

COMISIÓN ECONÓMICA PARA EUROPA
ASOCIACIÓN DE METANO PARA MERCADOS

Guía de Mejores Prácticas para un Drenaje y Uso Eficaz del Metano en las Minas de Carbón

ECE ENERGY SERIE N ° 31



Naciones Unidas

Nueva York y Ginebra, 2010

NOTAS

Las denominaciones empleadas y la presentación del material en esta publicación no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la Secretaría de las Naciones Unidas sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

La mención de cualquier firma, proceso con licencia o productos comerciales no implica la aprobación por las Naciones Unidas.

PUBLICACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS
<i>Ventas No. 10.II.E.2</i>
ISBN 978-92-1-117018-4
ISSN 1014-7225

Copyright © Naciones Unidas, 2010

Todos los derechos reservados en todo el mundo

Prólogo

El carbón ha sido una importante fuente de producción de energía primaria mundial durante los últimos dos siglos, y el mundo seguirá dependiendo del carbón como fuente de energía para el futuro previsible. El metano (CH₄) liberado durante el minado del carbón, crea condiciones inseguras de trabajo en muchas minas subterráneas de todo el mundo, con víctimas humanas mortales, como consecuencia inaceptable de muchos accidentes relacionados con el metano. La gestión eficaz del gas no se limita a cuestiones de seguridad; sin embargo el metano liberado a la atmósfera, especialmente desde sistemas de drenaje, es un recurso energético que se perdió para siempre. Las emisiones resultantes también contribuyen al cambio climático. Afortunadamente, las soluciones para estos retos pueden ir de la mano, usando una efectiva respuesta coordinada.

Aunque la literatura técnica respetada en relación con la gestión del metano está ampliamente disponible para el profesional de la minería, hasta ahora no existía una fuente única de orientación informada y accesible para los altos directivos. La *Guía de Mejores Prácticas para el Drenaje y Uso Eficaz del Metano en las Minas de Carbón* busca llenar este vacío crucial. Los principios y normas recomendadas para la captura y el uso del metano de las minas de carbón (CMM) se establecen en una presentación clara y concisa para proporcionarles a los responsables de tomar decisiones una base sólida de entendimiento, desde la cual dirigir políticas y decisiones comerciales. Creemos que tal conocimiento es fundamental para lograr cero víctimas mortales y riesgo de explosión mientras se reduce al mínimo el impacto ambiental de las emisiones de CMM. El cambio debe empezar desde la cima.

El documento guía también puede ser utilizado por estudiantes e incluso especialistas técnicos como una introducción a los principios y referencias clave de gestión del metano. De hecho, como parte de esta iniciativa global, varias organizaciones financiaron una reimpresión del emblemático *Manual para el Drenaje de Metano-Húmedo*, una referencia técnica definitiva publicada por primera vez por Verlag Glückauf para la Comisión de las Comunidades Europeas en 1980.

Queremos hacer hincapié en que la *Guía de Mejores Prácticas* no reemplaza ni sustituye las leyes nacionales o internacionales u otros instrumentos jurídicamente vinculantes. Los principios expuestos en este documento tienen por objeto proporcionar orientación para complementar los marcos legales y regulatorios existentes, y apoyar el desarrollo de prácticas más seguras y más eficaces, donde la práctica y las regulaciones de la industria continúan evolucionando.

Los colaboradores de este proyecto dieron su tiempo libre y voluntariamente en el deseo de promover una mayor seguridad en la minería del carbón. A la luz de los últimos accidentes y en memoria de todas las víctimas fatales del pasado, los autores expresan la esperanza de que su trabajo contribuya a operaciones mineras de carbón cada vez más seguras.

Febrero del 2010

Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
Asociación de Metano para Mercados

Contenido

Prólogo	iii
Contenido	iv
Agradecimientos.....	vii
Siglas y Abreviaciones	ix
Glosario de Términos	xi
Resumen Ejecutivo.....	xiii
Capítulo 1. Introducción.....	1
Mensajes Clave	1
1.1 Objetivos de este Documento Guía	1
1.2 Los Asuntos	1
1.3 Captura, Utilización y Reducción de Gas.....	3
Capítulo 2. Fundamentos de Control de Gas	5
Mensajes Clave	5
2.1 Objetivos del Control de Gas en las Minas.....	5
2.2 Ocurrencia de Riegos de Gas	5
Ignición de Mezclas Explosivas de Metano	7
2.3 Reducción del Riesgo de Explosión	7
2.4 Principios Regulatorios y de Gestión.....	9
Marco Regulatorio de la Seguridad Efectiva	9
Aplicación	9
Concentraciones de Gas Admisibles para las Condiciones Seguras de Trabajo	9
Transporte Seguro y Utilización del Gas.....	10
Reglamentos para Reducir el Riesgo de Ignición.....	11
Capítulo 3. Ocurrencia, Liberación y Predicción de Emisiones de Gas en las Minas de Carbón	12
Mensajes Clave	12
3.1 Introducción	12
3.2 Ocurrencia de Gas en las Vetas del Carbón	12
3.3 El Proceso de Liberación del Gas.....	13
3.4 Nivel Relativo de Gas (<i>Gassiness</i>) en Minas de Carbón	14
3.5 Comprender las Características de la Emisión de Gas de las Minas de Carbón	14
3.6 Medición del Contenido del Gas del Carbón <i>In Situ</i>	15
3.7 Estimación Práctica de los Flujos de Gas en las Minas de Carbón.....	16
Capítulo 4. Ventilación de la Mina.....	17
Mensajes Clave.....	17
4.1 Desafíos de Ventilación	17

4.2	Principales Características del Diseño de Ventilación	17
4.3	Ventilación de Frentes de Trabajo con Presencia de Gas.....	18
4.4	Requisitos del Sistema de Alimentación de Ventilación.....	21
4.5	Ventilación de los Encabezamientos de Carbón.....	21
4.6	Monitoreo de la Ventilación.....	22
4.7	Control de la Ventilación	22
Capítulo 5. Drenaje del Metano		23
	Mensajes Clave.....	23
5.1	Drenaje del Metano y sus Desafíos	23
5.2	Principios Básicos de las Prácticas de Drenaje del Metano Empleados en Todo el Mundo.....	23
5.3	Fundamentos de Pre-Drenaje.....	24
5.4	Fundamentos de Post-Drenaje	25
5.5	Consideraciones de Diseño para los Sistemas de Drenaje del Metano.....	27
5.6	Infraestructura del Oleoducto para el Gas Subterráneo	28
5.7	Monitoreo del Sistema de Drenaje del Gas.....	29
Capítulo 6. Utilización del Metano y Reducción		30
	Mensajes Clave.....	30
6.1	El Metano en la Mina de Carbón y Mitigación del Cambio Climático	30
6.2	Mina de Metano como Recurso de Energía	30
6.3	Utilice Opciones.....	31
6.4	Reducción y Utilización del Metano Drenado	32
6.4.1	<i>Concentración Media-a Alta de Metano CMM</i>	<i>33</i>
6.4.2	<i>Baja-Concentración del Metano Drenado.....</i>	<i>34</i>
6.4.3	<i>Tecnologías de Purificación para Diluir el Metano desde los Sistemas de Drenaje</i>	<i>34</i>
6.4.4	<i>Quemado</i>	<i>35</i>
6.5	Disminución o Utilización de Baja-Concentración del Metano en el Aire de Ventilación (VAM).....	35
6.6	Monitoreo del Metano.....	36
Capítulo 7. Costos y Asuntos Económicos.....		37
	Mensaje Clave.....	37
7.1	El Caso del Negocio para el Drenaje del Metano	37
7.2	Costos Comparativos de Drenaje del Metano.....	37
7.3	Utilización Económica del Metano.....	38
7.4	Financiamiento del Carbono y Otros Incentivos	41
7.5	Costo de Oportunidad de Utilización	43
7.6	Costos Ambientales.....	44
Capítulo 8. Conclusiones y Resumen para los Gestores de Políticas		45
Capítulo 9. Estudio de Casos		47

Estudio de Caso 1: Alcanzando la Producción Planeada de Carbón de Operación de Tajo Largo con Retirada, en Presencia con Estrés de Estratos Severo y una Veta de Carbón Propensa a Combustión Espontánea - Reino Unido	48
Estudio de Caso 2: Operaciones de Tajo Largo de Alto Rendimiento en Áreas con Altas Emisiones de Gas - Alemania	50
Estudio de Caso 3: Operaciones Tajo Largo de Alto Rendimiento en Áreas con Altas Emisiones de Gas - Australia	52
Estudio de Caso 4: Reducción de los Riesgos de Explosión en Minas de Anchurones y Pilares - Sur África	54
Estudio de Caso 5: Desarrollo de un Esquema de Reducción del Potencial de Co-generación/Emisión de CMM - China	56
Estudio de Caso 6: VAM - China	57
Estudio de Caso 7: VAM - Australia	59
Apéndice 1. Comparaciones de Métodos de Drenaje del Gas	61
Referencias	66
Recursos Adicionales	68

Agradecimientos

Organizaciones Patrocinadoras

La **Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa** (UNECE) es una de las cinco Comisiones Regionales de la ONU y facilita un foro a través del cual 56 países de América del Norte y Europa Occidental, Central y Europa del Este, así como Asia Central, se reúnen para forjar las herramientas de su cooperación económica. Las principales áreas de actividad de la UNECE son: La cooperación económica, medio ambiente y asentamientos humanos, estadísticas, energía sostenible, comercio, industria y desarrollo empresarial, madera, y transporte. La UNECE busca sus objetivos a través del análisis de políticas, el desarrollo de los convenios, reglas y normas, y la prestación de asistencia técnica. www.unece.org/energy/se/cmm.html

La **Asociación del Metano para Mercados** (M2M) es una asociación público-privada internacional con 30 países socios, además de la Comisión Europea, creada en 2004, y se centró en promover la reducción costo-efectiva de las emisiones de metano, mediante su recuperación y utilización desde cuatro sectores clave del metano: la minería del carbón, rellenos sanitarios, sistemas de gas y petróleo, y agricultura. El Subcomité de Carbón ha reunido a expertos clave en la recuperación del metano de las minas de carbón y su utilización para compartir información acerca de las tecnologías de punta y las prácticas a través de una serie de talleres, cursos de formación, viajes de estudio e iniciativas de creación de capacidad.. www.methanetomarkets.org

Estructura

Este documento fue concebido por un *Comité Directivo*, el cual proporcionó la dirección y visión general, y fue redactado por un *Panel de Expertos Técnicos*, formado por cinco expertos de reconocido prestigio a nivel mundial en ventilación subterránea y drenaje del metano en minas de carbón. El borrador del documento fue revisado por primera vez por un *Grupo Asesor de las Partes Interesadas* para asegurarse que los mensajes eran claros y eficaces para los tomadores de decisiones de alto nivel, antes de someterse a un proceso de revisión técnica formal de pares.

Comité de Dirección Ejecutiva

- Pamela Franklin, Co-Presidente, M2M Subcomité de Carbón
- Roland Mader, Vice Presidente, Grupo Ad Hoc de Expertos del Metano en Minas de Carbón de UNECE
- Raymond C. Pilcher, Presidente, Grupo Ad Hoc de Expertos del Metano en Minas de Carbón de UNECE
- Carlotta Segre, Secretaria, Grupo Ad Hoc de Expertos del Metano en Minas de Carbón de UNECE
- Clark Talkington, Ex Secretario, Grupo Ad Hoc de Expertos del Metano en Minas de Carbón de UNECE

Técnicos Expertos Grupo de Redacción

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

Grupo Asesor de las Partes Interesadas

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

Grupo de Pares Técnicos

- John Carras, Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (Australia)
- Hua Guo, Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (Australia)
- Li Guojun, Tiefsa Coal Industry Ltd. (China)
- Glyn Pierce Jones, Trolex Ltd. (RU)
- B.N. Prasad, Central Mine Planning & Design Institute (India)
- Ralph Schlueter, DMT GmbH & Co. KG (Alemania)
- Karl Schultz, Green Gas International (RU)
- Jacek Skiba, Central mining Institute of Katowice (Polonia)
- Trevor Stay, Anglo-American Metallurgical Coal (Australia)
- Oleg Tailakov, International Coal and Methane Research Centre, Uglemetan (Federación Rusa)

Además de los mencionados anteriormente, las organizaciones patrocinadoras desean expresar su agradecimiento a Lucas Warren, quien jugó un papel integral en las etapas iniciales de este proyecto.

Además de a los colaboradores ya mencionados, las organizaciones patrocinadoras desean expresar su gratitud a Lucas Warren, que jugó un importante papel en las etapas iniciales de este proyecto así como a María Luz Seoane de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa por revisar la publicación y facilitar así la comprensión para el lector español.

