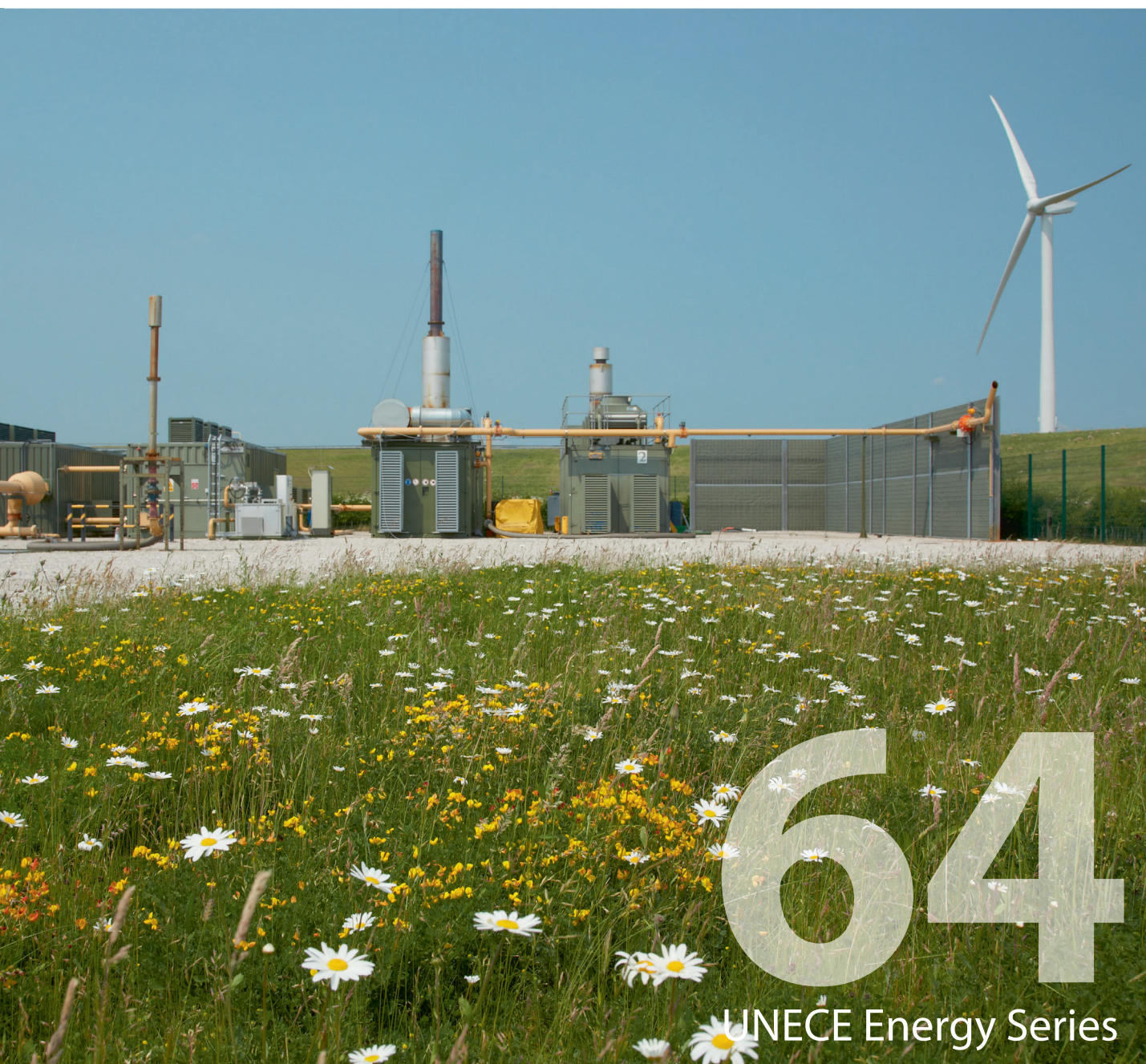


CEPE

Guía de las mejores prácticas para una recuperación y un uso eficaces del metano de las minas de carbón abandonadas



NACIONES UNIDAS

COMISIÓN ECONÓMICA PARA EUROPA

Guía de las mejores prácticas para una recuperación y un uso eficaces del metano de las minas de carbón abandonadas

SERIE CEPE ENERGÍA núm. 64



NACIONES UNIDAS

GINEBRA, 2020

© Naciones Unidas, 2019
Reservados todos los derechos en todo el mundo

Las solicitudes de autorización para reproducir pasajes o para fotocopiar deben dirigirse al Copyright Clearance Center, copyright.com.

Todas las demás consultas sobre derechos y licencias, incluidos los derechos subsidiarios, deben dirigirse a: Publicaciones de las Naciones Unidas, 405 East 42nd St, S-09FW001, Nueva York, NY 10017, Estados Unidos de América. Correo electrónico: permissions@un.org; sitio web: <https://shop.un.org>.

Los resultados, interpretaciones y conclusiones presentados en este documento son los de los autores y no reflejan necesariamente las opiniones de las Naciones Unidas, sus funcionarios o sus Estados Miembros.

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos en los mapas 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.

Esta obra se publica en chino, español, inglés y ruso.

Publicación de las Naciones Unidas editada por la Comisión Económica para Europa.

Créditos fotográficos: Portada: INFINIS, sitio de Blisthorpe;
pág. 11, figura 2.4, D. Creedy, K. Garner, Taller sobre Extracción y Uso del Metano de las Minas de Carbón Abandonadas, Transferencia de tecnología del carbón más limpia entre el Reino Unido y China, Departamento de Comercio e Industria del Reino Unido, 21 de mayo de 2002, Beijing;
pág. 47, figura 9.2, Mingas-Power GmbH.;
pág. 50, figura 9.4, N. Butler, HEL-Ease Ltd.;
pág. 51, figura 9.5, N. Butler, HEL-Ease Ltd.;
pág. 52, figura 9.6, N. Butler, HEL-Ease Ltd.;
pág. 59, figura 9.9, M. Coté, Coal Mine Methane in Colorado Market Research Report 2016.

ECE/ENERGY/128

eISBN: 978-92-1-004493-6
ISSN: 2078-5887
eISSN: 2412-0944

Prefacio

El carbón sigue siendo un elemento central en la canasta energética de muchos países. Las reservas de carbón se agotan inevitablemente a medida que avanza la extracción del recurso y las minas se cierran y abandonan. Las minas abandonadas siguen emitiendo metano durante muchos años después del cierre, pero en numerosas regiones productoras de carbón estas emisiones aún no se controlan ni contabilizan.

El metano es un potente gas de efecto invernadero (GEI), e investigaciones recientes han demostrado que el impacto del metano en la atmósfera es mucho más extenso de lo que se pensaba anteriormente. Las minas de carbón son la cuarta fuente más importante de emisiones antropógenas de metano, después de los sectores del petróleo y el gas, los vertederos y las industrias ganaderas. Los avances tecnológicos han permitido reducir significativamente las emisiones de metano en las minas activas con mayores emanaciones de gas grisú. Las minas cerradas, por su parte, pueden ofrecer una oportunidad pequeña, pero importante, de explotar un recurso energético limpio, conocido como metano de las minas abandonadas (MMA), que es posible extraer y utilizar. La captura y el uso del MMA reportan numerosos beneficios, como la mejora de la seguridad, la calidad del aire y la salud; el suministro de energía; y un mejor desempeño ambiental. La tecnología para recuperar el metano de las minas de carbón abandonadas ya existe.

El presente documento tiene por objeto dar a conocer mejor las oportunidades y los peligros que plantea el MMA, ofreciendo una orientación accesible y de alto nivel a los altos cargos de las empresas, los Gobiernos y el mundo de las finanzas, que desempeñan un papel fundamental en la adopción de decisiones sobre la aplicación de las mejores prácticas. Los principios y normas recomendados para la captura y el uso del metano de las minas de carbón (MMC) se expusieron en la *Guía de mejores prácticas para un drenaje y uso eficaz del metano en las minas de carbón*. El presente documento complementa esa orientación y completa el ciclo de la minería del carbón al ocuparse de las emisiones de metano que se siguen produciendo después del cese de la minería y el cierre de las minas.

Esta guía de las mejores prácticas relativas al MMA no sustituye ni deja sin efecto ninguna ley o reglamento u otro instrumento jurídicamente vinculante, nacional o internacional. Un marco jurídico claro y políticas propicias pueden ayudar a llevar el metano al mercado. Los principios aquí expuestos tienen por objeto proporcionar orientación que complemente los marcos jurídicos y reglamentarios existentes, y apoyar el desarrollo de proyectos posteriores a la extracción minera para reducir las emisiones globales atribuibles al ciclo de vida de la minería del carbón optimizando la recuperación y el uso del metano que, de otro modo, se liberaría a la atmósfera. Para comprender mejor el posible crecimiento de estas emisiones, instamos a los Estados miembros de la CEPE y a los miembros de la Iniciativa Global del Metano a que examinen cómo determinar con más precisión la magnitud y la tasa de crecimiento de esta fuente de emisiones, incluyendo las emisiones de metano de las minas subterráneas de carbón abandonadas en sus inventarios nacionales.

Guiados por el Grupo de Expertos sobre el Metano de las Minas de Carbón, países como Polonia y China han establecido Centros Internacionales de Excelencia sobre el MMC para promover la adopción de las mejores prácticas en la extracción y el uso de este gas. Estos centros están en condiciones de difundir las mejores prácticas relativas al MMA en los países en que están radicados. En los demás países, esperamos que organismos u organizaciones similares con responsabilidades en la gestión de los cierres de minas y del MMA encuentren en esta guía una ayuda práctica y útil al explorar las opciones para el aprovechamiento de este recurso.

Olga Algayerova
Secretaría Ejecutiva
Comisión Económica para Europa

AGRADECIMIENTOS

Organizaciones patrocinadoras

La **Comisión Económica para Europa** (CEPE) es una de las cinco comisiones regionales de las Naciones Unidas que ofrecen un foro en el que 56 países de América del Norte, Europa Occidental, Central y Oriental y Asia Central se congregan 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 las políticas, la elaboración de convenciones, reglamentos y normas y la prestación de asistencia técnica. Los temas relacionados con la energía, como la minería del carbón y el metano de las minas de carbón, son examinados por los Estados miembros en el ámbito del Comité de Energía Sostenible. El Grupo de Expertos sobre el Metano de las Minas de Carbón se reúne periódicamente como órgano subsidiario de dicho Comité, para examinar distintos temas y promover las mejores prácticas en la gestión, captura y utilización del gas metano liberado durante el ciclo de vida de la minería del carbón (www.unece.org/energy/se/cmm.html).

La **Iniciativa Global del Metano** (GMI) es una asociación internacional público-privada que trabaja con organismos gubernamentales de todo el mundo para facilitar el desarrollo de proyectos en cinco importantes sectores generadores de metano: las actividades agrícolas, la minería del carbón, los residuos sólidos municipales, los sistemas de petróleo y gas, y las aguas residuales. Lanzada en 2004, la GMI trabaja de consuno con otros acuerdos internacionales, entre ellos la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). A diferencia de otros GEI, el metano, que es el principal componente del gas natural, puede ser convertido en energía utilizable. Por lo tanto, la reducción de las emisiones de metano es una forma eficaz, en relación con el costo, de reducir los GEI y aumentar la seguridad energética, potenciar el crecimiento económico, mejorar la calidad del aire y aumentar la seguridad de los trabajadores. En la GMI participan 44 países asociados y la Comisión Europea, que representan alrededor del 70 % de las emisiones antropógenas de metano del mundo. Con respecto al metano de las minas de carbón, el Subcomité del 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, viajes de estudio e iniciativas de fomento de la capacidad (www.globalmethane.org).

Estructura

La labor de redacción fue respaldada con apoyo financiero, técnico y administrativo por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, a través de la GMI.

El autor principal de esta guía es David Creedy, de Sindicatum Sustainable Resources, que recibió contribuciones de Raymond C. Pilcher (Raven Ridge Resources) y Neil Butler (HEL-East Ltd).

Aportaron conocimientos, experiencia y estudios de casos:

- Clemens Backhaus, de A-TEC Anlagentechnik GmbH.
- Michael Coté, de Ruby Canyon Engineering.
- Janusz Jureczka y Jerzy Hadro, del Instituto Geológico de Polonia, con un estudio de caso presentado como contribución del Centro Internacional de Excelencia sobre el Metano de las Minas de Carbón en Polonia.
- James Marshall, de Raven Ridge Resources.

Bajo la dirección del Grupo de Expertos sobre el Metano de las Minas de Carbón de la CEPE, las siguientes personas proporcionaron orientación técnica y se encargaron de la revisión editorial en la preparación de este documento:

- Michal Drabik, de la Comisión Económica para Europa.
- Raymond C. Pilcher, de Raven Ridge Resources.
- Volha Roshchanka, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos/Iniciativa Global del Metano.
- Clark Talkington, de Advanced Resources International.

Las organizaciones patrocinadoras desean agradecer también las contribuciones editoriales de Meredydd Evans y Nazar Kholod, del Pacific Northwest National Laboratory.

La presente orientación se basa asimismo en la labor realizada del 1 de mayo de 2002 al 30 de abril de 2003 por Wardell Armstrong y Future Energy Solutions del Reino Unido y por el China Coal Information Institute para crear un centro de asesoramiento sobre los proyectos referentes al MMA en China. La labor contó con apoyo financiero del Ministerio de Relaciones Exteriores y Asuntos del Commonwealth del Reino Unido, con cargo a su Fondo para el Reto del Cambio Climático.

Índice

PREFACIO.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
SIGLAS, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	X
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	XI
RESUMEN.....	XIII
1. Introducción	1
Mensajes clave	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Información general sobre el metano de las minas abandonadas.....	1
1.3 Extracción del gas MMA	3
1.4 Emisiones y explotación del MMA en algunos países.....	4
2. Fuente de las emisiones de MMA	7
Mensajes clave	7
2.1 Migración del MMA.....	7
2.2 Composición de los gases de las minas abandonadas	11
3. Cuantificación de los recursos de MMA y predicción de los caudales de gas.....	15
Mensajes clave	15
3.1 Recursos de MMA	15
3.2 Reservas de MMA.....	15
3.3 Predicción del caudal de MMA.....	17
4. Evaluación de la viabilidad de la extracción y el uso del MMA.....	19
Mensajes clave	19
4.1 Factores de interés al evaluar la viabilidad de los proyectos de explotación del MMA	19
4.2 Estrategias de producción de gas.....	20
4.3 Opciones de utilización del MMA	21
5. Optimización de la producción de MMA.....	25
Mensajes clave	25
5.1 Control de la entrada de aire	25
5.2 Control de las aguas superficiales y subterráneas.....	26

6.	Desarrollo de proyectos de explotación del MMA.....	29
	Mensajes clave	29
6.1	Examen técnico	29
6.2	Sondeo del reservorio	30
6.3	Estudio de previabilidad	31
6.4	Estudio de viabilidad completo.....	31
6.5	Financiación de los proyectos de explotación del MMA.....	32
6.6	Diseño y ejecución de los proyectos de explotación del MMA.....	33
6.6.1	Principales parámetros del diseño y la fase operativa	33
6.6.2	Criterios de diseño específicos	34
6.6.3	Diseño de la protección contra descargas eléctricas.....	34
6.6.4	Placas cortafuegos	35
6.6.5	Análisis del gas y de su impacto en la seguridad, la vigilancia y la medición.....	35
6.6.6	Diseño de la planta de extracción	35
6.6.7	Diseño de la planta de destrucción o utilización	36
6.6.8	Riesgos comerciales de la planta de utilización, y evaluación del recurso.....	36
6.6.9	Explotación y mantenimiento.....	36
6.6.10	Vigilancia a distancia	37
7.	Mecanismos de política y reglamentación para facilitar y promover la extracción y el uso del MMA.....	39
	Mensajes clave	39
7.1	Función de la gestión de minas en la preparación para su cierre	39
7.2	Propiedad del gas	39
7.3	Responsabilidades por el gas fugitivo	40
7.4	Acceso a la infraestructura	40
7.5	Incentivos financieros y fiscales.....	41
7.6	Finanzas del carbono.....	41
8.	Resumen y conclusiones	43
9.	Estudios de casos.....	45
	Estudio de caso 1: Alemania – Yacimiento de carbón del Ruhr, Renania del Norte-Westfalia.....	45
	Estudio de caso 2: Polonia – Cuenca de Alta Silesia	48
	Morcinek – Mina de Kaczyce	48
	Mina de Żory.....	48
	Estudio de caso 3: Reino Unido – Utilización del metano de las minas abandonadas en el Reino Unido.....	49
	Mina de Stillingfleet, Grupo Selby	50
	Mina de carbón de Harworth	51

Estudio de caso 4: Estados Unidos – Valle de North Fork, Colorado	53
Estudio de caso 5: Estados Unidos – Proyecto sobre el Metano de Minas Abandonadas de la Zona Autorizada de Elk Creek.....	57
Apéndices	61
Apéndice 1: Regímenes de pruebas para la caracterización de los reservorios de MMA.....	61
Apéndice 2: Elementos fundamentales de un estudio de previabilidad de la explotación del MMA.....	62
Apéndice 3: Opciones de ingeniería para el tratamiento de las bocaminas al cierre de una mina	64
Apéndice 4: Equipo y servicios necesarios para la construcción y la fase operativa de los proyectos de explotación del MMA.....	65
Referencias	67

Lista de cuadros

Cuadro 1.1	Principales países productores de MMA	5
Cuadro 2.1	Muestras de la composición del gas de las minas abandonadas en la cuenca carbonífera de Illinois (Estados Unidos de América)	12
Cuadro 4.1	Características generales de algunas opciones de uso final del MMA	22
Cuadro 7.1	Propiedad del metano	40
Cuadro 9.1	Selección de proyectos de explotación del MMA en el Valle del Ruhr	46
Cuadro 9.2	Minas de carbón subterráneas del Valle de North Fork.....	54

Lista de figuras

Figura 1.1	Producción anual y acumulada de gas de las minas de Avion, Divion y Desirée	5
Figura 2.1	Posibles vías de migración del metano después del cese de la extracción minera	8
Figura 2.2	Monitoreo del gas y la presión en una mina cerrada con sellado imperfecto.....	9
Figura 2.3	Gráfico de la presión del gas en función del tiempo: la disminución a) indica que el agua no está llenando las excavaciones de la mina, mientras que el aumento b) revela el llenado de las excavaciones por el agua.....	10
Figura 2.4	Conductos de ventilación del gas en un pozo de mina abandonado (Reino Unido)	10
Figura 3.1	Modelo conceptual de un reservorio de MMA	16
Figura 3.2	Curva de declinación de las emisiones de MMA	17
Figura 3.3	Diferencia entre las tasas de disminución de las emisiones potenciales de las minas secas e inundadas.....	18
Figura 4.1	Proyectos de explotación del MMA a nivel mundial	22
Figura 9.1	Localización del distrito carbonífero del Ruhr.....	45
Figura 9.2	Central eléctrica de Lohberg.....	47
Figura 9.3	Gráfico de la producción de electricidad y la concentración de metano de Lohberg	47
Figura 9.4	Chimenea de ventilación en la mina de Stillingflee.....	50
Figura 9.5	Planta de extracción del gas de la mina de Stillingfleet	50
Figura 9.6	Motores de gas de la mina de carbón de Harworth	51
Figura 9.7	Previsión de las emisiones de la mina de Harworth	52
Figura 9.8	Mapa de las minas activas y abandonadas del Valle de North Fork	55
Figura 9.9	Proyecto de Generación de Energía Eléctrica con MMA de Elk Creek.....	57

Siglas, abreviaturas y símbolos

CARB	California Air Resources Board
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
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
GEI	gas de efecto invernadero
GMI	Iniciativa Global del Metano
GNC	gas natural comprimido
GNL	gas natural licuado
kWh	kilovatios-hora
m	metro
m³/min	metros cúbicos por minuto
m³/t	metros cúbicos de gas por tonelada métrica de carbón
mbarA	milibares absolutos
Mcf/d	millones de pies cúbicos por día
MDL	mecanismo para un desarrollo limpio
MMA	metano de las minas abandonadas
MMC	metano de las minas de carbón
MMm³	millones de metros cúbicos
Mt	millones de toneladas (métricas)
MW_e	megavatios de capacidad eléctrica
MWh	megavatios-hora
Nm³/h	metros cúbicos por hora a condiciones de temperatura y presión estándar
PCA	potencial de calentamiento atmosférico
RCE	reducciones certificadas de las emisiones
t	tonelada (métrica), equivalente a 1,102 toneladas cortas (Estados Unidos)
USBLM	Oficina de Gestión de Tierras de los Estados Unidos

Glosario de términos

En el sector del carbón y el gas grisú, sigue habiendo confusión en los términos y abreviaturas que se utilizan en distintas jurisdicciones y dentro de cada una de ellas. Además de los términos aquí enumerados, la CEPE ha preparado un amplio glosario de términos y definiciones relacionados con el metano de las minas de carbón, que indica el uso de la terminología en las diferentes regiones.

Ese glosario puede consultarse (en inglés) en la dirección: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/cmm4/ECE.ENERGY.GE.4.2008.3_e.pdf.

Metano de minas abandonadas (MMA): gas restante y, en algunos casos, gas nuevo generado por microbios, que se encuentra en las minas de carbón abandonadas, en las excavaciones, los mantos de carbón y otros estratos portadores de gas que han sido perturbados o interceptados por las operaciones mineras.

Recurso de MMA: cantidad total de MMA restante en las excavaciones, los mantos de carbón y otros estratos portadores de gas de las zonas descomprimidas como consecuencia de las operaciones mineras, junto con el biogás que pueda haberse generado más recientemente.

Reservas de MMA: cantidad del recurso que es posible extraer, teniendo en cuenta la recuperación del agua subterránea, a la máxima presión de succión aplicable (de 50 kPa a 70 kPa en una mina herméticamente cerrada).

Resumen

El cierre de las minas de carbón y, por consiguiente, las emisiones de metano de las minas abandonadas (MMA), seguirán siendo temas pertinentes e importantes en el futuro previsible, a medida que los países vayan explotando y agotando sus reservas de carbón a un ritmo más rápido. Esto se aplica a muchos países desarrollados en que la producción de carbón va en disminución y las minas están cerrando, pero también a algunas economías desarrolladas y en desarrollo en que el carbón seguirá desempeñando un papel importante en la canasta energética, y las minas que cierran son sustituidas por otras nuevas. Por lo tanto, el total de las emisiones de las minas cerradas y en proceso de cierre podría ser sustancial, y es probable que vaya en aumento. Las previsiones de las emisiones mundiales de metano de las minas de carbón indican que el MMA representaba el 17 % del total de las emisiones de metano de las minas en 2010 y que esta proporción podría llegar al 24 % en 2050 (Kholod *et al.*, 2018).

El cese de la minería del carbón debido al agotamiento de las reservas comercialmente viables no pone fin a la emisión de gases. Es importante evaluar la magnitud del MMA existente y las posibles tasas de emisión, debido a los riesgos que entraña la emanación superficial no controlada, las preocupaciones por las emisiones de gases de efecto invernadero y las oportunidades de utilización. Los nuevos métodos de evaluación de las emisiones, desde el empleo de la teleobservación hasta la medición de las concentraciones de metano en la atmósfera y la localización de las fuentes, incluidas las estimaciones basadas en la producción histórica de carbón, pueden ayudar a los países a determinar e inventariar de manera más completa los recursos de metano. Las estimaciones más precisas del volumen acumulado de las emisiones deberían prestar atención a esta fuente potencialmente importante, y podrían impulsar también la creación de marcos de política favorables, que incentiven la inversión.

Los riesgos de emisión de gases en la superficie son motivo de especial preocupación en las zonas de minería del carbón de larga data y muy pobladas. El riesgo puede mitigarse en muchos casos mediante la ventilación pasiva. Cuando se detectan grandes cantidades de MMA, puede haber posibilidades de extracción activa del gas para su uso como recurso de energía limpia. La extracción activa del gas también ayudará a reducir al mínimo los riesgos de emisión en la superficie.

Una vez que la explotación cesa, el bombeo del agua subterránea, aplicado para evitar que la mina activa se inunde, suele detenerse, con el consiguiente anegamiento de las labores mineras. Esto también puede llevar a una merma progresiva del recurso accesible de MMA, y reducir la conectividad entre un punto de producción y los reservorios del gas. La tasa de inundación variará según la hidrogeología, la extensión y la profundidad de las labores. En algunos casos, puede ocurrir que se mantenga el bombeo del agua subterránea para proteger las labores mineras más profundas de los riesgos de inundación.

Por lo tanto, durante el cierre de la mina deberían examinarse los posibles efectos ambientales, y diseñarse y aplicarse medidas de ingeniería adecuadas a fin de reducir al mínimo los riesgos para el medio ambiente. Estas medidas, junto con una estrategia de vigilancia después del cierre, permiten una gestión eficaz de las emisiones y los riesgos posteriores al cierre de las minas.

El potencial de extracción y explotación del MMA puede evaluarse al mismo tiempo que los riesgos para la seguridad y el medio ambiente, junto con la necesidad de medidas de control apropiadas. La presencia de metano en una mina abandonada no es, por sí sola, una razón suficiente que justifique el desarrollo de un programa de extracción y utilización del MMA. El primer paso ha de ser un estudio de previabilidad.

Existen métodos para estimar los recursos y las reservas de MMA. Los métodos empleados deben basarse en principios físicos sólidos, utilizar fuentes de datos rastreables, tener en cuenta las incertidumbres y los posibles riesgos e indicar explícitamente todos los supuestos empleados.

Las incertidumbres en las estimaciones son inevitables debido a la dificultad de obtener datos exactos sobre la intrusión de agua en las labores abandonadas y los posibles problemas de entrada de aire al aumentar la presión de succión. Las reservas deben rebajarse en función de esa incertidumbre, dando una explicación motivada del factor de descuento aplicado.

No todas las minas abandonadas son adecuadas para proyectos de extracción del MMA. Deben existir condiciones mineras y geológicas favorables, pero el requisito más decisivo es la existencia de un usuario final adecuado que genere la demanda del gas. Sin un mercado para la energía basada en el MMA, es poco probable que pueda establecerse un proyecto viable y sostenible. Sin embargo, en algunos países la destrucción del gas mediante la quema en antorcha es aceptable como proyecto de compensación de las emisiones de carbono. La experiencia ha demostrado que los esfuerzos realizados en las etapas de previabilidad y viabilidad de un proyecto pueden reducir considerablemente tanto los problemas operacionales como los costos futuros.

1. Introducción

Mensajes clave

- El cierre de minas forma parte del ciclo de desarrollo de los recursos naturales tanto en los países con una producción de carbón en descenso como en aquellos que tienen una producción de carbón sostenida o en aumento.
- Las emisiones de metano de las minas abandonadas (MMA) son un subproducto inevitable del ciclo de la minería del carbón y pueden persistir durante decenios.
- Las emisiones fugitivas de gas de las minas abandonadas pueden causar peligros en la superficie si no se gestionan y controlan adecuadamente.
- El MMA restante en el carbón no explotado de las zonas que se han distendido a causa de la anterior extracción por tajo largo puede representar, en algunos casos, un importante recurso de energía limpia que es posible explotar.
- El metano es un potente gas de efecto invernadero (GEI), con un potencial de calentamiento atmosférico (PCA) de entre 28 y 34 veces el del dióxido de carbono en un período de 100 años, pero significativamente más alto, de 84, en un período de 10 años, que se aproxima a su tiempo de residencia en la atmósfera (12 años).
- La recuperación y el uso del MMA pueden reportar también importantes beneficios socioeconómicos, como el desarrollo tecnológico y la creación de empleo.
- La cantidad de MMA que es posible extraer depende de varios factores, entre ellos el volumen de carbón intacto en los estratos perturbados por la minería, el contenido de gas residual del carbón no extraído y la tasa de inundación de las labores.
- Incluso si las condiciones geológicas y tecnológicas son favorables, la falta de un marco regulatorio propicio puede hacer que un proyecto sea poco atractivo o completamente inviable.

