcios (mD) a 10 mD (es decir, de $5 \cdot 10^{-4}$ (μm)² a 10^{-2} (μm)²), o incluso inferior. En Australia se utiliza una combinación de los métodos de predrenaje y posdrenaje, y el drenaje se realiza empleando técnicas avanzadas de

perforación dirigida, tanto subterránea como desde la superficie. Las emisiones totales de las minas del país pueden alcanzar 9.500 l/s, y se necesitan eficacias de captura de entre el 80% y el 85% para explotaciones por tajo largo en retirada de alta producción (Belle, 2016). Dado el bajo rendimiento de los sistemas de perforación desde la superficie a la capa, y los elevados costes que conllevan, en Australia se ha utilizado preferentemente el drenaje subterráneo en la capa (Belle, 2016). Las experiencias de Australia y los Estados Unidos (Von Schonfeldt, 2008) han demostrado que las perforaciones desde la superficie resultan más eficaces que las subterráneas porque pueden realizarse con mucha antelación al inicio de la actividad extractiva y, por consiguiente, es menos probable que el tiempo efectivo de drenaje se reduzca para dar inicio a la extracción de carbón (Black y Aziz, 2009). En la figura 5.1 se muestra un ejemplo de configuración de perforaciones para el predrenaje. En este caso hay dos capas explotables que se drenarán perforando primero un pozo piloto, a partir del cual se perforarán dos pozos laterales, uno hacia cada una de las capas. A continuación, se perforará otro pozo vertical transversal a los laterales, por el que se extraerán agua y gas. El pozo piloto se cerrará o se abandonará. En la figura 5.2 se muestran varias técnicas de posdrenaje, pero esa misma configuración se puede utilizar para realizar perforaciones inclinadas y perforaciones dirigidas o guiadas (antes de la actividad extractiva).

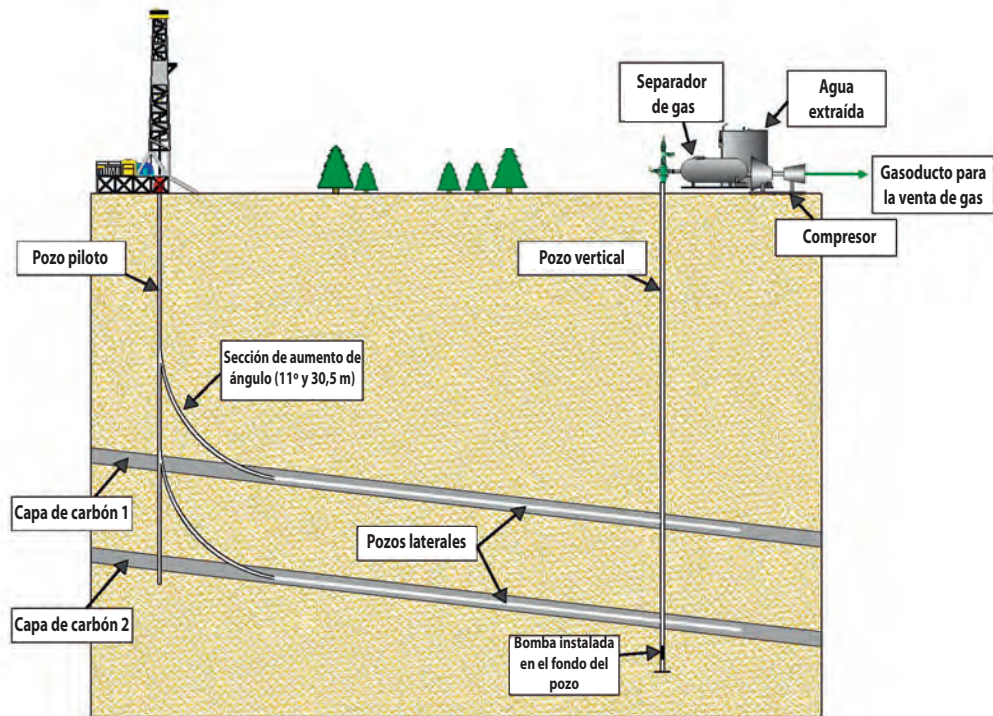
Para el predrenaje de capas de poca o media profundidad y de permeabilidad elevada (> 10 mD), se han empleado comúnmente, con buenos resultados, pozos verticales de estimulación hidráulica perforados desde la superficie, también conocidos como "pozos de fracturación hidráulica", principalmente en los Estados Unidos. La fracturación hidráulica se ha utilizado en minas de carbón de la región oriental del país sin plantear riesgos de seguridad, pero se debe estudiar con cautela si la técnica resulta adecuada en las condiciones geológicas y mineras específicas antes de proceder a su uso.

La ventaja que presentan las técnicas de superficie es que el drenaje se puede llevar a cabo separadamente de las actividades mineras, pero su viabilidad depende de la profundidad de la perforación, la naturaleza del carbón y las condiciones topográficas.

5.4 Principios básicos del posdrenaje

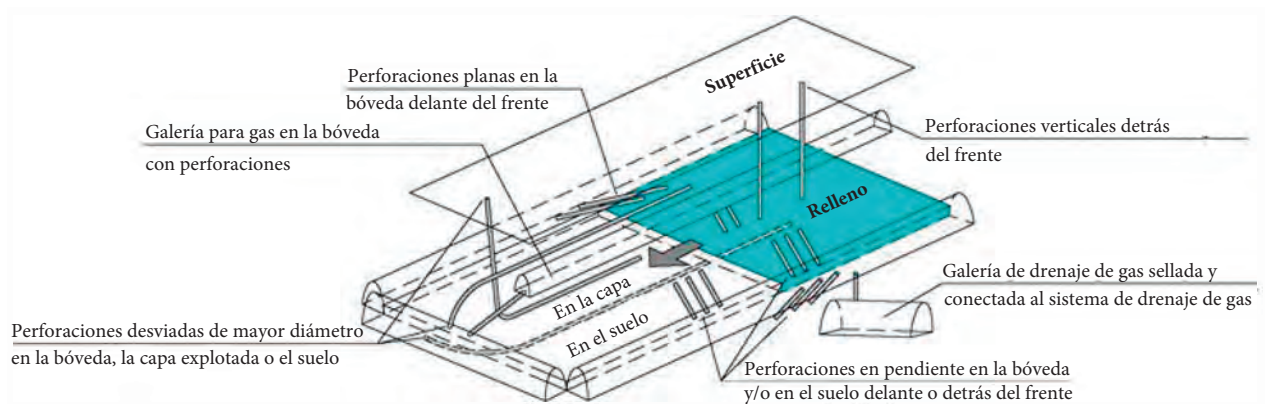
En muchas de las cuencas de carbón del mundo, la baja permeabilidad de las capas de carbón ($< 0,1$ mD) y las

Figura 5.1 Predrenaje mediante pozos laterales perforados desde la superficie



(Cortesía de Raven Ridge Resources, Incorporated.)

Figura 5.2 Distintos métodos de perforación para el posdrenaje



(Cortesía de DMT GmbH & Co. KG.)

Obtención de la producción de carbón prevista de una explotación por tajo largo en retirada en una capa de carbón grisosa propensa a la combustión espontánea y sometida a fuerte tensión horizontal-Reino Unido

Situación. La mina, cuya producción prevista era de 1 mtpa, tenía una profundidad de trabajo de 980 m y se explotaba por tajo largo de 2 m de altura en retirada. La capa explotada contenía carbón de permeabilidad muy baja, estaba sometida a fuertes tensiones horizontales y presentaba hinchamiento del suelo en las galerías de acceso del tajo largo. Además, era propensa a la combustión espontánea. Las emisiones específicas de la mina eran de 50 m³/t. El predrenaje no era viable debido a la baja permeabilidad del carbón, y las perforaciones inclinadas realizadas en ángulo por encima del frente del tajo largo se veían afectadas por las fuertes tensiones; por consiguiente, los niveles de captura y pureza del gas eran demasiado bajos. El elevado riesgo de combustión espontánea y el gran tamaño del pilar requerido para asegurar la estabilidad impedían el uso de sistemas de accesos múltiples o de vías de purgas.

Solución. Se realizaron perforaciones inclinadas detrás del frente en una configuración de "retorno hacia atrás" dotada de apoyo y ventilación especiales. Se dejó una separación de 100 m entre las perforaciones descendentes para minimizar los riesgos de emisiones del suelo. El ritmo de explotación en retirada era rápido, pero hubo tiempo suficiente para realizar cada perforación y conectarla al conducto de drenaje.

Veáse más información en el estudio de caso 1.

características geológicas de las capas (por ejemplo, la presencia de carbones bituminosos o la existencia de fallas) no son propicias para la aplicación de técnicas de predrenaje. Esta situación puede volverse aún más común en muchos países a medida que se van explotando las reservas menos profundas y las actividades de extracción avanzan hacia el interior. En estos casos, la eficacia del drenaje del metano depende de la fracturación y del aumento de la permeabilidad causados por el hundimiento de los estratos resultante de la extracción del carbón.

El *posdrenaje* consiste en capturar el metano liberado a consecuencia de la perturbación generada por las actividades de extracción antes de que pueda entrar a las galerías de ventilación de la mina. Para ello es necesario acceder a la zona perturbada que se encuentra por encima de la capa explotada, y en ocasiones también a la zona perturbada que se encuentra por debajo de esa capa.

Cuando hay una o más capas de carbón por encima o por debajo de la capa explotada, las emisiones de esas capas superiores o inferiores pueden superar con creces las emisiones de la capa explotada, en función, principalmente, del espesor neto del carbón y del contenido de gas de las capas. Las técnicas de posdrenaje permiten, por lo general, drenar volúmenes de gas mucho mayores que los que se pueden extraer mediante el predrenaje. Los sistemas de posdrenaje se deben diseñar y gestionar adecuadamente a fin de garantizar que las concentraciones de metano sean suficientes para que el drenaje resulte eficaz y el gas se pueda aprovechar de forma segura. Cuanto mayor sea la cantidad de carbón presente en el techo y el muro de una capa grisosa explotada, mayor interés revestirá el posdrenaje.

En la figura 5.2 se representan de forma sinóptica las técnicas de posdrenaje que se pueden utilizar para drenar gas de un panel de explotación por tajo largo tras la extracción del carbón. En el diagrama se muestran tres modalidades de perforación:

- Perforaciones horizontales dirigidas: Se realizan desde una galería de la mina o desde galerías de perforación habilitadas al efecto. Pueden realizarse en estratos adyacentes que se irán relajando a medida que el frente de trabajo vaya retrocediendo. Al relajarse, los estratos liberan gas a zonas que actúan como vías de ascenso y puntos de captura. En la figura se muestran perforaciones realizadas por encima del panel, hacia los estratos superiores, y por debajo del suelo, hacia los estratos subyacentes.
- Perforaciones inclinadas: En el diagrama se representan diversas configuraciones, diseñadas para drenar los estratos rocosos superiores y subyacentes conforme estos se vayan relajando a consecuencia de la liberación de tensiones causada por la extracción del carbón. Se realizan varias perforaciones delante del frente de la explotación por tajo largo en retirada, hacia el estrato rocoso superior situado detrás del frente de arranque. Estas perforaciones suelen resultar más eficaces que las realizadas antes de que comience la extracción, que inevitablemente sufrirán daños a medida que, una vez formado, el frente de la explotación por tajo largo avance a lo largo de los estratos. Por lo general, las perforaciones inclinadas realizadas detrás del frente de la explotación por tajo largo proporcionan mayores eficiencias de captura y niveles de pureza del gas más elevados

que las realizadas delante del frente de arranque. No obstante, es necesario sustentar la entrada que se encuentra detrás del frente construyendo muros de sostén, y, en algunos casos, también se debe sellar el relleno. El sellado del lado del relleno de la galería abierta situada detrás del frente contribuye a sustentar la galería y aísla el relleno para evitar la entrada de aire y minimizar el riesgo de combustión espontánea.

- Perforaciones de la superficie al relleno: Van desde la superficie hasta el límite superior del relleno, y normalmente se realizan antes del minado. Están diseñadas de manera que el gas que asciende desde los estratos subyacentes relajados y fracturados pueda drenarse a través de las ranuras practicadas en la parte inferior de la perforación. Por lo general, el drenaje se lleva a cabo en condiciones de vacío parcial. Hay que evitar intensidades de aspiración excesivas, que darán lugar al drenaje de grandes cantidades de aire y la consecuente dilución del metano a purezas inferiores al 30%. Cuando la pureza cae por debajo de entre el 25% y el 30%, se deben cerrar estas perforaciones.

Las emisiones de metano que se dirigen hacia las labores activas pueden reducirse eficazmente creando galerías de drenaje por encima o por debajo del frente explotado y drenando el gas de las labores anteriores que se encuentran en la zona perturbada por la actividad minera.

Las estrategias de posdrenaje pueden basarse en cualquiera de estas técnicas o combinar todas ellas. Los sistemas de posdrenaje se deberán elegir y configurar atendiendo a la eficiencia de drenaje requerida, las condiciones mineras y geológicas específicas, la idoneidad de la técnica para ser aplicada en la principal fuente de flujos de gases y los costes. En la figura 5.2 se muestran distintas técnicas de posdrenaje, pero se pueden realizar perforaciones inclinadas y dirigidas o guiadas con la misma configuración para extraer gas de paneles creados antes de comenzar la explotación por tajo largo. El inconveniente que presentan los métodos de posdrenaje es que pueden afectar a la estabilidad de las perforaciones, lo que puede dificultar la extracción del gas en algunos casos.

Algunos métodos de drenaje, como la instalación de tuberías en el relleno a través de pilares de seguridad contruidos detrás del frente, permiten que entren al sistema volúmenes de aire excesivos, que en ocasiones

diluyen el metano hasta que su concentración se sitúa en el rango de explosividad. Deben evitarse estos y otros tipos de sistemas de drenaje, mediante los que únicamente se obtiene metano de bajo nivel de pureza, ya que resultan sumamente ineficaces y propician la acumulación de mezclas de gases explosivos en el relleno, en el extremo de retorno del frente explotado en retirada. Estos métodos de drenaje tampoco suelen ser efectivos para prevenir la formación y la migración de capas de metano.

La disminución del rendimiento del drenaje da lugar a un rápido aumento de las concentraciones de metano en las galerías de ventilación (suponiendo que el flujo de aire de ventilación total que entra en la mina se mantenga constante). Por consiguiente, los sistemas de drenaje requieren un seguimiento y una gestión continuos y minuciosos.

5.5 Consideraciones sobre el diseño de los sistemas de drenaje de metano

Los sistemas de drenaje de metano deben tener capacidad para transportar los flujos máximos de mezcla de gas (metano y aire) que cabe prever que se liberen de todas las fuentes de la mina, incluidos los frentes que se están explotando, los frentes ya explotados de los que se va eliminando el equipo de extracción y las zonas abandonadas (cerradas o selladas).

El volumen previsto de metano que se obtendrá puede estimarse utilizando un método de predicción. El flujo máximo que se deberá transportar a través de la red de tuberías vendrá determinado por el flujo máximo previsto de gas capturado con las concentraciones (pureza) de metano mínimas que es probable que se registren en condiciones normales. El caudal resultante debería estar comprendido dentro del rango de capacidad que se prevé que tenga el sistema cuando todas las bombas estén en funcionamiento.

La calidad del gas no es una característica inherente o natural, sino que depende del diseño del sistema de drenaje. Las purezas inferiores al 30% de metano en el aire deben considerarse inaceptables tanto por motivos de seguridad como por motivos de eficiencia. Para mantener un nivel adecuado de pureza del gas en los sistemas de drenaje subterráneos se debe garantizar la calidad del sellado de las perforaciones, en particular instalando correctamente los tubos verticales, regular sistemáticamente cada perforación y aplicar una presión de aspiración apropiada en la planta de extracción de la

Explotaciones por tajo largo de alto rendimiento en zonas con niveles elevados de emisiones de gas-Australia

Situación. En una mina australiana se ha definido una nueva serie de bloques para la explotación por tajo largo de una capa de 2,8 m de alto cuyo contenido de metano oscila entre 8 y 17 m³/t. La profundidad de la cubierta va de 250 a 500 m. Según las predicciones, cabe esperar unas emisiones de gas de la capa de carbón de entre 15 y 30 m³/t. Los flujos de gas podrían alcanzar 9,5 m³/s.

Solución. Hasta la fecha se han venido realizando perforaciones de drenaje convencionales desde la superficie al relleno (de 300 mm de diámetro, con una separación de 50 m entre ellas y situadas en la galería de cabeza que actúa como vía de retorno) para reducir eficazmente las emisiones de gas al aire de ventilación. Este método ha permitido lograr un promedio de captura del 75% (drenaje del relleno y ventilación), con máximos de alrededor del 85%, y obtener gas de alta pureza (> 90% CH₄).

Veáse más información en el estudio de caso 3.

superficie. Si se intensifica la aspiración para aumentar el flujo de gas, entrará un mayor volumen de aire y, por consiguiente, disminuirá la pureza del gas. A la inversa, si se reduce la aspiración, disminuirá el flujo total de mezcla, pero mejorará la pureza del gas. Además, la aspiración y el flujo solo deben ajustarse en la planta de superficie si se conoce perfectamente la situación subterránea, y los ajustes deben realizarse manteniendo una comunicación constante con los encargados de supervisar la ventilación del frente.

Al planificar, habilitar y gestionar un sistema de drenaje de metano se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- La seguridad de acceso para la perforación, el seguimiento y la regulación;
- La estabilidad del terreno y los sistemas de apoyo necesarios para afianzar las perforaciones;
- La configuración de las perforaciones para el drenaje, en función de las diferencias entre el rendimiento previsto de las perforaciones para el posdrenaje del techo y el muro;
- La capacidad de drenaje, el diámetro de las tuberías, la bomba de extracción y la infraestructura necesaria;

- La ubicación, la instalación y la puesta en servicio de la red de tuberías de drenaje;
- Los colectores de agua y las instalaciones de desagüe;
- El control del funcionamiento y el mantenimiento de la infraestructura y el sistema de drenaje;
- La inspección de las perforaciones, las redes de tuberías y la planta de extracción de la superficie;
- La protección de las tuberías de drenaje para evitar que sean aplastadas detrás de los frentes en retirada.

5.6 Infraestructura de gasoductos subterráneos

Las canalizaciones para el drenaje de gas deben construirse con materiales adecuados. Existen tuberías de acero, de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y de polietileno.

Las tuberías de PRFV son relativamente frágiles y no deberían utilizarse en sectores de producción de carbón; sin embargo, son más fáciles de manejar e instalar que las tuberías de acero, por lo que el PRFV es el material preferido para los conductos principales.

Cuando el espacio es limitado y existe el riesgo de que los conductos sufran daños (por ejemplo, por la deformación de una galería o por el tránsito de vehículos no guiados por carriles), deben utilizarse tuberías de acero, que se conectarán mediante modelos específicos de juntas flexibles para permitir el movimiento.

En algunos países se utilizan tuberías de polietileno. Si se opta por este material se deben adoptar medidas preventivas para evitar que las juntas o los segmentos se fundan a causa de las altas temperaturas alcanzadas bajo tierra. Las autoridades reguladoras de algunos países permiten el uso del polietileno en zonas bien ventiladas y bajo la supervisión de personal de seguridad cualificado, mientras que en otros países está prohibido utilizar este material. Además, se requiere un medio conductor para reducir el riesgo de descargas electrostáticas.

Independientemente de la configuración y el material que se empleen, las canalizaciones subterráneas pueden sufrir daños incluso en las minas sometidas a las regulaciones más estrictas. Las principales causas de posibles daños son las voladuras y los equipos de minería, en particular las cintas transportadoras de mineral, los sistemas de tracción por cable y las locomotoras y sus cargas. También se pueden producir daños por el desplazamiento de los estratos y el hundimiento de la bóveda. Por consiguiente,

los sistemas de drenaje deben diseñarse y utilizarse teniendo en cuenta la existencia de estos riesgos.

5.7 Vigilancia de los sistemas de drenaje de gas

La eficacia de los sistemas de drenaje de gas se debe determinar utilizando sistemas de vigilancia controlados manualmente o a distancia. La calidad de la vigilancia depende de la fiabilidad, la ubicación, el mantenimiento, la calibración y el uso de los sensores.

Es necesario realizar mediciones en perforaciones individuales, en las tuberías de drenaje de gas y en la planta de extracción de la superficie que alberga las bombas que aspiran el gas drenado de la mina. Se deben controlar los siguientes parámetros: el flujo de mezcla, la concentración de gas, la presión manométrica y la temperatura. Conviene medir también la presión

barométrica para facilitar la tipificación de los datos sobre el flujo. En algunos casos, los gases drenados de las labores de la mina o que fluyen hacia estas pueden contener hidrocarburos gaseosos más pesados, como etano o propano. La presencia de estos tipos de hidrocarburos puede alterar el funcionamiento de los sistemas convencionales de detección de gas por radiación infrarroja y dar lugar a mediciones inexactas del metano. Se debe optar por equipos de vigilancia capaces de neutralizar el efecto de los hidrocarburos distintos del metano en las mediciones a fin de obtener datos precisos.

La labor de vigilancia debería servir para evaluar el rendimiento real del sistema en comparación con su rendimiento esperado. En algunos países, como los Estados Unidos, es obligatorio medir, notificar y verificar las emisiones de gases de efecto invernadero de las minas de carbón¹⁴.

¹⁴ En cumplimiento de la Ley Refundida de Asignaciones Presupuestarias de 2008 aprobada por el Congreso de los Estados Unidos de América, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos emitió la Norma de Notificación Obligatoria de Gases de Efecto Invernadero. Según esta Norma, las grandes fuentes emisoras y proveedores de los Estados Unidos, incluidas las minas subterráneas de carbón cuyas emisiones de metano sean iguales o superiores a 701 toneladas métricas al año (36,5 millones de pies cúbicos a 1,03 millones de metros cúbicos al año), deben presentar datos de sus emisiones de gases de efecto invernadero y otra información pertinente. En 2014, un total de 128 minas notificaron sus emisiones en el marco del Programa de Notificación de Gases de Efecto Invernadero. Los datos comunicados por las minas de carbón son públicos y se pueden consultar en el sitio web de la EPA. La Norma se refiere únicamente a la notificación y en ella no se ordenan controles de las emisiones, ni se prevé un programa de intercambio de emisiones.

Capítulo 6. Aprovechamiento y reducción del metano

Mensajes clave

Las minas subterráneas de carbón son una de las principales fuentes de emisiones antropógenas de metano, pero sus emisiones se pueden reducir significativamente aplicando las mejores prácticas. El metano tiene un PCA entre 28 y 34 veces más elevado que el del dióxido de carbono, el GEI más importante a nivel mundial.

La industria minera puede aprovechar o destruir una gran parte del metano extraído de las minas subterráneas. Entre las opciones de aprovechamiento o eliminación figuran la explotación del gas drenado, la combustión en antorcha del gas excedente y el uso o la reducción del VAM de la mina. Cuando las condiciones técnicas y de mercado son adecuadas, el objetivo final debería ser la práctica neutralización de las emisiones de metano.

En ocasiones, al tratar de explotar el MMC precipitadamente, no se han seguido las normas de ingeniería y de seguridad aplicables, lo que ha generado nuevos riesgos en las minas de carbón. Los sistemas de aprovechamiento del metano deben planificarse teniendo en cuenta la necesidad de evitar el aumento de los riesgos subterráneos.

6.1 El metano de las minas de carbón y la mitigación del cambio climático

Reducir las emisiones de metano es un objetivo prioritario a nivel internacional al que las minas de carbón pueden contribuir sustancialmente. El metano representa el 20% de las emisiones antropógenas mundiales de GEI, y las minas de carbón son responsables del 8% de las emisiones de metano (unos 400 millones de toneladas de CO₂ equivalente por año) (EPA, 2012; IPCC, 2014). Las emisiones mundiales de MMC son significativas, aunque resulten relativamente bajas en comparación con la otra fuente de emisiones de GEI relacionadas con el carbón, a saber, las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la combustión del carbón. En una única instalación, las emisiones de MMC pueden ser muy elevadas y superar 1 millón de toneladas de CO₂ equivalente por año. En el mercado existen tecnologías de eficacia demostrada para recuperar y utilizar el MMC, por lo que el aprovechamiento del MMC constituye una solución atractiva a corto y medio

plazo para reducir las emisiones de GEI de la industria carbonera.