Siglas y Abreviaturas

CBM	Metano de Yacimientos de Carbón
CDM	Mecanismo de Desarrollo Limpio
CERs	Reducciones Certificadas de Emisiones
CFRR	Reactores de Inversión de Flujo Catalítico
CH ₄	Metano
CMM	Metano de la Mina de Carbón
CMR	Reactor de Monolito Catalítico
CNG	Gas Natural Comprimido
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	Equivalente de Dióxido de Carbono
ERPA	Contrato de Compra de Reducción de Emisiones
ERUs	Unidades de Reducción de Emisiones
ESMAP	Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energético
GHG	Gases de Efecto Invernadero
GWP	Potencial de Calentamiento Global
IBRD	Banco Internacional para la Reconstrucción y Desarrollo
IC	Combustión Interna
I&M	Inspección y Mantenimiento
JI	Implementación Conjunta
kWh	Kilowatt-hora
LNG	Gas Natural Licuado
l/s	Litros por Segundo
m	Metro
m/s	Metros por Segundo
m ³ /d	Metros Cúbicos por Día
m ³ /s	Metros Cúbicos por Segundo
mD	Milidarcy (en el uso común, equivalente a aproximadamente 10 ⁻³ (μm) ²)
MRD	Taladrado de Radio Medio

MSA	Adsorción Molecular por Tamizado
Mt	Millones de Toneladas (10^6)
Mtpa	Millones de Toneladas Anuales
MW _e	Capacidad de Megavatios de Electricidad
Nm ³	Metros Cúbicos Normales
PSA	Adsorción de Presión por Balanceo
scfm	Pies Cúbicos Estándar por Minuto
t	Tonelada (métrica)
t/d	Toneladas por Día
TFRR	Rector de Reversión de Flujo Térmico
TRD	Perforación de Radio Hermético
UNECE	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
UNFCCC	Marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
VAM	Metano del Aire de Ventilación
VERs	Reducciones de Emisiones Verificadas
USBM	Buró de Minas de los Estados Unidos

Glosario de Términos

Dentro de la industria del carbón y del gas de mina, aún hay confusión sobre los términos y abreviaturas utilizadas dentro y a través de las distintas jurisdicciones. Además de los términos que figuran aquí, la UNECE ha elaborado un *Glosario de Términos y Definiciones de Metano en las Minas de Carbón* que es más amplio y pone de relieve cómo se utiliza la terminología en diferentes regiones.

(www.unece.org/energy/se/pdfs/cmm/cmm4/ECE.ENERGY.GE.4.2008.3_e.pdf).

Esclusa de Aire - una disposición de puertas que permite el paso desde una parte de un circuito de ventilación de la mina a otra sin causar un cortocircuito.

Ventilación Auxiliar – proporción de la corriente de ventilación principal dirigida a la cara de un corredor horizontal ciego (p.e., la entrada) por medio de un ventilador auxiliar y conductos.

Retorno posterior - una disposición de ventilación temporal formada en el extremo de retorno de un veta larga U-ventilado para desviar una parte del aire detrás de la cara, para permitir el acceso para la perforación de drenaje de gas y evitar que los gases de terraplén de alta concentración, invadan el extremo de la cara.

Tolva de Purga – un conducto vertical a través del cual se descarga el aire de gas cargado, proveniente de las áreas de trabajo.

Corredor ciego – una calzada desarrollada con una sola entrada que requiere ventilación auxiliar.

Anchurones y Pilares (anchurón-y-pilar) – un método de la minería en el que el carbón se extrae de una serie de vetas, que luego son vinculados entre sí dejando pilares de carbón no minados para sostener el techo.

Eficiencia de Captura (drenaje) - la proporción del metano (por volumen) capturado en un sistema de drenaje del metano respecto a la cantidad total de gas liberado. El gas liberado comprende la suma de gas drenado más el gas emitido en el aire de ventilación de la mina. Usualmente se expresa como un porcentaje de la eficiencia de la captura (o drenaje) que se puede determinar para un único panel de veta larga o para toda una mina.

Gas de frente carbonífero – gas liberado de la cara de la veta que se está explotando, por acción de la máquina cortadora del carbón.

Metano de yacimientos de carbón (CBM) - un término genérico para el gas rico en metano que ocurre naturalmente en las vetas de carbón, típicamente comprende del 80% al 95% del metano, con proporciones más bajas de etano, propano, nitrógeno y dióxido de carbono. En el uso común internacional, este término se refiere al metano recuperado en las vetas de carbón no-minado utilizando ventosas de superficie.

Metano de la mina de carbón (CMM) – el gas capturado en una mina de carbón de trabajo por medio de técnicas de drenaje subterránea del metano. El gas consiste en una mezcla del metano y otros hidrocarburos y vapor de agua. A menudo se diluye con el aire y los productos de oxidación asociados, debido a la fuga inevitable del aire en las ventosas o galerías de drenaje de gas, a través de las fracturas inducidas por el minado y también debido a las fugas de aire en las juntas imperfectas de sistemas de tuberías subterráneas. Cualquier gas capturado subterráneamente, ya sea drenado antes de o después del minado y cualquier gas drenado de los pozos terraplén de superficie, está incluido en esta definición. El drenado de preminado CMM puede ser de gran pureza.

Gases extraños – otras emisiones de gases distintas a los gases del frente de la zona carbonífera.

Metano Húmedo - Término alternativo para CMM.

Drenaje del Gas – métodos para capturar el gas que ocurre naturalmente en las vetas de carbón para evitar que entre en las ventilas de la mina. El gas puede ser retirado de las vetas de carbón antes de la extracción utilizando técnicas de predrenaje y de las vetas de carbón removidas por el proceso de extracción, utilizando técnicas de postdrenaje. A menudo se le refiere como **drenaje del Metano** si el metano es el componente principal del gas que se busca capturar.

Terraplén (Estados Unidos: gob) -, suelo fracturado impermeable donde el carbón se ha extraído por largos trechos de minería del carbón y se ha permitido que el techo colapse, fracturando de este modo y desestresando el estrato superior y, en menor medida, por debajo de la veta que se está trabajando. El término gob se utiliza generalmente en los Estados Unidos; en otros lugares, se utiliza generalmente terraplén.

Drenaje de metano - Ver drenaje de Gas.

Gas natural - típicamente se refiere al gas extraído de los estratos geológicos distintos a las vetas de carbón (p.e., a partir de las reservas de gas "convencionales"). El gas podría estar compuesto principalmente de metano y puede haber migrado originalmente desde fuentes de vetas de carbón.

Predrenaje (drenaje premina) - extracción de gas con antelación al minado del carbón.

Postdrenaje (drenaje postmina) - extracción de gas liberado como consecuencia del minado.

Polvo respirable - partículas microscópicas de polvo que pueden entrar y dañar el pulmón humano.

Metano del aire de ventilación (VAM) - metano emitido por las vetas de carbón que entra al aire de ventilación y está expulsado desde el conducto de ventilación a baja concentración, por lo general en el rango de 0,1% a 1,0% por volumen.

Resumen Ejecutivo

El mundo se ha apoyado en el carbón para una parte significativa de su producción de energía primaria desde la Revolución Industrial. Los principales países industrializados, las economías emergentes y en transición del mundo – y por lo tanto, la economía mundial – van a depender de los recursos de energía del carbón en el futuro previsible. Hoy en día, el carbón suministra el 25% de la energía primaria global, el 40% de la electricidad mundial, y casi el 70% de la industria del acero y del aluminio del mundo. La Agencia Internacional de Energía (AIE, en inglés), prevé que las economías emergentes verán un crecimiento de la demanda de energía de un 93% en 2030, impulsado en gran medida por el crecimiento de la demanda en China e India, y se espera que el carbón sea el combustible principal, que llevará a satisfacer esta creciente demanda (IEA, 2009).

Con la continua dependencia en la producción de carbón, se espera que la extracción de carbón sea cada vez más difícil en muchas partes del mundo, mientras las reservas superficiales se agoten y las vetas más profundas y gaseosas sean extraídas. Sin embargo, las sociedades están exigiendo y esperando condiciones de trabajo más seguras en las minas, y una mayor responsabilidad ambiental de la industria del carbón. La aplicación de las mejores prácticas para el drenaje y el uso del metano es crítico para reducir los accidentes y explosiones relacionados con metano, que a menudo acompañan a la minería del carbón, al tiempo que contribuyen a la protección del medio ambiente mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG).

El Metano de Minas de Carbón Plantea Desafíos a la Seguridad y al Medio ambiente

La industria del carbón mundial, los gobiernos nacionales, los sindicatos, y los defensores de la seguridad del trabajador están preocupados por la frecuencia y gravedad de las explosiones del metano; especialmente en las economías emergentes, donde son inaceptablemente altas. Las buenas prácticas mineras necesitan ser transferidas a todos los países para asegurar que los riesgos se gestionen profesional y eficientemente. Ninguna mina, incluso en los países más desarrollados, está libre de riesgos de seguridad. Independientemente de su ubicación o de las condiciones del minado, es posible reducir significativamente el riesgo de accidentes de metano.

El metano es un gas explosivo en el rango del 5% al 15% del metano en el aire. Su transporte, recogida, o uso dentro de este rango, o incluso dentro de un factor de seguridad de por lo menos 2,5 veces el límite inferior de explosividad y al menos dos veces el límite superior, se considera generalmente inaceptable debido a los riesgos de explosión inherentes.

La gestión eficaz de los riesgos de metano en minas de carbón, también puede tener la ventaja de contribuir a la reducción o minimización de las emisiones de GHG. Las minas de carbón son una fuente importante de emisiones de metano, un potente GHG con un potencial de calentamiento global (GWP) de 20 veces más que el del dióxido de carbono (IPCC, 2007). El metano totaliza 14% del antropogénico global de las emisiones de gases de efecto invernadero y las minas de carbón liberan 6% de las emisiones antropogénicas mundiales de metano, o unos 400 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e), por año. Se prevé un aumento en las emisiones de CMM hasta el 2020 (Metano a Mercados, 2008; IPCC, 2007; EPA, 2006a), con estimaciones de hasta 793 MtCO₂e en 2020 (ESMAP, 2007).

Ocurrencia de Metano y Control

Los gases ricos en metano, por lo general contienen de 80% a 95% de metano en las profundidades de la minería subterránea, se encuentran naturalmente en las vetas de carbón y se liberan como CMM cuando las vetas de carbón son perturbadas por las actividades mineras. El CMM sólo se vuelve inflamable y crea un riesgo de explosión cuando se le permite mezclarse con el aire.

Las emisiones de grandes cantidades de dióxido de carbono también se producen a partir de las minas de carbón en algunos ambientes geológicos (p.e., Australia, Sudáfrica, Francia, y Europa Central). Este dióxido de carbono de la veta de carbón puede tener implicaciones importantes para las estrategias de gestión de la desgasificación, de las minas en general.

Las buenas prácticas de seguridad en las minas de carbón son para reducir el riesgo de explosión, mediante la prevención de la ocurrencia de mezclas explosivas en la práctica, y por ello diluyendo rápidamente a concentraciones seguras (p.e., a través de los sistemas de ventilación). Cuando los flujos de gas son tan altos que superan la capacidad del sistema de ventilación de la mina, para asegurar la dilución adecuada de metano en el aire de la mina, el gas debe ser recogido a través de un sistema de drenaje de la mina antes de que pueda entrar en los conductos de ventilación de la mina.

Buenas prácticas para los sistemas de drenaje del metano en las minas, tanto la selección de un método adecuado de captura de gas y la correcta aplicación y ejecución del sistema de drenaje de la mina. Después de una buena práctica se procurará que el CMM pueda ser capturado de manera segura, transportado, y (si es apropiado) utilizado, a una concentración, al menos dos veces la del límite explosivo superior (p.e., en o sobre el 30% de metano).

Enfoques Normativos para el Control de Metano

Una aproximación en la evaluación de riesgos para minimizar los riesgos de explosión – combinados con una fuerte aplicación de una ventilación robusta y la utilización de reglamentos de seguridad – puede llevar a mejorar sustancialmente las cantidades y calidades del gas capturado.

Además, el establecimiento y la aplicación de las normas de seguridad, que regulan la extracción de gas, el transporte y su utilización, fomentará estándares más altos para el drenaje del metano, aumentando la producción de energía limpia, y mayores reducciones de emisiones.

Predicción de Liberaciones Subterráneas de Metano

Los flujos de gas en minas subterráneas de carbón, bajo condiciones normales de estado-estable, son relativamente predecibles en ciertas condiciones geológicas y mineras, aunque existe una variación significativa de un país a otro. La falta de métodos de predicción de las emisiones de gas confiables, para la minería profunda y minería de múltiples vetas, sigue siendo un reto significativo, debido a las complejas interacciones causadas por el minado entre los estratos, las aguas subterráneas y el gas. No obstante, los métodos de eficacia comprobada para la proyección de los flujos de gas, captura de gas, los requisitos de ventilación y el potencial de utilización, están ampliamente disponibles y deben ser usados de manera rutinaria en la planificación minera.