1.1 Objetivos

Esta orientación tiene por objeto ayudar a los explotadores de minas, los promotores de recursos de gas, los órganos reguladores gubernamentales, las autoridades que conceden las licencias para la extracción de petróleo y gas y los organismos de reordenación, así como a los encargados de formular las políticas, a tener en cuenta los recursos de metano, indicando y dando a conocer mejor los peligros que pueden derivarse de la emanación continua de metano tras el cierre y abandono de las minas.

Los beneficios secundarios importantes de la extracción y el uso del MMA son la reducción considerable del riesgo de emisiones incontroladas en la superficie, el aprovechamiento de un recurso de gas que de otro modo se desperdiciaría y la mitigación de las emisiones de GEI.

Los proyectos de extracción y uso del MMA también ayudan a cumplir los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas en relación con una energía asequible y limpia y con la acción para hacer frente al clima.

1.2 Información general sobre el metano de las minas abandonadas

El MMA es el gas restante, después del cierre de una mina de carbón, en las capas portadoras de gas que han sido perturbadas por la minería, en particular por la extracción de tajo largo, debido a la alteración de grandes volúmenes de estratos y de carbón. En algunos casos, puede haber también

metano generado por actividad microbiana reciente. La fractura de los estratos en torno a las minas de carbón y la naturaleza de los materiales superficiales depositados sobre la roca madre dificultan a menudo el sellado de los pozos y galerías abandonados y pueden facilitar las fugas. El resultado es a veces la generación de emisiones fugitivas, que representan un peligro público, una emisión de GEI y, posiblemente, un recurso energético perdido. Por ejemplo, el metano que migra a estructuras cerradas plantea un peligro de explosión, y el metano emitido a la atmósfera tiene un alto potencial de calentamiento atmosférico (PCA), entre 28 y 34 veces superior al del CO₂ (IPCC, 2014) en un período de 100 años, y contribuye considerablemente al cambio climático¹. Si se considera el horizonte más corto de 10 años, similar al tiempo de residencia del metano en la atmósfera (12 años), el PCA de este gas aumenta a 84 veces el del CO₂, lo que amplifica los beneficios de la recuperación y el uso del metano para la mitigación del cambio climático. Además de los peligros de la emisión de gases y las contribuciones al cambio climático, el cierre de una mina de carbón puede dejar problemas de inestabilidad de la superficie y de contaminación de las aguas.

Los imperativos del cambio climático, otros objetivos ambientales y la competencia ejercida por las energías renovables y el gas natural están reduciendo la dependencia del carbón como fuente de energía. Muchos de los principales países desarrollados industrializados están experimentando una importante disminución de la producción de carbón y están cerrando minas. Sin embargo, incluso en los países —desarrollados y en desarrollo— que tienen industrias del carbón activas, el cierre de minas forma parte del ciclo de desarrollo de los recursos naturales. Los extensos programas de cierre de minas de carbón pueden reducir la disponibilidad de carbón, pero el potencial de emisión de metano podría persistir durante decenios (con los volúmenes más altos y la mayor parte del valor comercial concentrados en los primeros diez años). El cierre de las minas de carbón y, por consiguiente, las emisiones de MMA, seguirán siendo temas pertinentes e importantes en el futuro previsible. Por lo tanto, el total de las emisiones de las minas cerradas y en proceso de cierre podría ser sustancial, y es probable que vaya en aumento. Las previsiones de las emisiones mundiales de metano de las minas de carbón indican que el MMA representaba el 17 % del total de las emisiones de metano de las minas en 2010 y que esta proporción podría llegar al 24 % en 2050 (Kholod *et al.*, 2018).

Los países han desplegado esfuerzos considerables por alentar la captura y el uso del gas en las minas de carbón activas, pero han prestado menos atención a la reducción de las emisiones y el aprovechamiento del metano de las minas abandonadas. Además de mitigar el cambio climático, la recuperación y el uso del MMA pueden reportar importantes beneficios a la sociedad. En muchos casos, los grandes cierres de minas de carbón generan problemas económicos y sociales graves a nivel regional. La mayoría de los países desarrollados han promulgado normas sobre el cierre de minas y la responsabilidad posterior al cierre², pero muchas economías en desarrollo tienen pocas o ninguna disposición financiera y reglamentaria para la determinación de las partes responsables y la gestión de las obligaciones posteriores al cierre. La recuperación y el uso del MMA pueden crear nuevos puestos de trabajo, haciendo una contribución relativamente pequeña, pero aun así positiva. En los lugares en que los recursos de MMA son abundantes, puede ser conveniente desarrollar parques industriales, ya que el combustible limpio y posiblemente de bajo costo será atractivo para las empresas comerciales.

Factores geológicos, tecnológicos y de mercado influyen directamente en el éxito de los proyectos de explotación del MMA. Además, el entorno reglamentario puede ser un factor decisivo al estudiar la posibilidad de explotar este recurso. Incluso si las condiciones geológicas y tecnológicas son favorables,

¹ El PCA de 28, que prescinde de la retroalimentación del clima en el ciclo del carbono, es el más frecuentemente citado para el metano. El PCA de 34 tiene en cuenta la retroalimentación del clima en el ciclo del carbono, es decir, los efectos indirectos de los cambios en el almacenamiento del carbono causados por los cambios del clima (véase IPCC, 2014).

² Administración de Seguridad y Salud en las Minas de los Estados Unidos, título 30, Código de Reglamentos Federales, núm. 751204; Reglamento de Salud y Seguridad en el Trabajo (Minas y Explotaciones Petrolíferas) de Nueva Gales del Sur, 2014; y Reglamento de Seguridad y Salud en las Minas de Carbón de Queensland, 2017.

la falta de un marco reglamentario propicio puede hacer que el proyecto sea poco atractivo o completamente inviable. Los factores reglamentarios que hay que tener en cuenta son los reglamentos de seguridad de las minas, el proceso de concesión de licencias, los derechos de propiedad, el acceso físico, la reglamentación ambiental, los impuestos, las responsabilidades posteriores al cierre y los reglamentos fiscales. Los encargados de formular las políticas pueden contribuir considerablemente a que estos factores no sean un obstáculo a la comercialización de los recursos de MMA.

1.3 Extracción del gas MMA

Las tecnologías y prácticas de gestión adecuadas permiten extraer el metano de las minas abandonadas, generando importantes beneficios ambientales, económicos, sociales y de seguridad pública.

Los métodos de extracción de gas de las minas abandonadas difieren de los empleados para capturar y recuperar el gas de las minas activas. Una vez que una mina está sellada y aislada de la atmósfera, el gas de todas las fuentes subterráneas puede, en principio, ser extraído en un mismo lugar de producción. Las concentraciones de metano del gas grisú recuperado de una antigua mina bien sellada varían normalmente entre el 15 % y el 90 %, y sin ningún oxígeno. Los otros principales componentes del gas pueden ser el nitrógeno, con inclusión de aire desoxigenado, y el dióxido de carbono. A veces están presentes bajas concentraciones de monóxido de carbono y trazas de hidrocarburos como el etano.

El acceso a las labores mineras abandonadas para extraer el gas se efectúa a través de los antiguos pozos o galerías. Cuando estos no son adecuados, por ejemplo porque se han llenado o porque no tienen tuberías de ventilación instaladas, es posible perforar un pozo de extracción desde la superficie hasta intersecar las labores subterráneas. Inicialmente puede haber suficiente presión en el reservorio para obtener MMA en la superficie. Pero a un cierto punto será necesaria la succión, o la creación de un vacío, para extraer el gas presente en las excavaciones de la mina, incluidas las antiguas áreas de derrumbe, detrás de los sellos y en el carbón de las zonas descomprimidas. La concentración de metano en el gas puede variar no solo entre las distintas minas, sino también a medida que se extrae el gas de las diferentes partes de una misma mina. El principal factor que afecta a la calidad del gas es la dilución con el aire que penetra en la mina por entradas de la superficie que no quedaron perfectamente selladas. Las filtraciones de aire no controladas reducen la concentración de metano del gas y limitan también la succión y el flujo que es posible alcanzar. La entrada de aire debe reducirse al mínimo para estabilizar la cantidad y calidad del gas. El aire que penetre por succión en una mina abandonada podría, en algunos casos, causar una combustión espontánea y la liberación de monóxido de carbono.

La cantidad de MMA que es posible extraer depende de varios factores, entre ellos el volumen de carbón no explotado presente en los estratos perturbados por la minería, el contenido de gas residual del carbón no extraído y la tasa de inundación de las labores.

Los proyectos de explotación del MMA de minas pequeñas tienen pocas probabilidades de ser comercialmente viables si no se agrupan. La integración de proyectos de MMA pequeños y medianos con los programas de recuperación del metano de las minas de carbón (MMC) en las explotaciones mineras activas podría aumentar la flexibilidad y la rentabilidad, al proporcionar una fuente de gas para los períodos de demanda alta y un reservorio para almacenar el gas en los períodos de demanda baja.

Se ha informado de sitios de extracción de MMA en Europa en que los caudales extraídos igualan o incluso superan los del MMC obtenidos de la mina activa (Backhaus, 2018). En estos casos, puede estar presente un volumen importante de metano biogénico relativamente reciente.

La quema en antorcha del MMA para mitigar las emisiones no se practica actualmente de forma generalizada, sino solo cuando es necesario por razones de seguridad y/o ambientales. En algunos países puede crear un conflicto con los titulares de las licencias de explotación de gas, y hay pocos

incentivos para practicarla, salvo en los Estados Unidos, donde los proyectos relacionados con el MMA pueden participar en algunos mercados de carbono. Los factores que influyen en las políticas se examinan con más detalle en una sección posterior de este documento.

1.4 Emisiones y explotación del MMA en algunos países

Las emisiones de metano evitadas por los principales países productores de MMA se presentan en el **cuadro 1.1**. Cabe señalar que las emisiones de muchas minas abandonadas suelen estimarse, en lugar de medirse, y esas estimaciones se basan en metodologías aceptadas como la del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático³ o la desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos⁴. Esto contrasta con las emisiones notificadas por las minas activas, que a menudo se miden, ya sea con fines de seguimiento del desempeño ambiental o para la vigilancia de la salud y la seguridad. En general, esto hace que las emisiones de MMA notificadas tengan un mayor margen de incertidumbre.

China: En este país, los posibles recursos de MMA están identificados (Coté, 2018b). Hay al menos 30.000 campamentos de minas de carbón abandonados, pero es probable que la mayoría de estas minas sean demasiado pequeñas para justificar el desarrollo de un proyecto de explotación del MMA. También hay 120 minas de carbón de propiedad estatal que están abandonadas. De ellas, se considera que 50 podrían utilizarse para la producción de MMA. En 2017, se cerraron minas por una capacidad total de producción de carbón de 150 millones de toneladas. Sin embargo, varios factores limitan el potencial del MMA en China, entre ellos las tasas de inundación, que en muchos casos son altas, la explotación minera intensiva que elimina la mayoría de las fuentes de gas en algunas zonas, y un marco regulador poco claro en lo que respecta a la propiedad y la responsabilidad de las tierras, los bienes y los recursos después del cierre de las minas. Liu (2018) describe dos estudios de casos relacionados con el MMA y señala posibles sitios de extracción para el futuro.

Alemania: Según la base de datos internacional sobre los proyectos de recuperación del metano de las minas de carbón de la GMI, Alemania ha desplegado más de 35 proyectos de explotación del MMA y todos ellos entrañan la generación de electricidad o la cogeneración de energía térmica y eléctrica (GMI, 2017). En 2015 había 94 unidades de cogeneración alimentadas con MMA (un proyecto suele comprender varias unidades), con una capacidad de cogeneración instalada de 120 MW_e⁵. Estos proyectos que utilizan el MMA generan más de 500 MWh de electricidad y 75 MWh de energía térmica anualmente, evitando la emisión de 2,3 Mt de CO_{2e} (Backhaus, 2017). La mayoría de los proyectos de explotación del MMA de Alemania comenzaron a principios de la década de 2000, cuando una actualización de la política de energía renovable del país creó una tarifa regulada especial para la generación de energía eléctrica con MMA y MMC. Al mismo tiempo, las emisiones anuales notificadas de GEI de las minas abandonadas pasaron de 5 Mt de CO_{2e} en 2000 a solo 18.000 t de CO_{2e} en 2015 (CMNUCC, 2017). Se estima que los proyectos de MMA activos utilizaron el 99 % de las emisiones totales de metano de las minas abandonadas de Alemania en 2015 (Denysenko *et al.*, 2019).

³ IPCC (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, vol. 2., Energía*, cap. 4: Emisiones fugitivas. 2006. Ginebra, Suiza, https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_4_Ch4_Fugitive_Emissions.pdf.

⁴ EPA (2004). *Methane Emissions from Abandoned Coal Mines In The United States: Emission Inventory Methodology and 1990-2002 Emissions Estimates*. 2004. Washington, D.C., Estados Unidos de América. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/amm_final_report.pdf.

⁵ Backhaus, Clemens (2017). *Experience with the utilization of coal mine gas from abandoned mines in the region of North-Rhine-Westphalia, Germany*. Taller sobre el metano de las minas abandonadas. Grupo de Expertos sobre el Metano de las Minas de Carbón de la CEPE, 23 de octubre de 2017, Ginebra (Suiza). https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/cmm12/Workshop_2017/7.Mr._Backhaus.pdf.

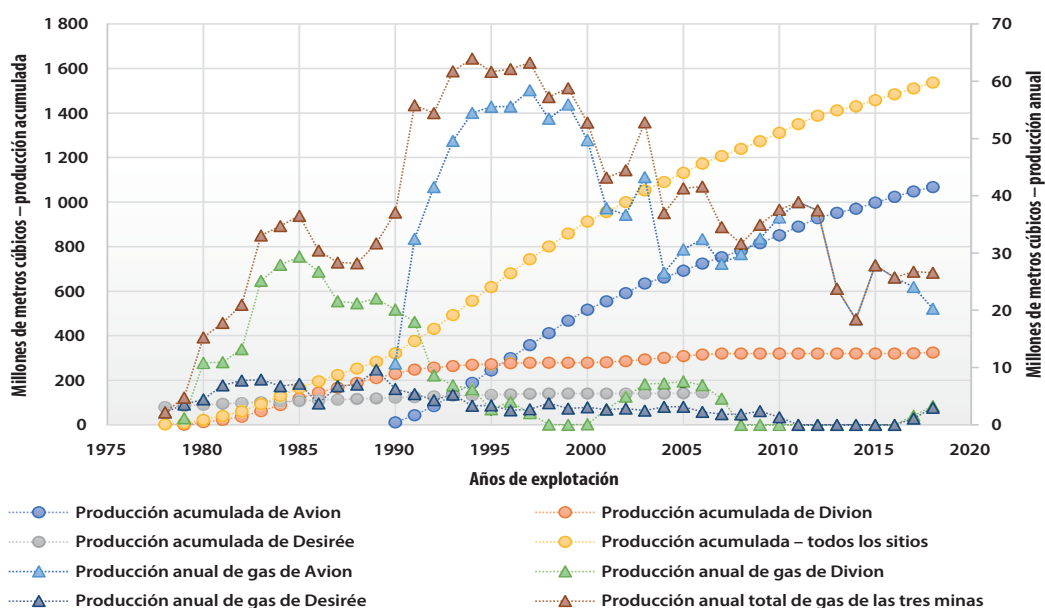
País	Número de proyectos	Emisiones evitadas (Mt de CO ₂ e)	Uso principal del MMA
China	Se desconoce	Pocas, al parecer	Se desconoce
República Checa	10	0,36	Generación de electricidad
Francia	5	10,60	Industrial
Alemania	40	5,71	Generación de electricidad
Reino Unido	20	0,64	Generación de electricidad
Estados Unidos	20	2,70	Ventas por gasoducto

Fuentes: EPA, 2015, CMM Country Profiles; EPA, 2017, inventario de GEI de los Estados Unidos.

Francia: La última mina de carbón de Francia, La Houve, cerró en 2004, pero la captura y el uso del MMA habían comenzado en este país en 1978, en respuesta a la crisis del petróleo del Oriente Medio que, tras su inicio en 1973, mantuvo altos los precios del petróleo durante varios años. Desde entonces, varias minas de carbón grisáceas abandonadas del norte de Francia han producido gas que se inyecta en gasoductos y se utiliza para generar electricidad. Durante muchos años estas actividades fueron realizadas por Gazenor, antigua filial de Charbonnages de France, la empresa nacional del carbón de Francia, que se disolvió en 2008. Tres minas de carbón son las principales fuentes de producción de gas: Avion, Divion y Desirée. La **figura 1.1** ilustra la producción anual y acumulada de gas de estas minas abandonadas (Moulin, 2019).

Française de l'Énergie, una empresa que cotiza en bolsa, compró Gazenor en 2016 y actualmente tiene la concesión sobre unos 1,500 km² y administra los sitios de producción de gas de minas abandonadas y cinco plantas de generación de electricidad con una capacidad instalada de 9 MW. Desde 1978 hasta 2018, Avion produjo 1.068 millones de metros cúbicos de metano, mientras que Divion y Desirée

Figura 1.1 Producción anual y acumulada de gas de las minas de Avion, Divion y Desirée



Fuente: Moulin, J., 2019.

produjeron 325 y 145 millones de metros cúbicos de metano, respectivamente. En 2018, la producción anual de gas de las tres minas fue de 26 millones de metros cúbicos de metano. Française de l'Énergie ha estimado que anualmente se evita la emisión de más de 600.000 toneladas de CO₂ gracias al uso del metano como combustible en lugar del carbón.

Reino Unido: En 1990, casi el 80 % de las minas de carbón subterráneas del Reino Unido habían cerrado, y para 2010 se había emitido o utilizado una alta proporción del MMA (Fernando, 2011). La extracción del MMA de las minas pequeñas, las que contenían poco grisú y las que llevaban cerradas más de diez años y estaban inundadas no se había considerado viable. Para 2018, se habían cerrado 150 zonas de minería del carbón y se habían desarrollado casi 30 proyectos de generación de energía y suministro de gas con el MMA, aunque no todos de forma sincrónica. En octubre de 2017, había 13 proyectos de explotación del MMA en ejecución. Doce de ellos producían electricidad (con una capacidad total instalada de 78 MW_e) y uno inyectaba el gas en gasoductos (Kholod *et al.*, 2018). Los proyectos de MMA activos en el Reino Unido utilizan alrededor del 58 % del total de las emisiones de metano de las minas abandonadas. Estas emisiones del Reino Unido pasaron de 1,4 Mt de CO₂e en 2000 a 0,441 Mt de CO₂e en 2015 (CMNUCC, 2017).

Estados Unidos: En los Estados Unidos hay 7.500 minas abandonadas, de las cuales 524 contienen gas grisú (EPA, 2017; Iniciativa Global del Metano, 2015). Tradicionalmente, los proyectos de explotación del MMA de los Estados Unidos han inyectado el recurso en los gasoductos de gas natural existentes; sin embargo, el número de proyectos de generación de electricidad y quema en antorcha basados en el MMA ha crecido en los últimos años. En total hay 19 proyectos de MMA en 45 minas de carbón. Algunos de ellos son proyectos agregados: 3 agrupan entre 3 y 5 minas cada uno, 1 incluye el metano de 14 minas y 3 son proyectos de MMA combinados con proyectos de MMC ya existentes (Coté, 2018a). Gracias al mayor uso del MMA, las emisiones netas de metano de las minas abandonadas pasaron de 8,8 Mt de CO₂e en 2000 a 6,4 Mt de CO₂e en 2017. El total de MMA liberado aumentó a 9,2 Mt de CO₂e en 2017 y, de esa cantidad, 2,7 Mt de CO₂e se utilizaron para la generación de energía y la venta de gas por gasoductos (EPA, 2019). La producción de carbón sigue siendo un componente importante de la canasta energética de los Estados Unidos; sin embargo, el número de minas subterráneas había disminuido a 237 en 2017, frente a 583 en 2008, debido a la competencia de otros combustibles y a la constante tendencia a la concentración en las minas de tajo largo de mayor producción⁶. El reciente cierre de muchas minas podría ofrecer oportunidades viables de explotación del MMA.

⁶ Administración de Información Energética de los Estados Unidos. Annual Coal Report 2017 y Annual Coal Report 2008, noviembre de 2018 y marzo de 2010, Washington, D.C., disponibles en <https://www.eia.gov/coal/annual/>.

2. Fuente de las emisiones de MMA

Mensajes clave

- Cuando se cierra una mina de carbón, los ventiladores principales de la mina se detienen, y rápidamente se produce un cambio fundamental en la composición y distribución de los gases en los espacios subterráneos.
- El metano y otros gases peligrosos migran a las zonas de menor presión, pudiendo migrar a la superficie si no encuentran estratos impermeables o mantos freáticos, con la consiguiente posibilidad de peligros graves para la salud y la seguridad.
- La mina puede llenarse de agua, deteniéndose así las emisiones, pero los gases disueltos en el agua se liberan cuando esta llega a la superficie.
- Los riesgos ambientales y de seguridad que se plantean en los yacimientos mineros abandonados y en sus proximidades pueden reducirse mediante una serie de medidas, como la instalación de sistemas de vigilancia ambiental, un mejor sellado artificial de las bocaminas y la extracción activa del gas.
- Es preciso entender lo que suponen todos estos cambios y gestionar las consecuencias.
- Para poder gestionar los problemas ambientales de las minas cerradas es necesario que la propiedad del carbón residual, las excavaciones subterráneas y el gas esté claramente definida.

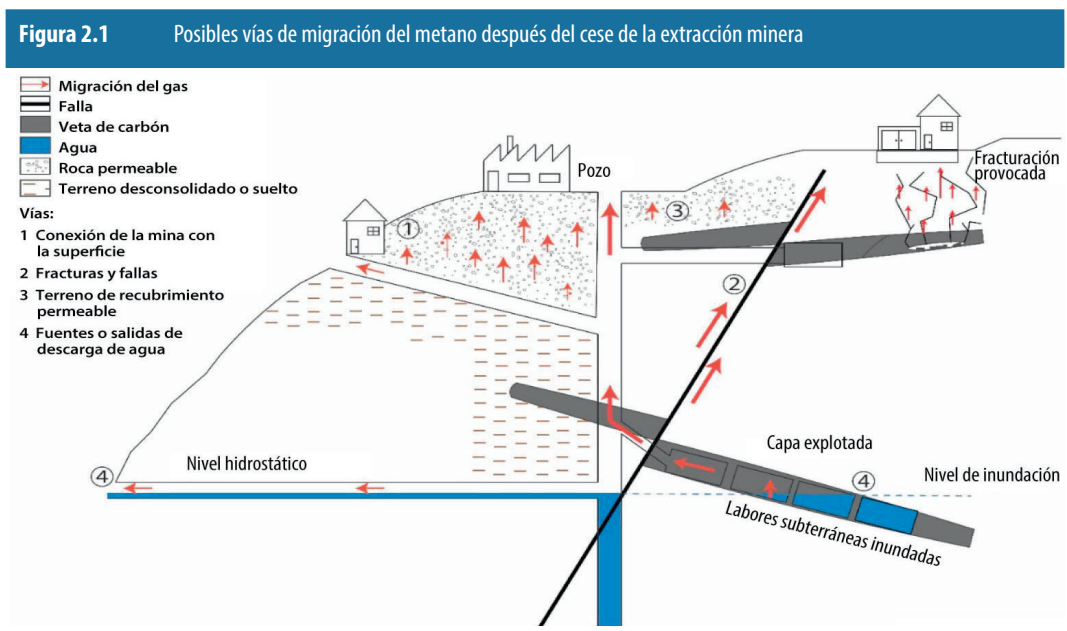
2.1 Migración del MMA

Cuando se cierra una mina, la ventilación mecánica se detiene inmediatamente, y los gases comienzan a migrar libremente entre las distintas labores interconectadas de la mina. Debido a su flotabilidad en comparación con el aire y con otros gases de las minas, el metano subirá hacia las bocaminas de la superficie y las labores aflorantes poco profundas donde existan conexiones subterráneas. Las vías más comunes de acceso a la superficie comprenden la filtración por las bocaminas abandonadas o desde las labores poco profundas a través de la roca fracturada que las recubre, especialmente cuando solo hay una fina capa de depósitos superficiales (**figura 2.1**).

Esa migración crea condiciones peligrosas en los emplazamientos de las minas que han estado cerradas durante muchos decenios, pero también para cualquier mina activa adyacente. Además, la migración del MMA puede dificultar la evaluación de este recurso.

Los gases de minas potencialmente peligrosos pueden, en algunos casos, entrar en edificios y acumularse allí, representando un riesgo para la seguridad. Ha habido incidentes en varias antiguas zonas de extracción de carbón de Europa y Asia. En el Reino Unido, todos los principales yacimientos de carbón se han visto afectados en algún momento por emisiones de gas grisú en la superficie. Pero no todos los cierres de minas de carbón provocan necesariamente problemas de emisión de gases, ya que entre 1947 y 1998 se cerraron en el Reino Unido más de 900 minas profundas y solo se registraron unos 75 incidentes de emisión de gases en la superficie. Sin embargo, muchos otros pueden haber pasado desapercibidos. Durante la década de 1990 hubo un promedio de unos 3 nuevos incidentes por año, de los cuales más del 60 % fueron atribuidos a fugas de gas a través de antiguas bocaminas abandonadas. Aunque se han producido incendios de metano en edificios residenciales, no ha habido víctimas mortales. En cambio, las emisiones de gas asfixiante (dióxido de carbono y nitrógeno) han causado varias muertes.

En Francia, el Instituto Nacional de Medio Ambiente Industrial y de Riesgos (INERIS) recibió el encargo de estudiar los peligros relacionados con las minas abandonadas y ha publicado dos manuales.



Fuente: Adaptado a partir de INERIS, 2019. Post-Mining Hazard Evaluation and Mapping in France.