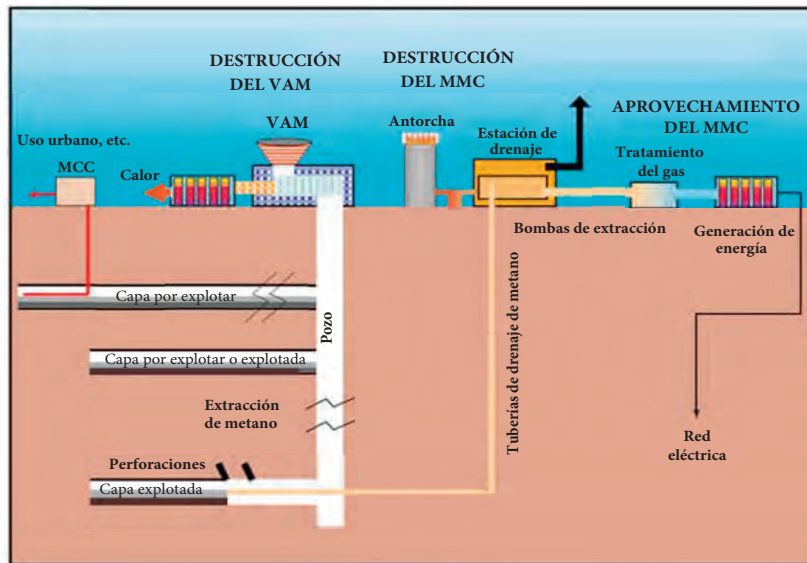
6.2 El metano de las minas como fuente de energía

Los procesos de captura y utilización del metano pueden aportar un importante valor añadido a las actividades de extracción. El MMC recuperado puede ser utilizado directamente para suministrar o generar energía, lo que permite aprovechar el valor de un recurso natural. A su vez, esto puede traducirse en la obtención de un rendimiento económico de la mina mediante la venta de energía o el ahorro de costes. Además, el aprovechamiento del metano aporta valor intrínseco al generar un capital que se puede reinvertir en operaciones y equipos de seguridad para la mina. Los procesos de captura y utilización del MMC pueden ser un componente central de una estrategia de responsabilidad social empresarial, y representan una gran ventaja en un momento de creciente atención mundial a la mitigación de los efectos del cambio climático y la sostenibilidad de las industrias extractivas.

6.2.1 El metano de las minas subterráneas

Las tecnologías existentes permiten optimizar la recuperación de energía y eliminar un porcentaje sustancial de las emisiones de metano de las minas subterráneas de carbón (figura 6.1). Siguiendo prácticas y normas adecuadas para el drenaje del metano se obtendrá un flujo de gas utilizable y de calidad constante, y se facilitará el empleo de las modalidades de aprovechamiento de menor coste. El flujo de gas podrá fluctuar debido a las variaciones de la explotación minera, y, en ocasiones, el equipo de aprovechamiento fallará o tendrá que ser desactivado para la realización de tareas de mantenimiento. En esos casos, el gas no utilizado se podrá quemar a fin de minimizar las emisiones. El metano que no se puede captar y aprovechar se diluye en el aire de ventilación y se libera a la atmósfera en forma de VAM. Desde hace muchos años se vienen desarrollando tecnologías para reducir las emisiones de VAM. En general, desde el punto de vista técnico, es viable oxidar el VAM cuando su concentración es superior al 0,20%, y existen varios proyectos comerciales en este ámbito en todo el mundo.

Figura 6.1 Optimización de la recuperación de energía en una explotación minera con emisiones de metano casi nulas



(Cortesía de Sindicatum Sustainable Resources.)

La seguridad debe ser siempre la máxima prioridad de la gestión del metano en las minas subterráneas de carbón. En ocasiones, al tratar de explotar el MMC precipitadamente, no se siguen las normas de ingeniería y de seguridad aplicables, lo que genera nuevos riesgos en las minas. Los sistemas de aprovechamiento del metano deben planificarse teniendo en cuenta la necesidad de evitar el aumento de los riesgos subterráneos.

6.2.2 El metano de las minas de superficie

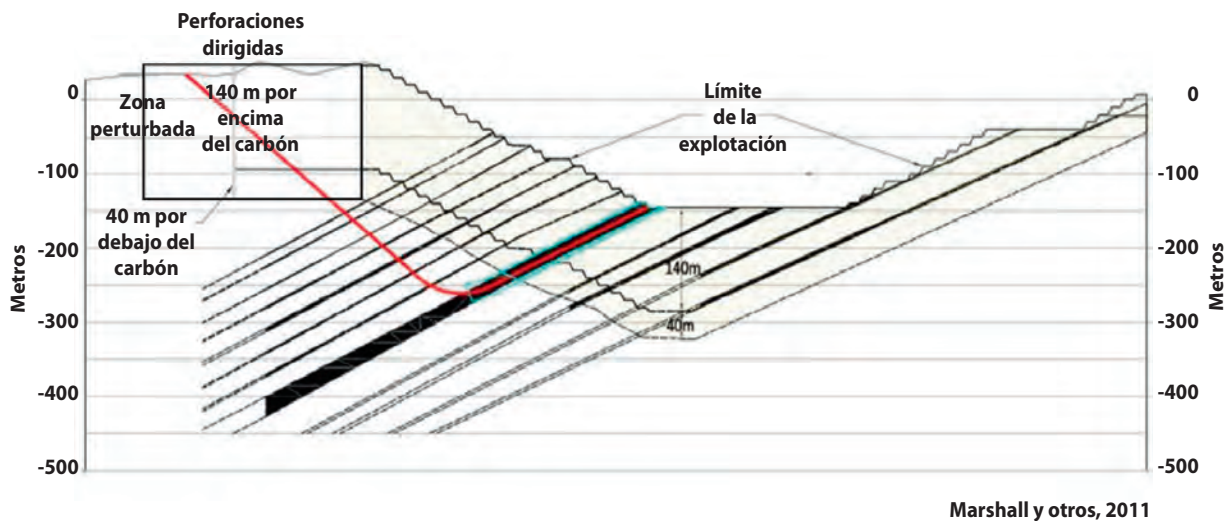
El metano de las minas de superficie se puede capturar empleando tecnologías preparadas y utilizadas para la obtención de metano de las capas de carbón; sin embargo, para drenar y capturar eficazmente el metano que, de no ser capturado, se liberaría durante la extracción del carbón, las perforaciones de drenaje han de realizarse antes del inicio de las actividades extractivas. Para que resulte rentable, el programa de perforación se debe coordinar con el plan de extracción y con el calendario de la mina. Así se garantizan las mejores condiciones para que, una vez perforado el pozo, el productor de gas pueda capturar el gas de forma provechosa y rentabilizar la inversión.

Las minas de carbón de superficie pueden adoptar la forma de cortas o de explotaciones al descubierto. Ambas modalidades presentan ventajas e inconvenientes para

el drenaje del metano. Las explotaciones al descubierto se disponen siguiendo la dirección de la capa de carbón que se va a explotar, de la cual se extraen franjas a medida que se va retirando el material estéril. Conforme la mina avanza, la tierra que se va retirando se deposita en las zonas ya explotadas. Se pueden utilizar perforaciones verticales para drenar el metano de la capa de carbón antes de comenzar la excavación, pero se deben realizar en una zona en la que no vayan a verse perturbadas por las actividades mineras, con antelación suficiente al avance de la mina para garantizar un drenaje efectivo. También se pueden realizar perforaciones dirigidas desde la superficie para drenar eficazmente el metano de la capa de carbón (figura 6.2). Este tipo de perforaciones pueden resultar especialmente adecuadas si se posicionan de tal manera que queden por debajo de la zona perturbada y dentro de la capa de carbón que se está explotando. A medida que se retira el material estéril, los estratos subyacentes se van relajando, lo que da lugar a un ligero aumento de la permeabilidad y de la eficiencia del drenaje.

En las cortas, el material estéril se excava en una serie de niveles o bancos concéntricos que descienden desde la superficie al fondo de la explotación. Las paredes están diseñadas para favorecer la estabilidad de los taludes y prevenir desprendimientos de rocas y derrumbes. A lo

Figura 6.2 Sección transversal de una explotación al descubierto en la que se muestra el posible emplazamiento de una perforación dirigida



largo de los bancos se habilitan pistas de transporte para que el carbón y/o el material estéril puedan ser llevados a la superficie y depositados en los bordes de la explotación. Al igual que en las explotaciones al descubierto, el calendario y el posicionamiento de las perforaciones deben determinarse en función del plan de la explotación. En la figura 6.3 se ilustra el posible posicionamiento de las perforaciones en relación con la expansión prevista de la corta.

En la corta de la cuenca del río Powder, en los Estados Unidos, se han obtenido buenos resultados perforando pozos verticales desde la superficie para drenar gas de las capas de carbón antes del inicio de las actividades extractivas. La clave del éxito de este proyecto fue la estrecha coordinación entre la empresa explotadora de la mina y el titular de los derechos de explotación del metano de las capas de carbón. El titular de los derechos mineros era el Gobierno de los Estados Unidos, y la Oficina de Administración de Tierras rebajó los cánones y los arrendamientos para ofrecer un incentivo al productor de gas, a fin de evitar el desperdicio de un valioso recurso. Esta iniciativa de coproducción coordinada permitió que el gas se capturara y se vendiera, en lugar de ser liberado a la atmósfera conforme avanzaban las actividades extractivas (EPA, 2014).

6.3 Posibles usos

El MMC con un contenido de metano de entre el 30% y el 100% puede emplearse para numerosos fines, por

ejemplo: 1) como combustible en altos hornos, hornos de calcinación, calderas y quemadores industriales; 2) para alimentar motores de combustión interna o turbinas de generación de energía; 3) para inyectar en gasoductos de gas natural; 4) de materia prima para la producción de fertilizantes; o 5) como combustible para y vehículos (GNL o GNC). En ocasiones se construyen tanques de almacenamiento para el gas destinado al uso externo, especialmente cuando el gas se vende a clientes privados, a fin de poder satisfacer picos de demanda y mantener el suministro en caso de interrupción de la extracción de gas. Los inconvenientes que presenta esta práctica, a saber, su elevado coste, sus implicaciones en términos de impacto visual y uso de la tierra y los riesgos que conlleva el almacenamiento de grandes volúmenes de mezclas de gases inflamables, pueden evitarse dotando a las propias minas de centrales generadoras de energía a partir del MMC, que en muchos casos funcionan eficazmente con una conexión directa a la mina.

La Iniciativa Global de Metano (www.globalmethane.org) ha identificado más de 200 proyectos operativos de MMC/VAM en minas activas y abandonadas de todo el mundo. En la figura 6.4 se resume la distribución de los distintos tipos de proyectos de MMC/VAM, entre los que destacan los de generación de energía, que representan casi el 50% del total mundial. En conjunto, los proyectos de generación de energía suministran aproximadamente

Figura 6.3 Vista seccionada de la expansión prevista de una corta de carbón con perforaciones verticales

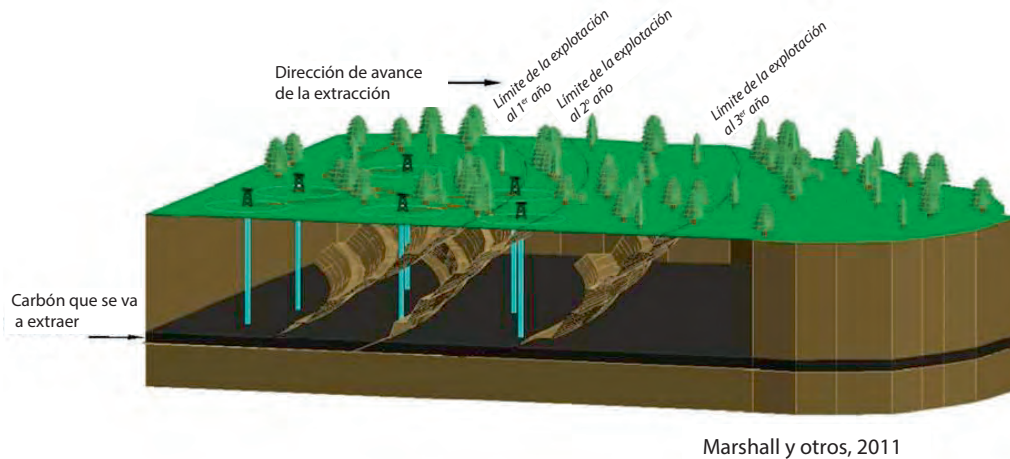
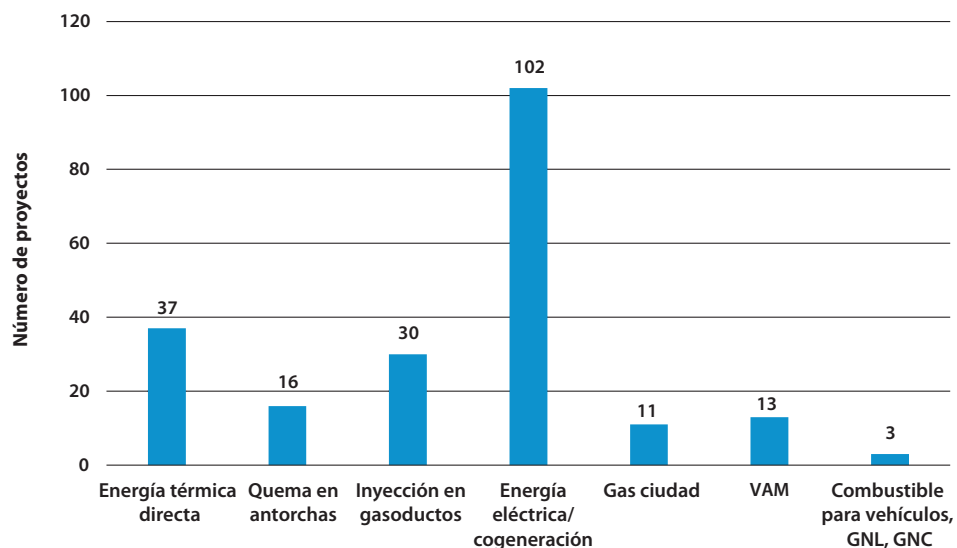


Figura 6.4 Distribución mundial de los distintos tipos de proyectos de MMC



(Fuente: Base de datos de proyectos de metano de minas de carbón de la Iniciativa Global de Metano, agosto de 2015.)

709 megavatios (MW) de potencia eléctrica, y los demás proyectos producen 2.716 millones de m³ de gas para la venta al año. Las reducciones anuales de las emisiones en 2013 fueron de 29,4 millones de toneladas de CO₂ equivalente (Iniciativa Global de Metano, 2015).

Hasta la fecha, la mayoría de los proyectos de aprovechamiento del metano capturado se han llevado a cabo en Alemania, Australia, China, los Estados Unidos, la Federación de Rusia, Polonia, el Reino Unido, la República

Checa y Ucrania, aunque también se han puesto en marcha proyectos en Kazajstán, México, Rumania, Sudáfrica y Turquía. En algunos países, la creación de los mercados de carbono y la consiguiente obtención de créditos de carbono u otros productos ambientales negociables ha aportado un valor añadido a la reducción de las emisiones mediante estos proyectos, además de la propia producción energética (véase el capítulo 7). Esto ha incentivado la puesta en marcha de proyectos en muchos países, en

particular en China, y ha impulsado el crecimiento de los tipos de proyectos cuya principal fuente de ingresos son únicamente los créditos de carbono (por ejemplo, la quema en antorcha y la reducción del VAM).

6.4 Reducción y aprovechamiento del metano drenado

El aprovechamiento del metano drenado depende de la cantidad y la calidad del gas obtenido. Hasta hace poco se requerían concentraciones de al menos un 30% de metano, pero en los últimos años han comenzado a comercializarse motores de combustión capaces de utilizar gas con concentraciones de metano inferiores. En esta guía se distingue entre concentraciones medias-altas y concentraciones bajas (<30%) del metano drenado, ya que el transporte de metano en concentraciones bajas es sumamente peligroso y debe evitarse.

6.4.1 MMC con concentración de metano media-alta

Las tecnologías empleadas para la reducción y el aprovechamiento del metano requieren, por lo general, un flujo y una calidad bastante constantes del metano drenado, cuya concentración mínima debe alcanzar el 30% para que pueda ser transportado de forma segura. Algunas aplicaciones solo resultan comercialmente viables cuando el gas es de alta calidad y se drena antes del inicio de las actividades mineras. No existe un "uso óptimo", sino que cada proyecto se debe evaluar por separado, teniendo en cuenta la cantidad y la calidad del gas obtenido, las condiciones de mercado, de extracción y de explotación y los aspectos legales que se hayan de observar en cada mina. Por ejemplo, el sistema de tarifas o primas reguladas para los generadores de electricidad a partir de fuentes renovables ha dado un fuerte impulso al aprovechamiento del MMC para la producción de energía en Alemania. En los Estados Unidos muchas minas están conectadas a un sólido sistema de transporte de gas natural y los precios de este recurso hacen de su producción una inversión rentable, lo que ha propiciado la puesta en marcha de una serie de proyectos de venta de gas. En el cuadro 6.1 se ofrece una breve comparativa de las ventajas e inconvenientes de los usos más comunes del gas drenado. Se puede obtener más información a este respecto en las principales fuentes consultadas, en particular en los sitios web del Programa de Divulgación de la EPA sobre el Metano de las Capas de Carbón (<https://www3.epa.gov/cmop/>) y de la Iniciativa Global de Metano (www.globalmethane.org).

Elaboración de un programa de reducción de las emisiones de MMC/cogeneración a partir de MMC-China

Situación. La pureza del gas en la planta de extracción era variable y en ocasiones la concentración del metano caía por debajo del 30% requerido para el aprovechamiento y la captura eficaz del gas. Se esperaba que la cantidad de gas drenado fluctuase debido a las variaciones del ciclo de la explotación por tajo largo y al escalonamiento de las labores en las distintas capas; por consiguiente, la capacidad de la planta de generación de energía a partir de MMC debía ser suficiente para garantizar una disponibilidad del 85% a fin de rentabilizar la inversión. Uno de los objetivos del proyecto era optimizar la recuperación de energía y minimizar las emisiones de GEI.

Solución. Se elevó la concentración de metano mejorando el sellado y la regulación de las perforaciones inclinadas. Se aumentó la capacidad de almacenamiento de gas de la infraestructura de drenaje, se reemplazaron los dispositivos de medición del flujo de alta resistencia y se elaboró un plan para aumentar la captura de gas. Se llevó a cabo una intensiva labor de predrenaje realizando perforaciones en dos futuros paneles de explotación por tajo largo, lo que permitió obtener gas de enriquecimiento y complementar el flujo con una aportación del 23% del gas drenado. El resto se extrajo mediante posdrenaje, realizando perforaciones inclinadas desde la bóveda.

Veáse más información en el estudio de caso 5.

6.4.2 Gas drenado con baja concentración de metano

La utilización de métodos de drenaje inadecuados y la aplicación deficiente de la normativa dan lugar a bajas eficiencias de drenaje y a una entrada de aire excesiva que reduce la concentración del metano, en ocasiones hasta niveles comprendidos en el rango de explosividad del gas. Se recomienda encarecidamente no transportar ni utilizar gas explosivo para evitar el riesgo de explosiones graves que pondrían en peligro la vida del personal, causarían daños estructurales a la mina y generarían costes sustanciales para el explotador de la mina.

6.4.3 Tecnologías de depuración del gas drenado con baja concentración de metano

En ocasiones puede resultar beneficioso mejorar la calidad del MMC, especialmente en el caso del gas drenado de los macizos de relleno. El enfoque inicial debe ser la mejora de las técnicas de drenaje a fin de evitar los elevados costes que conlleva la depuración del gas drenado. Así se eleva la calidad del gas y se refuerza la seguridad dentro de la mina.

Cuadro 6.1 Comparativa de los usos del MMC

Uso	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Generación de energía	Generadores con motor de gas que proporcionan energía para uso en la mina o exportación a la red eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología de eficacia probada Recuperación de calor residual para la calefacción de los edificios de la mina y las instalaciones de aseo del personal y para la calefacción y la refrigeración de los pozos 	<p>Posibilidad de interrupción de la generación y variaciones de la corriente generada, lo que dificulta el uso para la red eléctrica</p> <p>Mantenimiento regular, que requiere dedicación por parte de la empresa explotadora de la mina</p> <p>Elevados gastos de capital en la etapa inicial del proyecto</p>
Gas de alta calidad para la red de distribución	MMC de alta calidad depurado	<ul style="list-style-type: none"> Equivalente al gas natural Rentable cuando los precios del gas son altos Buena opción cuando existe una infraestructura de gasoductos sólida 	<p>Se requiere un elevado nivel de pureza del gas y la depuración es costosa</p> <p>Solo es viable para MMC de alta calidad, predrenado o tratado</p> <p>Se requiere un acceso adecuado a la red de distribución</p>
Gas industrial o "gas ciudad" de calidad media	> 30% de metano para calefacción urbana a escala local y para usos industriales (por ejemplo, como combustible para hornos de calcinación)	<ul style="list-style-type: none"> Fuente de combustible de bajo coste Beneficios localizados Ninguna o escasa depuración requerida 	<p>Coste del sistema de distribución y mantenimiento</p> <p>Calidad y flujo del gas variables</p> <p>Se requieren costosos gasómetros para hacer frente a los picos de demanda</p>
Insumo para la industria química	Gas de alta calidad para la producción de negro de carbón, formaldehído, combustibles sintéticos y dimetil éter	<ul style="list-style-type: none"> Aprovechamiento del excedente de MMC de alta calidad 	<p>Elevados costes de procesamiento</p> <p>Ningún potencial para el MDL cuando se puede liberar carbono</p>
En la mina	Calefacción, cocción de alimentos, calderas, secado de finos de carbón, residencias del personal	<ul style="list-style-type: none"> Sustituto del carbón Fuente de energía limpia de bajo coste 	Menor beneficio económico que la venta
Vehículos	Gas de alta calidad predrenado y depurado y MCC para GNC y GNL	<ul style="list-style-type: none"> Comercialización del gas excedente La alternativa es el gasóleo, cuyo precio es elevado 	<p>Costes de procesamiento, almacenamiento, manipulación y transporte</p> <p>Se requieren niveles de pureza muy elevados</p>

Nota: Todos los proyectos pueden generar créditos de carbono, créditos de energía renovable o acceso a tarifas reguladas si satisfacen los requisitos establecidos.

La segunda opción consiste en mejorar la calidad del gas. Los sistemas de mejora de la calidad del gas pueden ser costosos. Antes de instalar un sistema de este tipo se debe llevar a cabo un minucioso ejercicio de evaluación de las distintas opciones y ponderación de los costes y beneficios en función de los objetivos del proyecto de MMC. Si se opta por mejorar la calidad del gas, la solución más sencilla es combinar gas de baja pureza del macizo de relleno con gas predrenado de alta calidad para obtener una mezcla

óptima. La alternativa es eliminar los contaminantes (oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono, pero también sulfuro de hidrógeno) del gas, utilizando una de las tres tecnologías básicas disponibles: 1) la adsorción por oscilación de presión; 2) la adsorción con tamiz molecular, una variante de la anterior; y 3) la separación criogénica.

- Adsorción por oscilación de presión: en la mayoría de los sistemas de remoción de nitrógeno mediante

adsorción por oscilación de presión se utilizan tamices moleculares de carbono de poro grueso para adsorber el metano en ciclos de presurización sucesivos. El proceso permite reciclar gas con alto contenido de metano aumentando la proporción en cada ciclo. Mediante esta técnica, que se puede aplicar de forma continua y apenas requiere vigilancia, se recupera hasta un 95% del metano disponible.

- Adsorción con tamiz molecular: en la adsorción con tamiz molecular, el proceso de adsorción por oscilación de presión se lleva a cabo empleando un tamiz molecular ajustable, en el que el tamaño de los poros se puede ajustar hasta 0,1 ángstrom. El proceso deja de resultar rentable cuando el contenido de gas inerte supera el 35%.
- Separación criogénica: en el proceso criogénico —una solución económica comúnmente empleada para mejorar la calidad del gas de los yacimientos de gas natural— se utiliza una serie de intercambiadores de calor para licuar la corriente entrante de gas a alta presión. Las plantas criogénicas ofrecen la mayor tasa de recuperación de metano de todas las tecnologías de depuración (de alrededor del 98%), pero resultan muy costosas y, por consiguiente, son más convenientes para proyectos de gran magnitud.

En la publicación de la EPA titulada *Upgrading Drained Coal Mine Methane to Pipeline Quality: A Report on the Commercial Status of System Suppliers (USEPA-430-R-08-004)* se proporciona más información sobre la mejora de la calidad del MMC drenado (<http://USEPA.gov/cmop/docs/red24.pdf>).

6.4.4 Quema en antorcha

La quema en antorcha es un método de reducción del MMC que puede constituir una opción atractiva cuando el aprovechamiento no es viable. Lo ideal sería que cada planta de aprovechamiento dispusiera de instalaciones de quema para casos de avería o de cierre temporal de la planta por mantenimiento, así como para la fase inicial de explotación de la mina, en la que la producción de metano todavía no ha alcanzado niveles suficientes para la comercialización del gas. La quema permite minimizar las emisiones de metano a la atmósfera y, por tanto, contribuye a la protección del medio ambiente cuando no es posible el aprovechamiento.

Las autoridades reguladoras de las industrias minera y carbonera de algunos países se han opuesto a la práctica

de la quema en las minas debido al riesgo de que el fuego se propague por el sistema de drenaje hasta llegar a la mina y provoque una explosión. El requisito mínimo para que la quema resulte segura es la concepción de un diseño riguroso de la instalación, que integre parallasas y supresores de las detonaciones, sellamientos, sensores y otros dispositivos de seguridad. La quema en antorcha del MMC se ha venido empleando, con buenos resultados, en varios países, como Australia, China, los Estados Unidos y el Reino Unido.