Por su propia naturaleza, la emisión inusual y sorpresivas erupciones de metano, no son fáciles de predecir, pero las condiciones en las que pueden ocurrir son razonablemente bien conocidas. Por lo tanto, seguir las buenas prácticas permite una gestión más eficaz de estos riesgos.

Cualquier actividad minera a veces puede perturbar depósitos de gas natural adyacentes, lo que lleva a la liberación de metano no deseado, que pueden ser hasta el doble de lo esperado, a partir de fuentes de vetas de carbón únicamente. Tales situaciones se pueden identificar en una etapa temprana mediante la comparación de los datos medidos y esperados.

La Función de los Sistemas de Ventilación

La tasa máxima de extracción de carbón que se puede lograr de forma segura, en un lado gasificado y expuesto del manto carbonífero, se determina principalmente por la combinación de dos factores: 1) la capacidad del sistema de ventilación de la mina para diluir los contaminantes gaseosos a concentraciones aceptables, y 2) la eficiencia del sistema de drenado de metano de la mina.

Los costes de operación son un factor clave en el diseño del esquema general de desgasificación de las minas. La energía consumida en el suministro de ventilación de la mina subterránea es uno de los gastos operativos más costosos en una mina; es proporcional al cubo del volumen del flujo de aire. Por lo tanto, la introducción de un sistema de drenaje de gas – o aumentando su eficacia – a menudo representa una opción de menor costo que el incremento del volumen de aire de ventilación.

Drenaje del Metano

El objetivo de drenar el metano es capturar gas de alta pureza a partir de su fuente antes de que pueda entrar en los conductos de ventilación de las minas. Desde un punto de vista estrictamente reglamentario, solo es necesario capturar la cantidad de gas para garantizar que la capacidad del aire ventilado para diluir los contaminantes gaseosos, no sea excedida. Sin embargo, hay sólidos argumentos para maximizar la captura de gas, a fin de lograr una mayor seguridad, la mitigación del impacto medio ambiental y la recuperación de energía.

El metano puede ser capturado antes y después del minado, mediante técnicas de pre y postdrenaje, respectivamente. El predrenaje es el único medio de reducción del flujo de gas directamente desde la veta de minado. Por esta razón, el predrenaje es especialmente importante si la veta que se extrae es la fuente principal de emisión de gases, pero por lo general, es sólo factible en vetas de media a alta permeabilidad. Los métodos de postdrenaje involucran la interceptación del metano liberado por la perturbación del minado antes de que pueda entrar en un conducto de ventilación de la mina. Todas las técnicas de postdrenaje implican el acceso a la zona de perturbación por encima – y también a veces por debajo – de la capa de carbón trabajado. El postdrenaje puede implicar la perforación de la superficie o del subsuelo.

La baja eficiencia de captura por parte de sistemas de drenaje y la entrada excesiva de aire a los trabajos de la mina, son el resultado de la selección de métodos inadecuados de drenaje de gas y de la deficiente implementación de los mismos. Estos, a su vez, afectan negativamente tanto la utilización como el transporte de gas, mediante la producción de concentraciones de gases, a veces a niveles que no son considerados seguros (p.e., por debajo del 30% de metano).

El rendimiento de los sistemas de drenaje de metano se puede mejorar de manera significativa a través de una combinación de una correcta instalación y mantenimiento, seguimiento periódico y la perforación sistemática.

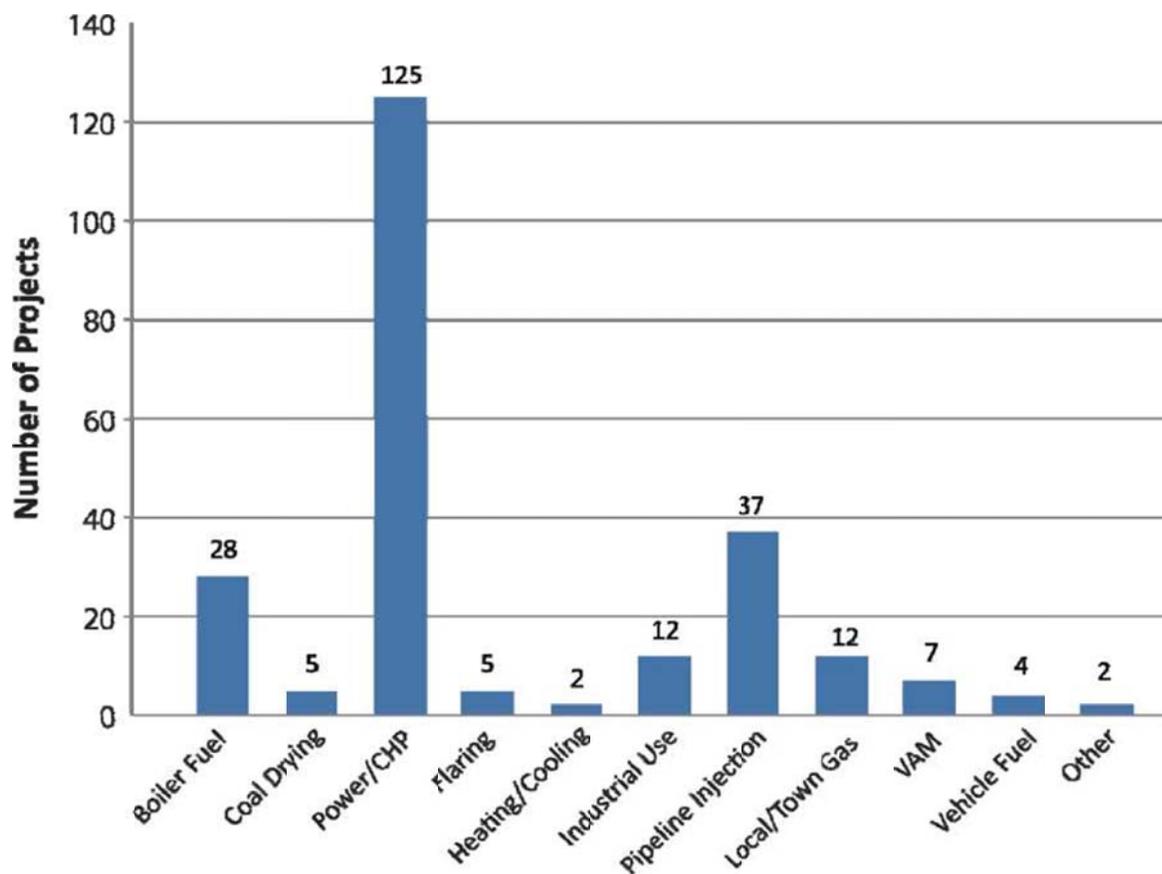
Hay sólidos argumentos desde la perspectiva empresarial, para la instalación y operación de sistemas de drenaje de gas metano de alta eficiencia. El control de metano con éxito es un factor clave en el logro de la rentabilidad de las minas subterráneas de carbón con altas reservas gaseosas.

Sobre la base de las experiencias en minas de carbón de todo el mundo, la inversión en "buenas prácticas" de los sistemas de drenaje de gas, redundan en menores tiempos de inactividad debido a problemas de emisión de gases, en entornos mineros más seguros, y en oportunidades para mayores usos del gas, reduciendo las emisiones.

Reducción y Aprovechamiento del Metano

El CMM capturado es un recurso de energía limpio para el cual hay una gran variedad de usos. La Gráfica ES-1 resume la distribución de los proyectos de CMM conocidos a nivel mundial, que están operando, bajo desarrollo, en planificación, o que estaban operando anteriormente. Estas gráficas se fundamentan en una base de datos de más de 240 proyectos compilados a nivel global por la Asociación de Metano para Mercados. Como indica la gráfica, la generación de energía, inyección de tubería de gas natural y las calderas son los tipos de proyecto dominante (fundamentados en el número de proyectos).

Gráfica ES-1 Distribución de los Usos del CMM en Proyectos Globales. Esta cifra representa el número total de proyectos de CMM informados a Metano para Mercados que están activos o en fase de desarrollo a nivel global, basado en el tipo de uso final.



(Fuente: Asociación de Metano para Mercados, 2009)

Se han desarrollado tecnologías de purificación y son ampliamente utilizadas (p.e., en los Estados Unidos), para retirar cualquier contaminante del CMM de alta calidad— típicamente producido a partir del predrenaje — y conforme a los exigentes estándares de calidad de tuberías (EPA, 2009). Para muchas otras aplicaciones de uso final del gas, los altos costos asociados con la purificación de gas drenado pueden ser innecesarios y pueden evitarse mediante la mejora de los estándares de drenaje subterráneos de metano.

Con los equipos y procedimientos adecuados, el gas drenado no utilizado puede ser quemado en tea con seguridad, para minimizar las emisiones de GHG. La quema convierte el metano, que tiene un GWP de más de 20 en comparación con el dióxido de carbono, el cual tiene un GWP de uno (IPCC, 2007).

El metano que no es capturado por el sistema de drenaje se diluye en el aire del sistema de ventilación de la mina y se emite a la atmósfera como metano de aire de ventilación diluido (VAM), típicamente en concentraciones de metano de 1% o menos. A pesar de esta baja concentración, colectivamente el VAM es la mayor fuente de emisiones de metano de las minas en todo el mundo. Las tecnologías de oxidación térmica se han introducido a escalas de demostración y comercial en varios lugares en todo el mundo (p.e., Australia, China y Estados Unidos), para reducir esas emisiones (y en un caso, para producir electricidad a partir del metano diluido). Otras tecnologías para mitigar las emisiones de VAM (p.e., la oxidación catalítica), están surgiendo y en fase de desarrollo.

Temas de Costos y Economía

Un drenaje eficaz de gas reduce los riesgos de explosiones y, por consiguiente, los riesgos de accidentes. La reducción de estos riesgos reduce a su vez sus costos asociados. Los costos de los accidentes relacionados con metano varían mucho de país a país, pero son significativos. Por ejemplo, una parada de actividades del 10% o la detención de trabajo en una mina determinada, debido a un incidente o accidente relacionado con gas, podrían conducir a unos ingresos perdidos

entre US \$8 millones y US \$16 millones por año, en una típica mina de veta larga de alta producción. Los costos adicionales de un solo accidente mortal, para una gran operación minera, podrían oscilar entre US \$2 millones a más de US \$8 millones a través de la pérdida de producción, costos legales, indemnizaciones y multas punitivas.

Al mismo tiempo, el drenaje de gas crea una oportunidad para la recuperación del gas y su respectiva utilización. Estos proyectos de recuperación de energía pueden ser económicos per se, por medio de la venta del gas, o su conversión a electricidad, combustible para vehículos u otras formas valiosas de inserción en ductos o de almacenamiento.

Los proyectos de recuperación y utilización del gas, son administrados cada vez más como fuentes de ingresos adicionales en la forma de créditos de reducción de emisiones de carbono, como Reducciones de Emisiones Verificadas (VERs), Reducciones de Emisiones Certificadas (CERs) u otros créditos como las Unidades de Reducción de Emisiones (URE). Estas opciones potenciales de financiamiento de carbono, pueden ser un factor crítico en hacer que algunos de los proyectos de utilización de CMM, que de otro modo serían poco atractivas, sean económicamente viables. Además, el financiamiento de carbono puede proporcionar las únicas fuentes de ingresos para los proyectos de sólo reducción, tales como la oxidación VAM (sin recuperación de energía) o la quema en torcha de CMM.

El VAM se puede utilizar también para la generación de energía. En la actualidad, la generación de energía derivada del VAM no es comercialmente viable, sin los ingresos de carbono u otros incentivos, tales como precios preferenciales en la electricidad o en el portafolio de normas.

Actualmente, las decisiones de inversión en la mayoría de las minas son propensas a favorecer la expansión de la producción de carbón, en lugar de desarrollar proyectos de utilización del CMM (en particular la generación de energía), debido al alto costo de oportunidad de la inversión, en bienes de equipos e infraestructura de generación de energía. Sin embargo, a fin de cumplir con los objetivos de protección del medio ambiente en el futuro podría requerirse que los propietarios de las minas, puedan mejorar la capacidad de drenaje del gas más allá del nivel estrictamente necesario, para satisfacer las necesidades de seguridad de las minas. Tales mejoras en el sistema de drenaje, que producen relativamente gas de alta calidad, pueden proporcionar un incentivo adicional para la inversión en proyectos de recuperación y de utilización de gas.

Conclusiones

Un enfoque holístico para la gestión de las liberaciones de metano, en las explotaciones mineras de carbón y las emisiones subsiguientes a la atmósfera, va a tener una serie de efectos beneficiosos, sobre la seguridad general de minas, la productividad de la mina y los impactos ambientales, en particular con respecto a las emisiones de GHG.