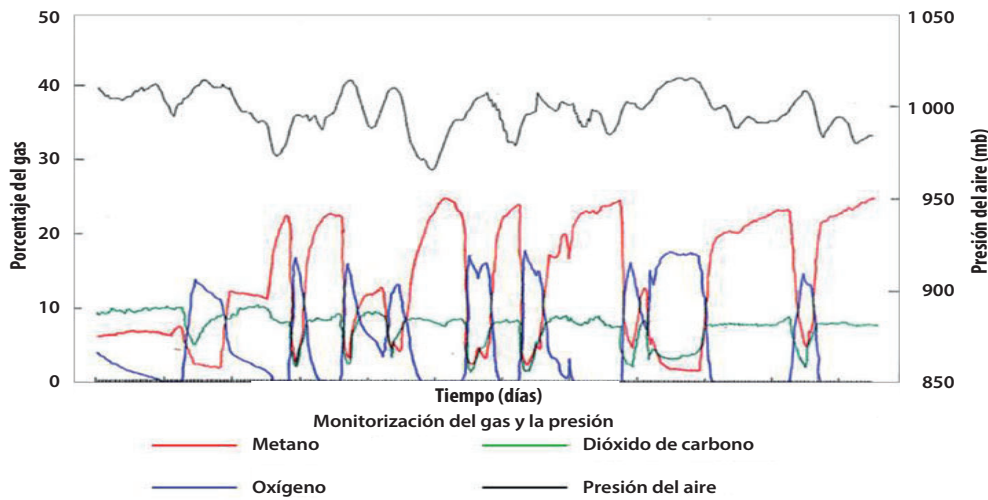
El más reciente proporciona información sobre la evaluación y cartografía de los peligros posteriores a la explotación minera, como ayuda para las autoridades y los planificadores locales (INERIS, 2019). Esta publicación remite a un manual anterior (INERIS, 2016), que ofrece orientación sobre las emisiones de gases potencialmente peligrosos desde las minas cerradas y abandonadas. Los riesgos identificados están clasificados, y van desde el bajo riesgo de asfixia por gases tóxicos y/o inflamables presentes en las excavaciones de la mina, sin alcanzar el umbral de explosión, hasta el alto riesgo de asfixia o explosión, cuando la tasa de emisión de gases de la mina es más alta.

En Alemania, el interés por el MMA comenzó en los años noventa, cuando el cierre de minas empezó a aumentar. En un principio, las preocupaciones se centraron solo en las zonas en que las fugas de gas podían ser un peligro para los habitantes de la localidad (Backhaus, 2017).

En Kazajstán se desarrollaron y cerraron muchas minas en rápida sucesión, especialmente tras el comienzo de la Segunda Guerra Mundial. Entre los decenios de 1940 y 1970, se pusieron en servicio y cerraron muchos proyectos mineros sin una planificación detallada. La migración del metano de las antiguas labores mineras subterráneas y de los huecos creados condujo posteriormente a un aumento del peligro de emisión de gases en la superficie en las zonas de extracción activas y abandonadas. En decenios posteriores, se descubrió que muchos edificios y asentamientos de las regiones mineras de Kazajstán central estaban contruidos sobre antiguos pozos de ventilación y galerías. Ha habido casos de aumento repentino de las concentraciones de metano, combustión espontánea, inestabilidad de la superficie y muertes (Ostapov, 2006). En otras situaciones, para evitar sucesos catastróficos, el Gobierno ha tenido que reubicar a los habitantes, demoler edificios y cerrar instalaciones industriales.

En cuanto a China, el país con la mayor industria de extracción de carbón, no hay datos sobre los peligros de los gases en las zonas en que se ha construido sobre sitios mineros abandonados, pero es probable que ya existan problemas que aún no se han detectado. Las labores mineras "respiran" a través de cualquier conexión con la superficie que no esté sellada, o que lo esté de manera imperfecta, en respuesta a los cambios de la presión atmosférica, como se ilustra en la **figura 2.2**, que muestra los aumentos y descensos periódicos de la concentración de metano en función de la entrada de aire.

Cuando la presión atmosférica va en aumento, el aire tiende a fluir hacia las labores de la mina abandonada, produciendo mezclas de gases ricas en aire. Cuando la presión atmosférica está

Figura 2.2 Monitoreo del gas y la presión en una mina cerrada con sellado imperfecto

Fuente: Creedy, D. P., y K. Garner, 2002.

disminuyendo, la dirección del flujo se invierte y llegan a la superficie mezclas de gases cada vez más pobres en oxígeno y ricas en metano. Los problemas que genera el gas de las minas suelen manifestarse en la superficie durante las caídas rápidas de la presión atmosférica o inmediatamente después.

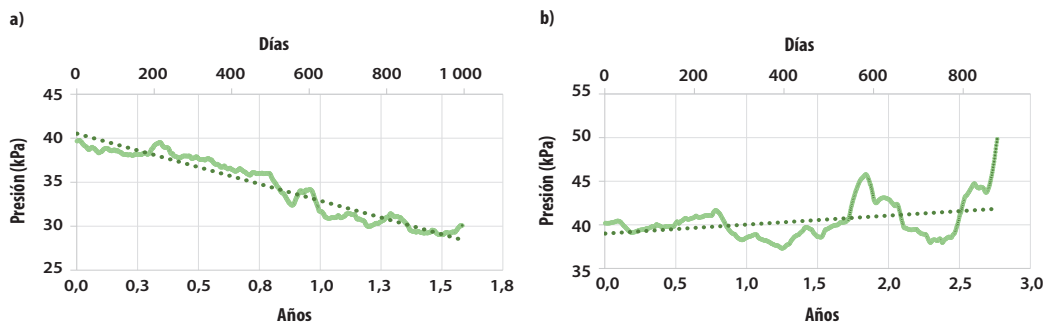
El aumento del agua en la mina modifica la presión en el espacio de la excavación de esta y puede empujar al gas a salir de la mina o penetrar en otros estratos permeables. El nivel final del agua dependerá del entorno hidrológico regional. En algunas minas cerradas se mantiene el bombeo de agua para proteger a las minas vecinas activas de zonas más bajas contra una posible inundación en caso de ruptura de las barreras de carbón que separan las labores. Cuando se evalúa un recurso de MMA, es crucial entender la interacción de estos dos factores. Deberían realizarse múltiples mediciones a lo largo de un período de tiempo para tener en cuenta los gases y los cambios generales en la presión del espacio vacío. El nivel del agua debe estar bien comprobado, y es necesario conocer o poder estimar la tasa de inundación. Por ejemplo, en una mina cerrada recientemente, la tasa de producción de gas puede parecer alta y llevar a la estimación de que el recurso de gas es abundante, siendo así que la tasa de producción podría ser el resultado de un rápido aumento del nivel del agua, que comprime el gas y aumenta la presión. En el ejemplo de la **figura 2.3 a**), la presión general de la excavación de la mina disminuye con el tiempo, lo que hace pensar que la excavación no se está llenando de agua, mientras que en la **figura 2.3 b**) la presión en la mina va en aumento, lo que indica que la mina podría estarse llenando de agua. Claramente, si el agua sigue llenando el espacio vacío de la mina, los mantos de carbón que están emitiendo gas por desorción se cubrirán de agua y el peso de la columna de agua ejercerá finalmente una presión mayor que la presión de desorción y suficiente para detener la emanación de gas del manto.

La minería extensiva de una cuenca carbonífera puede conducir a la interconexión de labores mineras de diferente antigüedad y profundidad. Esas interconexiones permiten la migración del gas por grandes distancias después del cierre de la mina y, en algunos casos, pueden crear problemas de emisión de gases en la superficie más allá del área correspondiente a la mina recién cerrada.

Las emisiones de gas no controladas de las minas de carbón cerradas pertenecen generalmente a una de las siguientes categorías:

- Una emisión de fuente puntual, detectable solo en unos pocos metros cuadrados de terreno y normalmente rastreable hasta una antigua bocamina enterrada que no quedó perfectamente sellada.

Figura 2.3 Gráfico de la presión del gas en función del tiempo: la disminución a) indica que el agua no está llenando las excavaciones de la mina, mientras que el aumento b) revela el llenado de las excavaciones por el agua



Fuente: Pilcher, R., 2019, modelización y análisis de datos inéditos.

- Una emisión localizada en que el gas ha escapado de una determinada bocamina y migrado por vías poco profundas y permeables, que afecta a algunas decenas de metros cuadrados de terreno.
- Una emisión de área extensa en que el gas está migrando a la superficie a través de la cobertura superficial de una amplia zona de estratos permeables aflorantes con labores mineras grisuosas poco profundas situadas directamente por debajo.

La posibilidad de que surjan esos peligros debería evaluarse como parte del procedimiento de cierre de una mina de carbón. El sellado perfecto de las antiguas bocaminas es difícil. A medida que se acumulan aguas subterráneas en las labores abandonadas, pueden crearse altas presiones de gas que agraven las emisiones fugitivas y las filtraciones de gas en el terreno. La instalación de conductos de ventilación pasiva para la liberación controlada del gas puede reducir el riesgo (**figura 2.4**). En situaciones más complejas, en que se ha detectado una emisión de área extensa, la extracción activa (por bombeo del gas) puede aminorar la probabilidad de emanaciones peligrosas de gas en la superficie; este gas no siempre será de suficiente pureza o estará disponible en cantidades adecuadas para su uso comercial.

Los riesgos ambientales y de seguridad que se plantean en los sitios mineros abandonados y en sus proximidades pueden reducirse mediante las siguientes medidas:

- Un mejor sellado de las bocaminas (pozos, galerías y socavones).
- La estabilización de las labores poco profundas y de las bocaminas para evitar nuevos movimientos del terreno.

Figura 2.4 Conductos de ventilación del gas en un pozo de mina abandonado (Reino Unido)



Fuente: Creedy, D. P. y K. Garner, 2002.

- La instalación de conductos de descompresión a través de los sellos de las bocaminas.
- El uso de sistemas de extracción activa del MMA.
- La interceptación y el tratamiento de las descargas de agua de las minas.
- La instalación de sistemas de monitorización ambiental.
- La inspección y vigilancia posteriores al cierre.
- La incorporación de barreras estructurales impermeables al gas y de sistemas de ventilación del subsuelo bajo los edificios industriales, comerciales y residenciales, para evitar la entrada de gases peligrosos.

Para poder gestionar los problemas ambientales de las minas cerradas (**recuadro 1**) es necesario que la propiedad del carbón residual, las aberturas subterráneas y el gas esté claramente definida.

La Autoridad del Carbón del Reino Unido es un ejemplo de un órgano creado por el Gobierno para asumir la propiedad de las minas de carbón abandonadas y que está facultado y financiado para hacer frente a las responsabilidades históricas que pongan en peligro la seguridad de la población. También supervisa la interacción de las minas de carbón, su cierre, y el cierre de los programas de explotación del MMA, como propietario del carbón y de las antiguas labores mineras. Es importante señalar asimismo que, aunque la gestión de las minas cerradas puede aminorar los riesgos para la seguridad, no reduce las emisiones totales, a menos que el metano se utilice para algún fin.

Recuadro 1. Ejemplo de un órgano regulador encargado de abordar los peligros ambientales relacionados con las minas de carbón cerradas

La Autoridad del Carbón del Reino Unido es la organización gubernamental encargada de gestionar las responsabilidades históricas relacionadas con las minas abandonadas que han vuelto a ser de su propiedad. Este órgano ha establecido un programa de inspección y vigilancia de las minas de carbón abandonadas para poder detectar y prevenir los posibles problemas. Los arreglos para la respuesta de emergencia prevén una rápida actuación y solución ante cualquier incidente que se notifique. El programa de vigilancia comprende:

- La medición de la composición, el flujo y la presión de los gases en los conductos de ventilación de la mina instalados para lograr una emisión controlada.
- La inspección de los supresores de llamas y los conductos de ventilación para verificar que no estén bloqueados.
- La medición de los niveles de agua en los pozos y la vigilancia de las perforaciones, los flujos de descarga y la calidad del agua.
- El mantenimiento de la seguridad de los sitios de monitorización, ventilación y tratamiento de aguas.
- La auditoría y el examen de los resultados.

2.2 Composición de los gases de las minas abandonadas

Los gases más comunes en las labores de las minas de carbón abandonadas son el dióxido de carbono, el nitrógeno, el vapor de agua, el oxígeno y el metano. Las proporciones de estos gases pueden variar sustancialmente de un yacimiento de carbón a otro, y algunas minas abandonadas de bajo contenido de gas pueden tener solo trazas de metano. En algunas antiguas minas grisuosas se detectan etano y otros alcanos. Si la fuente del MMA extraído son las vetas de carbón, la razón etano:metano irá en aumento debido a la desorción diferencial, es decir, al hecho de que las moléculas de los alcanos de cadena más larga tardarán más en desprenderse que el metano. El MMA procedente de depósitos no carboníferos

suele tener una composición muy diferente. Puede contener monóxido de carbono, como resultado de la oxidación a baja temperatura o de la combustión incompleta de material carbonoso. El sulfuro de hidrógeno y otros gases traza confieren un olor característico a las emisiones de gas de las minas. Los gases malolientes en bajas concentraciones no suponen normalmente un riesgo para la salud, pero pueden constituir una molestia. La concentración relativa del gas es importante por razones ambientales y de seguridad, pero también es fundamental a la hora de planificar el posible uso final del gas.

El **cuadro 2.1** ilustra la variabilidad en la composición del gas encontrada en las minas de carbón abandonadas de la cuenca carbonífera de Illinois. La variación en la composición del gas está

Cuadro 2.1 Muestras de la composición del gas de las minas abandonadas en la cuenca carbonífera de Illinois (Estados Unidos de América)									
Condado del estado de Illinois	Mina o pozo perforado	Profundidad (pies)	Composición del gas						Valor calorífico (MJ/m ³)
			CO ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	
Christian	Joe Simkins 1		16,3	1,1	63,1	19,0	0,5	0,2	7,5
Clinton	Breese-Trenton	435	11,8	0,4	27,1	60,3	0,2	0,1	23,1
Clinton	Pessina 1		10,2	0,3	20,7	68,8	n.d.	n.d.	25,9
Franklin	Zeigler	380	5,9	0,6	28,8	64,7	n.d.	n.d.	24,4
Franklin	Peabody 1	535	8,2	0,7	13,8	77,3	0,2	n.d.	29,2
Gallatin	B & W Coal		0,1	20,7	79,2	n.d.	n.d.	n.d.	-
Montgomery	G. Stieren, Crown 1	362	5,5	n.d.	24,4	69,8	0,2	n.d.	26,5
Perry	F. Hepp, mina Bernard	105	19,0	0,8	56,8	23,4	n.d.	n.d.	8,8
Randolph	Moffat Coal 2		3,3	11,6	85,1	n.d.	n.d.	n.d.	-
St. Clair	Peabody Coal, pozo de sondeo	126	0,3	n.d.	10,5	89,2	n.d.	n.d.	33,6
Saline	Charter Oil 1A		n.d.	0,6	12,8	75,9	9,5	n.d.	35,8
Saline	A. Farris, mina Dering	460	4,0	0,5	5,2	90,3	n.d.	n.d.	34,1
Saline	A. Farris, mina Dering		5,5	0,1	3,4	90,9	n.d.	n.d.	34,3
Saline	Pozo de la mina Wasson		6,2	0,6	40,7	51,0	1,5	n.d.	20,2
Saline	M. L. Devillez 3		3,3	4,1	50,8	41,8	n.d.	n.d.	15,8
Saline	W. Duncan, Cook-Spear 1	439	5,7	0,3	7,3	85,7	n.d.	n.d.	32,4
Saline	Unidad Adams 1 (Sahara 10)		6,2	0,2	2,2	90,2	n.d.	n.d.	34,2
Saline	Jade Oil, mina Dering		6,2	1,5	8,9	83,4	n.d.	n.d.	31,4
Saline	Mina Sahara 10	445	8,7	3,5	64,8	23,0	n.d.	n.d.	8,7
Saline	Dan January		3,1	0,7	9,8	86,3	n.d.	n.d.	32,6
Saline	J. Wilson, Sahara (O'Gara 8)	405	6,1	0,2	3,1	90,6	n.d.	n.d.	34,2
Saline	Mina Frank Genet		8,6	0,8	n.d.	90,1	n.d.	n.d.	34,0
Saline	Mina Sahara 1		7,0	3,7	72,7	16,6	n.d.	n.d.	6,3
Vermilion	Mina de Bunsenville		6,5	14,4	79,1	n.d.	n.d.	n.d.	-

Fuente: Demir, I. et al., 2004.

Nota: n.d. = no detectado.

controlada por muchos factores, el más importante de los cuales es el grado de sellado de la mina para evitar la entrada de aire. Un alto contenido de oxígeno y nitrógeno revela una elevada proporción de entrada de aire, mientras que las altas concentraciones de hidrocarburos indican que las aberturas de las minas están relativamente bien selladas y no permiten la penetración del aire en los períodos de alta presión atmosférica. Las minas pueden estar sectorizadas, debido a la disposición de las labores o a la subsidencia y el colapso del techo después del cierre, en cuyo caso la composición variará dentro de la mina, si no existe una comunicación directa que permita el flujo de gases de una zona a otra.

3. Cuantificación de los recursos de MMA y predicción de los caudales de gas

Mensajes clave

- La caracterización del reservorio de MMA es una primera etapa esencial de los trabajos para estimar las reservas de gas potencialmente recuperables, teniendo en cuenta los efectos de la recuperación del agua de las minas, la inundación de los pasillos de conexión y las obras de ingeniería que puedan ser necesarias para controlar la entrada de aire.
- Un reservorio de MMA comprende los mantos de carbón y cualquier otra roca que contenga gas dentro de los estratos descomprimidos a raíz de la antigua extracción de carbón por tajo largo. En algunos casos, puede también incluir metano de origen biológico.
- Los socavones de la mina abandonada proporcionan conductos para dirigir el MMA hacia un determinado pozo, galería u otro punto de producción.
- Los efectos de la descompresión de la roca que producen los métodos de minería sin socavación y derrumbe, como la explotación por cámaras y pilares, son considerablemente menores que los de la explotación por tajo largo y a menudo se excluyen de los cálculos de los recursos de gas.
- El caudal potencial de gas de producción puede estimarse utilizando las mediciones de la emisión de gas de la mina antes del cierre para extrapolar las curvas de declinación exponencial o hiperbólica.
- Los caudales reales pueden determinarse mediante pruebas de producción realizadas con una bomba de extracción.
- La eficacia de la extracción de gas puede verse comprometida cuando hay filtraciones de aire puro en las labores mineras a través de bocaminas superficiales no perfectamente selladas.

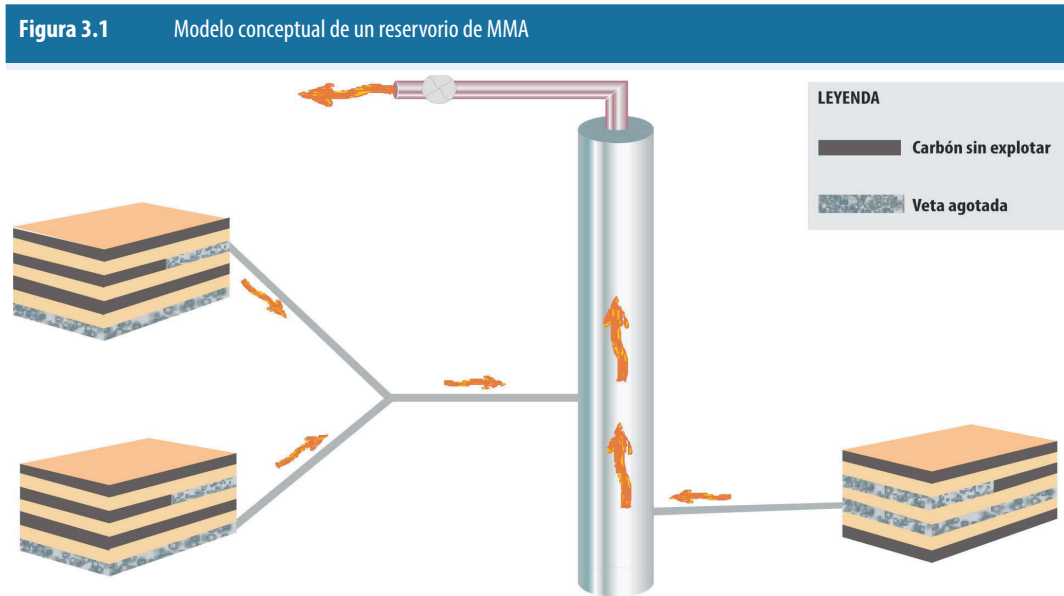
3.1 Recursos de MMA

La cantidad de MMA producida por los mantos de carbón depende del espesor del área y del contenido de gas residual de los mantos restantes después de la explotación en la zona de influencia de la antigua minería. Los recursos de MMA pueden estimarse sobre la base de la geología, utilizando un modelo simple que combina información obtenida a partir de los planos de la mina, los registros geológicos, los datos de entrada de agua y las mediciones *in situ* del contenido de gas. En la **figura 3.1** se presenta un modelo conceptual de un reservorio de MMA.

Investigaciones realizadas en Europa indican que un reservorio de MMA de tajo largo incluirá típicamente las vetas de carbón hasta unos 160 m a 200 m por encima del techo, y unos 40 m a 70 m por debajo del piso (CEPE, 2016). Cuando hay estratos firmes, particularmente en el techo, la altura de la zona de descompresión puede reducirse considerablemente. Durante los trabajos solo se emite una proporción del contenido de gas de los mantos vírgenes del techo y el suelo, y la magnitud de esa proporción depende de la proximidad entre el manto de carbón no explotado pero perturbado y el manto explotado, y de la permeabilidad al gas. Cuando se han explotado sucesivamente varios mantos apilados uno sobre otro, debe considerarse el efecto de desgasificación acumulativo de cada laboreo al determinar el recurso de gas residual.

3.2 Reservas de MMA

Las reservas de MMA son los volúmenes de gas que pueden ser extraídos, teniendo en cuenta la tasa de inundación. El anegamiento aislará progresivamente las fuentes de MMA a medida que suba el nivel del



Fuente: Creedy, D. P. y K. Garner, 2002.

agua en las antiguas labores mineras. Ello no solo reducirá el volumen del reservorio de gas accesible, sino que también podría aislar partes de las labores al inundar las vías de conexión. Las inundaciones localizadas pueden limitar la capacidad de las bombas de extracción de la superficie de ejercer una presión de succión negativa en las labores mineras abandonadas. Los registros del bombeo de agua de la mina antes del cierre proporcionan una indicación de la probable entrada de agua, pero el sellado de las bocaminas y la eliminación de las conexiones con el agua de la superficie pueden reducir este valor.

Aunque técnicamente es posible desaguar una mina para maximizar la extracción de MMA, en general es poco probable que esta medida sea económicamente viable. Además, la descarga de aguas subterráneas en la superficie puede estar sujeta a directrices ambientales restrictivas, lo que aumentaría la complejidad y el costo. El nivel de agua en la mina abandonada es, pues, un factor que restringe en un grado importante las perspectivas de explotación del MMA. A menudo hay un período de tiempo limitado en que es posible explotar el MMA de las minas antes de que se inunden.

Las vías subterráneas permiten transmitir la presión de succión de las bombas de superficie a los reservorios de gas principales. La succión es necesaria para generar gradientes de presión y mantener la desorción del gas del carbón. Cuanto menor sea la succión aplicada, tanto menor será la cantidad de gas recuperada. Por lo tanto, el proceso de producción de gas depende en gran medida del gas emitido por desorción de los mantos de carbón primarios que penetran en las áreas de derrumbe y de la extracción por bombeo del gas que se filtra a través de los múltiples bloqueos; pueden ser suficientes solo pequeñas fugas de un gran número de bloqueos para mantener un flujo de producción. A los bajos caudales requeridos, las pérdidas de presión a través de los bloqueos son insignificantes. En algunos casos, la eficacia de la extracción de gas puede verse comprometida por filtraciones de aire puro en las labores mineras a través de bocaminas superficiales no perfectamente selladas.

En las minas que han estado abandonadas durante algunos años antes de la instalación de un sistema de extracción del gas, el agua puede haberse acumulado en algunas áreas de derrumbe y haber desplazado el metano hacia las vías de conexión y las labores en mantos menos profundos. El gas desplazado puede ser accesible para la producción y, presurizado, generará a veces, inicialmente, un caudal elevado. Sin embargo, el volumen total de gas disponible puede ser demasiado pequeño para sostener un programa de explotación comercial del MMA.

Una vez que una zona de derrumbe se ha inundado, sus fuentes primarias de gas ya no pueden liberar gas hacia las labores. El recurso no se pierde, pero será necesario evacuar el agua para que se restablezcan los procesos de desorción.

En general, el volumen recuperable de MMA dependerá de:

- El contenido de gas restante en la veta explotada y en las rocas o los estratos carboníferos portadores de gas que se encuentren en la zona de influencia.
- El volumen excavado de las antiguas labores y la tasa de inundación.
- La interconectividad de las antiguas zonas de producción de carbón y las áreas de derrumbe.
- Las características de desorción del carbón y la presión del gas.
- La calidad de los sellos de la superficie.

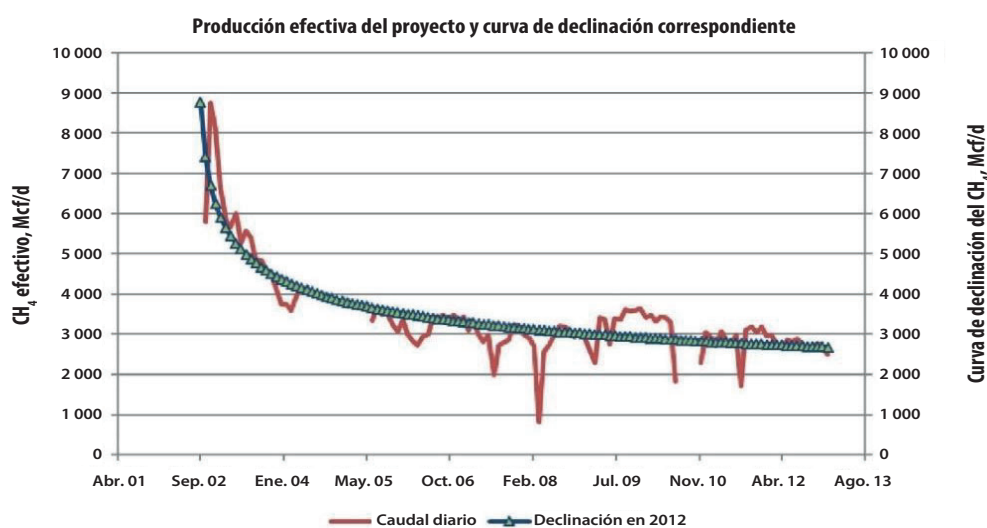
3.3 Predicción del caudal de MMA

El caudal potencial de gas de producción puede estimarse utilizando las mediciones de la emisión de gas de la mina antes del cierre para extrapolar las curvas de declinación exponencial o hiperbólica. Los caudales reales se determinarán mediante pruebas de producción realizadas con una bomba de extracción. Es importante tener claro que las inundaciones veloces pueden dar lugar a reducciones rápidas del caudal y a una recuperación significativamente menor. Una alta presión de gas en las labores mineras abandonadas puede ser un indicador de presurización causada por la subida del nivel del agua en un sistema bien sellado.

La extrapolación de las curvas de declinación hiperbólica, basadas en datos medidos, es un método frecuente para estimar las emisiones de MMA de las minas abandonadas (**figura 3.2**). El área total bajo una curva de declinación representa el MMA recuperable, siempre que no intervengan nuevos factores perturbadores. Sin embargo, la extrapolación de las emisiones de MMA de solo unos cuantos puntos de datos es intrínsecamente poco fiable, ya que no tiene en cuenta los diferentes volúmenes excavados en los distintos mantos de las minas y, por lo tanto, la variabilidad en la recuperación del agua.