La quema puede realizarse en antorchas de llama abierta o en antorchas de llama oculta (de suelo). La quema en antorcha de llama oculta puede tener un coste significativamente superior al de la quema en antorcha de llama abierta, pero, por lo general, resulta más eficaz. En "condiciones óptimas", los niveles de eficacia son casi iguales y pueden alcanzar entre el 98% y el 99%, pero la eficacia del sistema de llama abierta disminuye drásticamente cuando entran en juego el viento y otros factores (Universidad de Alberta, 2004). Además, su uso no está permitido en muchos casos. Así, por ejemplo, la Junta Ejecutiva del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL) ha fijado valores por defecto de la eficacia del 90% para los sistemas de llama oculta y del 50% para los de llama abierta (Junta Ejecutiva del MDL, 2009). En el caso de los sistemas de llama oculta, es posible medir y emplear los valores de la eficacia real. La Junta de Recursos del Aire de California (CARB), por su parte, utiliza factores por defecto de la eficacia del 99,5% para los sistemas de llama oculta y del 96% para los de llama abierta (CARB, 2014). Por último, cabe señalar que los sistemas de llama oculta presentan mayor atractivo estético ya que en ellos la llama no es visible y, además, permiten gestionar mejor los contaminantes derivados de la combustión.

6.5 Reducción o aprovechamiento del metano del aire de ventilación (VAM) en concentración baja

Las minas subterráneas son, con diferencia, la mayor fuente de emisiones fugitivas de metano del sector del carbón, y se estima que, como mínimo, el 70% de todas las emisiones mundiales relacionadas con las minas de carbón proceden del aire de ventilación subterránea. Por lo general, el VAM emitido a la atmósfera presenta concentraciones de metano inferiores al 1%. Actualmente, la viabilidad comercial de las tecnologías de recuperación del VAM para su uso como fuente principal de combustible depende de los ingresos procedentes de los créditos de carbono u otros programas de incentivos o subvenciones.

Se ha estimado que los proyectos de VAM empiezan a ofrecer tasas de rentabilidad positivas a partir de precios del carbono muy bajos, de entre 10 y 15 dólares por tonelada de CO₂ equivalente.

En los últimos años se han concebido tecnologías capaces de destruir mediante oxidación térmica el metano presente en el aire de ventilación de las minas en concentraciones muy bajas. El principal objetivo para el que están pensadas estas tecnologías es el de reducir las emisiones de GEI. Sin embargo, algunas de ellas se pueden combinar con sistemas de recuperación de calor para fines de calefacción de la mina o de calefacción urbana, o para impulsar turbinas de vapor generadoras de electricidad, y hay un creciente interés en emplear estas tecnologías para recuperar energía.

Las dos tecnologías de oxidación comercializadas actualmente son los oxidadores térmicos regenerativos (OTR), también conocidos como reactores térmicos con inversión de flujo (RTIF), y los oxidadores catalíticos regenerativos (OCR), también llamados reactores catalíticos con inversión de flujo (RCIF). En ambos casos se emplea un proceso de inversión del flujo para mantener la temperatura del núcleo del reactor, y la única diferencia entre ambas tecnologías es que en los OCR se utiliza un catalizador para el proceso de oxidación. Antes de emplearse para la destrucción del metano del VAM, estas tecnologías se han utilizado ampliamente para mitigar las emisiones de contaminantes de las actividades comerciales y los procesos de fabricación, específicamente para oxidar compuestos orgánicos volátiles, olores y otros contaminantes atmosféricos. Se han instalado OTR de tipo comercial para la reducción del metano del VAM en minas de Australia, China y los Estados Unidos, y los resultados obtenidos han sido satisfactorios. Además, en Australia se ha demostrado la viabilidad de la recuperación de energía a partir del VAM utilizando este gas como aire de combustión en motores de combustión interna y empleando OTR para convertir el VAM en electricidad en una central anexa a la mina. Se ha probado asimismo la eficacia de un OCR para el tratamiento del VAM en una demostración a escala real llevada a cabo con una unidad de ensayo.

En general, las tecnologías actuales de tratamiento del VAM no permiten procesar el metano en concentraciones inferiores al 0,2% sin el empleo de combustible adicional para aumentar ese porcentaje, pero se están investigando posibles formas de reducir ese umbral porque las concentraciones de metano son menores en numerosas minas de todo el mundo. En los procesos de generación de

energía a partir de VAM puede ser necesario optimizar las concentraciones del flujo entrante y, en particular, aumentar la concentración de metano que entra en el dispositivo de oxidación. En algunos casos se ha optado por enriquecer el gas con metano procedente de otras fuentes, como gas del macizo de relleno o gas predrenado. Cuando se recurre a este método, debe evitarse el uso de gas drenado de baja calidad (< 30%), ya que conlleva un riesgo de explosión. La utilización de gas con mayor concentración de metano (> 30%) se debe sopesar al evaluar la viabilidad del proyecto, dado que podría resultar más rentable generar electricidad a partir de MMC de menor coste.

Además de la reducción eficaz del contaminante, destaca como preocupación importante la cuestión de la seguridad, a la que se ha respondido, en gran medida, en instalaciones no relacionadas con la minería. Surgen problemas de seguridad cuando la concentración de un contaminante presente en un OTR supera su límite inferior de explosividad (LIE), que en el caso del metano es de alrededor de un 5% de concentración en el aire. En las minas de carbón pueden producirse ocasionalmente aumentos repentinos e inesperados de la concentración de VAM por diversas causas relacionadas con el funcionamiento normal y seguro de la mina, si bien este es un motivo de grave preocupación en todas las industrias en que se utilizan OTR. En cualquier caso, los equipos de reducción de VAM no están concebidos para tratar mezclas de rango explosivo, y se deberían utilizar mecanismos preventivos para evitar problemas.

Desde los años setenta, las cuestiones de seguridad que plantea el uso de OTR se han abordado en otras industrias mediante una combinación de medidas de prevención y mitigación. Como procedimiento habitual, los proveedores de OTR expertos evalúan y gestionan los riesgos de seguridad de todas las instalaciones siguiendo las normas IEC 61511 e IEC 61508 (AS 61511 y AS 61508) y sus equivalentes internacionales, en las que se establecen especificaciones técnicas para el diseño de los sistemas que garantizan la seguridad de los procesos industriales mediante el uso de instrumentación.

Entre las medidas de seguridad generales que aplican los principales proveedores en los procesos de tratamiento del VAM cabe destacar las siguientes:

- Detectar posibles riesgos de seguridad y, cuando se detecten, interrumpir el funcionamiento del OTR y emitir el gas/aire de ventilación directamente a la atmósfera.

VAM-China

Situación. En China, hasta el momento, no se había demostrado la eficacia de las estrategias de aprovechamiento o reducción de las emisiones de VAM porque no existían incentivos, como los créditos de carbono, para llevar a cabo este tipo de proyectos.

Solución. La emergencia del mercado del MDL imprimió el impulso económico necesario para la puesta en marcha de proyectos de reducción del VAM. El grupo minero estatal colaboró con un promotor de proyectos del MDL y con un proveedor de tecnología líder para diseñar, poner a punto y ejecutar un proyecto de demostración del aprovechamiento comercial del VAM mediante el uso de un OTR de lecho único sin llama en la mina de Zhengzhou. La instalación generó agua caliente para las duchas del personal y para la calefacción de edificios cercanos. La recuperación del calor se logra instalando un intercambiador de calor aire-agua entre el OTR y su chimenea de evacuación, que recupera la energía del aire caliente evacuado.

Veáse más información en el estudio de caso 7.

- Velar por que cuando se detecten riesgos para la seguridad de la mina se proceda de inmediato a la desconexión del OTR de la mina.
- Verificar, antes de su reconexión al OTR, que el sistema de conductos que lleva el VAM del difusor del ventilador a la unidad de reducción no contenga una mezcla de metano explosiva.
- Diseñar los conductos de manera que en algunas partes del sistema la velocidad sea mayor que la velocidad a la que se podría propagar un posible frente de llama alimentado por metano, pero también de manera que en algún tramo la velocidad se reduzca lo suficiente para permitir la sedimentación de la mayoría del polvo de carbón arrastrado.
- Prevenir riesgos de seguridad, cuando se registren concentraciones de metano ligeramente elevadas, diluyendo la concentración hasta un máximo del 25% del LIE antes de que el VAM llegue al OTR.

Además, hay que garantizar que los OTR y los OCR y la infraestructura que transporta el aire de retorno de la mina a los reactores no generen contrapresión adicional en el ventilador de la mina, reducir al mínimo el consumo de energía de mantenimiento e instalar analizadores de metano y otros equipos de seguridad (por ejemplo, parallas y sistemas de desviación).

En las minas de carbón, los sistemas de reducción de VAM diseñados de conformidad con las mejores prácticas deben integrar múltiples dispositivos independientes para medir la concentración de metano existente en el pozo de ventilación y en el difusor. Cuando se registran concentraciones ligeramente superiores al 25% del LIE, se debe diluir el flujo de ventilación con aire fresco, y si las concentraciones son sustancialmente mayores, se debe desviar a la atmósfera el flujo que sale del difusor. El dispositivo de cierre que impide el acceso del flujo al OTR debe estar situado a tal distancia del difusor que exista un margen temporal suficiente para que sea activado cuando se detecte una concentración de metano elevada. El sistema debe estar compuesto por múltiples dispositivos independientes para garantizar que las concentraciones elevadas no lleguen al OTR.

Actualmente se están desarrollando otras tecnologías para el tratamiento del VAM como los reactores catalíticos monolíticos (RCM), las turbinas de gas de mezcla pobre, que, según se informa, utilizan VAM con concentraciones de metano del 1,5% e inferiores, y los hornos rotatorios en los que se mezcla VAM con finos de carbón residuales (Su, 2006). También continúa la investigación sobre catalizadores con vistas a promover la distribución comercial de la tecnología de OCR para VAM. Un fabricante ha anunciado el desarrollo de un proceso catalítico de una sola fase que funciona a temperaturas significativamente más bajas y ofrece mayor energía utilizable que un OTR convencional. Al igual que en un OTR, el calor del proceso puede ser aprovechado para generar energía.

Como ejemplos de instalaciones comerciales de reducción del VAM cabe citar la instalación de 1 OTR por el proveedor Biothermica en una mina de Jim Walters Resources, en Alabama (Estados Unidos), la instalación de 6 OTR con generadores de agua caliente por MEGTEC en la mina de Datong, en la provincia china de Chongqing, y la instalación de 3 OTR por Dürr en la mina McElroy de CONSOL Energy, en Virginia Occidental (Estados Unidos) (figura 6.5).

Debido a la evolución de los mercados del carbono y del carbón, solo el último de los proyectos de mitigación de las emisiones de VAM citados seguía en marcha en 2015 (figura 6.5). Sin embargo, Dürr Systems y Fortman Clean Energy Technology han anunciado la implantación de varios proyectos de oxidación y aprovechamiento del MMC/VAM en China, el primero de los cuales arrancó oficialmente en mayo de 2015 en la mina de carbón de Gaohe, explotada por Lu'An Mining Group, en la provincia

VAM-Australia

Situación. Hasta el momento no se había demostrado la eficacia de los procesos de reducción o aprovechamiento del VAM a gran escala en ninguna parte del mundo debido a la naturaleza de la emisión, un gran flujo de aire con una concentración de metano extremadamente baja.

Solución. En la mina del caso se colaboró con el fabricante del OTR instalado previamente en otra mina, la de Appin, para incorporar cuatro OTR al ciclo de vapor de una central térmica convencional. Los OTR funcionan efectivamente como hornos alimentados por VAM, un combustible extremadamente diluido. La central térmica alimentada por VAM (figura 9.10) está diseñada para procesar 250.000 Nm³/hora de aire de ventilación (150.000 pies cúbicos estándar por minuto), lo que representa el 20% del volumen total disponible en el difusor de la mina. El caudal de procesamiento se definió sobre la base del promedio de concentración de un 0,9% de metano en el VAM.

Veáse más información en el estudio de caso 8.

de Shanxi. La instalación, de 12 unidades, tiene capacidad para mezclar más de 1 millón de Nm³ de aire de ventilación cargado de metano con hasta 60.000 Nm³/h de MMC y utilizar el calor del gas de escape de los oxidadores para generar hasta 30 MW de potencia eléctrica (figura 6.6).

6.6 Control del metano

La medición y el control precisos de la concentración de metano presente en el gas extraído permiten mejorar considerablemente la eficacia y la seguridad de los procesos de aprovechamiento del metano.

El transporte del gas drenado para su conversión en energía, o para su combustión, puede realizarse de forma más segura si se dispone de datos exactos sobre la concentración real de metano. Los beneficios van más allá del refuerzo de la seguridad, ya que la disponibilidad de datos también mejora las posibilidades de comercialización del metano o de los productos obtenidos de su reducción o aprovechamiento. Por ejemplo, los motores de gas tienen una horquilla limitada de admisibilidad de concentración de metano, y el suministro garantizado de un flujo de gas constante aumentará la eficiencia de los motores y reducirá los costes de operación y mantenimiento. El metano vendido a las redes de distribución de gas natural debe satisfacer requisitos muy estrictos, o, de lo contrario, el distribuidor podrá rechazarlo e, incluso, imponer medidas sancionadoras.

En los proyectos de procesamiento del VAM, antes de proceder al diseño, es fundamental medir con precisión los flujos de ventilación para analizar las fluctuaciones de la concentración de metano y calcular los flujos totales

Figura 6.5 Instalación de procesamiento de VAM (3 OTR) de Dürr en la mina McElroy (Estados Unidos)



(Cortesía de Dürr Systems.)

Figura 6.6 Instalación de procesamiento de VAM de Dürr Systems en la mina de Gaohe (China)



(Cortesía de Dürr Systems.)

de VAM. Una vez puesto en marcha el proyecto, se aplicará un régimen de seguimiento exhaustivo mediante el que se obtendrán datos de funcionamiento. Sin embargo, el seguimiento resulta particularmente importante para la medición exacta de la reducción de las emisiones, lo cual puede requerir un régimen de análisis muy diferente al que se emplea normalmente en una explotación minera en la que se controla el metano por motivos de seguridad y se miden los flujos de ventilación para optimizar el sistema. Por ejemplo, en muchos protocolos de medición de GEI se requieren un seguimiento constante de las emisiones de VAM y un análisis continuo o regular de muestras con analizadores de metano.

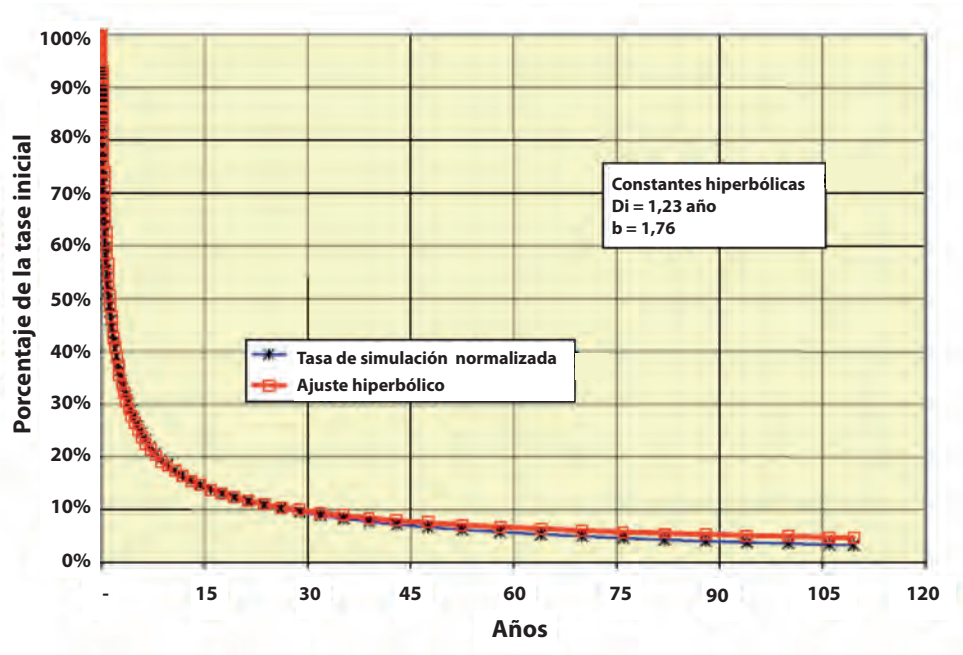
6.7 Aprovechamiento del metano de las minas cerradas y abandonadas

Cuando termina la extracción de carbón de una mina subterránea, sigue fluyendo gas metano hacia las labores subterráneas debido al proceso de desorción que se produce en el carbón remanente en los estratos perturbados por la actividad minera. En las minas grisúosas, este proceso de desorción puede prolongarse durante muchos años tras el cierre de la mina, aunque a un ritmo en rápido descenso, y, si la mina está inundada, el proceso se puede reanudar cuando se desaguan las labores. Por

consiguiente, el propietario de la mina puede enfrentarse a responsabilidades a largo plazo, por ejemplo, por los riesgos de que se produzcan explosiones en la superficie o de que se ponga en peligro a la población, así como por la continuación de las emisiones de gases de efecto invernadero. La explotación o la reducción del metano de las minas de carbón subterráneas cerradas contribuye a minimizar posibles riesgos y a mitigar las emisiones, y podría generar ingresos. En principio, apenas existen diferencias entre el gas de zonas selladas extensas de una mina activa y el gas de una mina abandonada, aunque las prioridades y las técnicas de gestión son distintas.

Si se va a extraer gas de una mina abandonada, resulta muy conveniente realizar una estimación de la producción teniendo en cuenta la posibilidad de que se produzcan inundaciones y, por consiguiente, se interrumpa prematuramente la disponibilidad de gas. Se han formulado diversos métodos científicos para predecir la disminución de las emisiones de metano, calcular el volumen de la reserva de gas y estimar el potencial de producción de metano de las minas de carbón abandonadas (por ejemplo, EPA, 2004; Lunarzewski & Creedy, 2006; Lunarzewski, 2009). En la figura 6.7 se muestra una curva de disminución típica de una mina abandonada no sellada y no inundada.

Figura 6.7 Curva de disminución y reserva de gas potencial de una mina muy grisúosa



(Fuente: USEPA 2004.)

Capítulo 7. Costos y aspectos económicos

Mensaje clave

Hay argumentos económicos contundentes a favor de la instalación y explotación de sistemas de drenaje de gas de alta eficiencia, y de la utilización del gas capturado. El metano de las minas de carbón tiene una gran variedad de posibles aplicaciones que se utilizan con fines comerciales y de manera rentable en todo el mundo. A menudo, los elevados costos relacionados con la depuración del gas drenado con objeto de aumentar la concentración de metano para un determinado uso final pueden evitarse mejorando las técnicas de drenaje de metano subterráneo.

7.1 Argumentos económicos a favor del drenaje de metano

En las minas de carbón modernas, se necesita un nivel elevado y sostenido de producción de carbón para obtener una rentabilidad adecuada de las inversiones. El aumento del ritmo de extracción de carbón suele generar mayores emisiones de metano. La producción de carbón planificada no debe verse limitada por la incapacidad de mantener las concentraciones de gas en la mina dentro de los límites de seguridad reglamentarios, ni verse comprometida por accidentes no controlados relacionados con el gas. La infracción de las normas de seguridad relativas al gas puede ser sancionada con una multa y causar explosiones que pongan en peligro la vida humana. Las pérdidas humanas siempre son inaceptables y deben ser evitadas. Además de afectar directamente a las personas que dependen del trabajador, los accidentes mortales tienen repercusiones negativas para las empresas y la mano de obra que van mucho más allá de las cuestiones económicas relacionadas con la responsabilidad penal, la indemnización, la interrupción de la producción y las consiguientes multas contractuales que podrían imponerse. Un único accidente mortal en una gran explotación minera podría costar entre 2 y más de 8 millones de dólares en pérdida de producción, costas judiciales, indemnizaciones y multas punitivas. Un accidente grave puede costar hasta 220 millones de dólares únicamente en multas y otras sanciones (véase la nota 1). En algunos países, un accidente grave en una mina puede conllevar la suspensión de las actividades mineras durante un período prolongado de tiempo, hasta

que las autoridades finalicen las inspecciones y tomen medidas para evitar que se produzcan otros accidentes. Los accidentes graves también pueden provocar el cierre o abandono de una mina.

Los costos del drenaje de metano son parte intrínseca de los costos totales de explotación y producción minera, lo que justifica plenamente la inversión en sistemas eficaces de extracción de gas para asegurar que las explotaciones de tajo largo alcancen los objetivos de producción de forma segura y acorde con las normas. Las consecuencias financieras se pueden calcular. Una explotación moderna de tajo largo muy productiva puede producir entre 2 y 5 millones de toneladas por año (mtpa) si las condiciones geológicas son adecuadas. Si el precio del carbón fuera de 60 dólares/tonelada, toda limitación relacionada con la emisión de gases que ralentizara o detuviera la producción durante un 10% del tiempo conllevaría una pérdida de ingresos de entre 12 y 30 millones de dólares anuales para la empresa minera.

Cuando se ha establecido un sistema de drenaje de gas, invertir en una captura de gas adicional permite realizar ahorros u obtener otros ingresos gracias a una posible reducción de los gastos del sistema de ventilación o a un aumento del potencial de producción de carbón.

7.2 Costos comparativos del drenaje de metano

El costo de los sistemas de drenaje de metano depende de varios factores (como los equipos, el mantenimiento, la mano de obra, el acceso desde la superficie o la adquisición de tierras) y varía considerablemente de un país a otro. A estas diferencias se suman otras variaciones debidas a las condiciones geológicas y mineras de cada país, por lo que resulta difícil generalizar. En el cuadro 7.1 se presenta una comparación general de los costos relativos de los métodos de drenaje de gas por tonelada de carbón producido (precios de 2015). El parámetro de base para la comparación es el drenaje de un panel ficticio de tajo largo grisúoso de 2 km de longitud, 250 m de anchura y 600 m de profundidad, con una capa de 3 m de grosor y un ritmo de extracción de 2 a 0,5 mtpa. Estas cifras se basan en datos de China y Australia.

Cuadro 7.1 Costos relativos por tonelada de carbón producido en 2015 con diversos métodos de drenaje de gas (en dólares de los Estados Unidos)

Método	Tecnología básica	Principales elementos de costo	Principales variables de los costos	Costo estimado en dólares/tonelada ¹⁵
Predrenaje subterráneo	Perforaciones direccionales de alcance extendido, en la capa a lo largo del panel	Equipos y perforadoras especializados	Diámetro y longitud de la perforación	0,5 a 3,7
	Perforaciones rotativas en el panel	Material y equipo de perforación rotativa	Diámetro y longitud de la perforación	0,7 a 4,6
Predrenaje de superficie	Pozo vertical con estimulación por fracturación convencional	Contratación de servicios de perforación, revestimiento y fracturación hidráulica; sellado tras el abandono	Profundidad de la perforación y número de capas	1,4 a 11,1
	Pozo desde la superficie hasta la capa con múltiples laterales	Contratación de servicios de perforación, revestimiento y servicios especializados de perforación dirigida con martillo en fondo; sellado tras el abandono	Profundidad de la perforación y longitud total de los laterales perforados; los costos pueden aumentar rápidamente si surgen problemas con la perforación	1,2 a 9,3
Posdrenaje subterráneo	Perforaciones inclinadas (a partir de galerías existentes)	Material y equipo de perforación rotativa	Diámetro y longitud de la perforación	0,1 a 1,9
	Galerías de drenaje	Construcción de galerías adicionales	Distancia por encima/debajo de la capa explotada y dimensión de la galería	0,4 a 13,0
	Perforaciones suprayacentes (o subyacentes) o perforaciones horizontales dirigidas	Perforadoras especializadas y material de perforación dirigida con martillo en fondo	Perforación difícil en función del radio de curvatura	0,6 a 4,6
Posdrenaje de superficie	Perforaciones en el relleno	Contratación de servicios de perforación y revestimiento; sellado tras el abandono	Profundidad	1,6 a 17,6

Nota: Los valores indicados tienen un carácter muy general y no tienen en cuenta cómo varían los costos de los métodos de superficie con la profundidad.

El método de drenaje seleccionado debe adecuarse a las condiciones geológicas y mineras. Por ejemplo, las perforaciones inclinadas subterráneas realizadas en los estratos situados encima de una capa explotada que contenga pocas vetas de carbón no proporcionarán un control eficaz del gas. El costo de los métodos de superficie aumenta con la profundidad de las labores; cuanto mayor sea esta, más atractivos resultarán los métodos subterráneos desde un punto de vista financiero.

En minas muy grisuosas, puede que sea necesario combinar varios métodos para alcanzar un alto nivel de producción de carbón de forma segura. El costo de los sistemas de drenaje aumenta en función de la complejidad geológica. El sistema debe disponer de un grado suficiente de redundancia para que el hundimiento de un pozo o de una galería de drenaje no comprometa la seguridad de las labores subterráneas. Según las estimaciones, los costos operativos de la extracción de metano puro de las minas de carbón subterráneas se sitúan entre 0,07 y 0,28 dólares/m³.

¹⁵ Sobre la base de los costos de 2009 con un aumento del 2,5% anual.

7.3 Aspectos económicos de la utilización del metano

La utilización del gas drenado para la generación de energía eléctrica requiere una inversión adicional, pero puede constituir una fuente de ingresos o reducir los costos de electricidad de la mina. Al invertir en un proyecto de generación de energía eléctrica se han de tomar en consideración diversas cuestiones financieras, como la variabilidad del suministro y la calidad del gas, el costo de oportunidad y la fuente de financiación.