- La aplicación global del conocimiento acumulado sobre la presencia de metano, la predicción, el control y la gestión que está disponible actualmente, mejorará la seguridad en las minas. La implementación de buenas prácticas para el drenaje del metano podría reducir sustancialmente los riesgos de explosión, resultantes de la presencia de metano en las minas de carbón.
- Hay un sólido argumento empresarial en favor de la instalación y operación de sistemas de drenaje de gas de alta eficiencia, fundamentados en sus contribuciones para aumentar la productividad de las minas. Debido a que dichos sistemas aumentarán la disponibilidad del CMM de buena calidad, también puede haber un sólido argumento empresarial para la explotación y recuperación de energía, a partir del gas capturado.
- Las emisiones de metano, un GHG importante, de las minas de carbón subterráneas, pueden reducirse significativamente mediante la utilización de gas drenado, la quema en tea del gas que no puede ser utilizado, y la mitigación de las emisiones de VAM por oxidación.

Capítulo 1. Introducción

Mensajes Claves

Independientemente de las limitaciones, la seguridad del trabajador de la mina es de suma importancia y no debe ser comprometida.

Un enfoque de evaluación de riesgos para minimizar los riesgos de explosión se debe combinar con una fuerte aplicación de robustas regulaciones de seguridad de la ventilación y la utilización.

Idealmente, las empresas mineras modernas de carbón reconocen los beneficios de la adopción de un sistema de gestión holístico de gas que integra de manera constructiva el control subterráneo de gas, la utilización de metano, y la reducción de gases de efecto invernadero (GHG).

1.1 Objetivos de este Documento Guía

Este documento tiene como objetivo orientar a los propietarios de las minas y a los operadores, a los reguladores gubernamentales y los responsables políticos, en el diseño e implementación de la captura segura y efectiva de metano y el control en las minas subterráneas de carbón. Está destinado principalmente a fomentar unas prácticas mineras más seguras para reducir las muertes, lesiones y pérdidas de propiedad asociadas con el metano.

Un co-beneficio importante del drenaje eficaz de metano en minas de carbón es permitir la recuperación de metano para optimizar el uso de los recursos energéticos de otro modo desperdiciado. Por lo tanto, una importante motivación detrás del desarrollo de este documento de orientación es facilitar y fomentar la utilización y reducción del metano de minas de carbón (CMM) para reducir las emisiones de GHG. En última instancia, la adopción de estas prácticas ayudará a mejorar la sostenibilidad a largo plazo y la situación financiera de las minas de carbón a nivel mundial por:

- Esforzarse por lograr una meta de cero víctimas mortales, lesiones y pérdidas de propiedad.
- Demostrar el compromiso de la industria mundial de carbón en la seguridad minera, la mitigación del cambio climático, la responsabilidad social corporativa y la buena ciudadanía.
- El establecimiento de un diálogo mundial sobre la captura y uso de CMM.
- La creación de vínculos críticos entre la industria del carbón, el gobierno y los funcionarios reguladores.
- La incorporación de la captura eficaz de CMM como parte de un portafolio de gestión efectiva de riesgos.

Este documento de orientación es intencionalmente "basado en principios". Es decir, no trata de presentar una solución amplia, ni un enfoque prescriptivo que no pueda dar cuenta de manera adecuada por las condiciones específicas del lugar, la geología y las prácticas mineras. Los autores reconocen que no hay una solución universal y, por tanto, han establecido un amplio conjunto de principios que pueden ser adaptados según corresponda a las circunstancias individuales. En general, las tecnologías para la aplicación de estos principios siguen evolucionando y mejorando con el tiempo. Las mejores prácticas internacionales de la industria se describen en este documento según corresponda.

Este documento no pretende servir como un manual técnico, completo y detallado del drenaje de metano. Las referencias y los recursos adicionales se proporcionan al final de este documento.

1.2 Los Asuntos

El carbón es un recurso energético esencial tanto en los países industrializados y en las economías emergentes. Satisfacer la demanda voraz de energía, particularmente en algunas economías de rápido crecimiento, ha puesto presión sobre las minas de carbón para aumentar su producción; a veces a niveles más allá de lo que se puede sostener con seguridad, dando lugar a tensiones en las operaciones mineras globales y comprometiendo la seguridad. La presencia de

metano en las minas de carbón presenta un grave problema de seguridad que debe ser gestionado profesionalmente y con eficacia.

Mientras las explosiones de metano en las minas de carbón subterráneas ocurren raramente en muchos países mineros del carbón, todavía causan miles de muertes y lesiones cada año.

Muchas muertes pueden ser el resultado de un solo incidente. La Tabla 1.1 muestra algunas de las más graves explosiones fatales de minas de carbón, que se han producido en varios países desde el año 2000. Con una gestión eficaz del metano de minas de carbón, tales tragedias se pueden eliminar.

Tabla 1.1 Principales Incidentes de Explosión de Minas de Carbón, Post-2000

País	Fecha	Mina de Carbón	Número de Muertes
China	14 Febrero de 2005	Sunjiawan, Haizhou shaft, Fuxin	214
Kazajstán	20 Septiembre de 2006	Lenina, Karaganda	43
Rusia	19 Marzo de 2007	Ulyanovskaya, Kemerovo	108
Ucrania	19 Noviembre de 2007	Zasyadko, Donetsk	80
Estados Unidos	2 Junio de 2006	Sago, West Virginia	12

Los accidentes pueden ocurrir cuando el metano entra en el espacio de la mina desde la veta de carbón y los estratos circundantes como consecuencia de la perturbación creada por la operación minera. La cantidad de gas liberado en la mina es una función tanto de la tasa de extracción de carbón, como del contenido de gas del carbón in situ y los estratos circundantes.

Las agencias nacionales de reglamentación establecen límites máximos de la concentración de metano en los conductos de ventilación subterráneos. Por lo tanto, las emisiones de metano en los trabajos de la mina puede ser un factor limitante para la producción de carbón.

Se necesita con urgencia de orientación para ayudar a los gobiernos a aplicar rápidamente las prácticas de trabajo más seguras para reducir el peligro planteado por el metano en las minas subterráneas de carbón. Con base en los datos disponibles, hay una gran variedad en la tasa de mortalidad de la minería subterránea de carbón, en diferentes países de todo el mundo. Por ejemplo, la tasa de víctimas mortales por millón de toneladas de carbón extraído puede diferir en un factor de más de 30 veces de un país a otro.¹

Ninguna mina de carbón está libre de riesgos de seguridad. Incidentes relacionados con el gas pueden ocurrir incluso en las minas subterráneas de carbón más modernas. La tecnología avanzada reduce el riesgo de muertes de trabajadores por las explosiones, pero la tecnología por sí sola no es suficiente para resolver el problema. La gestión, la estructura organizativa, la participación de los trabajadores, la formación, la regulación y la aplicación de los sistemas son componentes esenciales de un proceso eficaz de gestión de riesgos. El conocimiento y la comprensión de los principios básicos del control de gas metano son fundamentales para diseñar controles y sistemas eficaces. En última instancia,

¹ Con base en los datos de 2008 (estadísticas oficiales), para víctimas fatales de minería de carbón subterráneas en China y Estados Unidos, en 2008, China reportó 3.215 muertes por cada 2.565 mil millones de toneladas de carbón de las minas subterráneas (suponiendo un 95% del total registrado de 2,7 mil millones de toneladas de las minas de carbón subterráneas), 1,25 muertes por cada millón de toneladas de carbón subterráneo extraído (SAWS, 2009). En 2008, los Estados Unidos reportó 12 muertes en las minas subterráneas de carbón, con una producción de 324 millones de toneladas, de 0.037 muertes por cada millón de toneladas de carbón subterránea extraída (MSHA, 2009).

todos los accidentes de explosión son una manifestación de la falta de aplicación efectiva de las prácticas y los procedimientos de seguridad.

Las minas de carbón son una fuente importante de emisiones de metano, un potente GHG con un potencial de calentamiento global (GWP) de más de 20 veces el del dióxido de carbono (IPCC, 2007). El metano cuenta con el 14% de las emisiones globales antropogénicas de gases de efecto invernadero, y las emisiones de CMM contribuyen al 6% de las emisiones mundiales antropogénicas de metano o cerca de 400 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e) anuales (EPA, 2006a; IPCC, 2007; Metano a Mercados, 2008). Se prevé que las emisiones de CMM aumenten a 793 MtCO₂e en 2020 (ESMAP, 2007). Más del 90% de estas emisiones de CMM son desde las minas subterráneas (EPA, 2006b); de las cuales aproximadamente el 80% es emitida en forma muy diluida (típicamente menos del 1% de metano) a través del aire ventilación de la mina.

Ya existen tecnologías que podrían reducir significativamente las emisiones de metano de las minas de carbón. Su implementación exitosa requiere de un liderazgo de los gobiernos, mecanismos de financiación adecuados y el compromiso de la industria de la minería del carbón mundial.

1.3 Captura, Utilización y Reducción de Gas

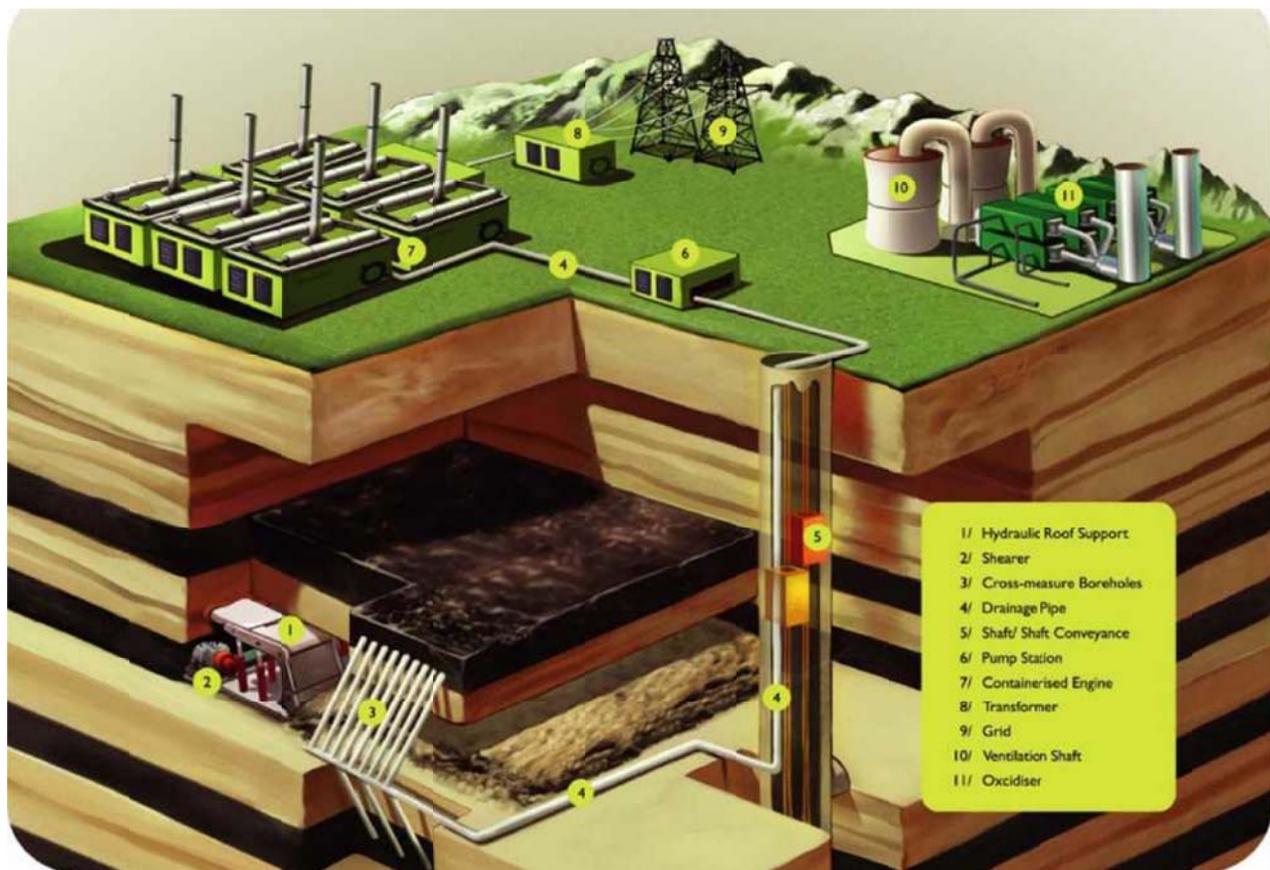
La captura de gas y su uso en las minas de carbón no es nueva, aunque ha habido importantes mejoras en la tecnología y su aplicación a través de varios siglos. El primer drenaje de metano registrado ocurrió en el Reino Unido en 1730. Sistemas controlados de drenaje de metano más modernos se introdujeron en Europa en la primera mitad del siglo XX.² La utilización del gas de las minas para iluminación, pudo haber ocurrido ya en el siglo 18 y fue registrado en la década de 1880.