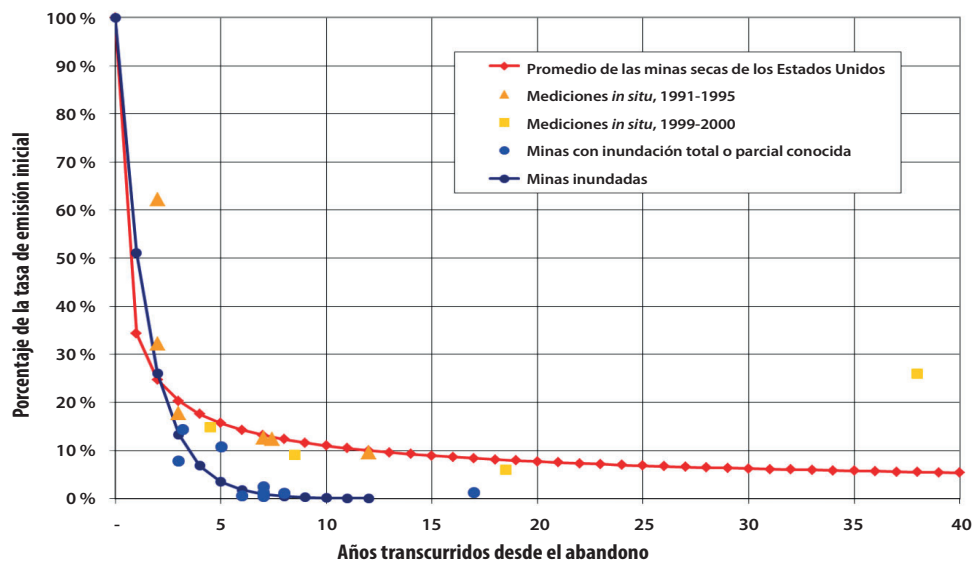
Un proceso robusto de determinación del MMA probablemente disponible para la explotación incluirá cálculos del MMA *in situ* basados en datos geológicos, mineros y del contenido de gas residual. Los

Figura 3.2 Curva de declinación de las emisiones de MMA



Fuente: Coté, M., 2018c.

Figura 3.3 Diferencia entre las tasas de disminución de las emisiones potenciales de las minas secas e inundadas



Fuente: Coté, M. et al., 2003.

límites del reservorio están definidos por la extensión de las antiguas zonas del tajo largo que se han descomprimido, y el recurso de gas es el gas restante en el carbón no explotado que ha sido perturbado por el laboreo de tajo largo anterior.

El gas recuperable dependerá de la interconectividad de las labores mineras, la calidad del sellado de las bocaminas y las tasas de inundación. Estas últimas pueden estimarse en cada uno de los mantos utilizando una tasa de entrada de agua medida o estimada, y estimaciones de los espacios excavados en cada nivel de extracción. Por lo tanto, las reservas de MMA son una función de la profundidad de la inundación (**figura 3.3**).

Por ejemplo, en el Reino Unido el contenido medio de gas desorbible remanente varía típicamente entre el 25 % y el 50 % del contenido de gas virgen inicial en la veta de carbón de referencia. En los reservorios de MMA en que los mantos superpuestos han sido extensamente explotados, se utiliza un valor del 25 % para las estimaciones de primer orden; cuando las labores se limitaron a un solo manto y hay una serie de capas de carbón en la zona descomprimida, se emplea un valor del 50 %. En la mayoría de los casos, la cifra se situará entremedio, y el uso de un valor por defecto del 35 % se considera adecuado.

El contenido de gas desorbible restante puede estimarse también utilizando relaciones empíricas (Creedy y Kershaw, 1988) derivadas de las mediciones del contenido de gas de los pozos perforados a través de las antiguas labores (Creedy, 1985).

Combinando el nivel del agua en función del tiempo con la reserva de gas en función de la profundidad, es posible obtener una curva de la reserva de MMA en función del tiempo (Kershaw, 2005).

4. Evaluación de la viabilidad de la extracción y el uso del MMA

Mensajes clave

- El éxito comercial de un programa de explotación del MMA dependerá de su capacidad de competir con otros combustibles y fuentes de energía del mercado.
- Al evaluar la viabilidad de los proyectos de explotación del MMA es preciso examinar aspectos relacionados con la minería, la geología, la superficie y la planificación, junto con los mercados del gas y la electricidad y el entorno político.
- Las opciones de uso del MMA en estos programas de recuperación son diversas y dependen de una serie de factores, como los precios de la energía, el acceso al gas y los incentivos existentes, entre otros.
- El desarrollo y la ejecución de un proyecto de explotación del MMA deberían incluir una estrategia de producción de gas bien definida y el reconocimiento de que la producción se basará probablemente en un recurso en disminución.

4.1 Factores de interés al evaluar la viabilidad de los proyectos de explotación del MMA

Para evaluar la viabilidad de los proyectos de explotación del MMA, es preciso examinar aspectos relacionados con la minería, la geología, la superficie y la planificación, junto con los mercados del gas y la electricidad y el entorno normativo. Los programas deben abordar no solo los problemas técnicos de la extracción del gas, como el control de la entrada de aire y la recuperación del agua, sino también las necesidades del usuario final.

El grado de detalle de un estudio y la fiabilidad de los resultados dependerán de cuándo se cerró la mina y de la disponibilidad de registros. Las situaciones típicas son:

1. Una mina abandonada hace algún tiempo, con pocos o ningún registro y escasos datos empíricos disponibles.
2. Una mina abandonada recientemente, con buenos datos históricos disponibles pero con algunas lagunas.
3. Una mina en proceso de cierre, en que se tiene acceso a todos los datos pertinentes.

El éxito comercial de un programa de explotación del MMA dependerá de su capacidad de competir con otros combustibles y fuentes de energía del mercado. En el uso del MMA influirán distintos factores:

- La disponibilidad, cantidad y calidad del gas.
- Las necesidades de los clientes y las condiciones de los contratos.
- El costo y la disponibilidad de combustibles alternativos.
- El marco regulador y jurídico.
- Los incentivos, que los Gobiernos suelen ofrecer debido a los beneficios sociales del uso del MMA.
- Los costos de capital y de explotación.
- El acceso al emplazamiento.

No todas las minas abandonadas se prestan para la explotación del MMA. Algunas minas cerradas en que se explotaron mantos de carbón de bajo contenido de gas producen mezclas de aire desoxigenado y dióxido de carbono (gas asfixiante). Sin embargo, hay excepciones: se ha informado de una mina de bajo contenido de gas que se convirtió en productora de MMA, posiblemente debido a la generación de metano de origen microbiano (Backhaus, 2018).

Cuando la extracción de carbón ha sido extensa, o cuando hay pocos filones de carbón en los estratos superiores e inferiores a los mantos explotados, el potencial de recuperación de MMA puede ser bajo. Otros factores también influirán en la idoneidad de una mina abandonada para un proyecto de explotación del MMA (**recuadro 2**); en general, esos factores se relacionan con la posibilidad de controlar la entrada de aire y la tasa de recuperación del agua en las labores mineras abandonadas.

Recuadro 2. Características fundamentales de una mina prometedora para un proyecto de explotación del MMA

- Una extensa área de labores mineras abandonadas interconectadas.
- Un gran volumen de carbón en vetas no explotadas y descomprimidas a raíz de las labores en capas superiores e inferiores (es decir, un espesor significativo de vetas de carbón por encima y por debajo de los mantos explotados).
- El uso de métodos de extracción por socavación y derrumbe total de tajo largo.
- Una cantidad importante de metano residual en los mantos de carbón no explotados.
- Una entrada mínima de agua.
- La posibilidad de reducir la entrada de agua como parte del programa de cierre.
- Una disposición de la mina que favorezca el flujo de agua hacia las labores más bajas con poco o ningún estancamiento en las vías principales.
- Un número mínimo de bocaminas.
- Un pozo o galería no rellenado por el que se pueda extraer el gas, o un lugar adecuado para perforar un pozo de extracción.
- Buenos registros del tratamiento histórico de los pozos de la mina.
- Ausencia de conexiones con labores aflorantes poco profundas, y por lo tanto, ninguna entrada de aire por filtración.
- Acceso a la superficie para la infraestructura y el desarrollo.
- Un mercado local de gas o generación de electricidad en pequeña escala y altos precios de la energía.

4.2 Estrategias de producción de gas

Hay diversas opciones que deben tomarse en consideración al determinar una estrategia de producción de gas a fin de maximizar los ingresos y los beneficios para los clientes:

- Extraer la mayor cantidad de gas posible antes del cierre mediante técnicas de drenaje de gas convencionales, mientras se pueda acceder a los principales sitios de extracción de gas y el proceso sea controlable.
- Maximizar la extracción después del cierre y el sellado inmediato, mientras los flujos de gas sean más altos, para recuperar el máximo volumen posible antes de que la inundación elimine las fuentes de desgasificación.
- Producir MMA para satisfacer una demanda específica de los usuarios.

También se debe considerar cómo optimizar el uso de la fuente de MMA en disminución:

- Producir y utilizar el MMA a una tasa de extracción inferior a la máxima, con el riesgo de que la constante recuperación de las aguas subterráneas reduzca las reservas de gas explotables.
- Producir MMA solo para atender los momentos de demanda máxima, a fin de aprovechar las altas tarifas de esos momentos para la generación de electricidad.
- Optar por la cogeneración con gas natural, cuando el costo de producción del MMA sea menor que el precio de compra del gas natural.
- Utilizar sistemas de generación compactos y portátiles para poder reubicar el exceso de capacidad, si hay otras instalaciones disponibles que puedan acoger un equipo adicional.

4.3 Opciones de utilización del MMA

Las distintas opciones de utilización del gas en los programas de explotación del MMA son similares a las disponibles para el uso del gas natural. Para seleccionar la opción de uso final más apropiada deben tenerse en cuenta los precios de la energía, los arreglos de transmisión de gas y electricidad, la reglamentación y los incentivos, la infraestructura y el acceso, la planificación, las cuestiones ambientales, los objetivos empresariales y las necesidades de los clientes.

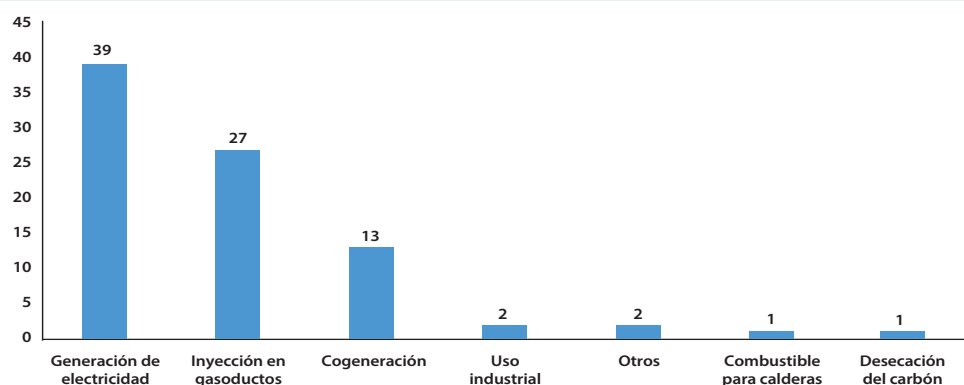
Dependiendo de la calidad del gas y de otros factores, las opciones para el uso comercial del metano incluyen:

- La producción de electricidad.
- La cogeneración de energía térmica y eléctrica para la industria y/o las zonas urbanas.
- El suministro a través de los gasoductos del mercado de gas natural comercial.
- El uso térmico industrial local a través de los gasoductos locales.
- La adición de MMA de baja calidad al gas natural, en volúmenes que mantengan el gas del gasoducto dentro de las especificaciones.
- El uso como materia prima química.
- El uso en microturbinas y pilas de combustible a pequeña escala.
- El uso como combustible para vehículos (equivalente al GNC).
- La obtención de beneficios monetizados por la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (por ejemplo, por la quema en antorcha).

Las opciones más comunes para el uso comercial del metano son la generación de energía eléctrica (incluida la cogeneración) y la venta a los gasoductos de gas natural. La **figura 4.1** presenta la distribución de las opciones de uso de los proyectos activos de explotación del MMA desplegados en todo el mundo y comunicados a la base de datos internacional sobre los proyectos de recuperación del metano de las minas de carbón de la GMI (Iniciativa Mundial del Metano, 2016).

Cada opción tecnológica para la utilización del MMA tiene sus limitaciones, ventajas y desventajas particulares (**cuadro 4.1**).

Hasta la fecha, los programas de explotación del MMA han optado principalmente por suministrar gas a la industria local a través de un gasoducto de distribución o generar energía eléctrica con motores modulares de encendido por chispa situados en las mismas instalaciones. La selección del uso final ha respondido a los precios de la energía locales y nacionales, las necesidades del mercado local, las prioridades de política y los incentivos, el costo del transporte y el costo de las inversiones en proyectos. En el Reino Unido, se han construido gasoductos específicos para suministrar MMA a usuarios industriales.

Figura 4.1 Proyectos de explotación del MMA a nivel mundial


Fuente: Iniciativa Global del Metano, 2016.

Cuadro 4.1 Características generales de algunas opciones de uso final del MMA

Opción de uso final	Aplicación	Ventajas	Desventajas	Requisito de calidad del gas (porcentaje de CH ₄)
Inyección en un gasoducto de gas natural	MMA de alta calidad (purificado)	Equivalente al gas natural; atractiva en mercados con altos precios del gas y una infraestructura de gasoductos bien desarrollada.	Requiere MMA de alta calidad, obtenido cerca de un gasoducto de gas natural y con acceso a él. Si no se cumplen los requisitos de calidad, será necesario un costoso tratamiento de purificación.	95 % a 97 % de metano
Adición al gas natural	Inyección de cantidades variables de MMA de baja calidad en los gasoductos de gas natural	Facilita el uso del MMA de baja calidad que de otra manera iría a parar a la atmósfera.	Solo pueden añadirse volúmenes pequeños para que el gas natural se mantenga dentro de las especificaciones; el precio del MMA es bajo y en el mejor de los casos será un producto marginal desde el punto de vista comercial. Requiere medidas para evitar las mezclas potencialmente explosivas antes de la inyección.	>25 %
Industrial para uso térmico directo	Gas de calidad mediana para uso industrial y comercial local y para la calefacción urbana residencial	Fuente de energía de bajo costo, que requiere un mínimo de tratamiento del gas y puede, en teoría, producirse a demanda.	Posibilidad de que el volumen y la calidad del suministro de gas a largo plazo sean problemáticos; costo de un gasoducto local o del enlace con el gasoducto industrial existente.	>35 %
Generación de energía eléctrica y uso del calor residual (cogeneración)	Generadores de motor de gas con recuperación del calor si es necesario	Tecnología bien establecida que puede operar en función de la demanda, dentro de ciertos límites; posibilidad de aplicaciones para horas punta con tarifas altas; calor residual posiblemente utilizable.	Inversión de capital alta, viable solo cuando el precio de la electricidad es razonablemente elevado; incertidumbre en el flujo y la calidad del gas a largo plazo; disminución del recurso de gas con el tiempo; conexión a la red eléctrica posiblemente cara.	>35 %
Otros usos	Materia prima química, GNC y GNL para vehículos, microturbinas y pilas de combustible	Usos especializados, según la localidad y la demanda.	Generalmente requerirá una purificación costosa, que eleve las concentraciones del gas a la calidad del gasoducto o a un porcentaje mayor de CH ₄ .	

El uso térmico del MMA y su inyección en gasoductos tienen muchas ventajas por la simplicidad de la extracción y el suministro, el bajo costo de capital y la flexibilidad del mercado. Cuando no hay otro suministro de gas disponible, puede obtenerse un precio más alto por un combustible limpio como el MMA. En cambio, si existe un buen suministro de gas natural, será necesario ofrecer el MMA a un precio más bajo para conseguir y mantener una cuota de mercado. Los factores que influyen en el uso del MMA como combustible son:

- Los costos de compresión del gas para la inyección directa en una red de tuberías de distribución.
- Las composiciones del gas permitidas para la inyección.
- La proximidad de los gasoductos existentes y la necesidad de construir una red de tuberías.
- El cumplimiento de la especificación mínima del gas durante el período de suministro.
- El acceso a otra fuente de combustible para el enriquecimiento del gas o como suministro de reserva.
- El acceso, el control y la regulación del suministro de gas a la red de distribución.
- La disponibilidad y necesidad de instalaciones de almacenamiento de gas in situ o en etapas posteriores del proceso.
- La proximidad de los usuarios industriales locales.
- Las necesidades de tratamiento del gas y su costo.
- El acceso a tierras para la red de tuberías o el almacenamiento.
- El mercado del GNC.

Cuando la calidad del gas y los volúmenes de producción son altos y el proyecto está situado cerca de una red de gasoductos, la venta a un mercado más grande puede ser una opción atractiva. Si el gas producido cumple ciertos criterios, el MMA puede ser vendido y transportado a gasoductos comerciales. Los operadores de gasoductos suelen tener especificaciones de calidad muy estrictas para el gas, que deben cumplirse antes de poder proceder a la inyección. Los límites de concentración establecidos protegen contra la introducción irrestricta de gases tóxicos, humedad, dióxido de carbono y oxígeno. La humedad y el dióxido de carbono pueden conducir a la corrosión de la tubería, los gases tóxicos podrían generar condiciones peligrosas en el lugar del uso final, y el oxígeno encierra el peligro de explosión. Aunque existe tecnología que permite purificar el gas hasta que cumpla las normas para el gas natural, en muchos países ese proceso difícilmente será viable desde el punto de vista comercial.

El gas podría utilizarse también en pilas de combustible y microturbinas para atender las necesidades de generación de electricidad del lugar, o las necesidades de clientes con bajo consumo de energía, pero estas son actualmente, en general, tecnologías en pequeña escala que tienen un costo elevado.

Un programa de utilización del MMA puede entrañar la extracción y el uso del gas de una sola mina abandonada, o de un grupo de ellas. A veces es provechoso vincular los programas relativos al MMA con los de extracción del metano de las minas de carbón (MMC) de las explotaciones mineras activas. La producción de MMA puede ajustarse según sea necesario, mientras que la extracción del MMC debe mantenerse para proteger la seguridad de la mina en explotación. Por lo tanto, el MMA podría utilizarse en conjunto con el MMC para satisfacer la demanda máxima de gas. También puede ser posible almacenar el excedente de MMC en la mina abandonada cuando la demanda es baja. La disponibilidad de múltiples fuentes de gas mejora la seguridad del suministro y aumenta las posibilidades de controlar y mantener la pureza del gas deseada.

Independientemente del uso final, los programas de explotación del MMA requerirán que durante todo el período de suministro se mantengan los caudales y las concentraciones del gas especificados en el contrato. Para la gestión eficaz de un programa, será preciso comprender los procesos que causarán

cambios en la composición, la presión y el flujo del gas, en particular los efectos probables del aumento del nivel del agua en las minas. Por lo tanto, es conveniente vigilar la recuperación y los niveles del agua en las labores mineras abandonadas.

El valor calorífico del gas (superior o inferior, ajustado a condiciones de ausencia de humedad y de temperatura y presión estándar) es la medida preferida internacionalmente para el suministro de energía, y debería servir de base en los asuntos contractuales y en la evaluación del desempeño de un sistema de MMA.

La generación de energía eléctrica con MMA se efectúa generalmente con motores de émbolo. Los sistemas avanzados de gestión del combustible y los sistemas de vigilancia y control a distancia permiten ejecutar los programas con poca mano de obra. Es probable que la mayoría de los programas se basen en la generación de energía de carga base (24 horas), aunque en algunos casos puede aprovecharse el aumento de los precios de la electricidad para la generación en las horas pico.

Los factores que influyen en la opción de usar el MMA para la generación de energía eléctrica son, en particular:

- La localización, capacidad y calificación de la infraestructura de distribución eléctrica existente.
- Los costos del acceso y la conexión a la red de suministro nacional.
- Los costos del aforo y el control para exportar la energía eléctrica generada.
- Las necesidades de energía eléctrica del usuario *in situ*.
- La capacidad de la infraestructura *in situ*.
- Las necesidades de tierras y acceso.
- El uso *in situ* o local del calor residual generado.
- La existencia de tarifas reguladas u otras subvenciones para la energía eléctrica limpia.

5. Optimización de la producción de MMA

Mensajes clave

- Para el éxito de los programas de explotación del MMA, es fundamental reducir al mínimo la entrada de aire y controlar la entrada de agua en las labores mineras abandonadas.
- Las medidas de ingeniería diseñadas para maximizar la extracción de MMA pueden incorporarse en el programa de cierre de una mina de carbón, y serán más eficaces en relación con el costo si las obras se ejecutan antes del cierre.

5.1 Control de la entrada de aire

El control de la entrada de aire requerirá el tratamiento efectivo de **TODAS** las bocaminas conectadas al programa de explotación del MMA, no solo de las correspondientes a la mina en cuestión, sino también de las de todas las labores mineras interconectadas de las minas adyacentes. Es esencial que todas las bocaminas estén marcadas en los planos de las minas y que se encuentre y examine su localización en la superficie.

Las bocaminas pueden ser pozos verticales o galerías inclinadas, desde simples excavaciones con un sostenimiento mínimo hasta complejas estructuras de ingeniería. Las opciones de tratamiento deben tener en cuenta la necesidad no solo de crear un sello hermético eficaz, sino también de garantizar la estabilidad del suelo y la seguridad pública.

El diseño de toda medida de ingeniería deberá tener en cuenta los siguientes elementos:

- La infraestructura existente y los detalles de la construcción del pozo/galería.
- La profundidad y las características geotécnicas de la superficie de la roca madre.
- La naturaleza y profundidad de los materiales superficiales.
- El control de las aguas de superficie.
- El tratamiento de los conductos de servicio, los túneles de ventilación, etc.
- La retirada de los elementos de soporte del pozo.
- Las instalaciones de superficie existentes y futuras.
- El acceso para el trabajo en torno a la bocamina.
- La propiedad de la tierra y el acceso a ella.
- El uso futuro de la tierra.
- Las disposiciones de vigilancia.
- Los requisitos de mantenimiento.

El tratamiento de las bocaminas de la superficie requerirá la construcción de tapas de pozos o tapones de bloqueo de las galerías. Los factores fundamentales son los siguientes:

- En el caso de los sellos de pozos, el factor de diseño más importante es la profundidad y naturaleza de los materiales superficiales.
- Los conductos de servicio y túneles de ventilación deben quedar sellados.
- Los tapones de bloqueo de las galerías deben construirse en un suelo competente y enclavarse en los estratos naturales.

- Las tuberías que atraviesen la tapa o el taponamiento de un pozo deberán ser herméticas, de diámetro constante en toda su longitud, sin curvas e instaladas de modo que se evite la acumulación de agua.
- Las tapas o los taponamientos de pozos que se vayan a utilizar para la producción de MMA deberán contener al menos dos tubos de extracción.
- El diámetro de la tubería debe ser suficiente para limitar la caída de presión al mínimo previsto en el diseño.
- Debe existir un acceso seguro a las tuberías y válvulas para la vigilancia y el mantenimiento.

Las opciones de ingeniería aplicables al tratamiento de las bocaminas para facilitar los sondeos del MMA y la extracción después del cierre se describen brevemente en el **apéndice 3**.

5.2 Control de las aguas superficiales y subterráneas

Tras el cierre de una mina, el nivel del agua subirá en las labores abandonadas, a menos que se mantenga el bombeo. La creciente cantidad de agua llenará las labores abandonadas, aislando no solo las áreas de carbón no explotado (la fuente del gas) sino también las vías de migración creadas por los pasillos subterráneos. La tasa de recuperación del agua variará de una mina a otra. Una mina puede tardar desde unos pocos meses hasta muchos años en quedar completamente anegada, dependiendo de las tasas de entrada de agua y la extensión de las labores. Durante la explotación normal de la mina, se reunirá información sobre la localización del agua y las cantidades que fluyen hacia las labores, las cantidades bombeadas a la superficie y las zonas ya inundadas.

Como parte del cierre de la mina, pueden diseñarse e instalarse medidas de ingeniería para reducir al mínimo los efectos de la entrada de agua y controlar el flujo del agua. Estas medidas, que son particularmente útiles cuando está previsto utilizar el metano en el futuro próximo, incluyen lo siguiente:

- Obras para minimizar la entrada de agua superficial a través de las bocaminas.
- La colocación de taponamientos de arcilla (o materiales similares) en los pozos o galerías, para restringir el flujo de agua hacia las labores más profundas por estas rutas.
- La conexión de diferentes zonas mineras mediante pozos perforados, tuberías o pasillos para controlar el flujo y la acumulación de agua.
- La construcción de presas de agua.
- La instalación de tuberías que crucen los puntos bajos de las vías subterráneas para permitir la transmisión del gas.
- La construcción de puntos de vigilancia que permitan evaluar la recuperación del agua.
- El mantenimiento o la instalación de estructuras de evacuación del agua.

Desde el punto de vista de las emisiones, es importante señalar que el control de la inundación de las minas puede aumentar las emisiones, si el metano no se utiliza prontamente.

La gestión eficaz de la recuperación del agua como parte del programa de cierre entrañará la determinación de los puntos bajos de las principales vías subterráneas de conexión donde el agua pueda acumularse. Se pueden instalar tuberías herméticas que crucen estas zonas para evitar el aislamiento de los bloques mineros adyacentes, incluso si la vía subterránea se inunda. Esto será particularmente importante en la base de los pozos y las galerías, o en los túneles principales, donde un bloqueo puede afectar a una amplia zona de labores y reducir significativamente la recuperación del MMA.

De ser posible, deberían aprovecharse los pozos y las galerías accesibles para vigilar el nivel del agua. Se puede utilizar la tubería existente dentro de un pozo, por ejemplo los antiguos conductos de agua o aire comprimido.

La instalación de disposiciones de vigilancia adecuadas permitirá evaluar los efectos de la elevación del nivel del agua y adoptar medidas correctivas, si procede. Esto puede requerir la perforación de pozos hasta determinados horizontes. Las técnicas de entubado durante la perforación permiten atravesar las antiguas áreas de derrumbe y las labores sin pérdidas de fluidos y sin riesgo de causar emisiones de gases peligrosos.

6. Desarrollo de proyectos de explotación del MMA

Mensajes clave

- El desarrollo de un proyecto de explotación del MMA debería incluir una serie de estudios, comenzando por un análisis técnico básico, seguido de un estudio de previabilidad y luego de un estudio de viabilidad completo.
- El estudio técnico debe basarse principalmente en la documentación técnica disponible, pero puede incluir también sondeos pasivos o activos de los reservorios.
- Además de análisis geológicos, de ingeniería y operacionales más detallados, los estudios de previabilidad y viabilidad comprenden los análisis de políticas, del mercado y financieros necesarios para satisfacer a los inversores.
- Los posibles inversores en proyectos de explotación del MMA deben ser convencidos de que el rendimiento proyectado de la inversión será proporcional al grado de riesgo.
- Una vez tomada la decisión de iniciar un proyecto de ese tipo, los pasos siguientes son el diseño, el desarrollo, la construcción y la explotación de las plantas de extracción y de destrucción o uso del gas.
- Los principales parámetros del diseño de procesos para una planta de MMA son la seguridad del personal de operaciones, la seguridad pública y las medidas adecuadas de protección del medio ambiente.
- Debe prestarse especial atención a las fuentes de ignición y a la mitigación de los riesgos de explosión, pero en el diseño y la ejecución de los proyectos deben tenerse en cuenta también los gases que no son hidrocarburos, como el monóxido y el dióxido de carbono.
- Deberían realizarse auditorías periódicas de la seguridad, para verificar que se cumplan los procesos de gestión de riesgos.
- Los sistemas de control pueden vigilarse a distancia, de modo que los problemas operacionales se detecten de inmediato y los directores de las plantas puedan abordarlos con rapidez.