El costo de inversión por megavatio de capacidad eléctrica (MW_e) de una central de cogeneración con MMC (con todo el material, incluido el destinado al acondicionamiento del gas) se sitúa entre 1 y 1,5 millones de dólares para los generadores de alta eficiencia que se ajustan a las normas internacionales (2008). Los costos de explotación y mantenimiento (todo incluido) en términos de electricidad producida se sitúan, de media, en torno a 0,02 y 0,025 dólares/kilovatio hora (kWh) para el ciclo de vida completo de la central de cogeneración (2008).

El rendimiento financiero de una central de generación de energía eléctrica con MMC depende de la disponibilidad del gas, la eficiencia de conversión, la fiabilidad del material (y, en consecuencia, las horas de funcionamiento), la aceptación de la energía por los usuarios o la red eléctrica nacional, la recuperación de energía, y los ingresos de la producción de energía y calor o los ahorros realizados por la mina gracias a la utilización de energía generada con MMC. El costo marginal del drenaje no se ha incluido en el análisis ya que, de todas maneras, es necesario drenar el gas por cuestiones de seguridad y para la producción de carbón. En algunos casos, el aumento del flujo de gas o la mejora de su calidad puede conllevar costos adicionales. El éxito del proyecto requiere una combinación de buen diseño, utilización de material de eficacia demostrada, un plan sólido de explotación y mantenimiento, y un sistema de seguimiento del rendimiento en tiempo real. La figura 7.1 muestra una captura de pantalla de un programa informático de seguimiento óptimo.

Al determinar las dimensiones de una central eléctrica alimentada por MMC, es necesario tener en cuenta la variabilidad del flujo de gas y su pureza en las actividades mineras habituales y, de ser necesario, se deberá elevar el nivel de las normas relativas al drenaje para asegurar que el gas cumpla los requisitos legales en materia de seguridad y calidad para poder ser utilizado. Se pueden utilizar datos históricos para determinar la capacidad potencial de generación en función de una disponibilidad

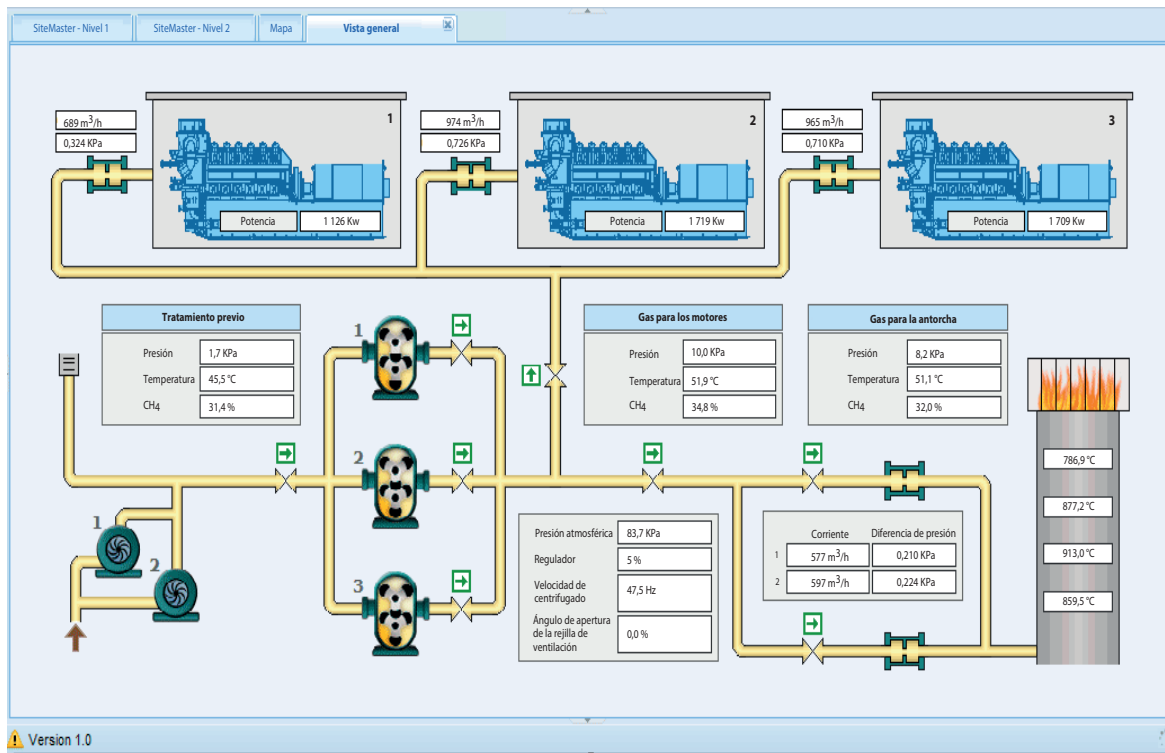
de gas predeterminada (por ejemplo, 85%); el gas no utilizado se quemará en antorcha (figura 7.2). Como se ha podido observar en varias centrales eléctricas alimentadas por MMC de dimensiones excesivas y, en consecuencia, de bajo rendimiento, este ejercicio es importante porque la economía de estas centrales requiere que estén en funcionamiento al menos 7.500 horas al año. En consecuencia, no debe calcularse la capacidad del motor de gas en función de la carga pico, sino más bien de una carga base continua según la disponibilidad del gas. Idealmente, los picos deberían destruirse por combustión en antorcha, a fin de maximizar los beneficios ambientales.

Con la mejora progresiva de la captura del gas, se pueden ir añadiendo otros motores; un flujo de metano puro de $4 \text{ m}^3/\text{min}$ producirá alrededor de 1 MW_e .

El MMC tiene otras aplicaciones además de la producción de energía, entre ellas su utilización como gas ciudad, en calderas para producir calor y como materia prima para productos químicos, como se ha explicado en el capítulo 6. En esos casos, los factores económicos dependen en gran medida de las circunstancias particulares, y resulta más difícil generalizar.

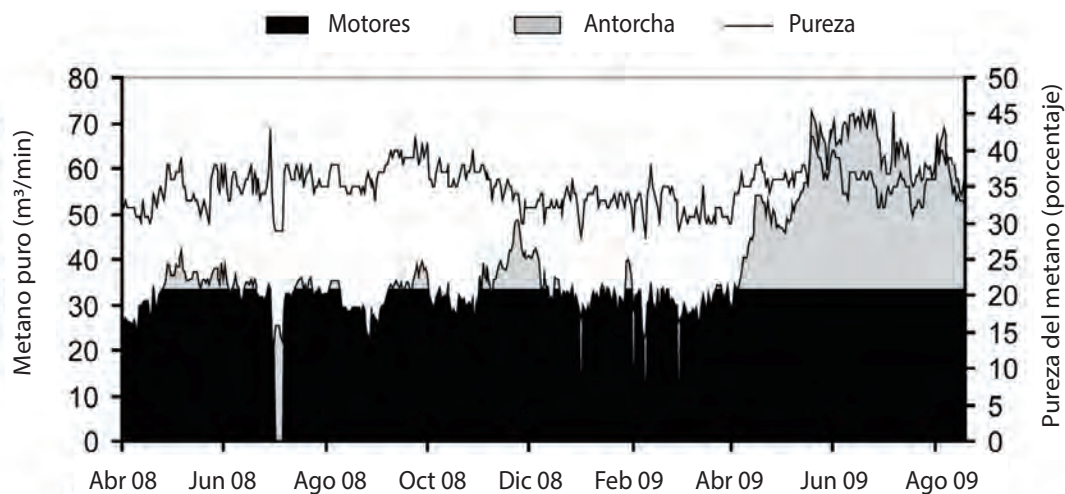
El hecho de que la mayoría de emisiones de metano de las minas de carbón se liberen como VAM justifica la aplicación de algunos principios relativos a la utilización de VAM. La oxidación de VAM genera calor, que se puede utilizar para producir vapor y generar electricidad. Las unidades de oxidación del VAM con una capacidad de 35 metros cúbicos normales por segundo (Nm^3/s) de aire de ventilación con 0,5% de metano podrían generar unos $1,3 \text{ MW}_e$. Para conseguir una producción de energía constante, se necesita una fuente de MMC drenado a fin de estabilizar la concentración de VAM, así como una concentración de VAM relativamente alta a fin de optimizar el rendimiento. El costo de capital por unidad de energía producida duplica con creces el de la generación convencional de energía eléctrica con MMC, y el "costo de oportunidad ambiental" respecto de la reducción de emisiones es, con un nivel de inversión similar, cuatro o cinco veces superior. Teniendo en cuenta el precio actual de la electricidad, y si las tarifas para proveedores de energía renovable no son elevadas, la generación de energía eléctrica a partir de VAM no es viable desde un punto de vista comercial si no se asegura un flujo de ingresos procedentes del carbono a más largo plazo. Además, la mejora del drenaje de gas puede incrementar la generación de energía eléctrica con MMC a un costo mucho menor, reduciendo así las emisiones de VAM.

Figura 7.1 Generación de electricidad con MMC y reducción del MMC: seguimiento del rendimiento en tiempo real, que muestra un diagrama del flujo y los parámetros del rendimiento del MMC utilizado en tres motores de gas y una antorcha



(Cortesía de Formac Electronics and Sindicatum Sustainable Resources.)

Figura 7.2 Variaciones del flujo y la pureza del MMC drenado; capacidad y utilización optimizadas de los motores y de la antorcha



(Cortesía de Sindicatum Sustainable Resources.)

Utilización del MMC y mitigación de las emisiones de metano en tres grandes minas de carbón (China)

Situación: Tres grandes minas con una capacidad de producción de carbón combinada de 14 mtpa capturaban en total unos 140 m³/min de metano que se ventilaban a la atmósfera. Las minas deseaban instalar tecnologías modernas de motores de gas y maximizar la producción de electricidad, pero no tenían ninguna experiencia en la utilización de MMC. También se debían tener en cuenta cuestiones relativas a la variabilidad de la concentración y los flujos de metano en las minas.

Solución: La empresa minera se asoció con un promotor de proyectos a nivel internacional que tenía experiencia en materia de MMC, con objeto de desarrollar y realizar proyectos de cogeneración con MMC en tres minas de carbón grisosas. El promotor internacional financió todo el equipo, mientras que la empresa minera china proporcionó tierras y financió el diseño y las obras. Los tres proyectos se registraron como proyectos del MDL en el marco de la CMNUCC y evitan, en total, más de 1 millón de toneladas de dióxido de carbono equivalente por año.

Véase más información en el estudio de caso 6.

Los aspectos económicos de la utilización de MMC o VAM para generar energía eléctrica dependen en gran medida del precio de la electricidad que se haya obtenido para un determinado proyecto y del valor de los créditos de reducción de las emisiones u otros incentivos como la desgravación fiscal.

7.4 Finanzas del carbono y otros incentivos

En muchos países, regiones o provincias, los créditos de reducción de las emisiones pueden ser una opción de financiación adicional y pueden complementar otras formas tradicionales de financiación de proyectos como los préstamos bancarios o las inversiones privadas directas en empresas. Existen varios programas de límites máximos y comercio de derechos de emisión de GEI, o programas similares, que ya están funcionando o cuya puesta en marcha se ha previsto en países extractores de carbón como Australia, el Canadá, China, Kazajstán, México y los Estados Unidos, así como en la Unión Europea. Además, otros programas voluntarios relativos a los GEI aceptan el MMC en el marco de los proyectos de compensación. El 25 de abril de 2014 en los Estados Unidos, la Junta de Recursos del Aire de California (CARB) aprobó el último protocolo de compensación del MMC, que prevé la

reducción de emisiones hasta 2020 en minas de carbón subterráneas, en activo o abandonadas, así como en minas de carbón a cielo abierto. El 4 de junio de 2014 en China, la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma aprobó proyectos para la utilización del MMC en la provincia de Guizhou como nuevos proyectos de reducción voluntaria de emisiones. Las reducciones certificadas de las emisiones en China (RCEC) generadas por estos proyectos se pueden utilizar como reducciones compensatorias en algunos de los siete regímenes experimentales de comercio de derechos de emisión que funcionan en China¹⁶.

El ciclo del proyecto de compensación de las emisiones de carbono empieza con el listado y el registro de proyectos en un programa o registro relativo a los GEI. Todos los proyectos de compensación registrados deben demostrar que son reales, cuantificables y verificables. En el caso de algunos proyectos, como los proyectos de reducción voluntaria de emisiones de China, es necesario aportar pruebas convincentes que demuestren la "adicionalidad" para que se puedan conceder créditos de reducción de las emisiones utilizando metodologías basadas en proyectos como las del MDL. Para ello es necesario aportar pruebas de la adicionalidad de un proyecto específico, demostrando que este necesita los créditos de reducción de las emisiones para superar ciertas dificultades (tecnológicas, financieras o de orden práctico) y que, en caso contrario, no podría llevarse a cabo. Generalmente, la determinación de la admisibilidad y la adicionalidad del proyecto se realiza durante la fase de validación y exige tiempo y dinero al promotor.

Otra posibilidad, en relación con la compensación, es que los programas de GEI utilicen un método estandarizado basado en el desempeño o en las actividades. De esta manera se eliminan los costos de validación y la necesidad de presentar argumentos de adicionalidad para cada proyecto individual. El establecimiento de métodos estandarizados conlleva más gastos iniciales de investigación y análisis por parte de los interesados y los programas de GEI, y puede resultar difícil en regiones geográficas extensas con prácticas de explotación minera diferentes. Los programas de la Reserva de Acción Climática (CAR) y la CARB utilizan enfoques estandarizados

¹⁶ En el momento de publicar esta edición de la *Guía de mejores prácticas*, solo se habían puesto en marcha proyectos experimentales. En septiembre de 2015, China anunció que en 2017 se pondría en marcha un régimen de comercio de derechos de emisión a nivel nacional, que estaría plenamente operativo en 2020.

basados en las actividades para las minas de carbón en los Estados Unidos.

Otros incentivos que pueden contribuir a financiar proyectos de utilización del metano son las subvenciones, los créditos fiscales, los planes de inversiones ecológicas y las tarifas para proveedores de energía renovable (como por ejemplo en Alemania o la República Checa). A falta de incentivos adicionales de esta índole, las finanzas del carbono han demostrado ser un instrumento de mercado eficaz para impulsar la ejecución de proyectos de MMC, en particular de los que conllevan únicamente la destrucción del metano, como el VAM. La remuneración basada en el desempeño también está cobrando fuerza como herramienta de política para incentivar la reducción de emisiones, por ejemplo en Australia y en el Banco Mundial^{17 18}.

El efecto de apalancamiento que pueden aportar las finanzas del carbono se basa en que una unidad de reducción de las emisiones equivale a 1 tonelada de dióxido de carbono. Partiendo de la hipótesis de que el metano tiene un potencial de calentamiento atmosférico de 21¹⁹, 70 m³ de metano equivaldrían aproximadamente a una tonelada de dióxido de carbono. En los cálculos se deben tener en cuenta los beneficios de destruir el metano, así como la emisión de 2,75 tCO₂ por tonelada de metano quemado. Para dar una estimación aproximada, 1 MW_e de capacidad instalada de generación de energía eléctrica a partir de MMC, con emisiones de metano puro de 250 m³/h, podría conllevar una reducción anual de las emisiones de CO₂ de 30.000 t. Según las horas de funcionamiento y la eficiencia del sistema, eso puede significar una reducción de las emisiones siete veces superior a la que produciría una turbina eólica de 1 MW_e.

¹⁷ Australia Emissions Reduction Fund White Paper. http://www.environment.gov.au/system/files/resources/1f98a924-5946-404c-9510-d440304280f1/files/emissions-reduction-fund-white-paper_0.pdf.

¹⁸ Pilot Auction Facility del Banco Mundial. <http://www.worldbank.org/en/topic/climatechange/brief/pilot-auction-facility-methane-climate-mitigation>.

¹⁹ En su Cuarto Informe de Evaluación (IPCC 2007), el IPCC revisó esta cifra y la elevó a 25, que es la que ahora se utiliza en los proyectos del MDL. California sigue utilizando el valor anterior, 21, aunque este podría ser revisado en el futuro. Con el aumento del conocimiento de los mecanismos de cambio climático, los informes de evaluación posteriores del IPCC han ido revisando constantemente al alza el potencial de calentamiento atmosférico (PCA) del metano. El Quinto Informe de Evaluación presenta unos valores del PCA de 28 a 34 (IPCC, 2014) en el horizonte temporal generalmente utilizado de 100 años. Los protocolos de reducción de emisiones suelen ir a la zaga de las actualizaciones del IPCC, por lo que, en los documentos sobre esta cuestión, se encuentran valores muy diversos.

Antes de decidir recurrir a las finanzas del carbono y/o a otros incentivos, sería necesario tener en cuenta otras cuestiones, entre ellas el mecanismo de acreditación, los costos de los procesos y las transacciones, el tiempo, la complejidad, las normas locales y la incertidumbre respecto de los precios de los créditos de reducción de las emisiones. La inscripción de las compensaciones de las emisiones de carbono en los registros de cumplimiento relativos a los GEI puede resultar complicada y requerir la asistencia de un especialista, especialmente en las fases de establecimiento del proyecto y de verificación y validación iniciales.

El MDL aplicado de 2008 a 2012 en virtud del Protocolo de Kyoto permitió que los países desarrollados establecieran y solicitaran reducciones certificadas de las emisiones (RCE) aplicando metodologías aprobadas en los países en desarrollo no incluidos en el anexo I. Este mecanismo impulsó el establecimiento de 128 proyectos de MMC en China, que fueron aprobados por la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma entre 2005 y 2012. No todos los proyectos permitían obtener RCE y el precio de estas cayó estrepitosamente a partir de 2012 debido a la falta de demanda de los regímenes de comercio de derechos de emisión, el único mercado importante para los créditos. Sin embargo, los incentivos del MDL han fomentado el desarrollo de la industria del MMC en China y han dado lugar a inversiones internacionales, una mejora del drenaje del gas y tecnologías avanzadas para la utilización del metano. Desde 2012, el MDL no es aplicable a los nuevos proyectos de MMC en China. Sin embargo, este país ha puesto en marcha siete programas experimentales independientes de límites máximos y comercio de derechos de emisión de GEI a nivel de los municipios y las provincias. Las normas para la gestión de las RCEC se gestionan a través de un proceso similar al MDL, en el que la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma es el árbitro definitivo. El Gobierno de China tiene previsto introducir un régimen nacional de comercio de derechos de emisión en 2016, que debería estar plenamente operativo en 2020. Con ello, el mercado del carbono más grande del mundo podría brindar oportunidades considerables para ampliar el desarrollo del MMC en todo el país. Sin embargo, hay una norma ambiental que exige que se utilice MMC con una pureza superior al 30%, lo que puede conllevar dificultades relacionadas con la adicionalidad en la aplicación de mejores prácticas al conceder RCEC únicamente a los proyectos con una baja concentración de metano. Si bien el Gobierno de China tiene previsto reducir la dependencia del carbón limitando el crecimiento de este sector, las

minas de carbón seguirán siendo una importante fuente de emisiones de GEI en el futuro próximo. En 2014, había grandes diferencias en el precio de los derechos de emisión de carbono de los distintos programas experimentales, que iban desde 3,2 hasta 10,5 dólares/tCO₂e. La previsión de los precios medios de las RCEC se sitúa principalmente entre 3,2 y 6,5 dólares.

El Programa de Límites Máximos y Comercio de Derechos de Emisión de California, controlado por la CARB, concede a las entidades cubiertas (como las centrales eléctricas) derechos de emisión de GEI. La CARB consideró que los proyectos de reducción de emisiones de MMC podían ser un tipo de proyecto de compensación siempre que cumplieran lo dispuesto en el Protocolo de Compensación para los Proyectos de Captura de Metano en las Minas²⁰. Este Protocolo se aplica a las minas subterráneas, de superficie y abandonadas de los Estados Unidos, aunque no a las ventas de gas de gasoducto de minas en activo, ya que se considera que estas no aportan nada nuevo y no tienen carácter adicional. El primer período de evaluación finaliza en 2020. Según la información disponible, el precio de las compensaciones para 2014 variaba entre 8 y 10 dólares/tCO₂e. La CARB se asoció oficialmente al programa de GEI de Quebec en 2014, y ha mantenido conversaciones con los representantes del programa en México, Kazajstán y China.

Existen varios programas internacionales de reducción voluntaria de las emisiones de GEI donde se pueden registrar proyectos de reducción de las emisiones. En comparación con los mercados de cumplimiento, las reducciones verificadas de emisiones funcionan en un mercado más pequeño y con precios considerablemente inferiores (1 a 3 dólares/tCO₂e); pese a ello, en 2014 se negociaron acuerdos bilaterales que alcanzaron hasta 5 dólares/tCO₂e.

Varios programas de GEI establecidos en América del Norte aceptan proyectos de MMC. La CAR utiliza un protocolo de compensación para la reducción de las emisiones de metano en las minas subterráneas de los Estados Unidos, y el Estándar Verificado de Carbono utiliza protocolos de compensación para minas subterráneas, de superficie y abandonadas a nivel internacional. El American Carbon Registry acepta proyectos internacionales que utilizan protocolos del MDL, como el ACM0008.

Los costos de inversión de las centrales de cogeneración con MMC en términos de su potencial de reducción de

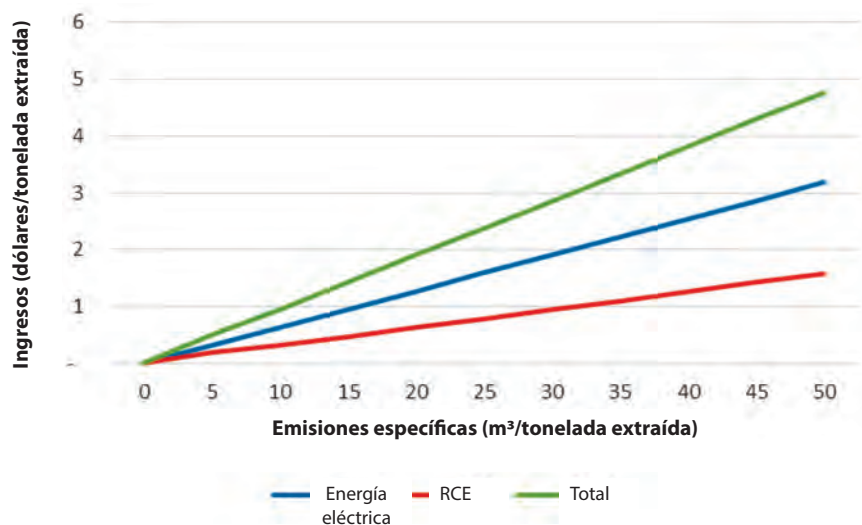
emisiones durante un período de funcionamiento de diez años son de aproximadamente 3 a 5 dólares por tonelada de CO₂ equivalente evitada. La generación de créditos de reducción de las emisiones conlleva costos relativos a los documentos de preparación del proyecto, la validación, la verificación y los servicios, además de otros costos relacionados con el material para la destrucción o utilización del metano y su mantenimiento.

Por ejemplo, una mina medianamente grisúosa (con una emisión específica de 10 m³/tonelada de carbón extraído) produce, sin contar el CO₂ generado por la combustión, 0,040 CO₂/tonelada de carbón extraído, mientras que una mina muy grisúosa (con una emisión específica de 40 m³/tonelada de carbón extraído) produce 0,158 tCO₂e/tonelada de carbón. Este cálculo parte de la premisa de que se extrae el 40% del gas total, del que se utiliza un 80%. Se trata del rendimiento mínimo que se espera de los proyectos en los que se aplican normas y métodos de mejores prácticas y que no presentan grandes problemas mineros o geológicos. En este ejemplo, si la mina medianamente grisúosa produjera 4 millones de toneladas de carbón por año, la cantidad de tCO₂e mitigadas por año sería de aproximadamente 158.000. En el caso de una mina muy grisúosa que produjera 4 millones de toneladas de carbón por año, la cantidad de tCO₂e mitigadas sería de alrededor de 633.000 por año.

El valor real de una tCO₂e mitigada depende del mercado y del momento de la venta. En 2015, los precios del mercado en los Estados Unidos solían situarse entre 6 y 10 dólares por tonelada de CO₂e. Invertir en la utilización en una mina medianamente grisúosa (10 m³/t) que produzca 4 mtpa, con un acuerdo de compra de reducción de emisiones de un precio de 8 dólares/tCO₂e (40% de captura de gas y 80% de disponibilidad), permitiría obtener unos 1,3 millones de dólares anuales de los créditos de reducción de las emisiones, además de los ingresos y los ahorros conseguidos con la generación de energía eléctrica o con la venta del gas. Si el suministro de gas fuera estable, el metano capturado sería suficiente para generar 5 MW_e (2,2 millones de metros cúbicos por año de metano puro generan alrededor de 1 MW_e), y los ingresos energéticos (sobre la base aproximada de 0,05 dólares/kWh y 7.000 horas de funcionamiento anuales) serían de 1,75 millones de dólares. Por consiguiente, los ingresos totales obtenidos a través de la reducción de las emisiones y la producción de electricidad serían de 3,01 millones. La figura 7.3 muestra un modelo de los ingresos (en dólares por tonelada de carbón producido) derivados de la venta

²⁰ <http://www.arb.ca.gov/cc/capandtrade/protocols/mmcprotocol.htm>.