Por la década de 1950, los métodos sistemáticos y efectivos de captura de gas fueron desarrollados originalmente en Alemania, siendo utilizados en toda Europa. Desde la década de 1960, ha aumentado el uso del gas drenado, en un principio para las calderas de las minas y los procesos industriales y, posteriormente, para la generación de electricidad, gas por gasoducto y gas en la ciudad.

La Figura 1.1 ilustra un esquema tridimensional, en perspectiva recortada, de los trabajos en una mina de carbón subterránea y las instalaciones de la superficie. Este gráfico muestra la complejidad y los aspectos inter-relacionados del drenaje subterráneo de la mina y el sistema de recolección del gas con las instalaciones necesarias en la superficie para convertir el CMM en electricidad. El gráfico también muestra la reducción simultánea de metano del aire de ventilación (VAM) desde los pozos de ventilación de la mina.

² Estos sistemas fueron incluidos en la Cuenca Superior Silesia en Polonia, en 1937 y en Alemania en 1943.

Figura 1.1 Esquema de un Sistema de Drenaje de una Mina Subterránea de Carbón y las Instalaciones en la Superficie para la Recuperación de la Energía y Reducción del CMM



(Cortesía de Green Gas International)

Actualmente, hay cientos de proyectos de recuperación y utilización del gas de CMM en todo el mundo, que están operando o en desarrollo. Por ejemplo, la Asociación de Metano para Mercados estima que más de 240 proyectos han operado, están operando actualmente, o están en desarrollo, en unos 14 países en el mundo (2009). El uso más frecuente de CMM es para la generación de energía; otros usos incluyen combustible para las calderas, la inyección de tuberías de gas natural, gas para la ciudad, gas industrial, materia prima para la conversión a combustibles para vehículos, como el gas natural licuado (GNL) o el gas natural comprimido (GNC) y secado de carbón.

En algunos casos, se destruye el metano que económicamente no puede ser recuperado y utilizado debido a las condiciones específicas del sitio o a los mercados poco prácticos (p.e., es quemado en tea y por lo tanto convertido en dióxido de carbono). Esto reduce el GWP potencial de las emisiones. Estas reducciones de emisiones también tienen el potencial de generar ingresos de créditos de carbono en algunos países, tanto a través de mercados voluntarios y de cumplimiento de carbono.

Capítulo 2. Fundamentos del Control de Gas

Mensajes Clave

Establecer y hacer cumplir los reglamentos para la extracción, transporte y utilización segura de gas, fomentando estándares más altos en el drenaje de metano, así como el aumento de la producción de energía limpia y una mayor reducción de emisiones.

Hay un tremendo conocimiento de la industria mundial y experiencias sobre la gestión de los riesgos de explosión de metano.

Las condiciones seguras de trabajo en entornos de minas gaseosas no pueden alcanzarse sólo a través de la legislación o incluso de la tecnología más avanzada. Por el contrario, los sistemas de gestión racional y eficaz, organización de gestión y prácticas de gestión, son fundamentales para la seguridad de las operaciones. Otros elementos críticos de seguridad en las minas son la educación y la formación adecuada, tanto para la gestión y la fuerza de trabajo, como para el ingreso de los trabajadores, fomentando la adopción de prácticas de seguridad laborales.

2.1 Objetivos del Control de Gas en las Minas

El objetivo principal de los sistemas de control de gas es evitar explosiones y riesgos de asfixia en las minas subterráneas de carbón. Controlar el metano en un frente de veta larga activo, de manera que las concentraciones de metano en el retorno de la ventilación no superen el 1% en general, sólo requiere el uso de técnicas de ventilación. Sin embargo, si se espera que sean superiores los flujos de metano en el frente de trabajo, debe utilizarse una combinación de ventilación y drenaje de metano. Unas mejores prácticas de control de gas para la seguridad, mejorará las perspectivas de utilización del gas.

Las medidas de protección están disponibles para reducir la propagación de una explosión después de que ha ocurrido y son importantes las líneas de defensa secundarias. La mitigación del metano post-fallo no es un sustituto para la prevención, sin embargo, es el enfoque de estas directrices.

2.2 Ocurrencia de Riesgos del Gas

Los gases ricos en metano, por lo general contienen entre 80% y 95% de metano, se producen naturalmente en las vetas de carbón y se liberan cuando éstos son perturbados por el minado. El gas de la veta de carbón sólo se vuelve inflamable y crea un riesgo de explosión cuando se le permite mezclarse con el aire.

También se encuentran emisiones de grandes volúmenes de dióxido de carbono en minas de carbón en algunos entornos geológicos. El dióxido de carbono es más pesado que el aire y tóxico a concentraciones por encima del 5% en el aire, pero se pueden experimentar efectos fisiológicos en concentraciones tan bajas como el 1%.

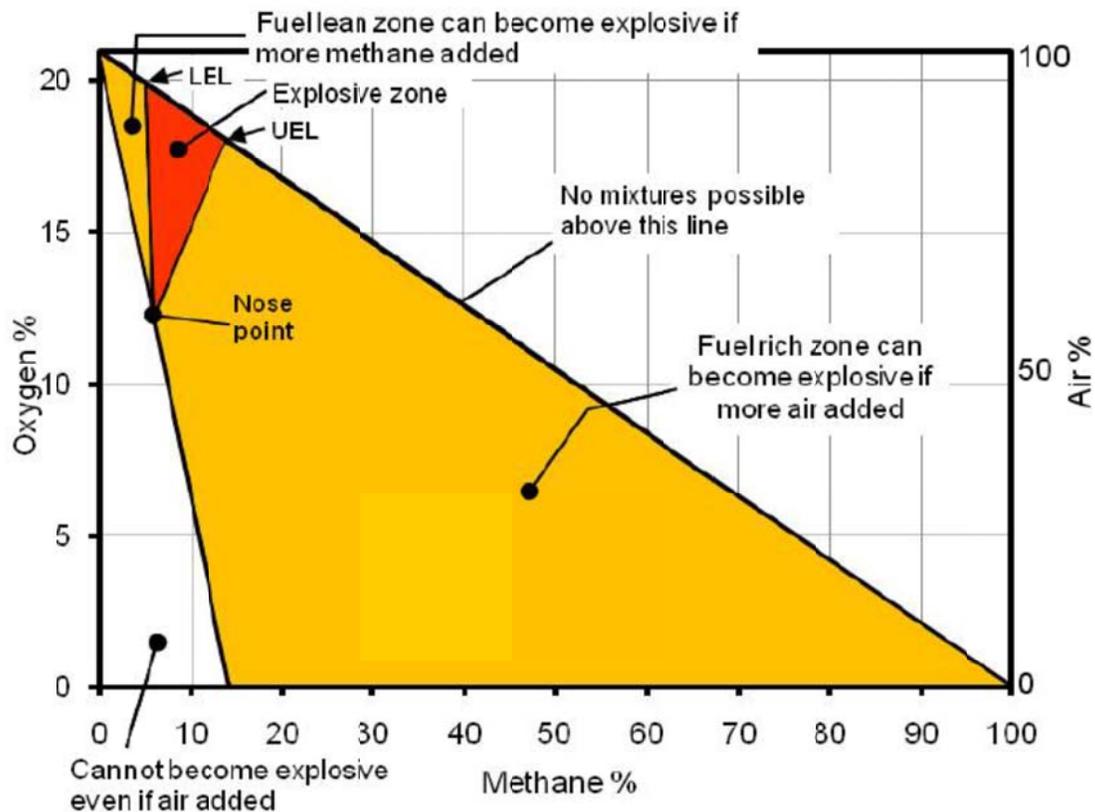
El metano es incoloro, inodoro e insípido; por lo tanto, se necesita un dispositivo de medición para confirmar su presencia. El metano es inflamable cuando se mezcla con oxígeno en un intervalo de concentraciones como se muestra en la Figura 2.1.

A presión atmosférica, la concentración más explosiva de metano en el aire es de 9,5% en volumen. En el confinamiento subterráneo, puede aumentar la presión máxima de explosión como el gas sin quemar es comprimido por delante del frente de llama.

En ambientes carentes de oxígeno, como puede ocurrir en goafs sellados, se pueden formar mezclas explosivas sólo si se añade aire. Cuando está presente en concentraciones más altas, el metano es un asfixiante debido al desplazamiento del

aire. Como las minas de carbón subterráneas están confinadas, la ignición de una acumulación sustancial de metano invariablemente conduce a una explosión.

Figura 2.1 Formación de Mezclas Explosivas



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

El metano tiene una tendencia a estratificar y formar capas horizontales cerca de la azotea de trabajos de la mina donde hay velocidades de ventilación insuficientemente altas para evitar la estratificación. Este fenómeno se produce porque el metano es más ligero que el aire, con una densidad de sólo 0,55 en comparación con la del aire. En muchos casos, una velocidad del aire de 0,5 metros por segundo (m/s) evitará capas, pero hay algunas circunstancias en las que esta velocidad del aire será insuficiente. Los diseñadores de la ventilación deben estar al tanto de las variables que inhiben las capas de metano, una anchura de capa, la inclinación de la calzada, la tasa de emisión de gases y la tasa de flujo del aire (Creedy & Phillips, 1997; Kissell, 2006).

En algunas circunstancias, cuando la mezcla no está teniendo lugar debido a una velocidad de aire insuficiente, las capas de metano se pueden formar y ambos fluirán ya sea con la corriente o en contra de la veta de ventilación. Estas capas de metano pueden propagar las llamas rápidamente, lo que aumenta el riesgo y la gravedad de las explosiones al proporcionar una vía entre las fuentes de ignición y las grandes acumulaciones de mezclas inflamables (p.e., en goafs de veta larga). Una vez que el metano se mezcla con aire, sin embargo, no se separará de forma espontánea.

Los operadores mineros aíslan activamente zonas de minas que ya no se están trabajando (p.e., tajos largos ya explotados y algunas veces goafs de tajos largos activos) desde el sistema de ventilación de la mina mediante la construcción de barreras o sellos. Estas barreras de ventilación o sellos son invariablemente imperfectas debido al movimiento de tierra y no evitará completamente la entrada de gases emitidos hacia las explotaciones mineras activas.

Las mezclas explosivas de gases pueden acumularse detrás de los sellos de ventilación y fluirán hacia los conductos de ventilación como consecuencia de las fluctuaciones de la ventilación o las depresiones de la presión barométrica.

Las zonas de alto riesgo en una mina de carbón – donde el metano en la veta de carbón pasa a través del rango explosivo – se encuentran en el terraplén (gob) detrás de las caras y del veta larga en la zona de corte de las máquinas cortadoras de carbón mecanizadas. Las mezclas explosivas también se pueden formar dentro de los sistemas de drenaje de metano con un mal diseño o mal gestionados – debido a un exceso de aire que se va introduciendo.

Los trabajos de minería de anchurones y pilares (sin recuperación del pilar) tienden a molestar considerablemente los volúmenes menores de estratos adyacentes que en los métodos de veta larga; por lo tanto, estas minas tienden a ser menos gaseosas que las minas de veta larga. Las minas de anchurones y pilares no están necesariamente en situación de menos riesgo de explosiones, sin embargo, lo que se debe a las dificultades para lograr una ventilación adecuada del frente de trabajo. La fuente de metano predominante en trabajos de anchurón y pilar es la veta trabajada en sí. Las capas de mezclas de gases inflamables pueden surgir en el techo como resultado de una ventilación inadecuada de corredores horizontales sin salida y las emisiones de fuentes de techo (ver Estudio de Caso 4).

Ignición de Mezclas Explosivas de Metano

Las mezclas de metano-aire pueden ser encendidas por una serie de fuentes: las chispas eléctricas, las altas temperaturas causadas por el acero de la roca cuarcita, compresión adiabática de las caídas de piedra, aluminio impactando en hierro, caída de rayos, materiales para fumar, explosivos y detonadores, combustión espontánea y llamas.

El uso de la cada vez más poderosa maquinaria de corte de carbón y roca en las minas modernas de carbón ha provocado el grave problema de los encendidos por fricción. La alta frecuencia de igniciones de metano de carbón producidas por herramientas de corte de carbón y roca, en comparación con otras fuentes, indica la dificultad técnica en la realización de un control absoluto de los peligros del gas.

2.3 Reducción del Riesgo de Explosión

Es un objetivo principal de esta guía destacar los principios subyacentes de la prevención de explosiones. Este conocimiento es esencial para el diseño de programas efectivos para controlar los riesgos de gas en minas de carbón. Los principios descritos en el presente documento son sinónimo de los incluidos en los sistemas de gestión de riesgo que las empresas mineras modernas han puesto en práctica en la lucha hacia lograr cero accidentes y cero explosiones.