6.1 Examen técnico

La información esencial sobre el reservorio de MMA estará contenida en los registros, informes y planos mineros. El reservorio puede describirse como una serie de "pilas" discretas de mantos de carbón descomprimidos a raíz de la anterior explotación minera por tajo largo. Estas zonas explotadas están interconectadas internamente dentro de cada pila por las vías subterráneas secundarias, que a su vez se conectan con las vías subterráneas principales de la mina, con la zona del fondo de esta y, finalmente, con la superficie. La cantidad de carbón descomprimido en una pila variará, al igual que el estado y la transmisividad de las vías subterráneas y las conexiones a las áreas de derrumbe. Los sondeos y análisis permiten determinar la característica compuesta. Los factores clave para elaborar una descripción del reservorio de MMA son:

- Los métodos de minería utilizados y la probable extensión vertical del reservorio de gas.
- El volumen de carbón descomprimido y el número de pilas que componen el reservorio de gas.
- El tipo y las propiedades de los estratos situados entre los mantos de carbón.

- Las posibles fuentes de gas adicionales a los mantos de carbón.
- Las propiedades del carbón y el contenido de gas.
- Los flujos y las fuentes de agua.
- Las zonas inundadas antes del cierre.
- Los puntos bajos en las vías subterráneas principales de la mina, donde el agua podría acumularse y causar bloqueos.
- Las conexiones subterráneas con otras minas.
- Las principales conexiones subterráneas entre los diferentes horizontes de trabajo.
- La conexión con labores más superficiales y la posible entrada de aire.
- La posibilidad de que haya labores y bocaminas no registradas por las que pueda entrar aire.
- El número de bocaminas y la escala de las obras de ingeniería necesarias para reducir al mínimo la entrada de aire y agua.
- Las actividades de producción de gas existentes.

Es necesario determinar las características críticas del reservorio elaborando los escenarios de entrada, flujo y probable recuperación del agua en la mina, sin olvidar las posibilidades de entrada de aire. También se pueden determinar los lugares adecuados para conectarse con las labores abandonadas y realizar la extracción, para lo cual se puede utilizar un pozo o galería ya existente o perforar un pozo nuevo. En los casos en que los pozos o galerías existentes no sean adecuados, por ejemplo porque se han llenado, será necesario hacer una perforación. Una práctica común consiste en perforar pozos de extracción de MMA hasta intersectar pasillos de zonas generalmente estables, donde sea probable lograr una buena conexión con la red de labores abandonadas.

6.2 Sondeo del reservorio

La fase del estudio técnico comenzará con la elaboración de un modelo conceptual tridimensional del reservorio. Sin embargo, ese modelo no puede resolver las incertidumbres con respecto a cuestiones clave que determinarán la tasa máxima de producción, el volumen total recuperable y la calidad del gas, tales como:

- Los niveles de agua y su recuperación.
- El posible espacio hueco abierto de la mina.
- El posible ingreso de aire a través de entradas de la superficie.
- La conectividad entre el punto de extracción de la superficie y el reservorio.
- La transmisividad del reservorio subterráneo.

Por lo tanto, es una buena práctica monitorear las concentraciones de gas y los flujos emitidos naturalmente por las bocas de las minas abandonadas (sondeo pasivo) y realizar pruebas de bombeo de gas (sondeos activos) para confirmar la viabilidad comercial del reservorio. En el **apéndice 1** se resumen una serie de pruebas y sus posibles interpretaciones.

Solo se pueden hacer sondeos activos si todas las bocaminas han sido selladas en un grado razonable. Las bombas de sondeo pueden conectarse a un tubo de ventilación ya existente. Si no existe una conexión adecuada, será necesario perforar un pozo de sondeo hasta intersectar las labores. Las pruebas de bombeo de gas permitirán determinar las características de flujo del reservorio. Estos sondeos proporcionan información sobre la resistencia al flujo entre el punto de extracción de la superficie y las labores subterráneas, la magnitud de la entrada de aire, la resistencia equivalente de las vías

subterráneas interconectadas de la mina y los tajos largos explotados (áreas de derrumbe), los efectos de la recuperación del agua en la mina, la posible composición del gas y su flujo potencial. Los resultados de las pruebas sobre el terreno deben considerarse junto con el modelo evolutivo del reservorio de MMA y no de forma aislada para evitar interpretaciones erróneas que puedan comprometer el diseño de un programa.

6.3 Estudio de previabilidad

Se requerirá un estudio de previabilidad para convencer a los posibles inversores de que el proyecto propuesto goza del análisis de factibilidad financiera y de que se han determinado los principales factores técnicos y administrativos que pudieran afectar al resultado. El estudio de previabilidad debe incluir planos que presenten la información clave para ayudar a los nuevos interesados en el proyecto a obtener rápidamente una comprensión clara de lo que se propone. La buena calidad de los datos reducirá las incertidumbres. Los datos históricos y actualizados del monitoreo de los factores clave, en particular del contenido de gas, las emisiones durante la explotación minera, y la entrada de agua, su localización y sus niveles, son fundamentales. El apoyo a un proyecto dependerá finalmente de sus méritos financieros y técnicos.

El estudio de previabilidad entrañará la realización de un análisis geológico y minero básico de la mina de carbón, así como una evaluación de alto nivel del mercado y un análisis financiero básico. Como parte del análisis de mercado y financiero, el estudio de previabilidad debería tratar de determinar los incentivos y otras políticas de fomento, junto con los posibles desincentivos. Cuando sea factible, será útil cuantificar los posibles costos y beneficios de los mecanismos de política. Los elementos que deberían incluirse en un estudio de previabilidad se enumeran en el **apéndice 2**.

6.4 Estudio de viabilidad completo

Si bien un estudio de previabilidad proporciona una evaluación inicial con algunos datos específicos del lugar, es aconsejable y a menudo necesario realizar un estudio de viabilidad completo para financiar un proyecto. La evaluación de la viabilidad podría comprender, entre otras pruebas, la conexión de una bomba de extracción a una mina ya sellada para determinar las características de producción del reservorio de MMA. Por lo tanto, puede ser necesario realizar obras de ingeniería para sellar las bocaminas o mejorar la calidad de los sellos existentes. Dado que los gastos de capital pueden ser importantes, esta etapa solo se lleva a cabo cuando el resultado del estudio de previabilidad es prometedor.

Los principales elementos de un estudio de viabilidad son:

- La construcción o mejora de los sellos de las bocaminas y de las tuberías de producción.
- Los sondeos pasivos del gas (flujos de ventilación natural y composiciones).
- Las pruebas por bombeo (tendencias de la presión, flujos y composiciones del gas obtenidas con diferentes tasas de extracción).
- El análisis de los resultados de la observación pasiva y activa.
- Los trabajos de investigación y reparación requeridos en los sellos de las bocaminas y en cualquier otra vía de filtración.
- Un estudio geológico más pormenorizado.
- Diseños y cálculos de costos detallados para un programa completo de extracción y uso.
- Un estudio de mercado.
- Un análisis de las leyes y la reglamentación.
- Una evaluación financiera.

Recuadro 3. Un proyecto de explotación del MMA está listo para la inversión cuando cumple las siguientes condiciones:

- Se han identificado importantes reservas, con una vida útil prevista del proyecto de diez años o más.
- Los objetivos del proyecto están claramente definidos, se comprenden en todos sus aspectos y son alcanzables.
- La propiedad del gas está clara, y el promotor tiene los derechos de producción.
- Se han determinado la estructura de gestión y los principales responsables de la toma de decisiones.
- Se han obtenido las aprobaciones y el apoyo (incluso financiero) de la administración local.
- Los riesgos técnicos son cuantificables y controlables.
- Se ha seleccionado la tecnología adecuada, y es aplicable con la base de competencias de la comunidad.
- Pueden generarse ingresos en una etapa temprana.
- Se han identificado los clientes y se han negociado contratos de suministro en firme.
- Se obtendrán beneficios ambientales y sociales importantes.
- La recuperación del capital es posible en 2 o 3 años.
- Hay perspectivas de uso o venta del gas a largo plazo.

6.5 Financiación de los proyectos de explotación del MMA

Un requisito esencial para un proyecto de explotación del MMA que busque financiación es que cumpla los criterios técnicos para poder obtener la rentabilidad proyectada, lo que suele establecerse en líneas generales en el estudio de previabilidad y en detalle en el estudio de viabilidad completo. Una consideración importante para evaluar la viabilidad de los proyectos es el entorno reglamentario, que se describe con más detalle en el **capítulo 7**. Las políticas y los reglamentos pueden afectar a las perspectivas de recuperación de la inversión y de rentabilidad al determinar los incentivos fiscales y tributarios y al reducir la carga administrativa de las empresas en relación con la obtención de los derechos de propiedad o el acceso a la infraestructura. En algunos casos, pueden ser importantes también factores ambientales, políticos y sociales.

Los inversores en un posible proyecto de explotación del MMA deben poder convencerse de que:

- Se han obtenido todas las aprobaciones necesarias, especialmente en lo que respecta a los derechos de producción de MMA.
- Se trata de un proyecto técnico sólido.
- Existe un mercado para el gas y los compradores están dispuestos a pagar un precio razonable.
- La documentación del proyecto es clara y transparente, y los objetivos están claramente definidos, se comprenden en todos sus aspectos y son alcanzables.
- El proyecto tiene una escala suficiente para justificar el esfuerzo de estructurar los arreglos financieros y la administración.
- Los riesgos técnicos y financieros que conlleva el proyecto son cuantificables y controlables.
- El rendimiento proyectado de la inversión es proporcional al grado de riesgo.
- Las corrientes de efectivo se producirán en los momentos y con la certeza señalados.

Cuando haya posibilidades de reproducir los proyectos, los inversores pueden estar dispuestos a aceptar márgenes más pequeños en el primer proyecto, a sabiendas de que la experiencia adquirida generará beneficios razonables en los proyectos posteriores.

La existencia de diversos incentivos financieros puede aumentar el atractivo de los proyectos de explotación del MMA para los inversores, como se describe en el **capítulo 7**.

En la guía de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos titulada *Coal Mine Methane (CMM) Finance Guide* se encontrará información adicional sobre la financiación de los proyectos referentes al metano de las minas de carbón (MMC)⁷.

6.6 Diseño y ejecución de los proyectos de explotación del MMA

Una vez tomada la decisión de iniciar un proyecto de explotación del MMA sobre la base de una evaluación suficiente de sus méritos técnicos y económicos, los pasos siguientes son el diseño, el desarrollo, la construcción y la fase operativa del proyecto.

6.6.1 Principales parámetros del diseño y la fase operativa

Durante la explotación de una mina de carbón, la seguridad de los mineros en las labores subterráneas es el parámetro de diseño fundamental para cualquier planta de extracción y de destrucción o uso del gas. Este enfoque cambia después del abandono de la mina, a medida que las instalaciones pasan a ser un lugar de trabajo en la superficie solamente. Como en la mayoría de las operaciones industriales, los parámetros clave del diseño de procesos para la planta de MMA son la seguridad del personal operativo y de las personas que puedan vivir cerca del sitio, o visitarlo o atravesarlo, así como las medidas de protección ambiental, incluidas la gestión de las emisiones y de la escorrentía de aguas pluviales y la eliminación adecuada de los desechos industriales.

En general, la seguridad de la instalación tiene dos componentes: la seguridad del gas en las excavaciones de la mina (es decir, las vías por las que el gas puede escapar de la mina) y la seguridad de los procesos de la instalación de extracción y destrucción o uso del gas.

Los principales peligros se relacionan con la posibilidad de incendio o explosión del metano de la mina.

Cuando se emprenda el diseño de una planta de este tipo, deberá realizarse una investigación inicial para determinar las normas reglamentarias (la legislación local) que se aplican a la planta. Esto incluirá el establecimiento de parámetros para garantizar el cumplimiento de los requisitos locales de zonificación y obtención de permisos.

El cumplimiento de las normas ambientales también se controla estrictamente en muchos países, y para todo emplazamiento de un proyecto de explotación del MMA debería ser una prioridad cumplir los requisitos reglamentarios y demostrar la aplicación de una correcta gestión ambiental. Como mínimo, la construcción y explotación del sitio deberían reducir en lo posible las emisiones de contaminantes y polvo aerotransportados, establecer una adecuada eliminación de los desechos y las aguas residuales, controlar eficazmente las descargas de aguas pluviales y proteger los recursos de aguas subterráneas. En función de la ubicación del sitio, se deberá tener cuidado también de limitar el impacto sobre la flora y la fauna.

⁷ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). *Coal Mine Methane (CMM) Finance Guide* (actualizada en julio de 2019). EPA-400-D-09-001. Washington, D.C., julio de 2019. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/cmop_finance_guide_march_2016_revision.pdf.

Una vez examinadas la seguridad, la salud y la protección del medio ambiente desde una perspectiva general y reglamentaria, deberán estudiarse los criterios de diseño específicos.

6.6.2 Criterios de diseño específicos

- Cumplimiento de las leyes y reglamentos locales.
- Cumplimiento de los requisitos de obtención de permisos locales.
- Integridad del gas en el espacio de las excavaciones de la mina (verificar si hay fugas de gas de las excavaciones de la mina en torno al pozo, o si es probable que las haya en la geología circundante, o, cuando se haya creado un vacío, si hay entrada de aire en la mina).
- Localización de las filtraciones en el espacio de las excavaciones de la mina (puntos de fugas o de entrada de aire).
- Seguridad del sitio y de la instalación, con vallas, señales de advertencia, detectores y alarmas a distancia, si no hay personal.
- Viviendas residenciales o instalaciones industriales de la localidad y su impacto en el diseño de las instalaciones.
- Diseño de los pozos de gas, incluidas las estructuras de ventilación y aislamiento.
- Diseño de la instalación de ventilación (incluido el radio de la zona de peligro).
- Diseño de las tuberías de gas.
- Instalaciones de drenaje del agua (normalmente simples separadores del vapor y el líquido, o un intercambiador de calor de refrigeración con circuito de refrigeración del agua o ventilador de radiador de aire).
- Diseño de la planta de extracción.
- Diseño de la planta de destrucción o uso.
- Sistema de monitoreo a distancia.
- Conexión a tierra y diseño de la protección contra descargas eléctricas.
- Diseño acústico.
- Diseño civil.
- Conexión eléctrica para el suministro y posiblemente la exportación a la red.
- Conexión para la exportación de gas.
- Evaluación de los riesgos de seguridad del proceso.
- Evaluación de los riesgos de seguridad operacional.
- Evaluación del riesgo ambiental.

La lista anterior representa un resumen de alto nivel de las consideraciones de diseño para una planta de explotación del MMA. En las partes siguientes de esta sección se ofrece orientación más detallada sobre algunos temas específicos de alta prioridad.

6.6.3 Diseño de la protección contra descargas eléctricas

Los rayos son una fuente comprobada y regular de ignición de mezclas de gases inflamables tanto en las minas activas como en las abandonadas. El equipo debe estar debidamente conectado a tierra, de acuerdo con las normas locales, y dotado de los disyuntores de aislamiento eléctrico que sean necesarios.

Debe examinarse debidamente si las instalaciones de la planta están conectadas o separadas, desde el punto de vista de la toma de tierra, de la boca del pozo o la conexión con la mina.

6.6.4 Placas cortafuegos

Uno de los elementos fundamentales del diseño de plantas de extracción y uso del metano de minas abandonadas es el empleo de placas cortafuegos dentro de las tuberías de gas para evitar la propagación de las llamas. Las placas cortafuegos están diseñadas para impedir temporalmente el paso de un frente de llama a través de una mezcla de gas y aire inflamable. Al seleccionar este dispositivo, es fundamental utilizar los servicios de un especialista técnico competente para cerciorarse de que el diseño de la placa instalada sea el correcto. En función de la fuente de ignición y de la posición de la placa, pueden requerirse diferentes tipos.

Las placas cortafuegos se utilizan normalmente con sistemas automatizados que miden la temperatura en el lado protegido y están acoplados automáticamente a una válvula de aislamiento que se activa para cortar el flujo de gas hacia la placa y extinguir la llama.

6.6.5 Análisis del gas y de su impacto en la seguridad, la vigilancia y la medición

La concentración de metano alrededor de la planta de MMA se monitorea por varias razones. Los operadores de la planta utilizan detectores de gas personales para su propia seguridad y como respaldo para detectar cualquier fuga de metano. En los edificios se instalan detectores de gas fijos para detectar los escapes incontrolados de metano, complementados a menudo con sensores de humo y monóxido de carbono que detectan el fuego y los productos de la combustión. Dentro de la tubería del gas se instalan normalmente transductores que indican la concentración de gas inflamable y oxígeno para evitar transportar mezclas explosivas. Para garantizar un alto nivel de seguridad, puede ser adecuado instalar instrumentos redundantes. Cuando exista un incentivo financiero, la exactitud y fiabilidad de las lecturas de gas serán importantes. En las instalaciones de importancia crítica para la seguridad, la detección y la respuesta del proceso deberán ser rápidas.

Además del metano, el etano y el propano, pueden estar presentes también otros alcanos, lo que aumenta el valor calorífico del gas y el rango de inflamabilidad de las mezclas de aire y gas. Los detectores infrarrojos que se utilizan comúnmente para la vigilancia del metano tienen una sensibilidad cruzada al etano, que, de no tenerse en cuenta, puede dar lugar a falsos valores altos de metano.

Si el rango de inflamabilidad es importante en el proceso de destrucción o uso, puede aplicarse el principio de Le Chatelier para corregir ese rango. Aumentando la presión o la temperatura del metano en el proceso, se amplía también el rango de inflamabilidad, en particular por la elevación del límite superior. Esto es importante si la mezcla de MMA contiene aire y si se está comprimiendo. En general, el contenido de gas inflamable de la mezcla se expresa como "porcentaje de metano"; por ejemplo, una mezcla con un 20 % de nitrógeno y un 80 % de gas inflamable se describirá como un gas con un 80 % de metano.

Los gases de las minas de carbón están calientes y saturados de agua, por lo que es necesario diseñar dispositivos de detección y muestreo de gases para evitar la acumulación de un condensado ya sea por desecación, decantación o calentamiento. Además del metano, el MMA siempre contiene monóxido de carbono (un producto de la oxidación a baja temperatura y de los incendios en minas subterráneas), dióxido de carbono y nitrógeno.

6.6.6 Diseño de la planta de extracción

La planta de extracción es necesaria para subir el gas del espacio de las excavaciones de la mina abandonada a la superficie y para transportar el gas bajo presión hasta la planta de destrucción o uso. Por lo general, en las instalaciones de explotación del MMA, las plantas de extracción son ya sea del tipo seco, que utiliza sopladores de desplazamiento positivo, ventiladores o compresores centrífugos, o

del tipo de vacío de anillo líquido, cuando la planta de extracción se hereda de la etapa de explotación minera activa. Las bombas de anillo líquido tienen la ventaja de que pueden alcanzar mayores niveles de succión por vacío que las bombas secas. Sin embargo, su circuito de refrigeración del sellado con agua requiere mucho mantenimiento, y pueden tener una mayor demanda de carga eléctrica parásita que los sistemas secos. Otra desventaja de las bombas de anillo líquido es que entregan a la planta de utilización un gas que está completamente saturado de agua caliente, procedente del sistema de sellado con agua, y de agua contaminada con productos químicos, procedente del sistema de refrigeración del sellado con agua.

La planta de extracción de gas puede situarse en los antiguos edificios de la mina, pero lo más común es que se encuentre en recintos modulares de tipo contenedor, que pueden ser trasladados fácilmente a otras instalaciones cuando se agota la fuente del reservorio de MMA.

6.6.7 *Diseño de la planta de destrucción o utilización*

Desde el punto de vista ambiental, la jerarquía del diseño debería ser la utilización, como primera prioridad, seguida de la destrucción y, solo en el peor de los casos, la descarga a la atmósfera. Esta jerarquía podría aplicarse también desde la perspectiva de la seguridad, en que la utilización y la destrucción presentan características de seguridad similares, porque el gas se quema de forma confinada y controlada, mientras que la descarga representa el peor de los casos, ya que supone la liberación a la atmósfera de una mezcla inflamable de aire y gas, con posibilidades de ignición. Sin embargo, los supresores de llamas impedirán la transmisión de llamas a la mina abandonada. Los lugares de descarga a la atmósfera deberán estar rodeados de una valla de seguridad y, de ser posible, situados lejos de zonas residenciales. Los supresores de llamas requerirán un mantenimiento regular, y en los sitios sin operadores deberán efectuarse inspecciones periódicas para garantizar su seguridad.

6.6.8 *Riesgos comerciales de la planta de utilización, y evaluación del recurso*

Además de una fuente segura de ingresos fiables y suficientes, el principal factor que influye en el éxito comercial de un proyecto de explotación del MMA es la estimación exacta del recurso de gas y el adecuado ajuste del tamaño de la planta de extracción y utilización al volumen de ese recurso estimado. La modelización informática permite estimar el espacio excavado y derrumbado y pronosticar la producción de gas, pero en general el paso siguiente —la realización de pruebas de presión— genera datos mucho más fiables sobre los recursos del espacio derrumbado en la fase de preinversión del diseño del proyecto.

La tecnología relativa al MMA requiere generalmente el uso de equipos debidamente probados, algunos de cuales pueden haber sido desarrollados para proyectos de extracción y utilización del metano de las minas de carbón o del gas de los vertederos.

El uso de una planta de extracción y utilización semimóvil, alojada en contenedores, permite una fácil reubicación en caso de que la recuperación de MMA en un sitio sea inesperadamente baja, mitigando así el riesgo comercial, siempre que haya otros sitios de extracción de MMA disponibles. Cuanto mayor sea la cartera de minas abandonadas, más eficiente será el uso de los activos infraestructurales de extracción y utilización semiportátiles. Por ejemplo, en el caso de una empresa con proyectos de explotación del MMA en cinco emplazamientos, si una mina suministra menos gas del previsto, los activos podrán trasladarse a otra mina que esté generando un volumen superior a lo esperado.

6.6.9 *Explotación y mantenimiento*

La explotación y el mantenimiento de las plantas de extracción y utilización corren a cargo de operadores generales con personal semicualificado, pero con especialistas mecánicos y eléctricos

disponibles cuando es necesario. El mantenimiento de los motores y generadores de gas también puede requerir la intervención de especialistas capacitados por los proveedores del equipo.

Mediante auditorías periódicas de la seguridad se garantiza el cumplimiento de los reglamentos y el mantenimiento de los niveles operacionales, y se evalúan las necesidades de capacitación o actualización.

6.6.10 Vigilancia a distancia

Por lo general, los sitios de explotación del MMA no tienen personal y son monitoreados a distancia por los dueños del proyecto o por contratistas. Los sistemas de extracción y los sistemas de destrucción/uso se controlan generalmente mediante controladores lógicos programables (PLC), y suelen estar conectados a distancia ya sea a un sistema de control central o a las computadoras personales de los operadores o administradores. También pueden utilizarse las conexiones de datos del Sistema Mundial de Comunicaciones Móviles (GSM) o de teléfonos celulares, cuando las instalaciones están lejos de las redes de Internet cableadas. Las alertas automatizadas dan aviso a los operadores y administradores en caso de parada de la planta debido a un defecto o a valores anómalos de los parámetros del gas. La seguridad de los sitios automatizados puede protegerse con ayuda de alertas de intrusión y cámaras de videovigilancia.

Los distintos equipos y servicios que pueden ser necesarios se resumen en el **apéndice 4**.

7. Mecanismos de política y reglamentación para facilitar y promover la extracción y el uso del MMA

Mensajes clave

- Es esencial que la política y la reglamentación promuevan la máxima extracción y el máximo uso o destrucción de las emisiones de MMA.
- Las experiencias de varios países proporcionan valiosas lecciones para otros países que deseen utilizar el potencial del MMA.
- La existencia de derechos de propiedad claros y prácticos respecto del MMA es fundamental para el éxito en el despliegue de proyectos de explotación de este recurso.
- Una reglamentación que exija a las empresas mineras la incorporación e instalación de sistemas para la futura recuperación de gases, después del abandono de la mina, puede alentar la ejecución de un mayor número de proyectos de explotación del MMA y reducir aún más las emisiones.
- Junto con los mercados de productos energéticos inocuos, la reducción de impuestos o el establecimiento de incentivos financieros y fiscales específicos pueden estimular la ejecución de proyectos de explotación del MMA.
- Los mercados de carbono también pueden impulsar el desarrollo de esos proyectos.

7.1 Función de la gestión de minas en la preparación para su cierre

Las políticas de buenas prácticas podrían crear un marco que aliente a los propietarios de minas a colaborar con promotores del MMA para asegurarse de que la mina se estructure de un modo que facilite la producción de MMA durante el proceso de cierre. Por ejemplo, con un subsidio atractivo o la atribución de un valor a la reducción de las emisiones de GEI, los proyectos de explotación del MMA podrían ser financieramente viables y constituir una fuente de ingresos tanto para el propietario/explotador de la mina como para el promotor del proyecto.

Las políticas deberían incluir también un mecanismo para evitar o resolver las controversias entre las minas activas y los productores de MMA en labores adyacentes, cuando haya interacción.

7.2 Propiedad del gas

Los derechos de propiedad claramente definidos pueden ayudar a las empresas a mitigar los riesgos en los proyectos de explotación del MMA. De igual modo, la transferencia de la propiedad del MMA a un tercero reduce el riesgo financiero del proyecto en ciertas situaciones y permite explotar el recurso. Los países en que los proyectos de explotación del MMA han prosperado han sido aquellos que han creado un entorno propicio, eliminando las restricciones a la transferencia de los derechos sobre el gas, independientemente de que este se venda como gas o se convierta en electricidad (**cuadro 7.1**).

Cuadro 7.1 Propiedad del metano	
País	Propiedad del gas
Estados Unidos	Propiedad federal y privada – Los proyectos de explotación del MMA deben normalmente adquirir los derechos sobre el gas metano, y los procedimientos varían según el estado y el propietario de la superficie.
Francia	Propiedad del Gobierno – Se otorgan concesiones a los explotadores, pero algunos equipos instalados en la superficie con fines de seguridad, como las bocas de pozos, pertenecen al Gobierno. La autorización para utilizar estas instalaciones gubernamentales se otorga a los concesionarios caso por caso.
Alemania	Propiedad federal – Los procedimientos para obtener los derechos sobre el MMA son sencillos y ágiles.
Reino Unido	Propiedad del Gobierno – Para producir y utilizar el MMA se requiere una Licencia de Exploración y Desarrollo de Petróleo o una Licencia de Drenaje de Metano.
China	Propiedad del Estado – La situación del MMA no está clara. Las licencias para la explotación del carbón y del metano en mantos de carbón se otorgan por separado. El uso del MMC no requiere una licencia de explotación del metano en mantos de carbón.
Ucrania	Propiedad del Gobierno – Ucrania no tiene actualmente ningún proyecto de recuperación del MMA, pero los derechos sobre el gas serían probablemente arrendados, como ocurre con los del MMC y otros gases.
Australia	Propiedad del Estado – Los gobiernos federal y estatales consideran el MMA un producto del petróleo. Las reglas estatales varían, pero, en todos los casos, los promotores del desarrollo del MMA deben obtener una licencia de explotación petrolífera.