Figura 7.3 Ingresos dobles de la generación de energía eléctrica con MMC: 40% de gas capturado y 80% utilizado



(Cortesía de Sindicatum Sustainable Resources).

de créditos de reducción de las emisiones y de electricidad en función de las emisiones específicas de metano (puro) en m³/t. Partiendo de un precio medio de 8 dólares/tCO₂e para los créditos de reducción de las emisiones, estos créditos suponen un 33% de los ingresos totales. Utilizando los precios más altos y más bajos (6 dólares/tCO₂e y 10 dólares/CO₂e), los créditos de reducción de las emisiones proporcionarían el 27% y el 38% de los ingresos totales, respectivamente. El atractivo económico de un proyecto de generación de energía eléctrica con MMC dependerá, evidentemente, del capital y de los gastos de funcionamiento del proyecto.

Las minas con un mayor contenido de gas podrían ofrecer una rentabilidad mucho más alta. Una mina muy grisúosa (con emisiones específicas de 40 m³/t) que produjera 4 mtpa generaría ingresos de 8 millones de dólares mediante la reducción de las emisiones y tendría un potencial de generación de 20 MW_e que podría reportar 7 millones de dólares. En consecuencia, los ingresos brutos potenciales serían de 15 millones de dólares. Sobre la base del costo de inversión normal para una central de generación de energía eléctrica con MMC (por ejemplo, 1,2 millones de dólares por MW_e instalado), se podría recuperar el capital invertido en un plazo de dos años.

Los proyectos de reducción de las emisiones solo reportan beneficios financieros si se puede demostrar que ha habido una reducción, proporcionando para ello

mediciones precisas de la concentración y el flujo del metano. Los proyectos de drenaje y utilización del metano deben proporcionar pruebas fiables de reducción de las emisiones, y probablemente deban aportar más pruebas en el futuro. A menudo se subestima la complejidad del seguimiento y la medición, lo que puede provocar riesgos de seguridad y una pérdida de ingresos.

7.5 Costo de oportunidad de la utilización

Cuando los precios del carbón aumentan, las empresas mineras pueden optar por invertir en el incremento de la capacidad de producción de carbón en vez de en la generación de energía eléctrica con MMC, que resulta una opción más atractiva cuando los precios del carbón bajan. La situación es diferente cuando una tercera parte invierte en la utilización, con el respaldo de las finanzas del carbono (una opción atractiva para una mina), puesto que el costo de oportunidad ya no entra en juego y el metano que no se había utilizado crea un valor adicional.

7.6 Costos ambientales

En la actualidad, la mayoría de las empresas mineras incluyen el drenaje de gas en los costos de extracción minera, pero consideran que los gastos realizados para la utilización del gas o la mitigación de las emisiones al medio ambiente son un costo de inversión adicional. Sin embargo, dado que la mitigación del cambio climático

y la recuperación de energía limpia desempeñan un papel cada vez más importante en la cadena de valor, las empresas explotadoras tal vez deban abordar estos factores de manera más holística. Es probable que, en el futuro, los propietarios de las minas deban mejorar el rendimiento del drenaje de gas más allá de las necesidades de seguridad de las minas si quieren cumplir los objetivos de protección del medio ambiente.

Las estimaciones para China muestran que, en un escenario tradicional, el costo de internalizar el impacto

de las emisiones de metano resultantes de la minería sería de aproximadamente 12 dólares/tonelada de carbón producido (Programa de Asistencia para la Gestión en el Sector de la Energía, 2007). De momento, ningún país ha intentado imponer costos de estas proporciones, pero esta cifra da una indicación del costo que podría suponer para una mina no minimizar las emisiones al medio ambiente. Rusia, por ejemplo, ya sanciona con una multa las emisiones de metano procedentes de las minas de carbón, aunque de un monto inferior a la cifra antes indicada.

Capítulo 8. Conclusiones y resumen para responsables de políticas

Desde la Revolución Industrial, el mundo ha dependido del carbón para gran parte de su producción de energía primaria. En el futuro inmediato, las principales economías emergentes, industrializadas y en transición (y, por lo tanto, la economía mundial) seguirán beneficiándose y dependiendo de los recursos energéticos del carbón. En 2013, el carbón representó el 29% del suministro total de energía primaria, el 41% de la electricidad mundial y más del 70% de la producción mundial de aluminio y acero. Según las previsiones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), la producción mundial de carbón seguirá aumentando hasta 2020 a pesar de los esfuerzos de China por moderar su consumo, principalmente a causa del aumento de la demanda en China y la India (IEA, 2015a, IEA 2015b, Asociación Mundial del Carbón 2014).

A medida que se agoten las reservas situadas a menor profundidad y se empiecen a explotar capas más profundas y grisúas, resultará más difícil extraer carbón y gestionar eficazmente el metano. Por otro lado, cada vez con más frecuencia las sociedades exigen y esperan que la industria ofrezca mejores resultados ambientales y unas condiciones de trabajo más seguras.

Lo ideal es que las empresas modernas de extracción de carbón reconozcan los beneficios que conlleva adoptar un sistema holístico para la gestión del gas que integre, de manera constructiva, el control de gases subterráneos, la utilización del metano y la reducción de emisiones nocivas. Del mismo modo, y desde un punto de vista normativo y de políticas, también se obtendrían múltiples beneficios de un enfoque amplio respecto de la gestión del MMC. El establecimiento y la aplicación de reglamentos de seguridad para la extracción, el transporte y la utilización del gas fomenta la adopción de normas más estrictas para el drenaje del metano, así como un aumento de la producción de energía limpia y de la reducción de emisiones del metano de las minas.

La experiencia de los países industrializados demuestra que invertir en buenas prácticas de drenaje de gas permite reducir el tiempo de inactividad de una mina como consecuencia de la presencia de gas, mejorar la seguridad de las explotaciones mineras, utilizar una mayor cantidad

de gas y reducir las emisiones de metano de las minas. Este documento orientativo debería considerarse un punto de partida para diseñar estrategias y desarrollar programas encaminados a respaldar las mejoras necesarias en términos de seguridad y de prácticas a fin de aumentar la seguridad en las minas y de reducir drásticamente sus emisiones de metano.

Los principios fundamentales de este documento son los siguientes:

- 1. A nivel mundial, la industria posee una gran cantidad de conocimientos sobre los riesgos de explosión a causa del metano y tiene mucha experiencia gestionándolos.** La aplicación a nivel mundial de las prácticas y los conocimientos que la industria ha ido acumulando sobre la presencia, la predicción, el control y la gestión del metano podría reducir considerablemente los riesgos de explosión a causa del metano en las minas de carbón. Los conocimientos sobre la gestión de los posibles riesgos de desprendimiento de gas son deficientes. ¿Cómo se puede mejorar el drenaje de gas en capas de carbón de baja permeabilidad?
- 2. Independientemente de las limitaciones existentes, la seguridad de los trabajadores en las minas es fundamental y no debe ponerse en peligro.** La seguridad de las condiciones de trabajo en entornos de minas grisúas no se consigue únicamente a través de leyes ni de las tecnologías más avanzadas. La racionalidad y la efectividad de los sistemas de gestión, la organización de la gestión y las prácticas relativas a la gestión son cruciales para la seguridad de las operaciones. En este sentido, también es primordial impartir una formación y una capacitación adecuadas a los gerentes y a los trabajadores, y fomentar la participación de estos últimos en la adopción y la revisión de las prácticas de seguridad en el trabajo.
- 3. El enfoque de evaluación de los riesgos para minimizar los riesgos de explosión debe ir acompañado de la aplicación estricta de una reglamentación sólida en materia de seguridad por lo que respecta a la ventilación, el monitoreo**

y la utilización del gas. Este enfoque conllevará una mejora cuantitativa y cualitativa del drenaje del gas. Por lo general, los flujos de gas metano en las minas de carbón son predecibles en condiciones normales y estables. Los desprendimientos y las emisiones inusuales no pueden predecirse fácilmente, pero las condiciones en que pueden producirse se conocen bastante bien. Se han desarrollado métodos detallados para reducir los riesgos en estas condiciones, que deberían aplicarse cada vez que se detecte un riesgo considerable. En este contexto, la seguridad de las condiciones de trabajo depende del rigor con que se apliquen y supervisen los métodos de control de gases. Cabe recalcar que no solo es importante instalar sistemas de monitoreo subterráneo por razones de seguridad de las operaciones mineras, sino que también se deben reunir y utilizar los datos obtenidos para la planificación de la seguridad.

4. **Los sistemas de ventilación de las minas son un componente esencial del sistema general para eliminar eficazmente el metano de las minas.** Los sistemas de ventilación de minas tienen tres objetivos: 1) proporcionar aire fresco respirable a los trabajadores, 2) controlar la temperatura del aire en la mina, y 3) eliminar o diluir eficazmente los gases peligrosos o el polvo respirable en suspensión.
5. **Mejorar el sistema de drenaje de metano puede solucionar los problemas relativos al gas de mina de manera más rápida y rentable que aumentar el suministro de aire en la mina.** Generalmente, los problemas prácticos relativos al drenaje de gas en las minas de carbón pueden solucionarse aplicando los conocimientos y técnicas existentes. La introducción de tecnologías nuevas o novedosas solo debería plantearse después de haber aplicado las buenas prácticas vigentes, y únicamente si las técnicas existentes no han solucionado satisfactoriamente el problema. El rendimiento de los sistemas de drenaje de metano puede mejorarse con una instalación adecuada, una labor de mantenimiento, una supervisión regular y la aplicación de planes de perforación sistemáticos.

6. **Transportar mezclas de metano/aire en concentraciones dentro o cerca del rango de explosividad en minas de carbón es una práctica peligrosa que debería estar prohibida.** El metano es un gas explosivo cuando alcanza una concentración de entre el 5% y el 15% en el aire. Por regla general, se debería respetar estrictamente un margen de seguridad de al menos 2,5 desde el límite inferior, y de 2 desde el superior.
7. **Las minas subterráneas de carbón son una importante fuente de emisiones antropógenas de metano (alrededor del 8% del metano mundial relacionado con actividades del ser humano), pero estas emisiones se pueden reducir considerablemente con la aplicación de mejores prácticas.** El metano tiene un PCA entre 28 y 34 veces mayor que el dióxido de carbono, y es el GEI más importante a nivel mundial. Gran parte del metano producido en las minas subterráneas puede ser recuperado y utilizado de forma productiva o ser destruido (mitigando su efecto sobre el calentamiento de la Tierra al convertirlo en dióxido de carbono). Entre las distintas opciones disponibles figuran la recuperación energética del gas drenado, la quema en antorcha del exceso de gas drenado, y la utilización o reducción del VAM. En unas condiciones técnicas y de mercado adecuadas, el objetivo final debería ser llegar a un nivel de emisiones de metano próximo a cero.
8. **Hay argumentos económicos contundentes a favor de la instalación y explotación de sistemas de drenaje de gas de alta eficiencia y de la utilización del gas capturado.** El metano de las minas de carbón tiene una gran variedad de posibles aplicaciones que se utilizan con fines comerciales y de manera rentable en todo el mundo. A menudo, los elevados costos relacionados con la depuración del gas drenado con objeto de aumentar la concentración de metano para un determinado uso final pueden evitarse mejorando las técnicas de drenaje de metano subterráneo.

Capítulo 9. Estudios de casos

Los siguientes estudios de casos proporcionan a los lectores ejemplos en los que se han aplicado las mejores prácticas examinadas en este documento orientativo en minas en activo en todo el mundo (cuadro 9.1). Asimismo, ponen de relieve las graves consecuencias que conllevaría la no adopción de mejores prácticas.

En los estudios de casos 1 a 3 se examinan las prácticas de evaluación, planificación y gestión del metano que se han aplicado en tres minas de tajo largo para resolver los problemas relativos al control del metano. El estudio de caso 4 muestra cómo un sistema de gestión efectivo permite llevar a cabo las labores de extracción en capas de carbón propensas a los desprendimientos con seguridad.

Los estudios de casos 5 y 6 muestran cómo se puede mejorar el rendimiento del drenaje de metano y cómo pueden combinarse con éxito la utilización del MMC y su reducción para eliminar prácticamente las emisiones de gas drenado a la atmósfera.

Los estudios de casos 7 y 8 se centran en la utilización y reducción del VAM.

En el estudio de caso 9 se trata la reducción de los riesgos de explosión en minas explotadas por cámaras y pilares, mientras que el estudio de caso 10 presenta las gravísimas consecuencias que acarrearía la no adopción de mejores prácticas.

Cuadro 9.1 Lista de estudios de casos

Núm.	País	Eficiencia de la producción de carbón	Control de la ventilación	Control y captura del gas	Utilización del gas	Mitigación de las emisiones	Prevención de explosiones	Nota
1	Reino Unido	Y		Y				
2	Alemania	Y	Y	Y				
3	Australia	Y	Y	Y	Generación de energía eléctrica	Utilización/quema en antorcha	Sí	Prevención de desprendimientos
4	Australia	Y	Y	Y				Prevención de desprendimientos
5	China			Y	Energía y calor con MMC	Utilización/quema en antorcha		
6	China			Y	Energía y calor con MMC	Utilización/quema en antorcha		
7	China				Calor con VAM	VAM		
8	Australia				Energía con VAM	VAM		
9	Sudáfrica	Y	Y					Explotación por cámaras y pilares
10	Nueva Zelandia						Enseñanzas extraídas	

Los estudios de casos se presentan de manera breve, y tienen por objeto poner de relieve los aspectos más destacados de cada caso.

Estudio de caso 1: Obtención de la producción de carbón prevista de un tajo largo grisúoso explotado en retirada en una capa de carbón propensa a la combustión espontánea con estratos que soportan una gran tensión (Reino Unido)

Situación inicial. Extracción a 980 m de profundidad; emisiones específicas de 50 m³/t procedentes de un tajo largo explotado en retirada de 2 m de altura del que se esperaba obtener 1 mtpa; carbón con un elevado riesgo de combustión espontánea; carbón de permeabilidad ultrabaja; gran tensión horizontal en el frente de carbón; e hinchamiento del suelo en las galerías de acceso al tajo largo (una de entrada y otra de retorno).

Problemas relativos al control del gas. El predrenaje no era viable debido a la baja permeabilidad del carbón, y las perforaciones inclinadas realizadas en ángulo por encima del frente del tajo largo se veían afectadas por las altas tensiones; por ello, los niveles de pureza y captura del gas eran demasiado bajos. El elevado riesgo de combustión espontánea y la necesidad de utilizar pilares de gran tamaño para asegurar la estabilidad impedían el uso de sistemas de accesos múltiples o de vías de purga.

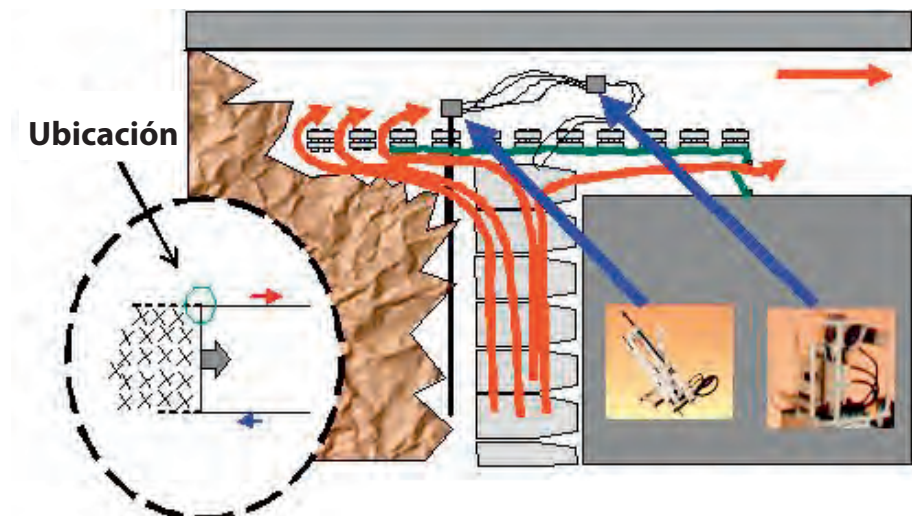
Solución. Se logró obtener la producción requerida con los 30 m³/s de aire de ventilación disponibles, realizando

perforaciones inclinadas detrás del frente en un sistema de "retorno hacia atrás" particularmente reforzado y ventilado (figura 9.1) Se determinó que el patrón de perforación óptimo consistía en realizar una serie de perforaciones ascendentes, perpendiculares a la galería del tajo, con un ángulo de 55° hacia arriba respecto del plano de la capa y con 7,5 m de separación entre ellas. Las perforaciones descendentes se realizaron con una separación de 100 m a fin de minimizar los riegos de emisiones del suelo.

Se instalaron dos tuberías colectoras de drenaje en paralelo. Los pozos se fueron conectando a una de las tuberías hasta que la calidad del gas disminuyó; entonces, se reguló la tubería para evitar que el gas se diluyera excesivamente y se conectaron los pozos a la otra tubería colectora. Se siguió aplicando este sistema de "saltos", permitiendo que, en todo momento, al menos ocho pozos siguieran conectados al sistema de drenaje de gas (véase la figura 9.2). Solo con ello se consiguió optimizar la cantidad y la calidad del gas, y se alcanzó un nivel de captura del 67% sin que el personal tuviera que adentrarse en la zona peligrosa del relleno para ajustar cada pozo.

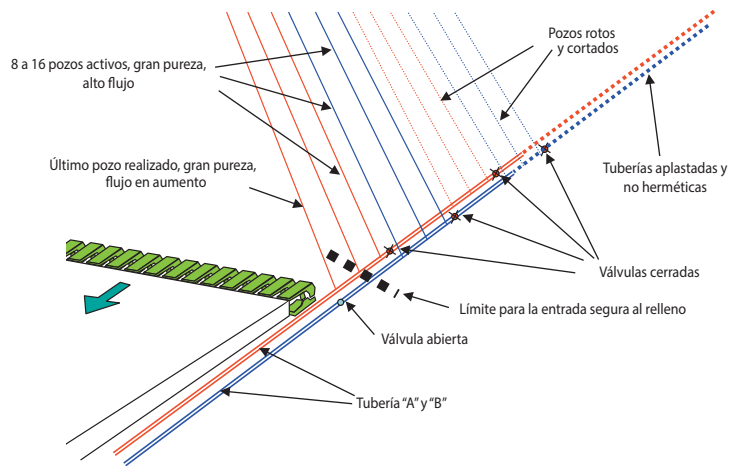
La explotación en retirada era muy rápida y había poco espacio para realizar las operaciones de perforación, por lo que fue necesario realizar cada perforación, instalar y sellar cada tubo vertical y conectarlo a la tubería colectora de drenaje en un plazo de aproximadamente 10 horas. Para

Figura 9.1 Sistema de retorno hacia atrás



(Cortesía de Green Gas International.)

Figura 9.2 Sistema de saltos



(Cortesía de Green Gas International.)

conseguirlo, se utilizó una perforadora portátil, pequeña y potente (figura 9.3), que se alimentaba del circuito hidráulico de la entibación progresiva del tajo largo para eludir la necesidad de electricidad.

Estudio de caso 2: Explotación por tajo largo de alto rendimiento en zonas con niveles elevados de emisiones de gas (Alemania)

Situación inicial. Tajo largo de 300 m de longitud en una capa de 1,5 m de grosor con una producción prevista de 4.000 toneladas por día (t/d) y un ritmo de avance del frente de unos 50 m/semana. La capa de cobertura se sitúa a 1.200 m de profundidad, la capa está en una posición casi horizontal y no se han efectuado labores previas para desgasificar parcialmente las capas de carbón. Las estimaciones apuntaban a unas emisiones específicas de gas de 25 m³/t procedentes del techo, 3 m³/t de la capa explotada y 8 m³/t del suelo (36 m³/t en total). Se sabía que el carbón era propenso a la combustión espontánea.

Problemas relativos al control del gas. La cantidad máxima de metano que debía capturarse o diluirse a través de la ventilación para conseguir una concentración segura era de 1,875 m³/s (112,5 m³/min). Se evaluaron las condiciones para el predrenaje y se concluyó que este no sería eficaz, por dos motivos en concreto. En primer lugar, el caudal máximo de aire permitido en el frente de arranque (25 m³/s) solo podía diluir una cantidad máxima de gas de 0,37 m³/s (22,2 m³/min), a pesar de que las autoridades mineras habían permitido aumentar

la concentración máxima de metano autorizada de 1,0% a 1,5% (lo que representaba una disminución en el coeficiente de seguridad de 5,0 a 3,3). Este cambio estaba sujeto a que se mejorara el monitoreo y el drenaje del gas. Es importante que este tipo de cambios solo se hagan en determinados emplazamientos y vayan acompañados de medidas adicionales para asegurar que los riesgos no aumenten considerablemente. El segundo motivo era que solo se permitía una concentración máxima de 1% de metano en el conducto donde se debía descargar el aire de ventilación.

Solución. Se diseñó un sistema de ventilación en Y (figura 9.4) para introducir otros 50 m³/s de aire y añadirlos a los 25 m³/s que circulaban por el frente; el flujo combinado pasaba detrás del frente y diluía el metano emitido por el frente de arranque y el relleno. La configuración de la ventilación permitía perforar pozos inclinados que se conectaban al sistema de drenaje y se controlaban y regulaban individualmente; generalmente, con los pozos inclinados perforados detrás del frente de tajo largo se consigue una mayor captura y una mayor pureza del gas que con los perforados delante del frente. Estos pozos de drenaje tienen una vida útil larga, son muy eficaces y pueden capturar un 70% del gas del techo y un 40% del gas del suelo.

Los diques de cierre (muros de relleno) en la parte de la galería abierta donde estaba el relleno, detrás del frente, sirvieron para reforzar el soporte de la galería y aislar el relleno para evitar la entrada de aire, a fin de minimizar el

Figura 9.3 Equipo de perforación inclinada



(Cortesía de EDECO Ltd.)

riesgo de combustión espontánea y evitar concentraciones de metano en rango de explosividad.

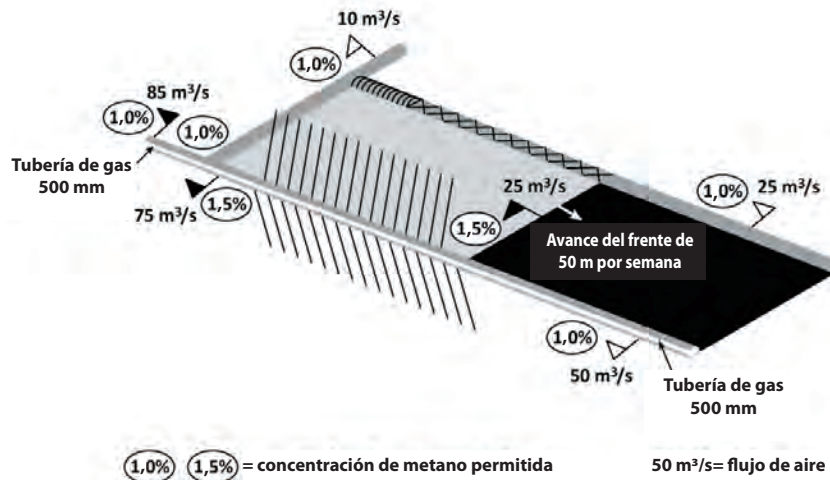
El límite relativo a la concentración del 1% en el extremo del retorno cercano al pozo limitaba la producción de carbón a 4.000 t/d, lo que se ajustaba al objetivo previsto. El sistema de drenaje de gas permitía extraer unos 80.000 m³/d de metano puro, que podían utilizarse en una central de generación de energía eléctrica. A pesar de las duras condiciones de extracción, las operaciones se

llevaron a cabo con éxito gracias al avanzado diseño de la ventilación y a un drenaje del gas extremadamente eficaz.

Estudio de caso 3: Explotación por tajo largo de alto rendimiento en zonas con niveles elevados de emisiones de gas (Australia)

Situación inicial. Nueva serie de bloques de explotación por tajo largo en una capa de 2,8 m de alto con un contenido de metano que oscila entre 8 y 14 m³/t. La profundidad de

Figura 9.4 Tajo largo con un avanzado diseño de ventilación en Y y pozos de drenaje en el techo y el suelo detrás del tajo largo



(Fuente: DMT GmbH & Co. KG.)

la capa de cobertura se sitúa entre 250 y 500 m y, por lo general, el acceso no suele verse obstaculizado por las características de la superficie. El contenido de gas *in situ* debe reducirse, por lo menos, a 7,5 m³/t a fin de respetar el *Código de prevención de desprendimientos*. Hay una capa de suelo y ocho capas de techo, que contienen entre 10 y 15 m de carbón en la zona de derrumbe designada. Los bloques miden 350 m de ancho y hasta 3,6 km de largo (figura 9.5), con un ritmo de producción previsto de 200.000 t por semana.

La probabilidad de un alto nivel de emisiones de gas llevó a la mina a desarrollar, desde el principio, una galería de tres frentes a fin de ofrecer un sistema de ventilación de gran capacidad volumétrica para la dilución del gas. En comparación con un sistema de ventilación en U, esta galería permite la entrada de una cantidad de aire considerablemente superior en el extremo de retorno del frente de tajo largo para la dilución del gas, sin que aumente la velocidad del aire en el frente. En la actualidad, es la única mina de Australia que utiliza este tipo de galerías.