La gestión del riesgo de explosión de gas en minas de carbón implica un gran número de diferentes actividades (véase el Recuadro 2.1), necesitando una buena organización y una clara asignación de responsabilidades.

Recuadro 2.1 Típicos Procedimientos y Controles de Riesgo de Explosión de Gas en una Mina de Carbón

- Uso de equipos eléctricos y cables a prueba de fuego
- Control de explosivos y su uso por debajo del suelo
- Prestación de servicios de bomberos y rescate adecuados
- Planificación, diseño e implementación de drenaje de gas
- Control de la descarga de gas metano drenado
- Control de acceso a la mina y sus áreas de trabajo
- Restricción del contrabando en el ambiente subterráneo
- Inspección de las explotaciones subterráneas
- Provisión de materiales antiestáticos
- Supervisión de las operaciones mineras
- Uso y mantenimiento de instalaciones mecánicas y eléctricas
- Provisión para restringir el uso de equipo inadecuado
- Supervisión de las operaciones mecánicas y eléctricas
- Restricción de los materiales fumantes bajo tierra
- Planificación de ventilación
- Control de la ventilación de la mina
- Seguimiento y medición de las concentraciones de gas de la mina
- Uso de la ventilación auxiliar
- Desgasificación de los encabezamientos
- Precauciones de encendido por fricción
- Disposición de detectores de metano
- Cualificación de los empleados
- Formación en seguridad
- Suministro de barreras de supresión de explosiones
- Publicación de los señales de advertencia y avisos

Las mejores prácticas de seguridad en las minas de carbón son reducir el riesgo de explosión mediante la prevención de la ocurrencia de mezclas explosivas siempre que sea posible – y tomar las medidas para garantizar la separación de mezclas explosivas de fuentes potenciales de ignición..

Es crítico el control de la dilución, dispersión y distribución de gases inflamables en las minas de carbón para reducir al mínimo la disponibilidad de combustible para la ignición. Los riesgos asociados con los gases inflamables en las minas subterráneas de carbón pueden minimizarse de varias maneras: mediante la dilución a concentraciones seguras con aire de ventilación; mediante el uso de dispositivos patentados para ventilar las máquinas cortadoras de carbón; desviando el gas hacia afuera de las zonas de trabajo; y, cuando sea necesario, mediante la captura de gas en pozos o galerías de drenaje de gas antes de que pueda entrar en los conductos de ventilación de las minas.

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

- Siempre que sea posible, evitar la ocurrencia de mezclas de gases explosivos (p.e., el uso de métodos de drenaje de metano de alta eficiencia, prevención y dispersión de las capas de metano por medio de la velocidad de ventilación).
- Si las mezclas explosivas de gas son inevitables, minimizar los volúmenes de mezclas explosivas (p.e., una rápida dilución en el aire de ventilación para lograr concentraciones permisibles de metano).

- Separar las ocurrencias inevitables de mezcla de gases de posibles fuentes de ignición (p.e., mediante el uso de sistemas de ventilación *face-end* (del frente final) especialmente diseñados para evitar acumulaciones de gas cerca de motores eléctricos o evitar el uso de la electricidad en los retornos de ventilación del distrito de veta larga).
- Evite las fuentes de ignición tanto como sea posible (p.e., dispositivos eléctricos inseguros, llamas libres, fumar).
- Controlar las emisiones de gases provenientes de áreas selladas y de trabajos terminados, por medio del uso de métodos de drenaje de gases regulados para mantener la pureza del gas y por el drenaje de gas para dar cabida a las fluctuaciones en la presión barométrica.

2.4 Principios Regulatorios y de Gestión

Marco Regulatorio Seguridad Efectiva

Un marco normativo eficaz de seguridad proporcionará orientación coherente y clara a la industria bajo el amparo de una autoridad líder en seguridad, con roles y responsabilidades claramente definidas que no se superponen con las de otras autoridades.

Las regulaciones integrales de seguridad de gas en minas de carbón no proporcionan ninguna garantía de condiciones de trabajo seguras. Para ser eficaces, las normas deben ser comprendidas, aplicadas y cumplidas por los inspectores de minas, gerentes de las minas, el personal de supervisión y los trabajadores de la mina. La gestión proactiva del riesgo y las responsabilidades de seguridad de abajo hacia arriba, son las claves para la prevención de los accidentes de gas. Los funcionarios y los mineros sólo pueden ser proactivos si entienden los principios básicos de los procesos de emisión de gases y el control respectivo. El entrenamiento y la transferencia de conocimiento son elementos necesarios de un programa de seguridad que sea exitoso, así como un fácil acceso a informes detallados sobre los incidentes de gas y sus causas. La gestión de la seguridad y la formación deben abarcar tanto a los empleados de la mina como a los contratistas.

Cumplimiento

Los inspectores de un gobierno efectivo auditan las condiciones de seguridad mineras mediante la realización de inspecciones subterráneas detalladas, proporcionando un asesoramiento experto para la gestión de la mina, la revisión de la eficacia de las normas, y garantizando el cumplimiento de la normativa mediante la colaboración con los operadores de las minas para que subsanen los defectos, o penalizar a aquellos que visiblemente ignoran las regulaciones y ponen en peligro la vida. La seguridad efectiva y los sistemas de gestión de regulación también implican a aquellos que se ven más afectados por la falta de control de gas, los propios mineros. Para garantizar una gestión de riesgos más eficaz, debe hacerse hincapié en la prevención del accidente o incidente, en lugar del castigo después de un evento.

El manejo exitoso de los riesgos de salud y seguridad no sólo implica a las autoridades reguladoras y el operador de la mina, sino que debe incluir a los trabajadores de las minas como participantes iguales. Como está indicado por la Oficina Internacional del Trabajo en el *Código de Prácticas en Seguridad y Salud en las Minas de Carbón Subterráneas* (OIT, 2006), los trabajadores tienen derecho a un medio ambiente de trabajo seguro, incluyendo la capacidad de ser informados sobre los riesgos potenciales y sin temor a represalias. Por otra parte, como socios en el desarrollo de las condiciones de trabajo seguras, los trabajadores tienen la obligación de apoyar las prácticas de trabajo seguras y mantener un ambiente de minería segura.

Concentraciones de Gas Admisibles para Condiciones de Trabajo Seguras

Las regulaciones prescriptivas deben utilizarse con moderación, ya que pueden frenar la innovación. Estas son justificadas por imperativos físicos tales como el rango explosivo de los gases inflamables de la mina en el aire. Todos los países mineros de carbón establecen límites superiores de metano permisible o las concentraciones de gases inflamables que no debe excederse en los conductos de ventilación de las minas. Algunos aplican diferentes límites obligatorios de

concentración de gas en diferentes partes de una mina de carbón en función de la actividad y el riesgo de niveles explosivos siendo alcanzado, y estableciendo las concentraciones mínimas de seguridad para el transporte y uso del gas para reducir al mínimo el riesgo de explosiones subterráneas (Cuadro 2.1).

Tabla 2.1 Ejemplos Seleccionados de Reglamentación y Límites de Concentración de Metano Inflamable Aconsejados

Limitando la concentración de metano inflamable [%]	Australia	China	Alemania	India	Sur Africa	Reino Unido	USA	Factores de seguridad ^a
Máximo por debajo del cual está permitido trabajar en general	1.25	1.0	1.0	1.25	1.4	1.25	1.0	3.6 – 5.0
Máximo por debajo del cual se permite el trabajo en conductos de retorno	2.0 ^b	1.5 ^g	1.5	0.75	1.4	2.0 ^b	2.0 ^b	2.5 - 6.7
Mínimo permitido para utilización	na ^e	30	25	na ^f	na ^f	40	25 ^c	1.7 – 2.7
Mínimo para el transporte subterráneo por tuberías	na ^e	na	22	na ^f	na ^f	na ^e	na ^d	1.5

(a) Los factores de seguridad indican el rango de múltiplos por debajo del límite inferior de explosividad del 5% o por encima del límite explosivo superior de 15% de metano en el aire;

(b) Si no hay electricidad;

(c) Los Estados Unidos maneja la desgasificación del metano en el plan de ventilación, no hay códigos o reglamentos;

(d) No se considera un problema en forma de gases terraplén de concentración baja, son generalmente drenados en pozos superficiales;

(e) Determinado por la evaluación local de riesgos;

(f) Pocas o ninguna aplicación por lo que no se abordan;

(g) El 2,5% para un retorno sin viaje;

(h) En la India, las normas de metano se especifican en el Reglamento de Minería de Carbón de la India de 1957, que se basa en la Ley de Minas de 1952.

Los niveles de acción precisos para las concentraciones de gas por sí mismos no son suficientes para garantizar las condiciones de seguridad de las minas. Tiene el mismo nivel de importancia la identificación de los lugares adecuados en los que se miden las concentraciones, los procedimientos que se utilizarán para la medición y las acciones a tomar como consecuencia de las medidas. La legislación minera en los países industrializados en general se centra en el seguimiento y control de esfuerzos en proporción al grado de riesgo esperado.

Transporte Seguro y la Utilización del Gas

El transporte y uso de mezclas explosivas de gas es peligroso debido a los peligros de la propagación de una explosión en las áreas de trabajo de una mina. Las normativas nacionales de seguridad minera varían en su evaluación de la concentración de metano mínimo considerado seguro para el transporte y la utilización, que varía de 25% a 40% entre los países. Un factor de seguridad de al menos dos veces el límite explosivo superior (p.e., 30% o mayor concentración de metano) se reconoce generalmente como un mínimo de una buena práctica.³ Los accidentes que involucran tuberías que transportan el metano en concentraciones muy por encima del límite superior de inflamabilidad, no dan lugar a explosiones ya que el gas tiene demasiada alta pureza para quemarse; en estos casos, un incendio en la interfase gas/aire puede ser extinguido mediante técnicas de extinción de incendios. En contraste, una ignición de gas de baja

³ Un factor de seguridad de por lo menos 2.5 por debajo del límite inferior de explosión de metano (es decir, por debajo del 2% de metano) es un máximo de buenas prácticas, en ausencia de electricidad; siendo necesario un factor más elevado de seguridad si la electricidad está en uso.

pureza (p.e., en el intervalo de 5% a 15%) en una tubería, puede causar que el frente de llama se acelere en ambas direcciones dentro del tubo, creando intensas fuerzas explosivas y poniendo toda la mina en peligro.

Reglamentos para Reducir el Riesgo de Ignición

La mayoría de los países mineros tienen normas que regulan el tipo y uso de materiales permitidos bajo tierra para minimizar los riesgos de ignición. No todas las fuentes potenciales de ignición pueden ser eliminadas, sin embargo.

La electricidad es necesaria para el equipo minero energético. Su uso seguro depende de la adopción de la protección contra las llamas y las normas de seguridad intrínsecas, el uso de cables blindados y conexiones de seguridad, y procedimientos (I&M) de inspección y mantenimiento riguroso. Por lo general, las normas prohíben el uso de electricidad en las carreteras específicas dentro de un distrito de veta larga, donde podrían surgir elevadas concentraciones de metano o donde es permitido las concentraciones cerca de los límites de gases inflamables (p.e., superior al 1% de metano).

Los riesgos de ignición por fricción en máquinas cortadoras de carbón se reducen al mínimo mediante el uso de picos afilados de corte, rociadores de agua correctamente colocados y sistemas de ventilación de la máquina. Los transportadores también pueden ser una fuente de ignición debido a un sobrecalentamiento, pero este riesgo puede reducirse sustancialmente a través de regulares I&M. El comportamiento humano inadecuado, tales como encender un cigarrillo bajo tierra, ha sido conocido por ser una fuente de explosiones de minas.

Capítulo 3. Ocurrencia, Liberación y Predicción de Emisiones de Gas en las Minas de Carbón

Mensajes Clave

Los flujos de gas metano en minas de carbón bajo condiciones normales, en el estado estacionario, son generalmente predecibles.

La emisión inusual y los eventos de explosión no son fáciles de predecir, pero las condiciones en las que pueden ocurrir son razonablemente bien conocidas. Se han desarrollado métodos detallados de la reducción de riesgos en estas condiciones y deben aplicarse siempre que se identifican riesgos significativos. En tales circunstancias, las condiciones de trabajo seguras dependen del rigor de la aplicación y el seguimiento de los métodos de control de gas.

No puede ser menospreciada la importancia tanto de la instalación de monitoreo del subsuelo por razones de seguridad de minas operativas sino también de la recopilación y el uso de los datos para la planificación de la seguridad.