Fuente: EPA, 2019; y Denysenko, A. et al., 2019; modificado a partir de Coté, M., 2018. Emisiones y preparación de proyectos, Foro Mundial del Metano, acto paralelo de la CEPE, Toronto (Canadá), 16 de abril de 2018.

Para aclarar las cuestiones relativas a la propiedad de las minas, puede ser necesario examinar el tratamiento jurídico del MMA. Por ejemplo, en Kazajstán, la Ley del Subsuelo divide todas las reservas en comerciales ("contabilizadas") y no comerciales ("no contabilizadas")⁸. Por el momento, la ley considera el MMA un recurso no comercial, un desecho, y no ofrece orientaciones sobre el modo en que las entidades podrían obtener derechos sobre este recurso. Recientemente, Kazajstán declaró su intención de adoptar la norma de clasificación utilizada por la mayoría de los países de la OCDE, es decir, las normas CRIRSCO, elaboradas por el Comité de Normas Internacionales para la Presentación de Informes sobre Reservas Minerales. Esto podría simplificar los procedimientos para obtener y transferir los derechos sobre los recursos de MMA.

7.3 Responsabilidades por el gas fugitivo

Sería razonable exigir a los explotadores del MMA que al finalizar un proyecto aplicaran determinadas medidas de diseño para dejar las instalaciones en condiciones de seguridad. Un claro beneficio de la extracción del MMA es que la ejecución del programa conduce a una situación de menor riesgo de emisión en la superficie que la existente anteriormente. Sin embargo, si las políticas imponen una responsabilidad a largo plazo a los explotadores del MMA, se desincentivará la ejecución de proyectos.

7.4 Acceso a la infraestructura

En general, los proyectos de explotación del MMA solo son viables si tienen fácil acceso a los mercados de gas natural y energía eléctrica. Sin ese acceso fácil al mercado, los proyectos deben utilizar el metano *in situ* o localmente, lo que, debido a la demanda y al precio, no suele ser competitivo. Así pues, el acceso a los mercados es una cuestión de política fundamental.

⁸ Esta clasificación es exclusiva de los países de la antigua Unión Soviética y no tiene equivalentes exactos en las normas internacionales de clasificación de las reservas minerales. Véase una descripción más detallada de diversas clasificaciones en Weatherstone, 2008.

Al mismo tiempo, el MMA debe ser transportado y utilizado de manera segura. Un principio clave es que las mezclas de gas correspondientes o próximas al rango explosivo (con entre un 5 % y un 15 % de CH₄) no deben ser transportadas en gasoductos o utilizadas en la producción de electricidad.

7.5 Incentivos financieros y fiscales

Los incentivos que ayudan a financiar proyectos de utilización del metano incluyen las desgravaciones fiscales, la reducción de las regalías y los incentivos a la producción de energía eléctrica limpia (como los de Alemania y de varios estados de los Estados Unidos). Por ejemplo, en el Reino Unido, los proyectos de explotación del MMA están exentos del Impuesto por el Cambio Climático. En Alemania, estos proyectos tienen acceso a "primas de mercado" favorables cuando el metano se utiliza para generar energía eléctrica. Varios estados de los Estados Unidos también reducen las regalías para el MMA producido en tierras estatales. Al menos una empresa de Francia tiene garantizada una tarifa regulada para la electricidad generada a partir del MMA mientras esté en vigor la licencia de la concesión (Moulin, 2019).

7.6 Finanzas del carbono

Las finanzas del carbono han sido un instrumento de mercado eficaz para poner en marcha proyectos de explotación del MMC (CEPE, 2016) en el marco del mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) y de la California Air Resources Board (CARB), y podrían igualmente apoyar el desarrollo de proyectos relativos al MMA, cuando proceda. El establecimiento de metodologías claras puede ayudar a facilitar las finanzas del carbono y a reducir el riesgo de los proyectos. Las metodologías proporcionan reglas claras sobre los tipos de proyectos que pueden reunir los requisitos y sobre cómo se estimarán las reducciones de las emisiones, lo que constituye una información esencial para que los promotores determinen si un proyecto es viable.

El mecanismo para un desarrollo limpio (MDL), puesto en marcha en el marco del Protocolo de Kyoto de 2008 a 2012, permitió a los países desarrollados establecer y solicitar reducciones certificadas de las emisiones (RCE) o unidades de reducción de las emisiones (URE) por la aplicación de metodologías aprobadas en países en desarrollo (no incluidos en el anexo I) y en países desarrollados (incluidos en el anexo I), respectivamente. El MDL estimuló el desarrollo de 128 proyectos de explotación del MMC aprobados por la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma de China entre 2005 y 2012. No todos los proyectos cumplieron los requisitos para obtener RCE, y el precio de las RCE se desplomó después de 2012, debido a la falta de demanda del régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea, el único mercado importante para los créditos. No obstante, los incentivos del MDL potenciaron el desarrollo de la industria del MMC en toda China, atrayendo inversiones internacionales y dejando en herencia un mejor drenaje del gas y tecnologías avanzadas de utilización del metano. Aun así, desde 2012 ya no se pueden registrar nuevos proyectos del MDL en China. La metodología del MDL aprobada por la CMNUCC para el uso y la destrucción del MMC (ACM0008, versión 08.0) se aplica también al MMA, y podría ser que un régimen nacional de comercio de derechos de emisión de China aceptara las compensaciones del MMA. Sin embargo, hasta la fecha, no se ha registrado ningún proyecto del MDL para la explotación del MMA.

El Programa de Comercio de Derechos de Emisión de California, controlado por la CARB, autoriza a las entidades participantes, como las centrales eléctricas, a emitir GEI. La CARB ha determinado que las reducciones de emisiones relacionadas con el MMA pueden dar derecho a una compensación, siempre y cuando el proyecto aplique el Protocolo de Compensación por Cumplimiento de los Proyectos de Captura del Metano de las Minas⁹. Este Protocolo se aplica a las minas subterráneas, a cielo abierto y

⁹ <http://www.arb.ca.gov/cc/capandtrade/protocols/mmcprotocol.htm>.

abandonadas de los Estados Unidos. Hasta julio de 2019, cinco proyectos de explotación del MMA habían recibido compensaciones de California en virtud de esta metodología.

También hay diversos programas internacionales voluntarios para registrar los proyectos de reducción de las emisiones de GEI, pero los mercados son pequeños, los precios son bajos, y las reducciones de emisiones relacionadas con las minas de carbón pueden ser difíciles de vender.

8. Resumen y conclusiones

El metano de las minas abandonadas forma parte del ciclo de vida de las emisiones de las minas de carbón que, en algunos casos, pueden prolongarse durante decenios después del cese de la actividad minera. El MMA tiene características que favorecen su aprovechamiento y, en las minas de carbón grisosas que están bien selladas, puede producirse generalmente un gas con un contenido de metano de entre un 15 % y un 90 % y prácticamente sin oxígeno. Su producción difiere de la del MMC en que la disponibilidad de gas disminuye con el tiempo, a medida que se agota el gas restante en las capas de carbón. Sin embargo, un reservorio de MMA con un componente biogénico importante no presentará necesariamente esa característica menguante. El volumen de gas extraíble puede mermar aún más con la recuperación del sistema de aguas subterráneas y su inundación progresiva de la mina, que impide la desorción del gas del carbón y puede también sectorizar la mina y restringir la transmisión del gas desde la fuente hasta el punto de producción.

No todas las minas abandonadas se prestan para la extracción del MMA.

En general, el tamaño de los proyectos de explotación del MMA corresponde a entre un 10 % y un 25 % del de los proyectos de MMC en la misma mina, pero las minas abandonadas pueden agruparse en un proyecto más grande. Sin embargo, hay sitios en Europa donde la extracción de MMA ha igualado los flujos de MMC cuando la mina estaba activa, e incluso algunos en que la producción de MMA supera la producción anterior de MMC (Backhaus, 2018). Estas últimas situaciones pueden darse cuando se ha añadido recientemente metano biogénico al metano fósil, y cuando el gas natural de otros estratos migra hacia las excavaciones de la mina con el tiempo.

Los proyectos de explotación del MMA son más sencillos que los del MMC, ya que, habiendo cesado las actividades de la mina, la producción no está condicionada principalmente por consideraciones de seguridad. Sin embargo, esta ventaja puede verse contrarrestada en las minas que no fueron preparadas para la recuperación del MMA antes del cierre y en que la inundación local de las labores, así como las entradas no debidamente tratadas, dificultan la transmisibilidad del gas desde el reservorio, generando bajas tasas de producción y un gas de escasa calidad.

Los aspectos que es preciso tener en cuenta cuando se cierra una mina con potencial de producción de MMA comprenden:

- El acceso a las labores subterráneas para la extracción del gas de los pozos o las galerías.
- La instalación de tuberías de gas bajo tierra, para conectar las partes selladas de la mina con el punto de extracción, así como las zonas más bajas de las vías subterráneas en que podría acumularse agua y bloquearse la conectividad.
- El uso de las vías subterráneas de la mina como conductos para el flujo de gas.
- La verificación de la integridad de los sellos de la superficie para prevenir la filtración de aire atmosférico.

El marco normativo también es un elemento esencial para la viabilidad de los proyectos. Las cuestiones clave incluyen los derechos de propiedad, la posibilidad de transferir esos derechos, el acceso a incentivos como los que se aplican a la energía renovable, y los beneficios fiscales y en materia de regalías, así como las políticas que exigen el sellado de las minas a fin de preservar el MMA para los proyectos.

Con respecto a la importancia de los derechos sobre el metano, los proyectos de extracción del MMA ejecutados por terceros pueden complicarse por la necesidad de solicitar nuevas licencias o permisos. En algunos países, la falta de claridad en cuanto a la propiedad de la superficie y el subsuelo de las minas abandonadas, así como de los derechos sobre el gas, desalienta la inversión.

Los proyectos de recuperación y uso eficaz del MMA reportan varios beneficios:

- Suministran energía a partir de un recurso que de otro modo se desperdiciaría por la emisión a la atmósfera.
- Aportan una mejora ambiental al impedir la emisión de metano, un gas de efecto invernadero entre 28 y 34 veces más potente que el dióxido de carbono.
- Ofrecen también el beneficio ambiental de sustituir, y por lo tanto evitar, una parte del consumo de un combustible más contaminante, como el carbón.
- En determinadas condiciones, pueden generar una energía eléctrica que sea competitiva con las alternativas disponibles.
- Brindan oportunidades de inversión adicionales debido al derecho a ser incluidos en los mecanismos de compensación del carbono, en algunos casos.
- Crean oportunidades de empleo en las antiguas zonas de minería del carbón.
- Protegen contra las fugas incontroladas de metano en la superficie terrestre, que constituirían un peligro para la población.

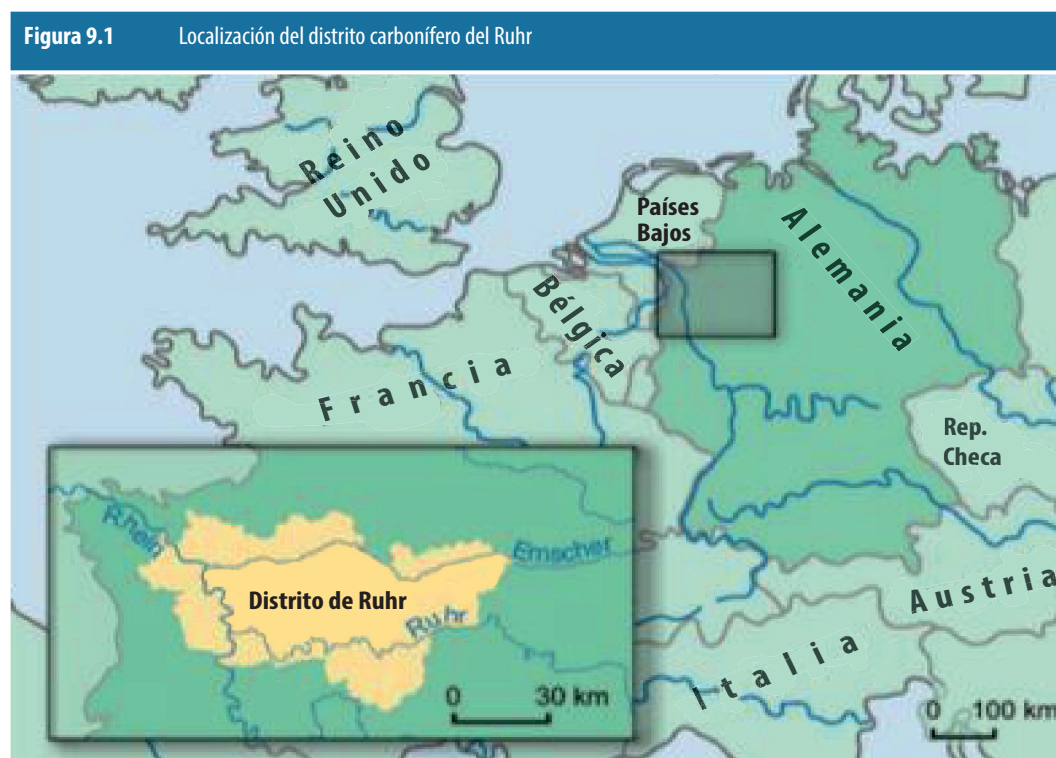
9. Estudios de casos

Estudio de caso 1: Alemania – Yacimiento de carbón del Ruhr, Renania del Norte-Westfalia

La cuenca carbonífera del Ruhr fue en su momento la zona productora de carbón más grande y una de las más importantes de Europa (**figura 9.1**) (Dodt y Drecker, 2018), con la apertura de su primera mina profunda de antracita en la década de 1820. En su momento álgido, en 1850, había casi 300 minas de carbón activas en la zona, y el empleo en la minería alcanzó su punto máximo en 1956 con más de 600.000 trabajadores. Sin embargo, la extracción industrial de antracita en Alemania llegó a su fin, después de casi 200 años, con el cierre de la mina Prosper-Haniel en Bottrop a principios de 2019.

Para facilitar la transición de los combustibles fósiles a las fuentes de energía renovables, Alemania promulgó en 1991 la Ley de Alimentación de la Red Eléctrica con Energía Renovable, que fue el primer plan verde de tarifas eléctricas reguladas del mundo. Esta Ley fue sustituida en 2000, cuando Alemania aprobó la Ley de Fuentes de Energía Renovables (EEG), que, aunque modificada varias veces a lo largo de los años, estableció tarifas reguladas para fomentar la generación de electricidad renovable mediante una serie de instrumentos legislativos. En 2014 y 2017, estos instrumentos fueron modificados para facilitar la transición de todos los proyectos de energía renovable de las tarifas reguladas a un sistema de subastas.

Entre 2002 y 2004, los promotores de proyectos, aprovechando la EEG, establecieron proyectos de explotación del MMA en los emplazamientos de varias de las minas de carbón más grisúosas del valle del Ruhr (**cuadro 9.1**).



Fuente: Dodt, J. y M. Drecker, 2018.

Mina de carbón	Períodos de explotación de la mina	Producción anual media de carbón (Mt)	Explosiones de metano cuando la mina estaba activa	Sitio de generación de electricidad	Capacidad instalada (MW)	Producción total de electricidad (GWh)	Años de funcionamiento	Reducción de emisiones (t de CO ₂ e)	Observaciones
Lohberg	Pozo 1: 1909 a 2005 Pozo 2: 1909 a 2005	De 1,3 a 2,5		Lohberg	7 x 1,3	510,4	De 2002 al presente	1 861 028	La mina no está totalmente sellada, la intrusión de aire contamina el MMA.
Niederberg 1	Pozo 1: 1912 a 2002 Pozo 3: 1954 a 2001	De 2,0 a 2,8	1 explosión 3 muertes	Neukirchen	4 x 1,3	494	De 2004 al presente	1 802 470	La mina está sellada, ninguna intrusión de aire evidente.
Minster Achenbach	1897 a 1992	0,13	5 explosiones 117 muertes	Christemark	1 x 0,4 1 x 1,0	25,8	De 2003 a 2007	141 030	La mina está inundada, lo que limita el MMA disponible.
Dorstfeld	1859 a 1963	De 0,85 a 1,1	2 explosiones 12 muertes	Wilberd	0,2	25,1	De 2001 al presente	91 855	Durante la explotación minera hubo entrada de gases en las casas; la producción de MMA y las inundaciones pusieron fin a esta situación, pero el MMA es limitado.
Lothringen	Pozo 1: 1872 a 1967 Pozo 2: 1895 a 1967	De 1,1 a 1,4	1 explosión 115 muertes	Corvin 1	4 x 1,3 1 x 0,6	96,8	De 2004 al presente	352 940	Muchos pozos abandonados de las cercanías no están sellados, lo que contamina la producción de MMA.
Erin 6	Pozo 1: 1887 a 1983 Pozo 6: 1943 a 1983	De 1,1 a 1,4	2 explosiones 6 muertes	Corvin 2	1 x 1,3	207,8	De 2004 al presente	757 638	

Fuente: Marshall, J. 2019, datos proporcionados por Mingas-Power GmbH y A-TEC Anlagentechnik GmbH.

En cada sitio minero, los proyectos de recuperación de gas se construyeron utilizando uno o varios grupos electrógenos de gas de vertederos Deutz, alimentados con el MMA drenado de las excavaciones de la mina para generar electricidad y venderla a la red local (**figura 9.2**). Las reducciones de las emisiones consignadas en el cuadro representan la parte de las reducciones totales que se debió a la sustitución del carbón por el gas para la generación de energía eléctrica durante la vida del proyecto. Las reducciones de emisiones notificadas por cada proyecto incluyen tanto las emisiones de la red que se evitaron gracias a la electricidad vendida a esta que sustituyó a la generada a partir del carbón, como las reducciones de emisiones logradas mediante la destrucción del gas de las minas abandonadas al utilizarlo para generar electricidad.

La Ley Federal de Minería de Alemania reconoce que las actividades mineras no terminan con el cierre de la mina, y exige que el explotador de la mina presente un plan de abandono específico para rehabilitar el emplazamiento, que debe ser aprobado por la Autoridad Minera antes de que quede sin efecto el permiso de explotación. En muchas minas, el espacio de las labores llenas de gas permanece comunicado con la atmósfera. Debido al sellado inadecuado de muchas perforaciones y pozos más antiguos, los aumentos incontrolados de la presión de gas pueden hacer que el gas migre a los acuíferos, edificios y otras estructuras situadas en la superficie, encima de las minas abandonadas. Las tuberías de desgasificación de la mina se instalan en los pozos rellenos de modo

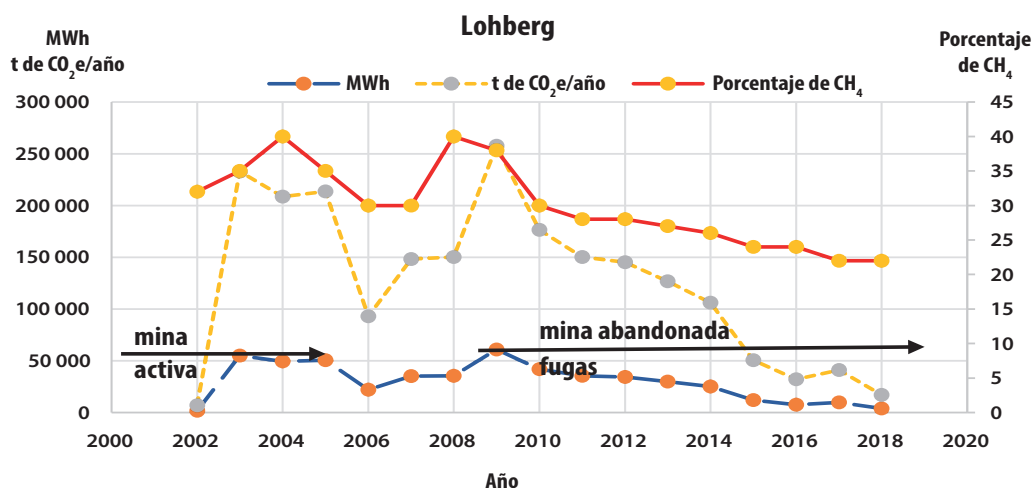
Figura 9.2 Central eléctrica de Lohberg



Fuente: Mingas-Power GmbH.

que el gas producido en la excavación subterránea pueda escapar a través de ellas, reduciendo así la migración incontrolada del gas en la superficie. Además de la fuga no controlada de los gases de la mina a la atmósfera, la ausencia de sellos fiables hace que la concentración de gas de la mina abandonada fluctúe durante la producción. Un factor que agrava este problema es que muchas de las minas del distrito de Ruhr están conectadas bajo tierra, y el gas que se extrae de las más grisúosas se diluye a menudo al mezclarse con el aire de las minas que contienen menos gas. Los promotores de proyectos han aprendido que si la presión de succión de las bombas de vacío no se controla, la concentración del gas disminuirá con el tiempo, repercutiendo negativamente en las operaciones y el éxito económico del proyecto. En la **figura 9.3** se ilustra un ejemplo que indica claramente que los pozos de la mina de Lohberg no están completamente sellados. Cuando comenzaron las operaciones de producción de energía eléctrica en la mina abandonada y se aplicó la succión en 2009, la introducción de aire en la mina diluyó el gas grisú. Al año siguiente, la concentración de metano había disminuido aún más. La tendencia continuó posteriormente, y la concentración de metano pasó de alrededor del 40 % en 2008 al 25 % en 2018. A medida que merma la concentración de metano en el gas producido a lo largo del tiempo, la eficiencia del grupo electrógeno disminuye, reduciéndose la cantidad de electricidad generada.

Figura 9.3 Gráfico de la producción de electricidad y la concentración de metano de Lohberg



Fuente: Mingas-Power, A-TEC Anlagentechnik.

Estudio de caso 2: Polonia – Cuenca de Alta Silesia

Desde 1989 se han cerrado unas cuarenta minas de carbón en Polonia. La mayoría de ellas no contienen prácticamente nada de gas. De las pocas en que hay gas, dos han sido empleadas para proyectos de utilización del MMA. Vale la pena mencionar que las minas cerradas recientemente contienen gas, y la mayoría de las minas activas también, por lo que el país tiene un buen potencial para la ejecución futura de proyectos de explotación del MMA.

Morcinek – Mina de Kaczyce

Período de explotación de la mina: De 1986 a 2000.

Información geológica: La potencia media de las capas de carbón explotadas varía entre 1,32 m y 1,44 m, y la profundidad de extracción, entre 950 m y 1.100 m. Las capas de carbón datan del Carbonífero Superior (Numuriense-Westfaliense) y su madurez se sitúa en los rangos del carbón bituminoso de alto contenido volátil A (HVBA) y el carbón bituminoso de mediano contenido volátil (MVB) (normas de la ASTM). Los mantos de carbón son complicados desde el punto de vista estructural y fueron difíciles de explotar.

Emisiones de gas: La tasa de emisión diaria relativa (grisuosidad) fue de 30 m³/t durante la extracción del carbón.

Modo y volumen de producción de gas: El MMA se obtiene a través de un pozo perforado desde la superficie hasta las áreas de derrumbe de la mina a una profundidad de 680 m. La producción de gas comenzó en 2001 y al final de 2017 la producción anual de metano era de 2,29 MMm³.

Uso final: El principal usuario final es Green Gas DPB en Paskov (República Checa), y el gas se transporta por gasoductos.

Mina de Żory

Período de explotación de la mina: De 1979 a 1998.

Información geológica: Los mantos de carbón explotados son relativamente delgados, rara vez de más de 2 m de potencia, y la profundidad de extracción fue de 400 m a 830 m. Las capas de carbón datan del Carbonífero Superior (Westfaliense) y su madurez se sitúa en los rangos del carbón bituminoso de alto contenido volátil B (HVBB) y el carbón bituminoso de alto contenido volátil A (HVBA) (normas de la ASTM). El contenido máximo de gas de los mantos de carbón explotados fue de 12 m³/t (seco, sin cenizas).

Emisiones de gas: La tasa de emisión anual relativa (grisuosidad) varió entre 10,5 m³/t y 54,0 m³/t de carbón extraído durante la explotación. La tasa de emisión absoluta pasó de 46 m³/min en 1987 a 18 m³/min en 1996. La cantidad total de metano liberada durante la extracción del carbón fue de 256 MMm³.

Modo y volumen de producción de gas: El MMA se extrae mediante pozos perforados desde la superficie hasta las áreas de derrumbe de la mina de Żory y hasta la galería del yacimiento de carbón adyacente no desarrollado, Jankowice-Este, que está conectado con las labores de la mina de Żory. El primer pozo perforado dentro del área de la mina de Żory, hasta una profundidad de 209 m, comenzó a producir en 2012; al final de 2017, su producción de metano reciente era de 3,25 MMm³ anuales. En 2013 se perforó otro pozo de producción hasta la galería del yacimiento de carbón de Jankowice-Este; al final de 2017, su producción de metano reciente era de 1,93 MMm³ anuales.

Uso final: cogeneración de energía eléctrica y térmica con motores de gas.

Políticas propicias o incentivos para la explotación del MMA en Polonia

No se cobran regalías por la producción del metano en capas de carbón (incluido el MMA), y el pago por la compra de los datos geológicos de propiedad del Gobierno que se utilizan para el desarrollo de este metano es de solo el 10 %.

Un plan nacional de comercio de certificados violeta apoya a los productores de electricidad y energía térmica que explotan el metano de las minas o el gas generado por las plantas de biogás. Sin embargo, este tipo de apoyo puede incluir al MMA solo si el explotador produce energía en cogeneración con unidades de alta eficiencia, consiguiendo ahorros de energía primaria de un nivel apropiado.

En 2018 se introdujo un nuevo reglamento relativo al uso del MMA, que permite a la Empresa de Reestructuración de Minas de propiedad del Gobierno (encargada de cerrar las minas) recuperar el MMA sin una licencia durante el proceso de abandono de la mina, siempre que ello se justifique por motivos ambientales y de seguridad. Esta regulación ha llenado un vacío legislativo, ya que anteriormente el metano emitido tras el cese de la producción de carbón tenía que ser expulsado a la atmósfera, al no haber ninguna reglamentación que permitiera las actividades de aprovechamiento de este recurso.

Lecciones aprendidas y conclusiones

A pesar de los incentivos mencionados, hasta la fecha solo se han ejecutado dos proyectos de explotación del MMA en Polonia. El principal motivo de ello es un largo y complicado proceso de obtención de permisos para la recuperación del MMA. En Polonia, la Ley de Geología y Minería trata el MMA como cualquier otro depósito de gas natural. Por lo tanto, deben cumplirse todos los requisitos relativos al proceso de concesión de licencias para los hidrocarburos, lo que requiere tiempo y dinero. Además, como el proceso de abandono de la mina tiene que estar terminado antes de que los inversores puedan solicitar una licencia para la explotación del metano de las capas de carbón, hay un retraso adicional en el inicio de los proyectos de aprovechamiento del MMA. Dado que la emisión de metano de las minas abandonadas presenta una curva de declinación hiperbólica, las reservas de MMA podrían reducirse considerablemente en algunos años, que es el período necesario para concluir todos los trabajos de abandono de la mina.