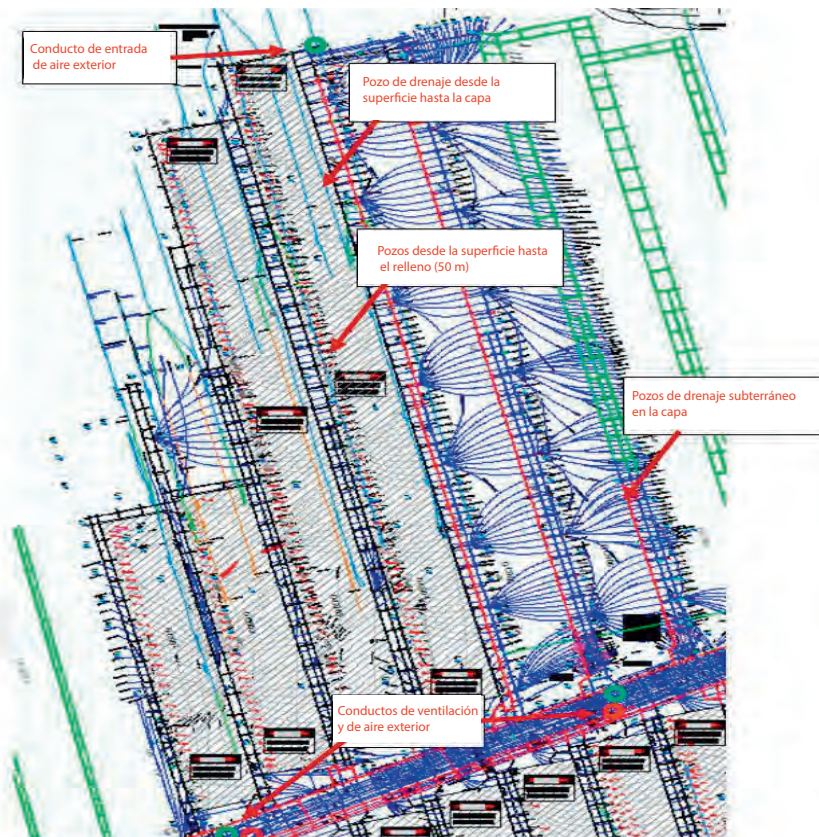
Problemas relativos al control del gas. Según las predicciones, se pueden esperar unas emisiones específicas de gas de la capa de carbón de entre 15 y 30 m³/t. Con el ritmo de producción previsto, eso equivaldría a entre 3.500 y 7.000 l/s de CH₄, que aumentarían con la profundidad. Sin embargo, los

estudios efectuados anteriormente en una mina adyacente pusieron de manifiesto la presencia de una cantidad considerable de gas extraño al yacimiento, que podría contribuir significativamente al nivel total de emisiones. Las de los tres primeros tajos largos se podían controlar con el diseño existente, pero eran superiores a lo que se esperaba en profundidades relativamente bajas. La extrapolación a los tajos largos más profundos permitió observar que las predicciones hechas en la fase de viabilidad se superarían, con emisiones que podrían alcanzar los 9.500 l/s.

Solución. Se alcanzaron los límites de ignición por fricción y de desprendimiento de la fase de desarrollo utilizando una combinación de técnicas de perforación de radio medio desde la superficie hasta la capa y realizando perforaciones direccionales subterráneas y pozos de verificación de los que se toman muestras para analizar el contenido de gas. La zona del fondo del pozo inicial se predrenó con técnicas de perforación de radio corto.

El plan original de utilizar galerías de tres frentes permitió efectivamente proporcionar al circuito de ventilación del tajo largo una capacidad de 100 a 120 m³/s (2.000 a 2.400 l/s de CH₄ con un límite de retorno del 2,0%). Cabe señalar que, a raíz de la catástrofe que se produjo en 1994 en la mina Moura, en la que fallecieron 11 mineros, la reglamentación, las directrices y las costumbres y prácticas

Figura 9.5 Esquema de una mina y sus sistemas de ventilación y drenaje de gas



(Fuente: Belle, 2016.)

relativas a las minas de carbón en Queensland prohíben determinados sistemas de purga utilizados en los Estados Unidos. Sin embargo, sí se puede llevar a cabo una purga controlada, teniendo debidamente en cuenta la ubicación de mezclas potencialmente explosivas y controlando, en la medida de lo posible, el riesgo de combustión espontánea.

La capacidad real de dilución de un sistema de purga en estos bloques está muy por debajo del índice total de emisión de gases en el tajo largo, por lo que se necesitan estrategias alternativas. Hasta la fecha, la mina ha utilizado con éxito perforaciones de drenaje convencionales desde la superficie hasta el relleno (de 300 mm de diámetro, con una separación de 50 m y situadas en la galería de cabeza que actúa como vía de retorno) para reducir la carga de las emisiones de gas en el sistema de ventilación. Esta manera de proceder ha permitido alcanzar un promedio de captura del 80% (drenaje del relleno y ventilación), con picos de alrededor del 85%, y obtener un gas de gran pureza (> 90% CH₄).

La infraestructura para la recogida de gas está situada en la superficie y está formada por tuberías de 450 mm

de diámetro, algunas de las cuales están conectadas verticalmente a las perforaciones direccionales subterráneas. El gas recolectado en la superficie a través del predrenaje subterráneo, el predrenaje de superficie con perforación de radio medio y los pozos en el relleno se evacua hacia una central móvil de drenaje de relleno y una estación central de bombeo, en las que se utilizan unos 2.200 l/s de gas para 16 motores de gas de 2 MW cada uno; el gas restante se quema en antorcha. La política del yacimiento consiste en evitar, siempre que sea posible, la descarga directa del gas capturado.

A sabiendas de que, en el futuro, el sistema de ventilación seguirá teniendo dificultades para hacer frente a las emisiones de gas a la ventilación, sin contar con el 85% del gas capturado en el relleno, la explotación está intentando efectuar también un predrenaje en determinadas capas de techo más gruesas perforando pozos de aproximadamente 2 km de profundidad a lo largo de los ejes del tajo. En un primer momento, estos pozos se utilizarán para el predrenaje y, después, para el drenaje del relleno en el contexto de las emisiones de gas en el frente de carbón.

En caso de que fuera necesario realizar un predrenaje adicional en las futuras labores a mayor profundidad, se podría considerar la posibilidad de utilizar pozos de fracturación convencionales de múltiples capas.

Estudio de caso 4: Seguridad en las actividades de extracción en una capa de carbón propensa a los derrabes (Australia)

Situación inicial. Desde 1895, en las minas australianas se han registrado más de 700 casos de derrabes de carbón y desprendimientos de gas, principalmente dióxido de carbón y metano en distintas proporciones, algunos de los cuales han causado muertes.

Problema. Una capa particularmente propensa a los derrabes era la de Bulli, que estaba siendo explotada por diversas minas en Nueva Gales del Sur. Desde que se registró el primer derrabe, alrededor de 1895, 12 personas han fallecido como consecuencia de este fenómeno. A raíz de una muerte provocada por un derrabe en la mina South Bulli Colliery en julio de 1991, la Dirección de Inspección de Minas decidió establecer varios grupos de trabajo para que evaluaran los riesgos. Como resultado de los análisis efectuados, se elaboraron planes de gestión de derrabes, que se aplicaron de manera irregular. En 1994 se produjo un derrabe que causó la muerte de una persona en la mina Westcliff Colliery, lo que puso de relieve la necesidad de adoptar un enfoque más estricto. Los procedimientos que habían funcionado en zonas con un alto contenido de metano no habían dado resultados satisfactorios en algunas minas con zonas ricas en dióxido de carbono. La concentración de la producción de carbón en un número inferior de tajos largos muy productivos requería acelerar el ritmo de desarrollo de las galerías de avance. En este contexto, era fundamental controlar los riesgos de derrabe y de emisión de gases a fin de mantener la viabilidad de las operaciones mineras.

Solución. La Dirección de Inspección de Minas de Nueva Gales del Sur procuró subsanar las deficiencias publicando una guía práctica en la que se explicaba a la dirección de las minas la manera de desarrollar y aplicar un sistema riguroso de gestión de derrabes. En el siguiente fragmento de las directrices relativas a los derrabes en las minas (Departamento de Recursos Minerales, Nueva Gales del Sur, 1995) se explica la necesidad de adoptar este enfoque:

"La vasta experiencia de la Dirección de Inspección de Minas de Carbón en relación con la investigación de derrabes y desprendimientos ha puesto de manifiesto que a menudo no

se sabe con certeza si los procedimientos previstos se llevan realmente a cabo. Dicho de otra manera, se ha demostrado que la gestión de los riesgos de derrabe no es solo una cuestión técnica, sino que es también una cuestión de gestión y supervisión. Disponer de la mejor tecnología disponible no suele ser suficiente si se carece de sistemas eficaces para controlar su aplicación."

Los planes de gestión de derrabes deben describir las responsabilidades, los procedimientos y los protocolos para crear unas condiciones de trabajo seguras. La gestión de derrabes implica analizar el contenido de gas en las capas, la estructura geológica y los resultados de las perforaciones realizadas en las capas. El drenaje de gas es el principal mecanismo de prevención, puesto que reduce el contenido de gas en la capa explotada por debajo de la concentración límite para que exista un riesgo de derrabe o desprendimiento (Lama, 1995). Los procedimientos de extracción en condiciones propensas al derrabe se aplican cuando se hace evidente que no se pueden tomar más medidas de mitigación o que realizar más perforaciones no va a proporcionar más datos significativos. Estos procedimientos están diseñados para minimizar la exposición de los trabajadores a situaciones de riesgo y para proporcionar medidas de protección de emergencia en las zonas de riesgo.

Las minas de carbón en Australia han demostrado que las capas propensas a los derrabes se pueden explotar de manera segura y provechosa si se dispone de sistemas de gestión eficaces.

Estudio de caso 5: Elaboración de un programa de cogeneración de energía eléctrica con MMC y de reducción de las emisiones de MMC (China)

Situación inicial. En mayo de 2007 se finalizó una central de superficie para la extracción de gas en una zona remota de montaña a 1.600 m de altitud situada sobre una mina de carbón que tenía una capacidad de producción de 5 mtpa, emisiones específicas de 17,7 m³/t y un flujo de drenaje de metano puro de 22 m³/min. La eficiencia total de captura de metano en la mina era del 15% y el 85% restante se evacuaba con el aire de ventilación.

Problemas relativos al control del gas. La pureza del gas en la central de extracción era variable y, en ocasiones, inferior al 30% mínimo requerido para la utilización del gas y la eficiencia de la captura. Se habían previsto fluctuaciones en la cantidad de gas drenado a causa de las variaciones del ciclo de explotación del tajo largo y

de la sincronización de las labores en las distintas capas; por consiguiente, era necesario ajustar la capacidad de la central de generación de energía eléctrica con MMC para garantizar una disponibilidad del 85% a fin de rentabilizar la inversión. Uno de los objetivos del proyecto era optimizar la recuperación de energía y minimizar la emisión de GEI. Para ello era necesario establecer un sistema que integrara un motor y una antorcha de combustión, algo que nunca se había hecho en China. Por ello, se esperaba que hubiera una gran necesidad en materia de transferencia de tecnología.

Solución. Se destinó a un equipo de especialistas locales e internacionales en el ámbito del drenaje de gas y de la ingeniería eléctrica y de sistemas al proyecto, a fin de que colaboraran con el personal de la mina en el suministro de gas, el dimensionamiento del proyecto, la integración de la central y su rendimiento.

Se aumentó la pureza del metano mejorando el sellado y la regulación de las perforaciones inclinadas. Se aumentó la capacidad de gas de la infraestructura de drenaje, se reemplazaron los dispositivos de monitoreo del flujo de alta resistencia y se preparó un proyecto para aumentar la captura de gas. La perforación intensiva realizada en dos futuros paneles de tajo largo con fines de predrenaje proporcionó un aporte adicional de gas enriquecido que representaba el 23% del gas drenado. La cantidad restante procedía de las perforaciones inclinadas realizadas en el techo para el posdrenaje. Estas se efectuaron delante del frente e, inevitablemente, algunas de ellas sufrieron daños y no dieron resultados satisfactorios cuando llegaron al relleno. Se realizó una perforación de demostración sobre el relleno detrás del frente, que dio resultados satisfactorios. Sin embargo, esta técnica de drenaje no es habitual en la región y todavía no se ha adoptado por cuestiones de reglamentación local.

La primera fase del proyecto implicó la instalación de 5 MW_e para la recuperación del calor residual a fin de calentar edificios y el aire de ventilación entrante en invierno. También se instaló una antorcha con una capacidad nominal de 5.000 m³/hora. Se contrató a una empresa especializada para que diseñara e instalara un sistema para controlar a distancia el rendimiento del material de utilización y de destrucción.

En octubre de 2009, cuando la captura de gas (puro) había superado claramente los 50 m³/min, se inició la segunda fase del proyecto, que se centró en aumentar la capacidad de generación de energía eléctrica a 12 MW_e.

Estudio de caso 6: Utilización del MMC y mitigación de las emisiones de metano en tres grandes minas de carbón (China)

Situación inicial. Tres grandes minas con una capacidad de producción de carbón combinada de 14 mtpa, situadas cerca de Taiyuan, la capital de la provincia de Shanxi (China), capturaban en total unos 140 m³/min de metano, que se ventilaban a la atmósfera. Todavía se podía aumentar la captura de MMC en las minas. La política seguida a nivel nacional, provincial y empresarial consistía en buscar la manera de aprovechar el MMC para producir energía limpia y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Los precios de la electricidad, que eran altos e iban en aumento, constituían un incentivo importante para que las minas generaran electricidad para su propio consumo.

Problemas relativos a la utilización y la mitigación. Las minas deseaban instalar tecnologías modernas de motores de gas y maximizar la producción de electricidad, pero no tenían ninguna experiencia en la utilización de MMC. A nivel empresarial, el objetivo era determinar y aplicar las mejores prácticas de extracción, utilización y mitigación del gas, utilizando para ello tecnologías importadas. Sin embargo, se habían previsto dificultades relacionadas con la financiación, el manejo y el mantenimiento del material procedente del extranjero. Anteriormente, la tecnología importada en China se deterioraba con bastante frecuencia porque no se disponía de la experiencia operativa necesaria y no se invertía en el mantenimiento preventivo. También se debían tener en cuenta otras cuestiones relacionadas con la variabilidad de la concentración y los flujos de metano en las minas.

Todos los emplazamientos estaban situados en zonas montañosas, la más alta a 1.600 m de altitud, y sufrían unas condiciones meteorológicas extremas, con nieve en invierno y altas temperaturas en verano, por lo que la construcción no podía realizarse de manera segura ni eficaz en invierno. Además, los equipos deberían poder funcionar de forma fiable en condiciones meteorológicas muy diversas.

Solución

Construcción del proyecto. Una gran empresa minera estatal y su filial operativa se asociaron con un promotor de proyectos a nivel internacional con objeto de desarrollar y realizar proyectos de cogeneración con MMC en tres minas de carbón grisúosas. Estos proyectos se registraron como proyectos del MDL en el marco de la CMNUCC. El promotor

internacional financió todo el equipo, mientras que la empresa minera china proporcionó tierras y financió el diseño y las obras. Fue necesario preparar un estudio de viabilidad, que debía recibir la aprobación del Gobierno, antes de proceder al diseño final y a la ejecución. De conformidad con los reglamentos gubernamentales de China, solo los institutos certificados y especializados pueden realizar este tipo de diseños. El equipo del promotor encargado de las cuestiones de ingeniería colaboró con los institutos de diseño chinos para ayudarlos a comprender las nuevas tecnologías del proyecto y para fomentar la adopción de normas occidentales, en particular en materia de salud y seguridad. Antes de la construcción, se prepararon, examinaron y aprobaron oficialmente las evaluaciones del impacto ambiental.

A continuación, se inició un proceso público de licitación para el suministro y la instalación del material necesario para el proyecto, con un contrato marco para las cuestiones de ingeniería, suministro y construcción. Después, se examinaron en detalle los aspectos técnicos con el licitante elegido y se acordaron las condiciones finales. Debido a las duras condiciones invernales, solo se podía construir durante ocho o nueve meses del año. El calendario de ejecución se resume en el cuadro 9.2.

Las plataformas de los emplazamientos para el proyecto de MMC se formaron por corte y relleno, en un terreno montañoso con un suelo en malas condiciones. Los motores se colocaron en contenedores que evitaban la contaminación acústica y permitían que los controles de las emisiones de la combustión del motor respetaran las normas más recientes.

El proyecto de cogeneración con MMC en la mina de carbón T sufrió grandes retrasos por problemas relacionados con la propiedad de la tierra, a los que se sumó una grave explosión subterránea en febrero de

2009 que mantuvo ocupados a los directores de la mina y del grupo durante un período de tiempo considerable. Después, a causa de una prolongada controversia sobre la garantía del motor, la central no pudo estar plenamente operativa hasta casi dos años después de su finalización. Los diseñadores locales incluyeron un depósito de gas de gran tamaño para el suministro de MMC, pero, por cuestiones reglamentarias, este todavía no se ha utilizado. Sin embargo, ello no ha tenido consecuencias mensurables en los resultados del proyecto.

El rendimiento inicial de la central eléctrica en la mina M fue inferior a lo que se había previsto, a causa de la capacidad insuficiente del sistema de refrigeración del gas, que posteriormente se rectificó.

Los tres proyectos, registrados como proyectos del MDL en el marco de la CMNUCC, evitan en total 1 millón de toneladas de CO₂ equivalente por año. La verificación de las emisiones ha culminado con éxito en los tres yacimientos y se seguirá llevando a cabo durante los diez años de vida de los proyectos. Se han instalado más de 30 MW_e de capacidad de producción de electricidad y se está estudiando la posibilidad de ampliar el proyecto T. Asimismo, se han creado unos 65 puestos de trabajo en zonas mineras pobres, lo que, junto con las mejoras en la infraestructura local, conlleva un beneficio para las economías locales.

Aspectos relativos a la ingeniería y soluciones.

La transferencia de tecnología era un componente esencial del proyecto. Un promotor de proyectos a nivel internacional, que contaba con un equipo con experiencia en minería e ingeniería, aportó una inversión y prestó asistencia técnica. Sin embargo, tuvo que enfrentar cierta reticencia a las nuevas ideas, en particular cuando estas entraban en conflicto con las prácticas vigentes, a menudo obsoletas.

Cuadro 9.2 Calendario de ejecución

Actividad	Mina D	Mina T	Mina M
Firma del acuerdo de cooperación entre los asociados	Agosto de 2007	Marzo de 2008	Marzo de 2008
Inicio de la preparación del yacimiento	Junio de 2007	Junio de 2009	Marzo de 2009
Inicio de la fase 1 de generación de energía eléctrica	Mayo de 2008	Junio de 2011	Agosto de 2010
Inicio de la fase 2 de generación de energía eléctrica	Noviembre de 2010	Previsto para septiembre de 2016	Noviembre de 2014

Las centrales de generación de energía eléctrica se construyeron por fases, a fin de permitir la adquisición de experiencia en el funcionamiento de motores de gas extranjeros y sofisticados y de disponer de tiempo para mejorar la captura del gas y su calidad en las minas (figuras 9.6 y 9.7). Los proveedores de tecnología impartieron formación y los servicios de apoyo técnico estuvieron disponibles desde la oficina del promotor del proyecto en Taiyuan, a poca distancia en coche de todos los yacimientos. Además, se desarrolló un sistema patentado para la supervisión a distancia, que permitía reaccionar rápidamente ante las advertencias de averías y optimizar la reducción de las emisiones.

Se diseñó una protección adecuada para asegurar el funcionamiento de los sistemas de pretratamiento, los motores y los dispositivos de monitoreo y control en todo tipo de condiciones meteorológicas. Sin embargo, las duras condiciones durante el verano y el invierno pueden limitar la carga de los motores de gas y alargar los períodos de inactividad por motivos de mantenimiento.

El equipo internacional trabajó en las minas del proyecto para elevar el nivel de la gestión del gas y asegurar que las concentraciones de metano se mantuvieran constantemente por encima del 30% necesario para la seguridad de la captura, el transporte y la utilización del gas. En ausencia de una norma nacional en China, el equipo internacional elaboró un documento con directrices operacionales para las centrales de superficie con MMC. Las principales mejoras en las minas se consiguieron prestando una mayor atención a la regulación y la perforación de pozos de drenaje, introduciendo nuevos métodos para el desagüe de los conductos de drenaje del gas y aumentando el control de la presión de aspiración en las centrales de extracción de superficie.

En el cuadro 9.3 se resumen los resultados generales de los proyectos. No se ha alcanzado el objetivo de lograr un 80% de generación de energía eléctrica disponible debido a factores relacionados con las operaciones en la central, el mantenimiento y el suministro de MMC. El flujo de MMC varía en función del ritmo de producción de carbón y se ve afectado por la interrupción de las actividades en el tajo largo ocasionadas por problemas geológicos, los cambios en el frente del tajo subterráneo y las actividades de mantenimiento en las minas. La disponibilidad de la central eléctrica se calcula multiplicando el porcentaje del tiempo de funcionamiento del motor por el porcentaje de la carga del motor lograda.

Los proyectos de MMC en las tres minas siguen funcionando según lo previsto, a pesar del bajo rendimiento de la reducción certificada de las emisiones y de los problemas recurrentes para alcanzar los objetivos de mitigación de las emisiones a causa de la quema en antorcha del excedente de gas procedente de la generación de energía eléctrica, en particular durante los períodos de inactividad.

La generación de energía eléctrica en los emplazamientos del estudio de caso se puede mejorar fomentando prácticas relativas a las operaciones y el mantenimiento, como la disponibilidad de repuestos, el mantenimiento preventivo y la formación avanzada para el personal técnico. En la mina D, los sistemas de recuperación de calor solo se utilizan en invierno (cinco meses aproximadamente) para calentar los pozos, mientras que en los otros emplazamientos se utilizan para el agua caliente y la calefacción. Todavía no se han encontrado otras formas de utilizar el calor residual durante todo el año que sean viables desde un punto de vista comercial.

Lecciones. Este estudio de caso muestra cómo se pueden integrar la generación de energía eléctrica con MMC, los sistemas de recuperación de calor y las unidades de quema en antorcha en un sistema que utilice o destruya prácticamente todo el gas drenado, un paso fundamental para conseguir que las operaciones mineras tengan un valor de emisiones próximo a cero. Las ventajas para las minas de carbón son el ahorro energético y la utilización de energía limpia conseguida mediante la recuperación de calor residual, en vez de mediante calderas de carbón contaminantes, para calentar agua, lugares y pozos.

Es posible que el elevado precio de la electricidad no sea de por sí suficiente para fomentar la inversión en una utilización avanzada del MMC. En este estudio de caso la asociación de las finanzas del carbono y la transferencia de tecnología resultó ser un impulsor eficaz.

No debe subestimarse el tiempo que se necesita para obtener las aprobaciones y autorizaciones requeridas para los proyectos de MMC. Los plazos y el calendario del proyecto deben tener en cuenta las dificultades y los riesgos que entraña trabajar en condiciones de frío extremas. Asimismo, los equipos y las instalaciones deben diseñarse de tal manera que puedan funcionar adecuadamente en todas las condiciones meteorológicas.

Las explotaciones mineras que empiecen a utilizar tecnologías con las que no estén familiarizadas deben disponer de un acceso inmediato a servicios especializados

Figura 9.6 Fase 1 de la central de cogeneración con MMC en la mina D



Figura 9.7 Sistema de antorchas en la mina T



(Cortesía de Zhengzhou Mining Group, MEGTEC Systems and EcoCarbone.)

Cuadro 9.3 Resumen del rendimiento de los proyectos de MMC

Mina de carbón con proyecto de MMC	Registro como proyecto del MDL en el marco de la CMNUCC	MW _e de capacidad de generación de energía eléctrica (2015)	Capacidad de la antorcha (m ³ /h)	Exportaciones anuales de electricidad habituales (en MWh)	Exportaciones de electricidad acumuladas a 31 de julio de 2015 (en MWh)	Promedio de la reducción de las emisiones en tCO ₂ /año	Disponibilidad general de los generadores de la central de energía eléctrica	Disponibilidad general de las antorchas
Mina D	9 de marzo de 2009	11,9	1 x 5 000	69 300	380 200	385 000	66%	20%
Mina T	17 de diciembre de 2010	12,2	4 x 2 000	62 000	266 900	482 000	59%	90%
Mina M	3 de diciembre de 2010	7,5	2 x 1 500	24 700 únicamente fase 1	120 400	192 800	75%	80%

y de apoyo técnico en la localidad donde estén situados los proyectos. El rendimiento del material no solo depende de su instalación y sus características iniciales, sino también de cómo se maneja y se mantiene.

Estudio de caso 7: VAM (China)

Reducción de las emisiones de VAM y generación de agua caliente a partir de la energía liberada en la oxidación del VAM

Situación inicial. Una gran mina de carbón situada en la provincia de Henan (República Popular China), con una capacidad de producción de carbón de 1,5 mtpa, emitía alrededor de 12 millones de metros cúbicos de metano por año. El VAM representaba el 56% de las emisiones y el 44% del metano restante se evacuaba mediante el drenaje. Las concentraciones de VAM oscilaban entre el 0,3% y el 0,7%.

Problemas relativos al control del gas. En China nunca se había experimentado la utilización o la reducción de las emisiones de VAM, puesto que no había ningún incentivo, como los créditos de carbono, para este tipo de proyectos.