3.1 Introducción

Actualmente, las minas de carbón de alta producción encuentran flujos de gas cada vez más altos ya que sus tasas de extracción de carbón aumentan y trabajan vetas de carbón a un nivel más profundo y con mayor contenido de gas. El conocimiento de la incidencia, las características de emisión, y el fluido de gas esperado de una mina de carbón en función de la tasa de producción de carbón, es esencial para la seguridad, la planificación de la mina, la ventilación, la utilización de gas, y los fines de control de emisiones de GHG

3.2 Ocurrencia de Gas en las Vetas del Carbón

El gas natural que se encuentra en las vetas de carbón se compone principalmente de metano (típicamente 80% a 95%) con las proporciones más bajas de gases más pesados de hidrocarburos, nitrógeno y dióxido de carbono. Las mezclas de metano, vapor de agua, aire y productos de oxidación asociados que se encuentran en las minas de carbón a menudo se denominan colectivamente “gas de minas”

El metano se formó en las vetas de carbón, como resultado de las reacciones químicas que tienen lugar como el carbón fue enterrado en la profundidad. Restos de plantas tales como los encontrados en los pantanos modernos cambiarán lentamente de mojado, detritus orgánico a carbón, si el material se entierra a una profundidad suficiente y permanece cubierto durante un período de tiempo a través de un proceso conocido como carbonificación. Cuanto mayor sea la temperatura, la presión, y la duración de entierro del carbón, mayor es la madurez de carbón (p.e., el rango) y mayor es la cantidad de gas producido. Se produce mucho más gas durante este proceso de carbonización que el que se encuentra ahora en las vetas. El gas perdido durante el proceso de carbonización ha sido emitido en las superficies antiguas de tierra, eliminadas en solución por el agua subterránea de paso, o ha emigrado y ha sido atrapado en los espacios de los poros y estructuras en las rocas circundantes. Este gas se también puede haberse acumulado en estratos porosos adyacentes, tales como areniscas o puede haber sido adsorbido por el esquisto orgánico. Estas rocas del yacimiento pueden convertirse en fuentes importantes de los flujos de gas en la mina, si estas capas gasíferas están selladas por los alrededores de los estratos impermeables y permanecen en reposo hasta que el minado tiene lugar. El metano se produce en concentraciones mucho más altas de carbón en comparación con cualquier otro tipo de roca debido al proceso de adsorción, que permite a las moléculas de metano que se envasen en la sustancia del carbón a una densidad casi parecida a la de un líquido. En una secuencia vertical de las vetas de carbón, el contenido de metano aumenta a menudo de forma sistemática con la profundidad y el rango. Los gradientes de contenido de gas en función de la profundidad varían de cuenca carbonífera a cuenca carbonífera y refleja la historia geológica de la cuenca en la que se formó el carbón. En algunas cuencas de carbón, el contenido de metano aumenta con la profundidad, y finalmente, alcanza un máximo y luego disminuye por debajo de este nivel.

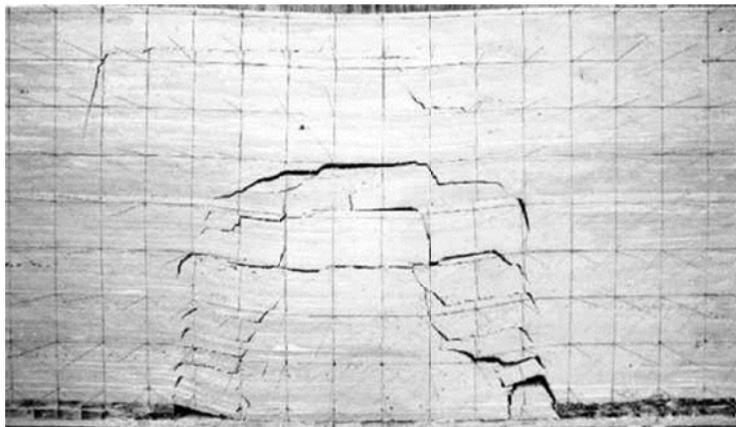
3.3 El Proceso de Liberación del Gas

El gas que se produce y se almacena en el carbón y en los estratos circundantes, naturalmente, puede ser puesto en libertad si se le molesta por la actividad minera. La velocidad y la cantidad de gas liberado depende de la cantidad inicial de gas en el (contenido de gas) carbón, la distribución y el espesor de las capas de carbón perturbado por el minado, la fuerza de los estratos que contienen el carbón, la geometría de los trabajos de la mina, la tasa de producción de carbón y la permeabilidad de la veta de carbón. El flujo de gas total varía proporcionalmente a la tasa de perturbación de los estratos por la actividad minera. En un entorno geológico particular, por lo tanto, el volumen total de gas liberado durante el minado aumenta proporcionalmente con el aumento en la tasa de extracción de carbón. En ciertas circunstancias, sin embargo, también puede ocurrir la eyección rápida, o explosiones, de carbón y gas y las emisiones repentinas de gas.

Algunas vetas de carbón extraído en Australia y en otros lugares, han absorbido grandes cantidades de dióxido de carbono, así como el metano. Cuando se extraen estas vetas de carbón, pueden ocurrir explosiones en un total más bajo en contenido de gas in situ de la veta de carbón del que se esperaría si sólo estaba presente el metano. Por lo tanto, el contenido in situ de ambos gases se debe medir para evaluar la necesidad de pre-drenaje.

Estudios Europeos (Creedy et al, abril de 1997), han demostrado que un arco desestresado o zona de perturbación, dentro de la cual se libera el gas, se forma por encima de una veta larga típicamente extensible de 160 m a 200 m en el techo y por debajo de la veta larga a aproximadamente 40 m a 70 m en el suelo. La gráfica 3.1 es una foto de un modelo de yeso que muestra el envejecimiento del material yacente, después de la creación de un espacio vacío. Este procedimiento de modelado es útil en la determinación de la magnitud de desestresado que tiene lugar y la altura por encima del vacío de separación en lecho sensible, la apertura de la fractura, y se produce otras formas de relajación de los estratos, aumentando así la permeabilidad y la creación de vías para la migración de gas. Diversas teorías y modelos empíricos se han desarrollado para representar este proceso.

Figura 3.1 Modelo de Sección Paralela al Frente de Tajo Largo Mostrando el Estrato Fracturado como Resultado de la Eliminación de Carbón, Formando así el Terraplén.



(Siguiendo el modelo de Gaskell, 1989)

La extracción de veta de carbón conduce a la subsidencia en la superficie. Mientras son perturbadas todas las vetas entre una veta larga y la superficie, sólo entra en funcionamiento el gas dentro de un arco desestresado. Las perforaciones superficiales y las excavaciones poco profundas en ocasiones encuentran gas liberado de las vetas de carbón que normalmente no podría ser emitido durante la explotación minera. Luego puede ocurrir la producción de gas. Sin embargo, la perforación o excavación también pueden servir como una vía de migración para el gas no capturado, dando lugar a peligros superficiales y del subsuelo.

3.4 Nivel Relativo de Gas de las Minas de Carbón

La tasa de emisión "específica" (o "relativa") es de uso común para representar el nivel de gas de una mina o de un distrito de veta larga. Utiliza las mismas unidades que el contenido de gas (p.e., metros cúbicos de metano emitido por tonelada de carbón o m^3/t), pero es conceptualmente muy diferente.⁴ Las emisiones específicas representan el volumen total de metano liberado de todas las fuentes, dividido por la cantidad total de carbón que se produce durante un período de referencia de tiempo, idealmente una semana o más. En otras palabras, esta medición es realmente metros cúbicos (m^3) de metano emitido por tonelada (t) de carbón extraído durante cualquier período de tiempo dado. El gas emitido, y medido, no viene sólo del carbón que está siendo extraído, sino también de todos los estratos que están siendo perturbados y quedan libres por el vacío dejado por el colapso del proceso minero. En general, las minas de carbón con emisiones específicas de $10 \text{ m}^3/\text{t}$ y superior, son consideradas como gaseosas. Se han encontrado emisiones específicas de más de $50 \text{ m}^3/\text{t}$ hasta $100 \text{ m}^3/\text{t}$ en las minas en algunos países, como el Reino Unido y los Estados Unidos, pero estos niveles son excepcionales (Kissell et al, 1973).

3.5 Comprender las Características de la Emisión de Gas de las Minas de Carbón

Los flujos máximos de gas se producen en los conductos de ventilación de retorno de distritos de trabajo durante el ciclo de corte del terreno y a medida que se avanza en la espeleología del techo por medio de soportes de veta larga. Los estudios estadísticos han demostrado que estos picos se elevan hasta el 50% por encima de la media (Creedy et al, Abril de 1997). Los métodos de predicción de gas suelen utilizar esta relación para estimar el volumen de aire que será necesario con el fin de cumplir con los requisitos obligatorios de dilución de gas.

El volumen de gas liberado desde cualquier carbón perturbado por el minado disminuye con el tiempo, y a medida que continúa la actividad minera se añaden nuevas fuentes de gas. Por tanto, las emisiones resultantes se determinan mediante la suma de todas las fuentes en el tiempo. Como consecuencia, la emisión específica (p.e., la cantidad de gas emitido por tonelada de carbón extraído) puede aumentar con la vida de un veta larga. Cuando se detiene la producción de carbón, el gas continúa el proceso de desorción desde la veta de carbón y el flujo de los estratos sin carbón, pero a una tasa decreciente. Cuando comienza la extracción de carbón en una mina, después de unos pocos días de paro, la emisión de gas será inicialmente más baja que en la producción constante.

La mayoría de los cálculos empíricos de emisión asumen la producción de carbón en estado estacionario y las características de emisión uniformes. Si bien este enfoque se adapta a la mayoría de necesidades de planificación, los operadores de minas también tienen que considerar otros factores menos predecibles. Por lo tanto, los métodos de control de riesgos son críticos para reducir la probabilidad de sucesos graves. Por ejemplo, estallidos repentinos de gas y carbón (y a veces de roca) de la veta trabajada se encuentran en ciertas minas con contenido alto de gas y carbón de baja permeabilidad. Los principales factores geológicos y mineros que dan lugar a un mayor riesgo de que ocurra un estallido, a menudo pueden ser identificados, pero la incidencia real no se puede predecir con certeza. La administración de la mina de carbón puede abordar este problema de seguridad mediante la aplicación de métodos rigurosos de prevención y control de estallidos. Estos métodos implican típicamente la reducción del contenido de gas del carbón por debajo de una cantidad crítica mediante el drenaje del gas antes del minado.

Las emisiones repentinas de gas pueden ocurrir por el piso de un trabajo de veta larga, ya sea en la cara o en las calzadas cerca del frente. Este tipo de emisiones se consideran especialmente probables cuando la planta contiene una fuerte cama arenisca y otra veta de carbón se encuentra dentro de 40 m a 60 m por debajo de la veta de trabajo.

Aunque la predicción de una ocurrencia es problemática, la prevención generalmente se puede asegurar mediante la perforación de una serie regular de perforaciones del piso para evitar la acumulación de presión de gas.

⁴ El contenido de gas se define y describe en la Sección 3.6.

Las emisiones y las explosiones súbitas pueden causar daños considerables y resultar en lesiones y muertes. Si la mezcla de aire/metano se encuentra en el rango de inflamabilidad, las chispas de los metales al golpear la roca también pueden encender el gas de las minas.