Por otra parte, se considera que el nivel de apoyo obtenido con el uso de los certificados violeta es insuficiente para explotación del MMA, ya que está dirigido principalmente a que las minas de carbón recuperen el MMC como subproducto de la extracción de carbón (por motivos de seguridad) sin costos adicionales, mientras que en la recuperación del MMA se incurre en un costo sustancial.

A la luz de estas observaciones, deberían iniciarse modificaciones de la legislación.

Estudio de caso 3: Reino Unido – Utilización del metano de las minas abandonadas en el Reino Unido

Desde 1952 se han cerrado unas 1.300 minas subterráneas, y en años más recientes, desde 1979, alrededor 130. A mediados de la década de 1990, Alkane Energy fue pionera en el uso del metano de las minas abandonadas en el Reino Unido, realizando perforaciones hasta las labores mineras selladas o a través de las tapas de los pozos en unos 15 a 20 proyectos (la capacidad instalada de sus proyectos actuales es de 43 MW_e). En 1998, la principal empresa de minería subterránea del carbón del Reino Unido, UK Coal Mining, empezó a seguir el ejemplo de Alkane y a instalar plantas de utilización del gas grisú en todas sus minas activas que producían gas, llevando a término seis proyectos. A medida que las minas cerraban, algunos de estos proyectos pasaron a ser proyectos en minas abandonadas. Actualmente hay tres en funcionamiento, de propiedad de Arevon Energy (con una capacidad instalada de 14 MW_e). El presente estudio de caso se refiere a dos de esos proyectos.

Mina de Stillingfleet, Grupo Selby

Período de explotación de la mina: De 1988 a 2004.

Información geológica: Yacimiento de carbón de Yorkshire; explotación del manto de Barnsley. La potencia media de la capa de carbón explotada es de aproximadamente 3 m, con una profundidad de pozo de 700 m. En general, la mina tiene una situación geológica difícil, con formación de fallas.

Emisiones de gas: Mina de contenido de gas intermedio. La mina de Stillingfleet está interconectada bajo tierra con varias otras minas y, por lo tanto, el reservorio de gas era grande.

Figura 9.4 Chimenea de ventilación en la mina de Stillingfleet



Fuente: Butler, N. HEL-East Ltd.

Modo y volumen de producción de gas: El MMA se extrae por la parte superior de la tapa del pozo de salida de aire. El caudal de gas extraído en 2019 fue de alrededor de 770 Nm³/h, con concentraciones de metano del orden del 80 % al 85 %. El gas se extrae mediante sopladores de lóbulos de desplazamiento positivo, a un vacío de succión de alrededor de 600 mbarA. La mina tiene un excelente sello hermético, que permite crear un fuerte vacío sin que entre aire.

Figura 9.5 Planta de extracción del gas de la mina de Stillingfleet



Fuente: Butler, N. HEL-East Ltd.

Uso final: El gas alimenta motores de émbolo, con alternadores de 6 kV interconectados con la red eléctrica.

Mina de carbón de Harworth

Período de explotación de la mina: De 1923 a 2006.

Información geológica: Yacimiento de carbón de la cuenca de los Peninos Orientales; mantos de Top Hard, Blyth, Deep Soft, Haigh Moor y Swallow Wood. La potencia media de los mantos es de unos 2 m, con una profundidad de pozo de 850 m. En general, la mina tiene una situación geológica difícil, con fallas y carbón muy grisoso.

Modo y volumen de producción de gas: El MMA se extrae de la parte superior de la tapa del pozo de entrada de aire. El caudal extraído en 2019 fue de alrededor de 1.080 Nm³/h, con concentraciones de metano del orden del 35 %. El gas se extrae mediante bombas de vacío de anillo líquido, a un vacío de succión de alrededor de 600 mbarA. La mina tiene un tapón no perfectamente sellado, que permite cierta entrada de aire y limita el vacío que se puede crear.

Uso final: El gas alimenta motores de émbolo, con alternadores de 415 V que, transformados en 11 kV, se introducen en la red eléctrica.

Reducciones de emisiones

Políticas propicias o incentivos para la explotación del MMA en el Reino Unido

Hubo un período de incentivo del aprovechamiento del MMC, que indirectamente apoyó algunos proyectos de extracción de este recurso en minas activas que finalmente se convirtieron en proyectos de explotación del MMA. Sin embargo, el apoyo financiero para la generación de energía eléctrica con MMA en el Reino Unido es bajo, siendo el único incentivo la exención del Impuesto por el Cambio Climático.

En 1999, las minas de carbón activas con generación de gas grisú fueron incentivadas por el régimen de comercio de derechos de emisión del Reino Unido a pasar de la simple descarga directa del gas metano a la atmósfera a la inversión en el aprovechamiento del metano o su quema en antorcha. Como resultado de ello, se pusieron en servicio los seis proyectos arriba mencionados en minas activas,

Figura 9.6 Motores de gas de la mina de carbón de Harworth



Fuente: Butler, N. HEL-East Ltd.

estableciendo así, de paso, una infraestructura que tras el cierre de la mina podría emplearse para la utilización del MMA.

No existe un incentivo similar del régimen de comercio de derechos de emisión para los proyectos de explotación del MMA, pero los proyectos de generación de energía eléctrica a partir del MMA están exentos del Impuesto por el Cambio Climático establecido en el Reino Unido, siendo tratados, de hecho, de la misma manera que las formas renovables de generación de electricidad. El Impuesto por el Cambio Climático es una tasa sobre la energía que se cobra a los usuarios no domésticos en el Reino Unido. Su objetivo es incentivar el aumento de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de GEI. En 2019, este impuesto era de 0,00847 libras esterlinas/kWh.

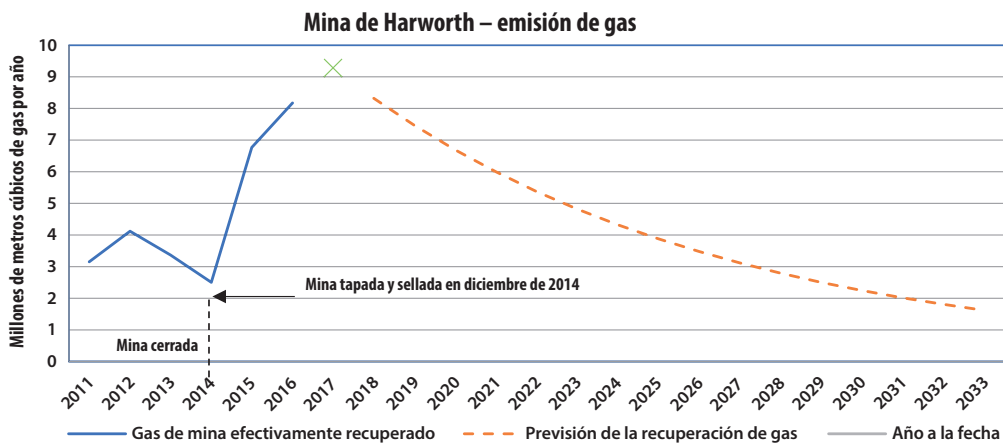
Cuando se cierra una mina, se produce un período de máxima emisión de gases que puede durar hasta un año a partir del cese de la explotación. Este período de máxima emisión se conoce como "pico" del grisú. Si una mina no tiene un uso previsto del gas inmediatamente antes de su cierre (es decir, ya establecido durante la explotación) o un plan para instalar la generación inmediatamente después del cierre, o si la mina está sellada herméticamente y el gas no puede escapar (una situación potencialmente peligrosa), este valioso gas adicional se pierde en la atmósfera para siempre. En muchos casos, ese primer año de emanación excepcional de gas puede financiar toda la instalación de la planta. Por este motivo, se requieren incentivos de política que fomenten el desarrollo de plantas de MMA antes del cierre de la mina.

Lecciones aprendidas y conclusiones

Cuando se diseña una planta de extracción de MMA, debe tenerse en cuenta que el gas extraído de la mina tenderá a estar caliente y húmedo y, por lo tanto, especialmente en el invierno, el agua se condensará tan pronto como entre en la tubería superficial. En consecuencia, se deben planificar e instalar colectores de agua y sistemas de drenaje adecuados para eliminar el agua en todo el sistema y evitar que entre en la planta de extracción (si es el caso) y en la planta de utilización.

También deben instalarse placas cortafuegos entre los puntos de extracción de gas y la planta de utilización, así como en todo sistema de ventilación que exista, para impedir que una posible ignición del gas retroceda por la tubería hacia donde se encuentre una mezcla inflamable de aire y gas. Estas mezclas pueden formarse en las minas abandonadas en que se esté poniendo en marcha una planta de utilización, o en que ocurra una fuga del sistema antes de la planta de extracción (es decir, por el lado del vacío). También pueden formarse en una instalación minera abandonada sin recuperación del metano, en que las fluctuaciones barométricas mezclen el gas con aire bajo tierra.

Figura 9.7 Previsión de las emisiones de la mina de Harworth



Fuente: Robinson, A., Jefe de Operaciones, Arevon Energy.

Lo ideal es que los proyectos se planifiquen e inicien antes del cierre de la mina, para aprovechar los conocimientos de los mineros y la composición y las tasas de liberación de gas conocidas en el momento del cierre. Además, en ese momento el promotor del proyecto de explotación del MMA podrá utilizar y aprovechar la experiencia del topógrafo de la mina para evaluar las tasas de inundación de esta. Y, por último, actuando de ese modo, el promotor podrá explotar el pico de gas que se produce inmediatamente después del cierre de la mina.

En general, en función del tamaño y la escala de los recursos, y del número de oportunidades de proyectos que tenga el promotor, ha resultado ser técnicamente más adecuado y también más conveniente desde el punto de vista financiero instalar múltiples grupos electrógenos a gas en contenedores, en lugar de crear instalaciones fijas situando los motores de gas en un edificio. Cuando se hayan sobreestimado los recursos de MMA, una infraestructura fija dará lugar a que gran parte de la inversión quede desaprovechada o subutilizada, con un bajo factor de carga y un escaso rendimiento de la inversión. En cambio, si se ha optado por los generadores contenedorizados, estos podrán utilizarse en otros proyectos, en que tal vez se hayan subestimado las reservas de gas.

Dependiendo del yacimiento de carbón, se presupone que no más de entre un 10 % y un 20 % de cualquier grupo de minas será adecuado para un proyecto de explotación del MMA. Este subconjunto de minas comprenderá típicamente aquellas que: a) contengan gas grisú; b) hayan tenido un drenaje del metano durante la explotación activa; y c) no se prevea que vayan a inundarse rápidamente.

La estimación de los recursos de gas MMA puede ser difícil. Las estimaciones más exactas para los proyectos son las que se elaboran mientras las minas aún están abiertas, ya que los mineros experimentados pueden ayudar en la planificación y es posible observar la producción real de gas y analizar los registros. Si una mina ha estado cerrada durante años, se podrá, cuando sea viable, efectuar una perforación de sondeo y hacer una prueba de presión y recuperación con succión/extracción en las labores mineras para evaluar el espacio excavado y derrumbado y los recursos de gas. Existen sofisticados programas informáticos de modelización geológica que permiten evaluar el espacio excavado y derrumbado y el recurso de gas para la explotación del MMA. Sin embargo, los resultados del modelo dependerán de la calidad de los datos introducidos, y los usuarios del modelo deberán tener en cuenta la incertidumbre de los resultados. En el Reino Unido, un promotor llevó a cabo una extensa modelización, obteniendo como resultado una reserva suficiente para alimentar una central eléctrica de 20 MW. Sin embargo, una vez perforados los pozos para intersecar las labores, se constató que solo había suficiente gas para producir 6 MW. Ello ilustra claramente la necesidad de combinar la modelización con las pruebas físicas.

En el Reino Unido hay plantas de explotación del MMA en funcionamiento desde hace más de veinte años y no se ha notificado ningún incidente de seguridad o explosión importante a causa del uso de este recurso.

Estudio de caso 4: Estados Unidos – Valle de North Fork, Colorado

El Valle de North Fork, situado en los condados de Delta y Gunnison, en la región occidental de Colorado, tiene un historial de más de cien años de minería subterránea del carbón, con la puesta en marcha de dos minas en 1903 para explotar el yacimiento carbonífero de Somerset, situado en los esquistos de Paonia y de Bowie, dos miembros de la Formación Mesaverde del Cretácico Inferior. Hasta el final de 2017, se habían extraído algo más de 323 millones de toneladas de carbón en el Valle de North Fork. Se trata de un carbón bituminoso de alta calidad con un elevado contenido energético (~11,6 MJ) y muy bajo contenido de ceniza, azufre y mercurio, ideal para la generación de energía eléctrica ya que cumple todas las normas ambientales vigentes en los Estados Unidos. En 2003 se alcanzó el punto máximo de la producción de carbón en cuatro minas, con un total combinado

de 16,5 millones de toneladas cortas, que representaron el 46 % de la producción del estado. En 2013, había en el valle solo tres minas de carbón en régimen de arrendamiento activas, West Elk, Bowie y Elk Creek, que producían aproximadamente 10 millones de toneladas de carbón y daban empleo a cerca de mil personas, emitiendo 66,5 millones de metros cúbicos de metano (949.952 t de CO₂e). En 2017 estaba en funcionamiento solo la mina de West Elk, que producía 4,8 millones de toneladas cortas, el 43,4 % de la producción de carbón del estado, y emitía 26 millones de metros cúbicos de metano (441.938 t de CO₂e) por sus sistemas de ventilación y drenaje. La mina de Bowie está ahora inactiva, habiendo concluido la extracción de sus reservas de carbón con arreglo al plan de la concesión minera actual. En la mina de Elk Creek, un incendio detuvo la producción y el propietario ha comenzado la restauración.

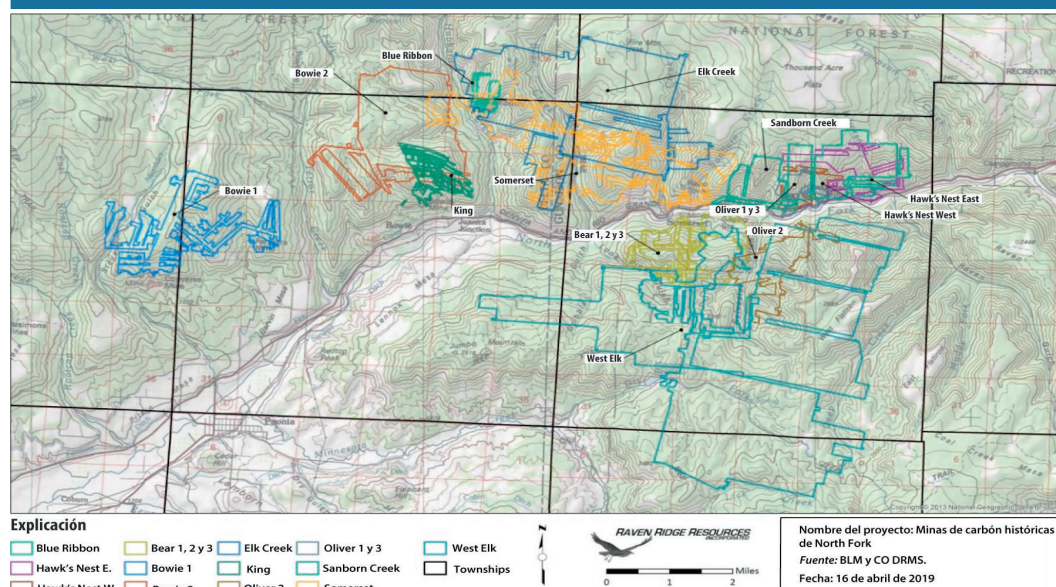
Actualmente hay por lo menos 14 minas abandonadas en el Valle de North Fork (**cuadro 9.2**), con una superficie combinada de aproximadamente 5.600 ha y un volumen total de la excavación de alrededor de 91 millones de metros cúbicos, calculado sobre la base de la producción total de carbón de cada mina (**figura 9.8**). Cuando cierre la mina de Bowie, seguida de la de West Elk una vez que se termine de extraer sus reservas, se añadirá a la región un volumen excavado de minas abandonadas de 131 millones de metros cúbicos.

Todos los mantos de carbón explotados en las minas enumeradas en el **cuadro 9.2** emiten gas, y varias de las minas más grandes de tajo largo requirieron un programa de drenaje del metano como complemento del sistema de ventilación mientras estuvieron activas. Por lo tanto, no cabe duda de que gran parte del espacio excavado de las minas abandonadas contiene gas metano en concentraciones variables. Además, se han detectado fugas de metano por los sellos de portales, tubos de ventilación y pozos abandonados.

Cuadro 9.2 Minas de carbón subterráneas del Valle de North Fork							
Mina	Situación	Período de explotación	Huella superficial de la mina (millones de metros cúbicos)	Huella superficial de la mina (hectáreas)	Producción total de carbón (millones de toneladas)	Volumen excavado de la mina (millones de metros cúbicos)	Porcentaje del volumen excavado total
Bear 1, 2, 3	Abandonada	De 1932 a 1996	6,6	659,6	9,1	6,3	2,8 %
Bowie 1	Abandonada	De 1976 a 1998	4,1	405,9	16,1	11,0	5,0 %
Elk Creek	Abandonada	De 2002 a 2013	17,4	1 736,3	49,4	33,9	15,2 %
King	Abandonada	De 1903 a 1974	1,1	111,3	3,0	2,1	0,9 %
Oliver 1 y 3	Abandonada	De 1923 a 1960	1,0	96,2	1,4	0,9	0,4 %
Oliver 2	Abandonada	De 1945 a 1954	2,4	241,6	0,8	0,5	0,2 %
Sanborn Creek	Abandonada	De 1992 a 2003	6,1	607,6	16,8	11,6	5,2 %
Somerset	Abandonada	De 1903 a 1985	14,3	1 431,9	31,2	21,4	9,6 %
Hawk's Nest West	Abandonada	De 1937 a 1982	1,1	113,2	2,9	2,0	0,9 %
Blue Ribbon	Abandonada	De 1956 a 1963 De 1977 a 1984	0,4	36,9	0,6	0,4	0,2 %
Hawk's Nest West	Abandonada	De 1975 a 1982	2,0	203,3	2,0	1,4	0,6 %
Todas las minas abandonadas			56,4	5 643,8	133,2	91,5	
Bowie 2	Inactiva	De 1997 a 2016	8,3	825,7	42,6	29,3	13,2 %
West Elk	Activa	De 1992 al presente	42,1	4 205,8	148,1	101,7	45,7 %
TOTALES			106,7	10 675,2	323,9	222,5	

Fuente: Marshall, J. 2019, compilación y análisis de datos inéditos.

Figura 9.8 Mapa de las minas activas y abandonadas del Valle de North Fork



Fuente: Raven Ridge, 2019, compilación y análisis de datos inéditos.

North Fork Energy LLC, una filial de Vessels Coal Gas, ejecuta un proyecto de MMA en la mina de Elk Creek, que fue abandonada en 2016, capturando aproximadamente 8.000 m³ por día. El proyecto comenzó en 2012, cuando la mina estaba activa, y hasta la fecha ha destruido aproximadamente 70 millones de metros cúbicos de metano. Vessels, junto con otras entidades, ha investigado otras opciones para el uso del metano drenado en varias de las minas grisúosas de la región, pero, debido a la falta de acceso a gasoductos de gas natural y a los bajísimos precios de venta de la electricidad en la región, la quema en antorcha ha sido el método económicamente viable para la reducción. Sin embargo, Vessels también ha podido negociar un acuerdo de adquisición de energía eléctrica de 15 años para la venta de 3 MW de electricidad a Holy Cross Energy, una empresa local de servicios públicos, en el marco del programa de energía renovable de Colorado.

Otro proyecto de quema en antorcha está en la etapa de planificación; Hubbard Creek Coal Gas, LLC, una compañía procedente del sur de Florida, ha propuesto quemar en antorcha el metano que emana de los respiraderos sobre la mina de carbón inactiva de Bowie.

Los arrendamientos de carbón en el Valle de North Fork están todos situados en tierras federales, lo que significa que la Oficina de Gestión de Tierras de los Estados Unidos (USBLM) es el organismo regulador que supervisa la explotación de todos los recursos naturales.

Algunos casos pioneros en los Estados Unidos han establecido el marco jurídico para la posible resolución de los problemas que se planteen en los intentos de obtener los derechos de captura y uso del MMC y el MMA. Dos precedentes importantes determinan la autoridad y las obligaciones respecto del arrendamiento de los derechos sobre los recursos de gas situados junto a recursos de carbón. El primero fue el caso histórico *AMOCO Production Company v. Southern Ute Tribe* núm. 526 U.S. 865, 875 (1999), en que el Tribunal Supremo de los Estados Unidos dictaminó que los arrendamientos de carbón adjudicados en virtud de las Leyes de Tierras Carboníferas de 1909 y 1910 no entrañaban el derecho a la captura y el uso del gas natural. La Junta Interior de Apelaciones, el órgano de examen de apelaciones del Departamento del Interior que dirime las controversias relacionadas con el uso y la disposición de las tierras públicas y sus recursos, resolvió que el uso de los arrendamientos de petróleo y gas no era el mecanismo adecuado para la captura del gas metano. En su decisión, los jueces administrativos declararon que el gas metano, como el MMC y el MMA, era un subproducto involuntario de la minería

del carbón y no constituía un yacimiento, por lo que no se podía arrendar por medio de los contratos normales de arrendamiento del petróleo y el gas. En un intento de rectificar la situación, la USBLM emitió el Memorando de Instrucciones (IM) 2017-037, en virtud del cual se permitía la captura y venta de este subproducto gaseoso, denominado metano minero de desecho, mediante la modificación de los contratos de arrendamiento de carbón existentes y la incorporación del mecanismo en los nuevos contratos que se adjudicaran. Lamentablemente, el IM 2017-037 fue anulado por el IM 2018-018, debido al temor de sobrecargar a los mineros del carbón con regulaciones indebidas que pudieran repercutir negativamente en la economía de este sector minero. Sin embargo, el IM no dice que la USBLM carezca de autoridad, y declara que las medidas para obtener el derecho a capturar y utilizar este subproducto gaseoso están permitidas y son voluntarias.

La Sección de Combustibles Sólidos de la USBLM supervisa el patrimonio de carbón, que incluye todo el ciclo de vida de la minería del carbón, desde la concesión de los permisos hasta la liberación del contrato de arrendamiento del carbón una vez cesada la minería. Por lo tanto, el único mecanismo que la Sección de Combustibles Sólidos puede utilizar para aprobar la captura del metano de las minas de carbón es el arrendamiento del carbón; sin embargo, el contrato federal estándar de arrendamiento del carbón no contiene ninguna cláusula en relación con la quema en antorcha del metano, su reducción o su captura de ninguna otra forma durante el proceso de extracción del carbón. Por consiguiente, el arrendatario del carbón tendría que negociar un apéndice o una enmienda del contrato de arrendamiento con la USBLM. Aun así, sigue habiendo incertidumbre sobre el modo en que la USBLM regularía la captura de metano, o sobre cómo valorar el gas desde el punto de vista de las regalías.

Una vez que el arrendatario renuncia al contrato de arrendamiento del carbón y la mina queda oficialmente abandonada, se añade una incertidumbre adicional, ya que la USBLM no tiene una política oficial que regule el metano de las minas abandonadas. El Director del estado de Colorado de la USBLM ha declarado que la autorización de los proyectos de captura de metano en minas de carbón abandonadas compete a la Sección de Minerales Líquidos de la USBLM, que exige un contrato de arrendamiento para la explotación de petróleo y gas. Este proceso requiere que el promotor del proyecto proponga las parcelas para una subasta de explotación de petróleo y gas, después de lo cual la USBLM realizará una subasta de arrendamiento de las parcelas con todos los posibles yacimientos contenidos en los estratos geológicos subyacentes. El promotor del proyecto tendría que ser el adjudicatario de la subasta para adquirir el arrendamiento. Lamentablemente, el Director también señaló que podría ser más adecuado que el estado de Colorado regulara la captura del metano de las minas abandonadas en el marco de sus diversos programas de calidad del aire.

La ausencia de políticas y directrices claras sobre la gestión del metano de las minas de carbón ha permitido a las empresas mineras seguir pasando por alto los problemas relacionados con sus emisiones de metano, y ha sido un obstáculo para el desarrollo de este importante recurso.

En 2017 se formó un grupo de trabajo, el Grupo de Trabajo sobre el Metano de las Minas de Carbón de North Fork, con el objetivo de elaborar y aplicar una estrategia integral de educación, mitigación y utilización económica del metano de las minas de carbón en la zona de North Fork. Entre los miembros fundadores de este grupo se cuentan comisarios de condado, miembros del personal de las minas de la región, senadores y representantes de Colorado ante el Congreso estadounidense, así como representantes de distintos grupos ambientales, compañías de electricidad y diversos organismos gubernamentales pertinentes de Colorado. Actualmente, el grupo está trabajando con la oficina regional de la USBLM para fomentar la formulación de políticas oficiales que faciliten el uso y/o la reducción del metano de las minas de carbón.

En enero de 2019, el senador Bennet y el representante Neguse de Colorado presentaron el proyecto de ley CORE, o Ley de Economía y Recreación al Aire Libre de Colorado (H.R. 823), que incluye dos

artículos (arts. 305 y 306) sobre el arrendamiento para la explotación del metano de las minas de carbón. Este proyecto de ley propugna el desarrollo de un programa piloto que promueva la captura, el uso provechoso, la mitigación y/o el secuestro de las emisiones de metano fugitivas de las minas de carbón subterráneas en las zonas de los condados de Garfield, Gunnison, Delta y Pitkin, en la región occidental de Colorado. El proyecto de ley fue presentado al Congreso el 6 de junio de 2019 y, habiendo sido examinado y anotado, está a la espera de los trámites siguientes.

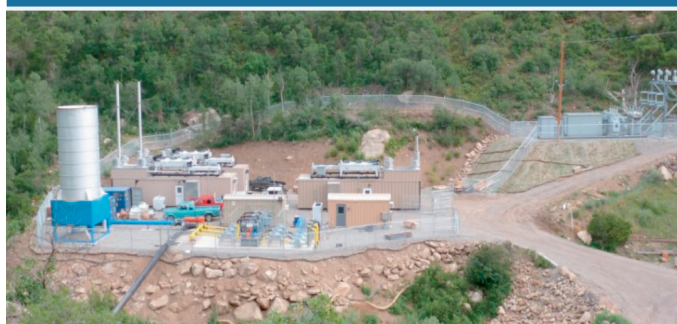
Estudio de caso 5: Estados Unidos – Proyecto sobre el Metano de Minas Abandonadas de la Zona Autorizada de Elk Creek

El Proyecto sobre el Metano de Minas Abandonadas de la Zona Autorizada de Elk Creek (el Proyecto) se ejecuta en el condado de Gunnison de Colorado (Estados Unidos de América). La mina de Elk Creek comenzó a funcionar en 2001, y a partir de 2012 fue la mayor mina de carbón subterránea activa de los Estados Unidos que generaba electricidad con su MMC. El Proyecto fue desarrollado por Vessels Coal Gas (VCG) y sigue estando en manos de esta empresa. La mina fue cerrada y abandonada en febrero de 2016, y el Proyecto del MMC pasó a ser un proyecto de explotación de MMA en múltiples minas, que agrupa Elk Creek y cuatro minas abandonadas adyacentes: Sanborn Creek, Hawks Nest East, Hawks Nest West y Somerset. La mina de Sanborn Creek cerró en 2003, y las otras tres, en los años ochenta. Todas las minas del grupo fueron minas grisúosas mientras estuvieron activas, especialmente las de Elk Creek y Sanborn Creek, con emisiones promedio de metano de 144.000 y 150.000 metros cúbicos por día, respectivamente.