Solución. La emergencia del mercado del MDL proporcionó el impulso financiero necesario para ejecutar proyectos de reducción del VAM. El grupo minero estatal colaboró con un promotor de proyectos del MDL y con un importante proveedor de tecnología en el diseño, la puesta en servicio y la ejecución de un proyecto comercial experimental en materia de VAM que utilizaba un OTR sin llama con un solo lecho (figura 9.8). Fue el primer proyecto del MDL sobre el VAM que se validó y registró en el marco del Protocolo de Kyoto.

Este primer proyecto pretendía ser un proyecto comercial experimental, pero permitía añadir unidades de VAM adicionales por si la mina deseaba ampliar la operación.

La instalación para el tratamiento del VAM en la mina se compone de un único OTR con un rendimiento de 62.500 Nm³/h (17 Nm³/seg), lo que representa el 17% del flujo del pozo, que es de 375.000 Nm³/seg. Este sistema está conectado indirectamente al ventilador de la mina, lo que significa que, si se detiene la instalación de tratamiento del VAM, todo el aire de ventilación se evacúa a la atmósfera. Como medida de seguridad, es necesario instalar conductos suficientemente largos como para que, en caso de emergencia (por ejemplo, si se detecta una concentración de VAM demasiado elevada), se disponga de tiempo para desviar todo el flujo directamente a la atmósfera. El OTR puede funcionar de manera autónoma dentro de los límites de las concentraciones de VAM producidas por la mina. El proyecto comenzó las operaciones en octubre de 2008 y su eficacia de destrucción ha sido del 97%. La RCE depende de la cantidad de metano que se destruya; generalmente, una única unidad permite evitar 20.000 t (0,3% de CH₄) y 40.000 t (0,6% de CH₄) de CO₂ equivalente por año. El sistema se detiene cuando la concentración de metano se sitúa por debajo del nivel de funcionamiento autónomo, que es del 0,2%.

Utilización del VAM. La instalación en la mina de Zhengzhou genera agua caliente para las duchas de los mineros y para la calefacción de los edificios cercanos. Para recuperar el calor se ha instalado un intercambiador de calor aire-agua entre el OTR y su conducto de evacuación, que recupera la energía del aire caliente evacuado.

Figura 9.8 Sistema de reducción del VAM y recuperación de energía aplicado en China



(Cortesía de Zhengzhou Mining Group, MEGTEC Systems and EcoCarbone.)

En el cuadro 9.4 se presenta una comparación de la cantidad de energía que se puede extraer de la recuperación del calor secundario del aire que se evacúa del OTR en forma de agua a 70 °C y 150 °C, respectivamente, con distintas concentraciones de VAM. También se indica la cantidad de energía que se puede recuperar a través del intercambio de calor primario, extrayendo la energía directamente del interior de los OTR. La generación de energía térmica es lineal, lo que significa que dos OTR producirían el doble de energía térmica.

Estudio de caso 8: VAM (Australia)

Reducción de las emisiones de VAM y utilización de la energía liberada en su oxidación para la producción de vapor sobrecalentado destinado al funcionamiento de una central eléctrica con turbina de vapor convencional.

Situación inicial. Una gran mina de carbón en Nueva Gales del Sur (Australia) liberaba a la atmósfera VAM con una concentración de alrededor del 0,9% de CH₄. También se liberaba a la atmósfera, cerca del difusor, el gas drenado, con una concentración superior al 25%.

Problemas relativos al control del gas. La eficacia de reducir o utilizar VAM a gran escala nunca se había experimentado a causa de la naturaleza de las emisiones, que tienen un gran flujo de aire y una concentración de metano extremadamente diluida. Durante 12 meses (entre 2001 y 2002), se llevó a cabo un ensayo de reducción o utilización de VAM a pequeña escala en la mina Appin Colliery de BHP Billinton (Australia), donde un pequeño OTR procesaba el VAM y utilizaba la energía liberada para producir vapor, demostrando así la posibilidad de gestionar los cambios naturales en las concentraciones

de VAM y recuperar de manera eficiente la energía a largo plazo.

Solución. La mina colaboró con el fabricante del OTR utilizado en la mina Appin e integró cuatro OTR en el ciclo de vapor de una central eléctrica de vapor, utilizando eficazmente los OTR como hornos especiales alimentados por VAM extremadamente diluido (figura 9.9). La empresa minera recibió una subvención gubernamental considerable para ejecutar el proyecto.

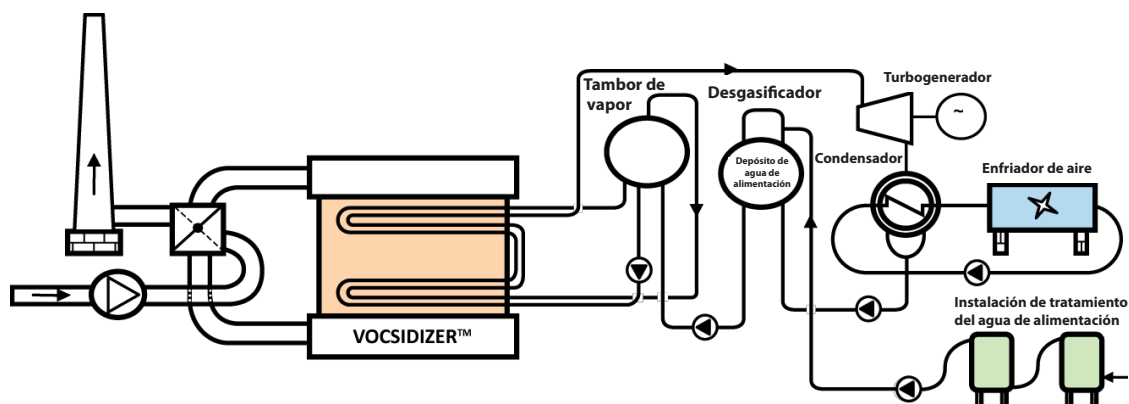
La central de generación de energía eléctrica alimentada por VAM (figura 9.10) está diseñada para tratar 250.000 Nm³ de aire de ventilación por hora (150.000 pies cúbicos estándar por minuto o scfm), lo que corresponde al 20% del volumen total disponible en el difusor. Para diseñar la central se tomó como referencia la concentración media de VAM, de 0,9%. Los OTR están diseñados para gestionar variaciones en las concentraciones de VAM; sin embargo, para que la turbina de vapor funcione de manera continua y con una velocidad óptima, la energía en el aire de ventilación procesado debe mantenerse relativamente estable en el punto de diseño. En este proyecto, se inyecta gas drenado con una concentración del 25% o superior en el flujo de aire de ventilación antes de que llegue a los ventiladores de proceso, cuando la concentración de VAM es inferior al 0,9%.

La central de generación de energía eléctrica con VAM estuvo plenamente operativa en abril de 2007. La disponibilidad notificada de la central en el primer ejercicio económico (julio de 2007 a junio de 2008) fue del 96% y en ella se incluyeron dos cierres previstos para el mantenimiento. En octubre de 2014, la instalación había

Cuadro 9.4 Cantidad de energía que se puede recuperar con una instalación que trata 250.000 Nm³/h de aire de ventilación en diversas condiciones

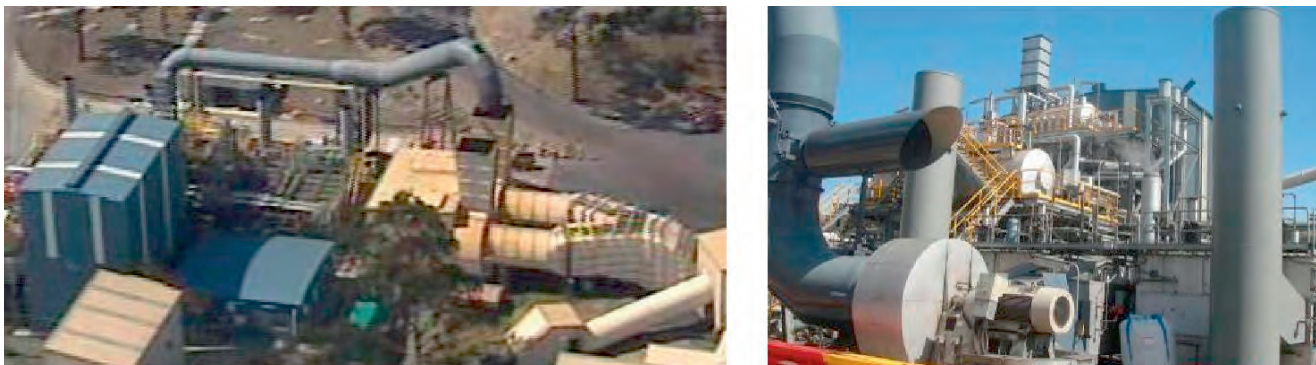
Resultado del intercambio de calor secundario	Con una concentración de VAM del 0,3%	Con una concentración de VAM del 0,6%	Con una concentración de VAM del 0,9%
- Agua a 70 °C	1 MW	8 MW	15 MW
- Agua a 150 °C	-- Imposible --	2 MW	10 MW
Intercambio de calor dentro de los OTR	3 MW	11 MW	18 MW

Figura 9.9 Reducción del VAM y recuperación de energía para la generación de electricidad



(Cortesía de MEGTEC Systems and Illawarra Coal Division of BHP Billiton.)

Figura 9.10 Central de generación de energía eléctrica y tratamiento del VAM WestVAMP



(Cortesía de MEGTEC Systems and Illawarra Coal Division of BHP Billiton.)

generado más de 1,5 millones de créditos de emisiones y más de 240.000 MWh de electricidad.

Para el buen funcionamiento de una central de generación de energía eléctrica con turbina de vapor alimentada por VAM es necesario que:

- La concentración de VAM sea del 0,7% o superior.
- El volumen de aire de ventilación disponible sea, como mínimo, de 500.000 Nm³/hora (300.000 scfm).
- Se disponga de gas drenado (con una concentración mínima del 25%) para ser inyectado en el aire de ventilación, a fin de compensar la baja concentración del VAM.
- Se disponga de agua de reposición para la refrigeración.
- Las centrales estén situadas cerca de una red de distribución eléctrica de alta tensión para la exportación de la energía generada.

- Se aproveche el calor residual del circuito de enfriamiento del vapor, siempre que sea posible, para enfriar o calentar agua o espacios a través de enfriadores de adsorción.

La posibilidad de enriquecer el VAM con MMC drenado no debería considerarse hasta que no se hayan resuelto los posibles problemas de seguridad. La utilización de metano de baja concentración debe evitarse, por el riesgo de explosión que conlleva.

Estudio de caso 9: Reducción del riesgo de explosión en minas explotadas por cámaras y pilares (Sudáfrica)

Situación inicial. A causa de un aumento de la gravedad de las explosiones en capas de carbón muy gruesas (4 a 6 m de altura) con un bajo contenido en gas (0,5 a 2 m³/t) que se estaban explotando con métodos mecanizados de cámaras y pilares en esta región minera en concreto, fue necesario adoptar una respuesta reguladora y práctica a fin de reducir los riesgos. Alrededor del 75% de las explosiones se iniciaron en las entradas de los frentes de arranque, o cerca de estas, y estuvieron, en su mayoría, causadas por una ignición por fricción (Landman, 1992). Sin embargo, también se produjeron muchas explosiones en otras zonas distintas del frente, lo que puso de relieve las dificultades para controlar el metano en las minas de cámaras y pilares a través de sistemas de ventilación. El flujo de aire en este tipo de explotaciones es diferente que el de las explotaciones por tajo largo, a causa de las contracciones y los ensanchamientos bruscos sucesivos que se producen en el lugar en que las galerías longitudinales se cruzan con las transversales.

Se consideró que la acumulación de gases en las zonas con una elevada producción que no estaban bien ventiladas y la propagación de llamas en las capas de metano en el techo no detectadas (cuadro 9.5) eran riesgos considerables que debían poder controlarse (Creedy y Phillips, 1997).

Problemas relativos al control del gas. La ventilación de los frentes de arranque exige que la ventilación auxiliar tome aire de la última galería de enlace. Los sectores explotados están formados por un gran tablero de galerías y pilares, que no se pueden ventilar eficazmente por la enorme cantidad de aire que ello requeriría y por la dificultad de distribuir el aire de manera uniforme. Para asegurar que los principales flujos de ventilación llegaran a los frentes de trabajo, las zonas que ya han sido explotadas se cierran con pantallas provisionales, de modo que el gas pueda acumularse en las zonas delimitadas detrás del frente.

En los casos en que se concluyó que el hundimiento del techo de las minas podía deberse a una acumulación de presión de agua y metano, se intercalaron perforaciones para pernos de anclaje y perforaciones abiertas de drenaje libre. Algunas dejaban escapar un bajo caudal de gas que podía formar grandes capas de metano que no se detectarían a menos que se efectuara un sondeo cerca del techo, lo que resulta difícil en las galerías elevadas.

Soluciones. El drenaje previo dentro de la capa puede ayudar a controlar el gas cuando se utilizan métodos de extracción parcial. Generalmente, no suele ser necesario realizar un drenaje posterior, ya que no se han perturbado en exceso los estratos carboníferos del suelo ni del techo. En las capas con un bajo contenido de gas, el drenaje previo no suele aportar grandes beneficios. Por ello, el drenaje de gas no era una opción viable para la región. A fin de adoptar una solución práctica, era necesario mejorar las prácticas de ventilación.

Las secciones ya explotadas no se pueden ventilar de la misma manera que las secciones en que se está trabajando, debido al suministro limitado de aire disponible. Por ello, se hizo hincapié en la introducción de plazos efectivos de monitoreo, entre otras cosas respecto de la detección de gas en el techo y de la velocidad de ventilación en el cuerpo general de las explotaciones por cámaras y pilares en las que se había reducido la cantidad de ventilación hasta que se sellara la zona.

Se determinó que las zonas más peligrosas eran los frentes de arranque. El organismo gubernamental encargado de reglamentar esta esfera (Departamento de Asuntos Minerales y Energéticos, 1994) elaboró un código de prácticas para la ventilación de las zonas mecanizadas, en el que se destacaba la necesidad de que las concentraciones de gas inflamable fueran inferiores al 1,4%. Para ello, se formularon las siguientes recomendaciones:

- Una velocidad mínima de ventilación de 1,0 m/s en la última galería de enlace (muchas minas decidieron instalar un sensor remoto continuo de velocidad).
- Una ventilación auxiliar eficaz en las galerías (ventilación secundaria).
- Medición y registro regulares de los datos clave sobre la ventilación.
- Inspecciones de los sectores grisusos a intervalos no superiores a una hora.

Cuadro 9.5 Evaluación del riesgo de ignición provocado por la estratificación del metano en las minas explotadas por cámaras y pilares

Posible problema	Posible causa del problema	Medidas preventivas
No se evita la ignición	<ul style="list-style-type: none"> Ventilación auxiliar no adecuada ni fiable en las galerías de avance Deficiencias en los sistemas de ventilación de la maquinaria Picos gastados, pulverizadores bloqueados, baja presión del agua 	<ul style="list-style-type: none"> Utilización de material bien diseñado y protegido Alto nivel de mantenimiento Control efectivo
No se eliminan las fuentes e ignición	<ul style="list-style-type: none"> Fuentes de ignición por fricción y energía eléctrica asociadas con los equipos de minería continua Fumar u otras actividades no autorizadas 	<ul style="list-style-type: none"> Supervisión y formación estrictas del personal Registros en la entrada de la mina para encontrar material no autorizado
No se dispersa la estratificación del metano	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad de ventilación insuficiente Ventilación local inadecuada 	<ul style="list-style-type: none"> Procedimientos de control del metano. Disponibilidad de circuladores de aire y otro material apropiado
No se detectan los estratos de metano	<ul style="list-style-type: none"> Emplazamiento inadecuado de los dispositivos de control Falta de equipos de control adecuados Personal con formación insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> Programa de control específico para el yacimiento Sondas de control adecuadas, en particular para los sectores de galerías elevadas Capacitación
No se evita la estratificación del metano	<ul style="list-style-type: none"> Ventilación insuficiente Ventilación no fiable 	<ul style="list-style-type: none"> Planificación de la ventilación. Ventilación de techo mejorada localmente
No se evitan las emisiones de metano	<ul style="list-style-type: none"> Las emisiones de metano son una consecuencia natural de la explotación subterránea de carbón 	<ul style="list-style-type: none"> Drenaje de metano

- Aislamiento eléctrico automático del corte mecánico en caso de que el sistema de ventilación secundario deje de funcionar.
- Precauciones especiales al acercarse a las zonas con riesgo de emisiones asociadas a intrusiones ígneas y anomalías geológicas.
- Observación continua de los gases en las galerías que se estén excavando.
- Obligatoriedad de la presencia de depuradores integrados en las minas de extracción continua.

Estudio de caso 10: Explosiones de gas en la mina de carbón de Pike River (Nueva Zelanda)

Situación inicial. La mina de carbón de Pike River está situada a 46 km al nornordeste de Greymouth, en la costa occidental de la Isla Sur (Nueva Zelanda). Se había completado la instalación y la infraestructura en superficie, que habían recibido un premio de protección del medio ambiente por su aplicación y diseño (figura 9.11).

La situación subterránea contrastaba por completo con las condiciones en superficie. La extracción subterránea

era difícil, especialmente a causa de las condiciones geológicas inesperadas que causaron grandes retrasos en el desarrollo de la mina.

Se ejercieron presiones para que se iniciara la producción de carbón de forma prematura. Los costos habían superado las previsiones y las reservas financieras disminuían rápidamente. A fin de generar unos ingresos muy necesarios, se estableció un frente de producción y se inició una extracción de carbón de prueba con un método hidráulico. Se instaló un ventilador principal cerca de un pozo de retorno del aire. El pozo había sufrido problemas de estabilidad y no servía como medio alternativo para la evacuación de personas en caso de que se produjera una emergencia en el interior. El único camino de entrada y salida posible para los mineros conllevaba tomar un desvío de 3 km.

No se había tenido en cuenta el peligro que podía suponer el gas. Durante la exploración y el desarrollo, no se obtuvieron datos sistemáticos sobre las características de las emisiones ni sobre el contenido de gas del depósito de carbón. Únicamente cuando el gas se convirtió en

Figura 9.11 Las instalaciones de superficie, con edificios que se integran en el bosque, reflejan la sensibilidad medioambiental de la zona



un problema, se intentó controlarlo apresuradamente. Además, el diseño y la aplicación del equipo eléctrico en parte de la mina subterránea no cumplían las normas de protección contra las explosiones en las minas.

La empresa tampoco asumió ninguna responsabilidad en relación con la salud ocupacional y la seguridad. La junta directiva no participó activamente en la gestión de la salud ni la seguridad, y delegó todas las cuestiones relativas a las operaciones y la seguridad al gerente de la mina. Aunque sí había un gerente y un comité para las cuestiones de seguridad en la mina, estos no eran eficaces. Se encargó un estudio externo que puso de relieve importantes problemas de seguridad, pero ni los propietarios ni el gerente de la mina tomaron medidas para resolverlos. Se habían detectado concentraciones de gas en el rango de explosividad en numerosas ocasiones, pero no se tomaron medidas al respecto. La falta de profesionalidad de la dirección ocasionó un gran movimiento de personal, por lo que las condiciones subterráneas quedaron en manos de miembros del personal y contratistas con poca experiencia.

Con las reformas de los reglamentos se habían eliminado los estrictos mecanismos de supervisión independiente de las condiciones sanitarias y de seguridad en las minas de todo el país. El Gobierno había reestructurado su Dirección de Inspección de Minas y había dado más libertad a los gerentes de las minas para que autorregularan sus actividades. A causa de la gran carga de trabajo y de la falta de inspectores de minas cualificados, se realizaron pocas

visitas subterráneas y las normas se aplicaron de manera deficiente.

El problema. El 19 de noviembre de 2010 se produjo una explosión. En los días posteriores, se produjeron otras tres explosiones y un incendio (figura 9.12), antes de que se inertizara la atmósfera de la mina y esta se sellara. Murieron 29 mineros.

La explosión no se detectó inmediatamente en la superficie, puesto que no se prestó atención a las alarmas en la sala de control, y no se llamó a los servicios de emergencia hasta 40 minutos después. Dos supervivientes salieron a la superficie 101 minutos después del suceso, pero nadie los estaba esperando.

La policía era responsable de la respuesta de emergencia, pero no tenía ninguna experiencia en minería. No se había realizado ningún simulacro de emergencia en la mina y no se disponía de datos de la zona subterránea para evaluar debidamente la situación. Como no se habían podido establecer los riesgos subterráneos, los Servicios de Salvamento no pudieron entrar en la mina.

La muerte de los mineros dejó a sus familiares y a la comunidad desconsolados. La comunidad prestó un gran apoyo a las familias afectadas, pero la inacción de las autoridades provocó irritación y frustración. Las familias pidieron con insistencia que, cuando las condiciones fueran seguras, se autorizara la entrada a la mina para que se pudieran recuperar los cuerpos de sus seres queridos. A pesar de que los expertos que prestaban asesoramiento técnico a las familias opinaron que era seguro entrar en la

Figura 9.12 Incendio en el pozo de retorno del aire tras la tercera explosión



mina, la empresa nacional a la que se confió esta mina tras la quiebra de Pike River Coal Ltd. no quiso hacerlo.

La solución. Era necesario encontrar una solución para que esta tragedia no se volviera a repetir. Lo ocurrido tenía varias causas fundamentales.

Se estableció una Comisión Real para determinar la causa de las explosiones y las muertes, la eficacia de las operaciones de búsqueda, rescate y recuperación, y la idoneidad de las leyes y su aplicación, así como para elaborar un informe al respecto.

La Comisión consideró que la gestión del incidente distaba mucho de ser satisfactoria por los siguientes motivos:

- Inicialmente, la dirección de las minas no reaccionó rápidamente para confirmar la explosión y proporcionar información al respecto.
- Los procedimientos de emergencia no estaban detallados ni se habían puesto a prueba.
- La policía era responsable del control del incidente, pero no estaba ni preparada ni cualificada para gestionarlo.
- Al no haber liderazgo ni coordinación entre los expertos, no se intentó entrar en la mina en condiciones de seguridad.
- No se informó correctamente a los familiares de las víctimas, que expresaron su frustración por la falta de iniciativa para recuperar los cadáveres.

Las explosiones podían tener diversas causas directas, ya que a las distintas posibilidades de emisión y acumulación de gases se sumaban las posibles fuentes de ignición,

como la falta de protección de los equipos eléctricos. Otros factores que contribuyeron a que no se detectara la peligrosidad del entorno de trabajo eran:

- Las dificultades económicas derivadas de los retrasos en el desarrollo de la mina causados por problemas geológicos, que habían llevado a que se pidieran ingresos de producción antes de que se hubiera completado la infraestructura de la mina y se hubieran resuelto debidamente los problemas de seguridad.
- La inadecuación de la ventilación y del drenaje de gas.
- La falta de personal experimentado a nivel subterráneo.
- La falta de participación efectiva de los trabajadores en las cuestiones relativas a la seguridad y la salud.
- La falta de medidas tomadas por la dirección a pesar de las reiteradas advertencias sobre la elevada concentración de gas.
- La ineffectividad de la supervisión corporativa en materia de salud y seguridad.
- La ineffectividad de la legislación gubernamental sobre la seguridad en las minas y su aplicación.

El 5 de noviembre de 2012, la Comisión Real publicó su informe, que contiene 16 recomendaciones principales, entre ellas:

- La introducción, en los casos en que fuera necesario, de importantes cambios en la legislación

neozelandesa relativa a la salud y la seguridad, en la administración y en la aplicación.

- La mejora de las prácticas de gobernanza empresarial a fin de mejorar la gestión de los riesgos y la supervisión del cumplimiento de las normas de salud y seguridad en las organizaciones.
- La adopción de mejores prácticas sobre control de gas por los administradores de las minas (se citó este documento de la CEPE).
- La participación de los trabajadores en las cuestiones relativas a la salud y la seguridad, como forma adicional de protección.

Lecciones. El estudio de caso muestra la importancia de disponer de reglamentos efectivos sobre el

establecimiento de objetivos y de que estos estén respaldados por una labor de inspección y aplicación realizada por profesionales experimentados en este ámbito. Es necesario que la dirección de las minas sea objeto de un control independiente cuando tenga obligaciones respecto de la producción y los ingresos y las condiciones no sean idóneas. La responsabilidad de supervisar el nivel de salud y seguridad ocupacional debería empezar en la sala de juntas.

El cierre de la mina de carbón de Pike River a raíz de la explosión y la quiebra de la empresa son un claro recordatorio del costo que conlleva este tipo de accidentes y de la imperiosa necesidad de gestionar eficazmente el gas en las minas de carbón grisúosas.

Apéndice 1. Comparación de los métodos de drenaje de gas (adaptado de Creedy, 2001)

Método	Descripción	Ventajas	Inconvenientes
<p>Predrenaje con perforaciones verticales desde la superficie</p>	<p>Consiste en fracturar una o varias capas de carbón bombeando fluidos de alta presión en una perforación realizada desde la superficie. Las fracturas se mantienen abiertas inyectando material de apoyo. De esta manera, el gas y otros fluidos pueden correr a través de la capa de carbón e introducirse en la perforación sin verse limitados por la resistencia del carbón circundante. También se han utilizado otros métodos para la realización de perforaciones, como una sencilla formación de cavidades en carbonos de alta permeabilidad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El gas se extrae antes de las operaciones mineras. • Se suele obtener un gas de gran pureza con valor comercial. • La extracción de gas es independiente de la actividad minera subterránea. • La fracturación hidráulica no suele afectar negativamente a las condiciones del techo. • Posibilidad de convertirlas posteriormente en pozos de relleno. • Oportunidad de reducir las emisiones de metano a la atmósfera (reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero) relacionadas con la mina de carbón. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso. • Se necesitan tuberías colectoras en la superficie para facilitar su utilización. • Pueden surgir problemas en la superficie respecto de la propiedad, el acceso y la intrusión visual. • La eliminación del agua salobre que a veces se produce. • La permeabilidad puede ser demasiado baja en capas profundas. • Los costos de perforación pueden resultar excesivos en las capas de carbón profundas. • Las capas de carbón deben tener una alta permeabilidad de fractura natural. • Coordinación difícil con el plan de minería. • El diseño final de la perforación es una tarea especializada.
<p>Predrenaje con perforaciones horizontales dentro de la capa</p>	<p>Se realizan perforaciones profundas a partir de las galerías subterráneas o de la base de los pozos, en las zonas donde se vaya a extraer carbón; el gas se extrae durante un período prolongado de tiempo para reducir los flujos de gas en las galerías de desarrollo y en los futuros frentes de arranque del tajo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El gas se extrae antes de las operaciones mineras. • Se obtiene un gas de gran pureza que puede ser utilizado. • El drenaje de gas es independiente de las operaciones de extracción de carbón. • Menos costoso que las perforaciones verticales desde la superficie. • Se puede aplicar en minas profundas, según la permeabilidad del carbón. • Puede reducir el riesgo de desprendimiento en las capas propensas a ello. • Permite un rápido desarrollo en las galerías de avance grisusosas. • Elimina el gas que no se puede interceptar durante las operaciones de posdrenaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario realizar las perforaciones antes de iniciar las actividades mineras. • La capa de carbón debe tener una permeabilidad natural entre moderada y alta para que se pueda reducir considerablemente el contenido de gas en la capa en un plazo de tiempo razonable. • Solo permite reducir las emisiones de gas de la capa en la que se llevan a cabo las labores de extracción, pero no las de las capas adyacentes perturbadas por las operaciones de tajo largo. • Las emisiones de agua, la estabilidad de la perforación y el control direccional de la perforación pueden resultar problemáticos en algunas ubicaciones de las capas. • Es necesario contar con un equipo formado en la perforación subterránea en zonas grisusosas.

Método	Descripción	Ventajas	Inconvenientes
<p>Predrenaje con perforación direccional desde la superficie hasta la capa</p>	<p>Se realiza un agujero vertical o inclinado a partir del cual se inicia la perforación direccional hacia la capa o las capas que se hayan determinado, y se prosigue la perforación durante 1.000 m o más. Se utilizan diversas configuraciones complejas de perforación en la capa para optimizar los resultados; las más rentables son las que tienen en cuenta la dirección de las tensiones en los estratos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El gas se extrae antes de las operaciones mineras. • Se obtiene un gas de gran pureza que puede ser utilizado. • El drenaje de gas es independiente de las operaciones de extracción de carbón. • La recuperación de gas es más eficaz que la obtenida con los pozos de fracturación verticales. • Posibilidad de reutilizar los agujeros en las capas situadas sobre las labores para el posdrenaje. • El emplazamiento de la perforación es flexible y no está limitado por las características de la superficie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo elevado. • No todas las capas de carbón se pueden perforar. • Es necesario proceder al desagüe para que el método no pierda eficacia. • El carbón debe tener una permeabilidad moderada. • Los fallos al perforar el agujero no se pueden corregir fácilmente. • Se necesitan competencias y materiales de perforación especializados.
<p>Predrenaje preventivo con pozos cortos en el techo de las galerías de avance</p>	<p>Se realizan perforaciones cortas y verticales en los estratos del techo de las galerías de avance, a fin de controlar las emisiones de grisú procedentes de fracturas poco visibles en la arenisca de los estratos del techo. El gas puede fluir de una capa de carbón situada encima que esté en contacto con el estrato fracturado o fluir naturalmente de la arenisca. A veces se perforan pozos de bajo ángulo en el techo, antes del frente, para liberar el gas antes de las operaciones de extracción, a fin de reducir los riesgos de ignición por fricción en las galerías de avance mecanizadas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Método de bajo costo para reducir los riesgos de ignición por fricción y controlar las emisiones de grisú. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo flujo de gas. • Conexiones con el sistema de drenaje de grisú si se consideran necesarias.

Método	Descripción	Ventajas	Inconvenientes
<p>Posdrenaje con perforaciones inclinadas</p>	<p>Se realizan perforaciones en ángulo por encima o por debajo del relleno de la galería de retorno del aire de un frente de tajo largo y se conectan a un sistema de extracción de grisú. En algunas minas de tajo largo explotado en retirada, el drenaje ha dado mejores resultados cuando las perforaciones se han realizado detrás del frente en vez de delante. Sin embargo, a veces resulta difícil mantener el acceso a los frentes de arranque en retirada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede conseguir un elevado nivel de captura en los frentes de tajo largo explotados en avance. • Apto para las labores en capas de carbón profundas. • Corta distancia de perforación hasta la fuente principal del gas. • El gas se puede extraer y canalizar hacia un lugar fijo de la superficie para su explotación comercial o su utilización en la mina. • Método eficaz en las capas de carbón de baja permeabilidad. • Las perforaciones en el suelo pueden reducir el riesgo de emisiones repentinas de gas en labores propensas a ello. • Patrón de perforación flexible y fácilmente modificable. • El método de drenaje de gas menos costoso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resulta difícil mantener la alta eficiencia de captura en los frentes de arranque en retirada. • Para obtener la máxima eficacia, es necesario perforar detrás del frente en los tajos largos explotados en retirada. • La vida productiva de las perforaciones suele ser corta. • Se obtiene gas con una pureza entre media y baja debido a que el aire de ventilación entra en el sistema de extracción de gas a través de las rupturas en los estratos ocasionadas por las actividades mineras. • Es necesario contar con un equipo formado en perforación subterránea. • La infraestructura subterránea de conductos debe llegar a la superficie o a un lugar seguro de descarga en una galería de retorno.
<p>Posdrenaje con perforaciones desde la superficie hasta el relleno</p>	<p>Se realiza y se reviste un pozo de ventilación a poca distancia de la capa que se va a explotar. El revestimiento en el fondo y la longitud productiva del pozo suelen estar ranurados. A veces se perfora y se reviste un pozo 30 m por encima de la capa; después se perfora un orificio más pequeño a través del horizonte de la capa explotada, antes o después del frente de arranque. Un método seguro y fiable para establecer el pozo consiste en realizar una perforación para entrecruzarlo con la capa explotada y luego enlechar los últimos 30 m hasta el fondo. Generalmente, los pozos se sitúan hacia la galería de retorno del aire de un tajo largo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Las operaciones de drenaje de gas son independientes de las operaciones subterráneas. • Puede ventilar importantes flujos de grisú del relleno del tajo largo. • Método demostrado y rentable a poca o moderada profundidad. • Se suele poder obtener gas de pureza moderadamente alta. La vida productiva puede ser de varios meses. • Puede adaptarse a los cambios en el plan de minería. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fallos de los pozos de relleno por razones geotécnicas. • Costoso en las capas de carbón profundas. • Riesgo de entrada de agua cuando hay grandes acuíferos directamente sobre la capa de carbón explotada. • No se puede drenar directamente el gas de las capas en el suelo. • Los pozos de relleno no se pueden operar hasta que el frente de arranque se encuentre a cierta distancia del pozo, a fin de evitar fugas de la ventilación a la superficie. • La recogida de gas con fines de explotación requiere una costosa infraestructura de conductos en la superficie. • Solo se puede aplicar si el acceso en la superficie no está obstaculizado. • Puede utilizar y airear más gas del que se liberaría en las labores subterráneas.

Método	Descripción	Ventajas	Inconvenientes
Posdrenaje con pozos largos horizontales perforados direccionalmente por encima o por debajo de la capa explotada	<p>Se perforan varios pozos utilizando técnicas de perforación direccional en un horizonte competente de unos 20 o 30 m por encima o por debajo de la capa explotada a lo largo de todo el panel de tajo largo previsto. Si no hay ninguna zona de perforación disponible en el horizonte apropiado, la perforación se orientará hacia el horizonte explotado que corresponda.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Puede utilizarse para el drenaje antes de la extracción. • Posibilidad de conseguir una mayor eficiencia de captura que con las perforaciones inclinadas desde la capa explotada. • Las actividades de drenaje de gas son independientes de las actividades de producción de carbón. • Se puede obtener gas de gran pureza. • Captura el gas cerca de los lugares de liberación iniciales próximos a la línea del frente de arranque. 	<ul style="list-style-type: none"> • La perforación direccional es relativamente costosa • Puede conllevar dificultades en las rocas expansivas y los carbonos bituminosos. • Resulta difícil reparar las perforaciones colapsadas o dañadas. • No se adapta a los cambios en las operaciones mineras. • La precisión y la velocidad de perforación son factores fundamentales para saber si se ha instalado un sistema apropiado antes del inicio de la producción de carbón. • Se necesitan competencias y equipo de perforación subterránea especializados.
Posdrenaje desde galerías subyacentes o suprayacentes	<p>Se realiza una galería encima o debajo de la capa explotada antes de la extracción. Luego se interrumpe la galería de avance y se conecta al sistema de drenaje de grisú mediante una tubería a través del elemento de obstrucción. Se puede aumentar la zona de influencia de la galería de drenaje perforando ventiladores de pozos a partir de esta antes del sellado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede complementar con perforaciones inclinadas desde la galería. • Posibilidad de conseguir una mayor eficiencia de captura que con las perforaciones inclinadas realizadas a partir del horizonte explotado. • Las actividades de drenaje de gas son independientes de las actividades de producción de carbón. • En ocasiones se pueden utilizar galerías o labores existentes situadas encima o debajo del sector de producción de carbón propuesto, a fin de reducir los costos. • Generalmente se puede obtener un gas de pureza relativamente alta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resulta costoso conseguir un acceso desde la capa explotada hasta el nivel de la galería. • Riesgo de incendios en capas de carbón tendentes a la combustión espontánea debido a las filtraciones de la ventilación. • Costoso, a menos que se realice en una capa de carbón relativamente gruesa. • No se adapta a los cambios en las operaciones mineras. • Puede no ser efectivo cuando los estratos entre la galería de drenaje y el frente de tajo largo son sólidos.
Posdrenaje con perforación direccional desde la superficie hasta la capa	<p>Una aplicación relativamente nueva de una tecnología consolidada para dirigir las perforaciones desde la superficie hasta las capas situadas sobre una capa explotada, logrando una configuración similar a la de la perforación subterránea direccional para el posdrenaje.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No se necesita un acceso subterráneo. • Se puede lograr reutilizando las perforaciones realizadas desde la superficie hasta la capa con fines de predrenaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo elevado. • Las perforaciones de predrenaje reutilizadas pueden resultar dañadas durante las operaciones de extracción. • No exime de la necesidad de realizar perforaciones inclinadas subterráneas cerca del frente para controlar el gas de manera eficaz.

Método	Descripción	Ventajas	Inconvenientes
<p>Posdrenaje a partir de cámaras o conductos en rellenos de tajo largo</p>	<p>Se construye una cámara en el relleno detrás del frente y se conecta al sistema de drenaje de gas con dispositivos de obturación. Otra posibilidad consiste en extender una tubería de drenaje de extremo abierto cerca de la línea de partida del frente a medida que este se retire.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce las concentraciones de metano en el extremo de retorno de un frente de tajo largo explotado en retirada. • Se reduce la cantidad de gas que entra en el sector. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiende a conllevar una captura y transmisión de mezclas de gases inflamables, creando un riesgo inaceptable. • Se necesita una gran capacidad de drenaje de metano a causa de la baja pureza del gas capturado, que no es eficiente. • Baja eficiencia de captura. • Bajo volumen de gas capturado.
<p>Posdrenaje desde labores transversales hasta el relleno del tajo largo (variante del método anterior)</p>	<p>Se desarrollan labores transversales desde una vía paralela junto al sector de explotación a fin de interceptar el relleno. El sistema de drenaje de gas se conecta a una tubería a través de un dispositivo de obturación en la labor transversal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • En determinados casos, puede reducir la necesidad de realizar perforaciones transversales para el drenaje de grisú. • Las actividades de drenaje de gas son independientes de las actividades de extracción de carbón. • Reduce las concentraciones de metano en el extremo de retorno del frente de tajo largo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede conllevar una captura y transmisión de mezclas de gases inflamables, creando un riesgo inaceptable. • Se necesita una gran capacidad de drenaje de metano a causa de la baja pureza del gas capturado. • Eficiencia de captura generalmente baja. • Solo se puede practicar cuando existe una galería adecuada a partir de la cual se puedan desarrollar labores transversales hasta el relleno. • Costo de las labores transversales adicionales.

Referencias

- Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos) (2004). *Methane Emissions from Abandoned Coal Mines in the United States: Emission Inventory Methodology and 1990-2002 Emission Estimates*. Washington, D.C. (Estados Unidos). Abril de 2004.
- Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos) (2006a). *Global Anthropogenic Emissions of Non-CO₂ Greenhouse Gases: 1990-2020. USEPA-430-R-06-003*. Washington, D.C., (Estados Unidos).
- Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos) (2006b). *Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases. USEPA-430-R-06-005*. Washington, D.C.: Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos).
- Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos) (2012). *Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2030. USEPA 430-S-12-002*. Washington, DC. (Estados Unidos). Diciembre de 2012. [www.USEPA.gov/climatechange/USEPAactivities/economics/nonco2projections.html](http://www USEPA.gov/climatechange/USEPAactivities/economics/nonco2projections.html).
- Asociación Mundial del Carbón. Septiembre de 2014. Londres (Reino Unido).
- Belle, B. (2016). *Underground Mine Ventilation Air Methane (VAM) Monitoring-An Australian Journey towards Achieving 'Accuracy'*. Anglo American Coal, Australia.
- Black, D., y Aziz, N. (2009). *Reducing Coal Mine GHG Emissions through Effective Gas Drainage and Utilisation*. Conferencia de Operadores de Carbón de 2009, Instituto Australiano de Minería y Metalurgia, Subdivisión de Illawarra, págs. 217 a 224.
- Coward, H. F. (1928). *Explosibility of atmospheres behind stoppings*. *Trans Inst Min Engs*, 77, págs. 94 a 115.
- Creedy, D. P. (1986). Methods for the Evaluation of Seam Gas Content From Measurements on Coal Samples. *Mining Science and Technology*, vol. 3, págs. 141 a 160. Amsterdam: Elsevier.
- Creedy, D. P. (2001). *Effective Design and Management of Firedamp Drainage. UK Health and Safety Executive, Contract Research Report 326/2001*, pág. 48, anexo 1, HSE Books.
- Creedy, D. P., Lunarzewski, L. (2001). *Gas Drainage Management System for Modern Coal Mines*. Séptimo Congreso Internacional sobre la Ventilación en las Minas. Cracovia (Polonia), 17 a 22 de junio.
- Creedy, D. P., Saghafi, A., y Lama, R. D. (abril de 1997). *Gas Control in Underground Coal Mines: IEA Coal Research*. Agencia Internacional de la Energía (IEA) CR/91, 120 págs. Londres: The Clean Coal Centre.
- Creedy, D. P., y Phillips, H. R. (julio de 1997). *Methane Layering in Bord-and-Pillar Workings. Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC) Final Report. Project COL 409*. Johannesburgo (Sudáfrica): Comité Asesor para la Investigación sobre la Seguridad en las Minas.
- Departamento de Asuntos Minerales y Energéticos (octubre de 1994). Guidelines for a Code of Practice for the Ventilating of Mechanical Miner Sections in Coal Mines in terms of Section 34(1) of the Minerals Act 1991. Segunda edición, ref. GME 16/2/1/20.
- Departamento de Recursos Minerales, Nueva Gales del Sur. (1995). Outburst Mining Guideline. Dirección de Inspección de Minas de Carbón y Subdivisión de Ingeniería, MDG núm. 1004.
- Diamond, W. P., y Levine, J. R. (1981). *Direct Method of Determination of the Gas Content of Coal: Procedures and Results. Report of Investigation 8515*. Pittsburgh, Pensilvania (Estados Unidos). Departamento del Interior de los Estados Unidos, Oficina de Minas.
- Diamond, W. P., y Schatzel, S. J. (1998). Measuring the Gas Content of Coal: A Review. *Int. Journ. of Coal Geology* 35, págs. 311 a 331. Amsterdam: Elsevier.

- ESMAP (julio de 2007). *A Strategy for Coal Bed Methane (CBM) and Coal Mine Methane (CMM) Development and Utilisation in China: Formal Report 326/07*. 109 págs. Washington, D.C.: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF)/ Programa de Asistencia para la Gestión en el Sector de la Energía del Banco Mundial.
- Gaskell, P. (1989). *A Study of Sub-Surface Strata Movement Associated with Longwall Mining*. Tesis doctoral. Universidad de Nottingham.
- IEA (2014). *Medium-Term Coal Market Report 2014*. París (Francia): Agencia Internacional de la Energía (IEA).
- IEA (2015a). *2015 Key World Energy Statistics*. París (Francia): Agencia Internacional de la Energía (IEA).
- IEA (2015b). *Medium-Term Coal Market Report 2015*. París (Francia): Agencia Internacional de la Energía (IEA). 18 de diciembre de 2015.
- Iniciativa Global de Metano (2015). Base de Datos Internacional de Proyectos de Metano de las Minas de Carbón. Iniciativa Global de Metano. Washington, D.C. (Estados Unidos). www.methanetomarkets.org.
- IPCC 2014: *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R. K. Pachauri y L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra (Suiza), 151 págs. (OIT).
- IPCC (2007): *Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R. K., y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. Ginebra (Suiza): Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).
- Janas, H. F., y Opahle, M. (1986). Improvement of Gas Content Determination. *Glückauf-Forschh* 47, págs. 83 a 89. Essen (Alemania).
- Junta de Recursos del Aire de California (2014). *Compliance Offset Protocol Mine Methane Capture Projects Capturing and Destroying Methane From U.S. Coal and Trona Mines*. Aprobado el 25 de abril de 2014. Sacramento, California (Estados Unidos).
- Junta Ejecutiva del MDL (2006). *Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane*. 28ª reunión. Bonn (Alemania): Junta Ejecutiva del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL).
- Kissell, F. N. (2006). *Handbook for Methane Control in Mining*. Pittsburgh, Pensilvania (Estados Unidos): Laboratorio de Investigación de Pittsburgh, Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional.
- Kissell, F. N., y otros (1973). *Direct Method of Determining Methane Content of Coalbeds for Ventilation Design*. Informe de investigación RI7767. Oficina de Minas de los Estados Unidos.
- Lama, R. D. (1995). Safe gas content threshold value for safety against outbursts in the mining of the Bulli seam. Int. Symp. cum Workshop on Management & Control of High Gas Emission & Outbursts Wollongong, 20 a 24 de marzo de 1995.
- Landman, G v R. (1992). *Ignition and initiation of coal mine explosions*. Tesis doctoral, Universidad de Witwatersrand, pág. 252.
- Marshall, James S., y otros (2011), "Surface Mine Methane Emissions and Project Opportunities", presentación de PowerPoint en la Reunión para Todos los Asociados de la Iniciativa Global de Metano, 12 a 14 de octubre de 2011, Park Inn, Cracovia (Polonia). Consultado en: https://www.globalmethane.org/documents/events_coal_101411_tech_marshall.pdf
- MSHA (2009). *Injury experience in coal mining*, MSHA IR1341. Washington, D.C.: Departamento de Trabajo de los Estados Unidos, Administración de Seguridad y Salud en las Minas (MSHA).
- Moreby, R. (2009). Comunicaciones privadas.
- OIT (2006). *Repertorio de recomendaciones prácticas sobre seguridad y salud en las minas de carbón subterráneas*. Ginebra (Suiza). Organización Internacional del Trabajo.

- Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO).
- SAWS (2009). Administración Estatal China para la Seguridad de los Trabajadores.
- Shi Su y otros (enero de 2006). *Development of Two Case Studies on Mine Methane Capture and Utilisation in China*.
- Universidad de Alberta. (2004). *Flare Research Project: Final Report 1996-2004*. Kostiuk, L., Johnson, M., y Thomas, G. Edmonton, Alberta (Canadá): Universidad de Alberta.
- von Schoenfeldt, H. (enero de 2008). "Advanced CMM and CBM Extraction Technologies." Conferencia sobre MCC. Singapur. Asociación Mundial del Carbón (2014). *Coal Facts 2014*.

Recursos adicionales

- Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos) (enero de 2008). *Upgrading Drained Coal Mine Methane to Pipeline Quality: A Report on the Commercial Status of System Suppliers*. USEPA-430-R-08-004. Washington, D.C.: Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos).
- Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos) (julio de 2003). *Assessment of the Worldwide Market Potential for Oxidizing Coal Mine Ventilation Air Methane*. USEPA-430-R-03-002. Washington, D.C.: Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos). www.USEPA.gov/cmop/resources/index.html.
- Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos) (julio de 2009). *Coal Mine Methane Finance Guide*. USEPA-400-D-09-001. Washington, D.C.: Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos).
- Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos) (julio de 2009). *Coal Mine Methane Recovery: A Primer*. USEPA-430-R-09-013. Washington, D.C.: Agencia de Protección Ambiental (Estados Unidos).
- Boxho, J., Stassen, P., Mücke, G., Noack, K., Jeger, C., Lescher, L., Browning, E., Dunmore, R., y Morris, I. (1980). *Firedamp Drainage Handbook for the Coalmining Industry in the European Community*, 415 págs. Dirección de Asuntos relativos al Carbón de la Comisión de las Comunidades Europeas. Essen: Verlag Glückauf GmbH.
- Brandt, J., y Kunz, E. (2008). *Gas Drainage in High Efficiency Workings in German Coal Mines*. Presentación en el 21^{er} Congreso Mundial de Minería, reunión sobre "Tratamiento del metano", págs. 41 a 50. Cracovia.
- Creedy, D.P. (1996). *Methane Prediction in Collieries. Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC) Final Report, Project COL 303*. Johannesburgo (Sudáfrica): Comité Asesor para la Investigación sobre la Seguridad en las Minas.
- ESMAP (diciembre de 2008). *Economically, socially and environmentally sustainable coal mining sector in China: World Bank Report No. 47131*, 258 págs. Washington, D.C.: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF)/Programa de Asistencia para la Gestión en el Sector de la Energía del Banco Mundial.
- Hinderfeld, G. (1985). State and Perspectives of Gas Drainage. *Bergbau* 2, 7 págs. Essen (Alemania).
- Kravits, S. J, y Li, J. (marzo de 1995). Innovative in-mine gas recovery techniques implemented by Resource Enterprises. En: *International Symposium-Cum-Workshop on Management Control of High Gas Emission and Outbursts*, págs. 523 a 532. Wollongong, Nueva Gales del Sur (Australia).
- Lama, R. D., y Bodziony, J. (1998). Management of outburst in underground coal mines. *Int. Journ. of Coal Geology* 35, págs. 83 a 115, Amsterdam: Elsevier.
- Lunarzewski, L., y Creedy, D. P. (2006). *Australian Decommissioned Mines Gas Prediction*. ACARP 2005 Project C14080 Newcastle (Australia), 18 de septiembre.
- Lunarzewski, L. W. (1998). Gas Emission Prediction and Recovery in Underground Coal Mines. *Int. Journ. of Coal Geology* 35, págs. 117 a 145, Amsterdam: Elsevier.
- Mine ventilation handbook, Mine Ventilation Society of South Africa.
- Moore, S., Freund, P., Riemer, P., y Smith, A. (junio de 1998). *Abatement of Methane Emissions*. París (Francia): Programa de I+D sobre los gases de efecto invernadero de la Agencia Internacional de la Energía (IEA).
- Mutmansky, J. M., y Thakur, P. C. (1999). *Guidebook on Coalbed Methane Drainage for Underground Coal Mines*, 46 págs.
- Noack, K. (1998). Control of gas emissions in underground coal mines. *Int. Journ. Of Coal Geology* 35, págs. 57 a 82. Amsterdam: Elsevier.
- Schlotte, W., y Brandt, J. (2003). *50 Years of Coal Research – Gas Emissions, Ventilation and Climate*. Glückauf 139, págs. 402 a 408. Essen (Alemania).

- Sdunowski, R., y Brandt, J. (2007). Optimizing the Gas Drainage in High Performance Longwalls. *Glückauf* 143, págs. 528 a 534. Essen (Alemania).
- Skiba, J. (noviembre de 2009). Instituto Central de Minería de Katowice. Comunicación personal.
- Somers, M. J., y Schultz, H. L. (2008). *Thermal Oxidation of Coal Mine Ventilation Air Methane*. 12º Simposio de América del Norte sobre Ventilación en las Minas, 2008, Reno, Nevada (Estados Unidos): Wallace.
- Thakur, P. C. (1997). Methane Drainage from Gassy Mines – A Global Review. *Proc. of the 6th Int. Mine Vent. Congr.* págs. 415 a 422. Pittsburgh, Pensilvania (Estados Unidos).
- Xu, T., Tang, C. A., Yang, T. H., Zhu, W. C., y Liu, J. (2006). *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43 (2006), págs. 905 a 919.