El proyecto fue el fruto de una asociación especial de empresas de diferentes sectores. Vessels Coal Gas aunó fuerzas con Oxbow Mining (explotadora de minas de carbón), Holy Cross Electric (empresa de servicios públicos) y la Aspen Skiing Company (usuario final y entidad financiadora) para construir el proyecto de explotación del MMC de 6 millones de dólares de los Estados Unidos en 2012. Los precios de la electricidad al por mayor son bajos en la región, de 0,03 dólares por kWh, un valor típico en los mercados de los Estados Unidos, por lo que el Proyecto necesitaba obtener ingresos adicionales por sus méritos ambientales para ser viable desde el punto de vista financiero.

Además de vender energía eléctrica a una compañía de electricidad rural, el Proyecto aprovecha financieramente dos incentivos de política del estado a los que tiene derecho a acogerse: los créditos de compensación de las emisiones de carbono, del programa de compensación del cumplimiento de California, y los créditos de energía renovable aprobados por la comisión de servicios públicos de Colorado. Los créditos de compensación de las emisiones de carbono son fundamentales para la viabilidad económica del Proyecto, debido a los bajos precios de la electricidad. Entre 2016 y 2018,

Figura 9.9 Proyecto de Generación de Energía Eléctrica con MMA de Elk Creek



Fuente: Coté, M. 2016.

el Proyecto generó reducciones de emisiones por más de 500.000 Mt de CO₂e (compensación de emisiones de carbono), una cantidad equivalente a la eliminación de 36.000 automóviles de las carreteras de los Estados Unidos. En 2018, las compensaciones de emisiones de carbono estaban valoradas en unos 13 dólares/Mt de CO₂e, y los créditos de energía renovable añadían aproximadamente 0,01 dólares/kWh.

En el yacimiento de Somerset, el carbón bituminoso de alto contenido volátil A y B de los estratos del Cretácico Superior comenzó a explotarse a finales del siglo XIX, en hasta cuatro mantos de carbón de entre 150 y 850 metros de profundidad. Los mantos de carbón tienen una potencia que varía entre 2 y 5 metros, y el espesor total de carbón presente en la zona es de alrededor de 13 metros. El contenido de gas del carbón depende en gran medida de la profundidad y la presión de sobrecarga en la región montañosa, con hasta 10 m³/t en los mantos de carbón más profundos. Todas las labores mineras abandonadas de las cinco minas se superponen parcialmente entre sí, creando una zona de influencia del MMA que permite recuperar este recurso de dos áreas principales. Por consiguiente, el metano solo se extrae de pozos situados en dos de las minas: Elk Creek (que incluye el gas de la mina de Somerset) y Sanborn Creek (que incluye el gas de las minas de Hawks Nest).

Desde el abandono de la mina de Elk Creek, VCG ha seguido explotando la central eléctrica de 3 MW conjuntamente con un sistema cerrado de quema en antorcha, y recupera aproximadamente 50.000 m³ de metano por día. El MMA se extrae de las labores mineras subterráneas y se hace llegar a los sistemas tecnológicos de destrucción o uso final del metano mediante sopladores de gas instalados en las minas cuando aún estaban activas. El Proyecto utiliza tres motores de combustión limpia Guascor de 1 MW (1.500 hp) para generar electricidad, y un sistema de quemado en antorcha Abutec. La subestación eléctrica del sitio, interconectada con la red, suministra energía eléctrica de 46 kV, que se transmite luego a través del tendido eléctrico a la compañía eléctrica y a la zona de esquí. La fiabilidad del suministro de electricidad del Proyecto a la red ha sido alta, con un tiempo de funcionamiento promedio de entre el 90 % y el 95 % cada año, tanto durante la fase de explotación activa como cuando las minas ya estaban abandonadas.

Mediante aforadores de gas y un analizador del metano se mide continuamente la cantidad de metano destruida en las actividades del Proyecto. También se vigilan constantemente el tiempo de funcionamiento de los motores y la temperatura de la antorcha, para verificar la destrucción del gas y demostrar el cumplimiento del programa de compensación de las emisiones de carbono. Todos los datos se reúnen en un controlador lógico programable (PLC) de la instalación, y se archivan y almacenan en computadoras externas.

Está previsto que el Proyecto funcione hasta el año 2026. En 2019-2020, VCG tiene planeado ampliar el Proyecto a otras zonas de las minas abandonadas que actualmente no contribuyen a los volúmenes de recuperación de metano. La capacidad de la subestación permitirá exportar hasta 9 MW de electricidad a la red.

Vessels Coal Gas ha comunicado varias lecciones aprendidas durante el desarrollo del Proyecto, la obtención de los permisos y los seis años de funcionamiento:

- Es necesario examinar los requisitos de autorización que limitan los contaminantes regulados resultantes de la combustión del MMC (los NO_x y el CO) en el equipo de uso final o de destrucción.
- Se necesita educación y divulgación para que los reguladores de todos los niveles comprendan las emisiones de MMC y MMA y la neutralidad en carbono de cada proyecto.
- Debe reconocerse la incertidumbre de las previsiones de producción de metano, y las evaluaciones económicas deben incluir hipótesis de producción alta, mediana y baja.

- Cuando se presenta un proyecto, es importante señalar los beneficios ambientales secundarios, por ejemplo la reducción de las emisiones de metano como compuesto orgánico volátil, precursor del ozono y gas de efecto invernadero.
- Es importante señalar los beneficios de la reducción de los contaminantes climáticos de corta duración, como el metano, con su PCA de 86 (en 20 años), según el Quinto Informe de Evaluación.
- Es provechoso integrar a los interesados locales y a las empresas en el desarrollo del proyecto.

Apéndices

Apéndice 1: Regímenes de pruebas para la caracterización de los reservorios de MMA

CARACTERÍSTICAS DEL RESERVORIO	PRUEBAS	RESULTADOS
Niveles y recuperación del agua	<ul style="list-style-type: none"> ■ Monitoreo de los niveles de agua en un punto clave del reservorio subterráneo; puede ser necesario perforar pozos de sondeo para complementar las instalaciones de vigilancia existentes. ■ Cambios en los regímenes de evacuación de aguas para evaluar el alcance de la recuperación en todas las partes de las labores. ■ Análisis de la calidad del agua. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Confirmación de los niveles de agua o, en algunos casos, confirmación de que el agua no ha subido hasta un determinado nivel. ■ Aclaración de las tasas de recuperación del agua. ■ Indicación del grado de transmisividad en las labores subterráneas. ■ Consideración de las cuestiones relativas a la calidad del agua y las opciones de descarga.
Espacio de derrumbe abierto	<ul style="list-style-type: none"> ■ Monitoreo de los respiraderos pasivos para observar las variaciones de la presión del gas y la temperatura a lo largo del tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Los resultados pueden dar una indicación del volumen del reservorio de MMA, pero no tienen en cuenta la emanación de gas por desorción de los mantos de carbón. ■ Las fluctuaciones rápidas de presión con flujos bajos pueden indicar un espacio derrumbado mínimo y, por lo tanto, un sistema de alta resistencia o la inundación.
Entrada de aire	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pruebas de bombeo de gas activo para monitorear la concentración de oxígeno en el gas extraído. ■ Uso de sondeos de poca profundidad con estacas alrededor de las antiguas bocaminas para investigar las filtraciones de gas grisú hacia la superficie. ■ Pruebas de detección de humo en las proximidades de las bocaminas. ■ Interacción de las estaciones de monitoreo para obtener una indicación de las rutas de migración. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ La detección de oxígeno en el gas extraído indica la entrada de aire en el reservorio de MMA. ■ Nuevas pruebas y exámenes pueden ayudar a determinar la probable fuente de filtración. ■ La entrada de aire diluirá el gas y reducirá la cantidad de succión que se pueda aplicar a la mina. ■ Necesidad de realizar obras de ingeniería de reparación en las antiguas bocaminas. ■ Posibles problemas en las tuberías de extracción. ■ Los resultados pueden utilizarse para demostrar la efectividad de las obras de ingeniería correctiva.
Conectividad de la superficie al subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> ■ Medición de la pérdida de presión entre la superficie y el subsuelo; la prueba de bombeo activo ayuda a aclarar los resultados. ■ Las pruebas de bombeo de gas activo permiten confirmar la integridad de las conexiones. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ La resistencia de la conexión de la superficie con el subsuelo puede calcularse y este valor puede confirmarse con pruebas sobre el terreno. ■ Una pérdida de presión excesiva puede indicar una mala conexión subterránea que obstaculizará la extracción de gas y puede impedir el logro de la tasa prevista.
Transmisividad subterránea	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pruebas de bombeo activo para extraer el gas de las labores. ■ Uso de estaciones de monitoreo situadas a cierta distancia del punto de extracción de gas para confirmar el alcance de la presión de succión. El ventilador de la mina puede ser usado para esta prueba antes del cierre. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Confirmación de la transmisividad de las labores. Un rápido aumento de la presión de succión y una caída del flujo pueden indicar un bloqueo parcial o un hueco mínimo. ■ Confirmación del estado y la transmisividad de las vías subterráneas principales de la mina.
Composición del gas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Uso de instrumentos portátiles para monitorear las variaciones de la composición del gas con el tiempo. Detección de: <ul style="list-style-type: none"> ■ Metano. ■ Dióxido de carbono. ■ Oxígeno. ■ Aumento de los hidrocarburos. ■ Sulfuro de hidrógeno. ■ Otros gases. ■ Mediciones del flujo. ■ Mediciones de la presión. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Los resultados del monitoreo y el análisis del gas indicarán el valor calorífico del gas (no solo del metano). ■ El valor calorífico es la unidad que debe utilizarse para la evaluación financiera. ■ Determinación de contaminantes que podrían causar problemas de funcionamiento/mantenimiento o emisiones ambientales inaceptables. ■ Detección de entradas de aire no controladas. ■ Características generales de los reservorios en relación con la recuperación del gas.

Apéndice 2: Elementos fundamentales de un estudio de previabilidad de la explotación del MMA

- Descripción del programa propuesto y su localización, junto con un calendario para la investigación, el desarrollo y la producción, con fechas provisionales para las etapas de toma de decisiones.
- Resultados de todo monitoreo del flujo de gas que se haya realizado en la mina antes y después del cierre, historial de drenaje del gas y fecha de cierre de la mina, si ya está abandonada. Los estudios realizados mientras la mina está activa pueden proporcionar información valiosa sobre el potencial de producción de gas de la mina después del cierre. Esos estudios incluyen las mediciones del contenido de gas de los mantos, los flujos de drenaje del gas, el flujo de gas en el aire de ventilación expulsado y el alcance de la influencia del ventilador principal, como indicador de las interconexiones con labores mineras antiguas y poco profundas.
- Estimación preliminar del recurso de gas sobre la base del volumen de carbón descomprimido que se encuentra sobre las labores y del contenido de gas de los mantos de carbón. Para ello se requerirá una sección geológica representativa que registre todos los mantos de carbón explotados e intactos. Deberán tenerse en cuenta la recuperación del agua y las presiones de succión alcanzables durante la extracción para obtener una estimación de los volúmenes de gas que probablemente se puedan recuperar (las reservas de MMA).
- Determinación del número, la localización y los detalles de las bocaminas registradas (pozos, rampas, socavones y perforaciones de servicio).
- Evaluación de la posibilidad de que haya bocaminas no registradas.
- Costos del sellado de los pozos y galerías con un grado de hermeticidad adecuado para la extracción del MMA; ese grado de hermeticidad es fundamentalmente diferente de la práctica convencional de sellado aplicada en muchos países en desarrollo. Deberían considerarse la profundidad hasta el suelo competente (la roca madre) en el corte transversal de la entrada de la mina y toda estructura de la superficie que pueda ser necesario suprimir. La experiencia de los programas de explotación del MMA indica que los problemas suelen relacionarse con la entrada de aire debido al uso de técnicas de sellado inadecuadas.
- Detalles del programa de pruebas de producción propuesto para comprobar la idoneidad del sellado y la tasa de producción y la calidad del gas.
- Medidas de ingeniería que se adoptarán bajo tierra antes del cierre para optimizar la accesibilidad al gas, como la desviación de flujos de agua y la instalación de tuberías, utilizando las ya existentes, para asegurar la transmisión del gas a través de las zonas bajas que puedan inundarse, y el sellado de los pozos.
- Detalles de las fuentes y cantidades de agua que fluyen en la mina y de las opciones para controlar el agua después del cierre. Esto puede implicar la instalación y el uso de un sistema de desagües cuyo costo tendrá que ser sufragado por el proyecto de explotación del MMA.
- Indicación de toda la infraestructura que exista en la superficie, el acceso en la superficie y los costos de limpieza y preparación del emplazamiento.
- Evaluación de las opciones de utilización del gas, la infraestructura de almacenamiento y distribución de gas existente, los posibles clientes industriales y comerciales, y los precios locales corrientes de la electricidad y del gas de valor calorífico de bajo a mediano. El estudio debería informar también sobre las necesidades de infraestructura nueva y los costos correspondientes.
- Opciones de uso de gas de fuentes alternativas para complementar el suministro, como MMC o gas natural.

- Posibles repercusiones sociales en cuanto a la creación de empleo, la pérdida de puestos de trabajo y la estimulación económica de la zona; los programas de explotación del MMA pueden ser el primer proyecto de reaprovechamiento en una mina cerrada.
- Impactos y beneficios ambientales gracias al control de la emisión de gases en la superficie y a la atmósfera.
- Cuestiones de seguridad.
- Permisos y acceso a la tierra, propiedad de los minerales y el gas.
- Evaluación financiera preliminar y costo estimado de un estudio de viabilidad completo que incluya las obras civiles y los programas de pruebas necesarios.
- Indicación de las incertidumbres y vacíos de conocimiento.
- Estrategias de investigación y vigilancia propuestas.

Apéndice 3: Opciones de ingeniería para el tratamiento de las bocaminas al cierre de una mina

OPCIÓN	CUESTIONES QUE SE PLANTEAN	CONSIDERACIONES TÉCNICAS
Construir la tapa del pozo en la roca madre	<ul style="list-style-type: none"> ■ Limitación de la profundidad de la tapa por el acceso desde la superficie y necesidad de excavar en profundidad para permitir el acceso. ■ Área de trabajo para poder realizar la excavación. ■ Propiedades geotécnicas del nivel de formación de la tapa. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Excavación para poder acceder al nivel de formación. ■ Tapa construida en la roca madre, en estratos competentes, sin problemas de estabilidad. ■ Enclavado de la tapa en los estratos naturales para formar un sello efectivo, posibilidad de utilizar un sellador adicional para evitar filtraciones por debajo de la tapa. ■ Posible construcción de una barrera adicional de baja permeabilidad alrededor de la tapa, si es necesario.
Construir la tapa del pozo sobre el revestimiento en relleno profundo	<ul style="list-style-type: none"> ■ Naturaleza geotécnica y profundidad del material de relleno. ■ Estabilidad de una tapa construida sobre el revestimiento del pozo . ■ Acceso a los conductos de servicio del sellado. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Estabilidad y practicidad de la formación de la tapa sobre el revestimiento del pozo y el material de relleno. ■ Poca profundidad de excavación necesaria. ■ Necesidad de una barrera perimetral adicional en torno a la tapa y el revestimiento del pozo para formar un sello eficaz. ■ Sellado de los conductos de servicio.
Taponar el pozo por inyección de una lechada de cemento	<ul style="list-style-type: none"> ■ Naturaleza geotécnica y profundidad del material de relleno. ■ Estabilidad del tapón que se forme. ■ Posibilidad de acceso a los conductos de servicio. ■ Profundidad y espesor del tapón de lechada. ■ Necesidad de rellenar el pozo a fin de que soporte el encofrado para la lechada de taponamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Colocación del tapón de lechada sin reducir la permeabilidad del relleno del pozo. ■ Instalación de tuberías a través del tapón. ■ Necesidad de soportes adicionales alrededor del revestimiento del pozo para que aguanten el tapón. ■ Opciones para crear una barrera protectora adicional y sellar los conductos de servicio.
Sellar la boca de la galería con un tapón	<ul style="list-style-type: none"> ■ Profundidad hasta la roca madre y naturaleza geotécnica del material de relleno. ■ Método de construcción del portal. ■ Control de la entrada de aguas superficiales. ■ Restricciones del acceso. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Enclavado de los muros de soporte del tapón en los estratos naturales para crear un soporte y un sello efectivos. ■ Espesor del tapón y naturaleza del material de relleno. ■ Necesidad de impedir la acumulación del agua en el muro de bloqueo. ■ Vertido de lechada sobre el tapón y los estratos circundantes. ■ Grados de las tuberías que atraviesan el tapón.

Apéndice 4: Equipo y servicios necesarios para la construcción y la fase operativa de los proyectos de explotación del MMA

EQUIPO/TECNOLOGÍAS	SERVICIOS/ACTIVIDADES
<ul style="list-style-type: none"> ■ Perforación del pozo de producción de gas desde la superficie, con tecnología guiada y entubado durante la perforación ■ Membranas de gas y otros productos y tecnologías para sellar eficazmente las bocaminas ■ Inyección de lechada ■ Bombas, tuberías y sistemas de control para el desagüe ■ Tratamiento de aguas ■ Bombas de extracción de gas y sistemas de control desde la superficie ■ Equipo de monitoreo fijo y portátil ■ Tuberías colectoras de gas y válvulas de control ■ Sistemas de vigilancia y control de las operaciones y la seguridad con alarmas a distancia ■ Planta de compresión del gas ■ Aparellaje eléctrico ■ Sistemas de comunicación a distancia ■ Medición de la composición del gas (valor calorífico) y de su flujo ■ Equipo de aforo ■ Tratamiento del gas y procesos de limpieza ■ Olor que se añadirá al gas antes del transporte para la detección de fugas ■ Equipo para la utilización del gas 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Determinación de los requisitos de desempeño del programa ■ Especificación del equipo ■ Diseño de obras de ingeniería civil, tratamiento de las entradas de la superficie, preparación y construcción del emplazamiento, instalación de la planta de MMA e infraestructura correspondiente ■ Preparación del contrato ■ Evaluación de la licitación ■ Supervisión de las obras del emplazamiento ■ Preparación del plan de salud y seguridad ■ Examen de la información ■ Puesta en servicio y resolución de problemas ■ Política y planes de salud y seguridad ■ Acuerdos de venta de gas y compra de energía eléctrica ■ Determinación de la estructura de gestión ■ Procedimientos operacionales ■ Procedimientos de emergencia (incluido el procedimiento de convocación) ■ Política de auditoría y examen ■ Control ambiental ■ Programa de mantenimiento ■ Gestión del proyecto ■ Apoyo técnico ■ Enlace con los clientes ■ Desarrollo comercial ■ Fiscalización financiera

Referencias

- A-TEC ANLAGENTECHNIK. Data provided on Lohberg mine and power generation station.
- A-TEC ANLAGENTECHNIK. Data provided on AMM Projects in the Ruhr Valley.
- ROBINSON, A., Chief Operations Officer, Arevon Energy. Data provided on Harworth Mine Emissions Forecast (Estimated Curve Showing Bonus Peak Gas).
- BACKHAUS, C., (2017). Experience with the utilization of coal mine gas from abandoned mines in the region of North-Rhine-Westphalia, Germany. Presentation at Workshop on Coal Mine Methane and Abandoned Mine Methane in the context of Sustainable Energy. United Nations Economic Commission for Europe. Geneva, Switzerland. Available at: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/cmm12/Workshop_2017/7.Mr._Backhaus.pdf.
- BUTLER, N., HEL-East Ltd. Data on, and pictures of Stillingfleet Mine and Harworth Colliery.
- CEC, (1998). Practical control of gas emission risks to the surface environment following mine closure. Draft Final Report on ECSC Research Project 7220-AF/014.
- COTÉ, M., R. COLLINGS AND C. TALKINGTON, (2003). Methane Emissions Estimates & Methodology for Abandoned Coal Mines in the United States, in 2003 International Coalbed Methane Symposium Proceedings, May 5-9, 2003.
- COTÉ, M., (2016). Coal Mine Methane in Colorado Market Research Report, Retrieved from https://www.colorado.gov/pacific/sites/default/files/atoms/files/Coal%20Mine%20Methane%20Report%202016%20FINAL%203_2016.pdf, p. 7.
- COTÉ, M., (2018a). Maximizing Value of Abandoned Mine Methane, Global Methane Forum, Toronto, Canada, 17 April 2018.
- COTÉ, M., (2018b). Significance of Abandoned Mine Methane Emissions and Preparing for Projects, Global Methane Forum UNECE Side Event, Toronto, Canada, 16 April, 2018.
- COTÉ, M. (2018c). Maximizing the value of abandoned mine methane [slide 15, PowerPoint presentation]. Retrieved from: <https://www.globalmethane.org/gmf2018/presentations/0417MaximizingValueofAMM.pdf>.
- CREEDY, D.P. AND KERSHAW S. (1988). Firedamp prediction – a pocket calculator solution. The Mining Engineer. Inst of Mining Engineers, Vol. 147, No. 317, Feb., pp. 377-379.
- CREEDY, D.P (1985). The origin and distribution of firedamp in some British coalfields. University of Wales, Dec 1985.
- CREEDY, D. P. AND K. GARNER (2002). Coal Mine Methane Extraction and Utilisation from Abandoned Coal Mines Workshop, UK-China Cleaner Coal Technology Transfer, UK Department of Trade and Industry, 21 May 2002, Beijing.
- DEMIR, I., D. MORSE, S. D. ELRICK, AND C. A. CHENOWETH, (2004). Delineation of the coalbed methane resources in Illinois: Illinois State Geological Survey Publication, Circular 564, p. 66.
- DENYSENKO A., M. EVANS, N. KHOLOD, N. BUTLER, V. ROSHCHANKA, (2019). Legal and Regulatory Status of Abandoned Mine Methane in Selected Countries: Considerations for Decision Makers. EPA Publication No 430R19003. March 2019.
- DODT, J. AND M. DRECKER, (2018). Multimedia Documentation of the Coal-Mines in the Ruhr District, International Cartographic Association, ICC Proceedings, p. 8.
- EPA, (2015). Coal Mine Methane Country Profiles, Global Methane Initiative. Available at https://www.globalmethane.org/documents/Toolsres_coal_overview_fullreport.pdf.
- EPA, (2017). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2015., U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC. Available at: https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-02/documents/2017_complete_report.pdf.

- EPA, (2019). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2017., U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC. Available at: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2017>.
- EPA, (2019). Legal and Regulatory Status of Abandoned Mine Methane in Selected Countries: Considerations for Decision Makers. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. EPA Publication No: 430R19003. March 2019. Available at: https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-03/documents/legal-regulatory-status-amm_epa.pdf.
- FERNANDO, S., (2011). Update of Estimated Methane Emissions from UK Abandoned Coal Mines, WSP Environment and Energy, Department of Energy and Climate Change, 25th May 2011.
- GLOBAL METHANE INITIATIVE (2016). International Coal Mine Methane Projects List, Global Methane Initiative. Available at <https://globalmethane.org/sectors/index.aspx?s=coal>.
- IPCC, (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151.
- INERIS, Colletif, (2006). L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide Méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine. INERIS-DRS-06-51198/R01, Available at <http://www.ineris.fr/guide-pprm>.
- INERIS, 2019. Post-Mining Hazard Evaluation and Mapping in France. Ineris- DRS-19-178745-02411A, www.ineris.fr/en/post-mining-hazard-evaluation-and-mapping-france.
- KERHAW, S., (2005). Development of a methodology for estimating emissions of methane from abandoned coal mines in the UK, White Young Green for the Department for the Environment, Food and Rural Affairs, (GA01039), 2005.
- KHOLOD N., M. EVANS, R. C. PILCHER, M. COTÉ, R. COLLINGS, (2018). Global CMM and AMM Emissions: Implications of Mining Depth and Future Coal Production, Pacific Northwest National Laboratory; Raven Ridge Resources; Ruby Canyon Engineering, Global Methane Forum, Toronto, 16 April 2018.
- LIU, W., (2018). Status and Potential of AMM Project Development in China, Global Methane Forum, Toronto, 16 April 2018.
- MARSHALL, J., 2019. Data provided on AMM Projects in the Ruhr Valley modified after data provided by Mingas-Power GmbH and A-TEC Anlagentechnik GmbH and compiled by C. Backhaus.
- MARSHALL, J., 2019. Unpublished data compilation and analysis (data provided by Mingas-Power GmbH and A-TEC Anlagentechnik GmbH and compiled by C. Backhaus).
- MINGAS-POWER. Data provided on Lohberg mine and power generation station.
- MOULIN, J., (2019). Personal interview with R.C. Pilcher, 2 July 2019.
- PILCHER, R.C., (2019). Unpublished data modelling and analysis.
- UNECE, (2016). Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines. 2nd edition. ECE ENERGY SERIES No. 47. United Nations Economic Commission for Europe. Geneva, Switzerland. Available at: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/cmm/docs/BPG_2017.pdf.
- UNFCCC, (2017). Greenhouse Gas Inventory Data - Detailed data by Party, United Nations Framework Convention on Climate Change. Available at: http://di.unfccc.int/detailed_data_by_party.
- RAVEN RIDGE, 2019. Unpublished data compilation and analysis.
- OSTAPOV, K., (2008). "Consequences of Closure of Unprofitable Mines of the Karaganda Coal Basin for the Purposes of Ecologic and Technical Safety// Последствия закрытия убыточных шахт Карагандинского угольного бассейна в целях экологической и технической безопасности." К.Н. Оспанов // Охрана труда Казахстана. – 2006. – №6(6). – С.38-41.
- WEATHERSTONE, N., (2008). International Standards for Reporting of Mineral Resources and Reserves - Status, Outlook and Important Issues. World Mining Congress & Expo 2008. Available at: http://www.criresco.com/isr_mineral_resources_reserves0908.pdf.

Guía de las mejores prácticas para una recuperación y un uso eficaces del metano de las minas de carbón abandonadas

El carbón es un elemento fundamental para la seguridad energética de muchos países y ha hecho una contribución importante al alivio de la pobreza energética en todo el mundo. Inevitablemente, a medida que las reservas de carbón se agotan, o en respuesta a los cambios en la economía de la energía, las minas se cierran y abandonan. Las minas cerradas pueden ofrecer una oportunidad pequeña, pero importante, de explotar un recurso energético limpio, el metano de las minas abandonadas (MMA), que es posible extraer y utilizar con la tecnología existente. Los principios que aquí se exponen no pretenden sustituir o dejar sin efecto los marcos jurídicos y reglamentarios existentes, sino complementarlos. Esta publicación tiene por objeto orientar y apoyar el desarrollo de proyectos posteriores a la extracción minera, para reducir las emisiones globales atribuibles al ciclo de vida de la minería del carbón optimizando la recuperación y el uso del metano que, de otro modo, se liberaría a la atmósfera.

Palais des Nations
CH - 1211 Geneva 10, Switzerland
Telephone: +41(0)22 917 12 34
E-mail: unece_info@un.org
Website: <http://www.unece.org>