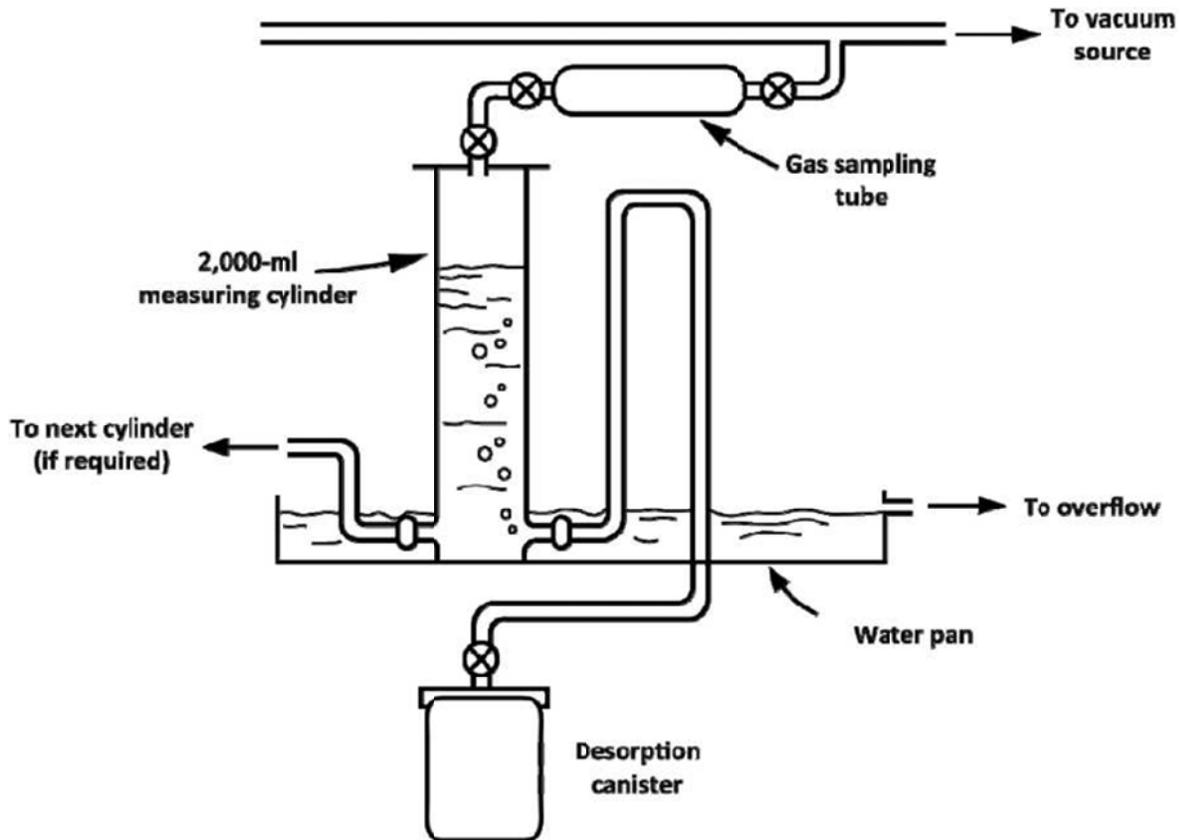
Los trabajos de la mina de carbón a veces pueden molestar a los depósitos de gas natural, lo que lleva a emisiones de hasta el doble de lo que se espera, a partir de fuentes de vetas de carbón solamente. Los yacimientos de gas natural pueden ser estratos entre mantos de las vetas de carbón y ocurren como una parte normal de la secuencia de rodamiento del carbón, pero por procesos geológicos u obstrucción de las vías de migración de gas sellado; el gas atrapado se libera posteriormente durante el minado. Este tipo de situaciones no se identifican fácilmente antes del minado, pero los operadores de minas deben estar atentos a esta posibilidad mediante la comparación de la medición y la estimación de datos. No puede ser menospreciada la importancia tanto de la instalación de monitoreo del subsuelo por razones de seguridad de minas operativas sino también de la recopilación y el uso de los datos para la planificación de la seguridad.

3.6 Medición del Contenido del Gas del Carbón In Situ

La planificación de los sistemas de drenaje de gases y la ventilación para garantizar el minado segura requiere el conocimiento de la cantidad de gas adsorbido en la sustancia de carbón y, en proporciones insignificantes, la cantidad de gas comprimido en los espacios de los poros más grandes. El contenido de gas se expresa en volumen de gas contenido por masa de sustancia de carbón in situ (m^3/t) y no debe confundirse con las emisiones específicas.⁵ El enfoque general para medir el contenido de gas es para obtener y sellar muestras de carbón en recipientes, en un estado tan fresco como sea posible. Estas muestras son mantenidas a una temperatura cercana a la del depósito, mientras se permite que el gas se desorbe. La velocidad de liberación medida permite la estimación del gas perdido antes del muestreo. La Figura 3.2 es un diagrama que muestra un aparato diseñado para recoger y medir el gas a medida que se desorbe a partir del carbón contenido en un recipiente sellado. El procedimiento para usar este sistema incluye la recogida de la muestra de carbón de un pozo de sondeo y la captura del carbón en un recipiente. Periódicamente, se permite fluir el gas en el cilindro de medición y el volumen de gas es medido y registrado. La composición del gas puede ser analizada mediante la captura de una muestra y su presentación para el análisis químico. El gas que queda en el carbón después de las pruebas iniciales se determina mediante la trituración del carbón y la medición de la cantidad liberada. El método de medición de contenido de gas de la Oficina de Minas de los Estados (USBM) es la técnica más utilizada y por lo general requiere de un período de días a varias semanas (Diamond & Levine, 1981). Los métodos de desorción rápidos se han desarrollado en Europa y Australia para proporcionar resultados rápidos para satisfacer las necesidades operacionales mineras (Janas & Opahle, 1986). Además, para los carbones de baja permeabilidad, la presión parcial y los métodos estadísticos también se han ideado (Creedy, 1986). En vista de que las vetas de carbón incluyen materia mineral, así como la sustancia de carbón (el gas es absorbido principalmente en sustancias orgánicas), los contenidos de gas son ajustados generalmente a una base sin cenizas. Los componentes gaseosos a veces se miden por separado; en la mayoría de los casos, el gas es predominantemente metano. Los contenidos de metano típicos en la veta de carbón, se encuentran en un rango natural de niveles de trazas de alrededor de $30 \text{ m}^3/\text{t}$.

⁵ La medida del gas emitido durante las operaciones de minería en comparación con la cantidad de carbón producido

Figura 3.2 Equipo de Medición de Contenido Gas (Estándar Australiano)



(Basado en Diamond & Schatzel, 1998)

3.7 Estimación Práctica de los Flujos de Gas en las Minas de Carbón

Los modelos de flujo de emisión de gases y de simulación teórica rigurosa se han desarrollado dentro de la academia y de los institutos de investigación. A efectos prácticos, las minas suelen utilizar modelos empíricos de emisión de gases que han demostrado ser muy fiables cuando se utilizan junto con el conocimiento y la experiencia local. Estos modelos requieren insumos de parámetros que incluyen contenidos de vetas de gas, las propiedades mecánicas de los estratos de roca y carbón, el minado, la geometría y las tasas de producción de carbón. Los usuarios pueden construir sus propios modelos utilizando la información publicada, o pueden comprar el software patentado. Las estimaciones de flujo se expresarán en términos relativos de metros cúbicos de gas liberado por tonelada de carbón extraído (emisiones específicas en m^3/t) o en términos absolutos, como una tasa de flujo en estado estacionario de metros cúbicos por minuto (m^3/min) o litros por segundo (l/s).

Los modelos pueden predecir los efectos del aumento de las tasas de producción de carbón en los flujos de gas. También pueden pronosticar el flujo de gas controlable máximo y la producción de carbón máxima asociada afectada por los siguientes parámetros:

- El límite de concentración de gas inflamable legal en el distrito de veta larga de los conductos de ventilación de retorno.
- Las cantidades de aire de ventilación disponibles y los volúmenes de flujo de aire que pueden circular alrededor de los distritos de trabajo. El volumen del flujo de aire que se puede entregar a un veta larga de trabajo depende del número de calzadas, la configuración de ventilación de la zona de producción y la velocidad máxima aceptable para la comodidad del minero.
- La captura de drenaje de gas que se puede mantener consistentemente, si se usa el drenaje de gas.

Capítulo 4. Ventilación de la Mina

Mensajes Clave

Los sistemas de ventilación de la mina son componentes críticos de un sistema general para eliminar efectivamente el metano de las explotaciones mineras. Se ha diseñado un sistema de ventilación de mina para lograr tres objetivos: 1) proporcionar aire fresco respirable para los trabajadores, 2) controlar la temperatura del aire de la mina y la humedad, y 3) diluir o eliminar los gases peligrosos y polvo respirable en el aire con eficacia.

Las mejoras de los sistemas de drenaje de metano a menudo pueden proporcionar una solución más rápida y rentable para los problemas de gas de mina ya que simplemente aumenta el suministro de aire de la mina.

4.1 Desafíos de Ventilación

El logro de una ventilación efectiva en las minas de carbón es en última instancia el factor que limita la producción de carbón en una mina determinada. La tasa máxima de extracción de carbón que se puede lograr de forma segura en un lado expuesto del manto carbonífero de trabajo con presencia de gas, se determina por la combinación de la capacidad de ventilación para diluir los contaminantes a concentraciones aceptables y la eficiencia de la captación del metano.

La ventilación es el principal medio para diluir y dispersar los gases peligrosos en las calzadas de las minas subterráneas. Las velocidades del aire y las cantidades están optimizadas para asegurar la dilución de gas, polvo y calor. Cuanto mayor sea la cantidad de aire fresco suministrado a los frentes, mayor será el flujo de entrada de gas que puede ser diluido. Este proceso de dilución está inherentemente limitado por la disponibilidad de aire dentro de la mina y las máximas velocidades de aire tolerables.

La presión de ventilación es proporcional al cuadrado del volumen del flujo de aire. Un modesto aumento en la cantidad de aire por lo tanto requiere un aumento significativo en la presión, lo que conduce a mayores fugas a través de goafs y de puertas de ventilación. Una fuga excesiva que fluya a través de los goafs también puede aumentar los riesgos de combustión espontánea y pueden poner en peligro los sistemas de drenaje de gas.

El volumen de aire necesario para ventilar las labores subterráneas y el nivel permisible de contaminante, está a menudo sujeto de las regulaciones de las agencias gubernamentales locales. Un sistema de ventilación que está diseñado simplemente para cumplir con los flujos de aire mínimo legal o las velocidades de aire, puede ser inadecuado para el propósito de mantener un ambiente seguro y satisfactorio en una mina activa. Por esta razón, las especificaciones de diseño del sistema de ventilación deben tener en cuenta los niveles esperados de contaminantes en el peor de los casos.

El metano es considerado el contaminante principal y el gas más peligroso para las especificaciones del sistema de ventilación. Si el diseño del sistema de ventilación seleccionado es capaz de eliminar o controlar satisfactoriamente el contaminante principal, se supone que los contaminantes menores serán adecuadamente controlados o eliminados al mismo tiempo.

4.2 Principales Características del Diseño de Ventilación

Generalmente, el aire es aspirado (succionado) a través de una mina por ventiladores de escape situados en la superficie. Por lo tanto, la presión de aire en la mina está por debajo de la presión atmosférica. En caso de fallo del ventilador, la presión de ventilación en la mina se eleva, previniendo una liberación instantánea de gas de las áreas trabajadas.

Entre más profunda y más extensa sea la mina, más complejo será el circuito de ventilación y mayor es la propensión a las pérdidas por fugas a través de las puertas que comunican la mina entre la captación y el retorno de los conductos de ventilación. Por lo tanto, las minas complejas más grandes tienen cantidades limitadas de aire fresco para su uso en los

corredores horizontales sin salida y en la superficie expuesta de una veta de carbón de trabajo, el cual requiere el uso de conductos de ventilación auxiliares. Sin embargo, se debe suministrar el aire suficiente para permitir que los corredores sean ventilados en paralelo y no en series; con la última disposición, un problema de gas en un corredor se transmitirá rápidamente al siguiente. La mejor práctica es hacer los arreglos para que el suministro de electricidad sea cortado desde todos los lugares de trabajo más abajo del lugar de trabajo en el que la concentración de metano ha superado el máximo legal.

Los requisitos de ventilación son dinámicos. La demanda de ventilación de aire aumenta a medida que se desarrolla una mina y el área a ser ventilada aumenta, a veces se requiere la instalación de pozos de ventilación adicionales, actualizar los ventiladores, o la ampliación de los conductos de ventilación existentes.

El software patentado está disponible para redes de modelización de ventilación. Deben hacerse encuestas de presión y flujo real a intervalos regulares para calibrar el modelo y comprobar el rendimiento del sistema cuando se realizan cambios.

Siempre que sea posible, el sistema de ventilación debe ser diseñado para que naturalmente se equilibren las diferentes ventilaciones "dividas" o en ramas. Esta acción reduce la necesidad de instalar dispositivos de control de flujo tales como bolsas de aire. La apertura y cierre de estos dispositivos permite el paso del personal que tiene un efecto profundo en las corrientes de aire en la rama.

El ventilador de superficie debe estar diseñado para satisfacer las necesidades de ventilación de la mina. Los ventiladores de superficie generalmente se pueden ajustar dentro de ciertos límites para asegurar que cumplen con los requisitos sin sufrir inestabilidad aerodinámica. Los ventiladores de superficie antigua, instalados en algunas minas antiguas, operan a menudo en su debido diseño máximo. En tales casos, cualquier incremento en los flujos de aire a las partes más remotas de la mina sólo puede lograrse mediante mejoras en la red de ventilación de aire.

4.3 Ventilación de Frentes de Trabajo Gaseosos

Diferentes diseños de la superficie expuesta de una veta de carbón controlan el gas, el polvo y el calor que resulta de la extracción de carbón con diferentes grados de efectividad. Los principales riesgos de gas están asociados con áreas de funcionamiento de carbón en los que la veta se ha extraído parcial o totalmente (ya sea por veta larga o métodos de anchurón y pilar) y ya no son accesibles de forma segura (p.e., goafs). Todas las operaciones de recuperación de veta larga o pilar están en contacto directo con las áreas abandonadas de la mina, donde está el metano, el aire pobre en oxígeno y se pueden acumular otros gases peligrosos. Estos gases son el metano no capturado por el drenaje de gas, además de que continúan las emisiones de carbón que queda en el terraplén.

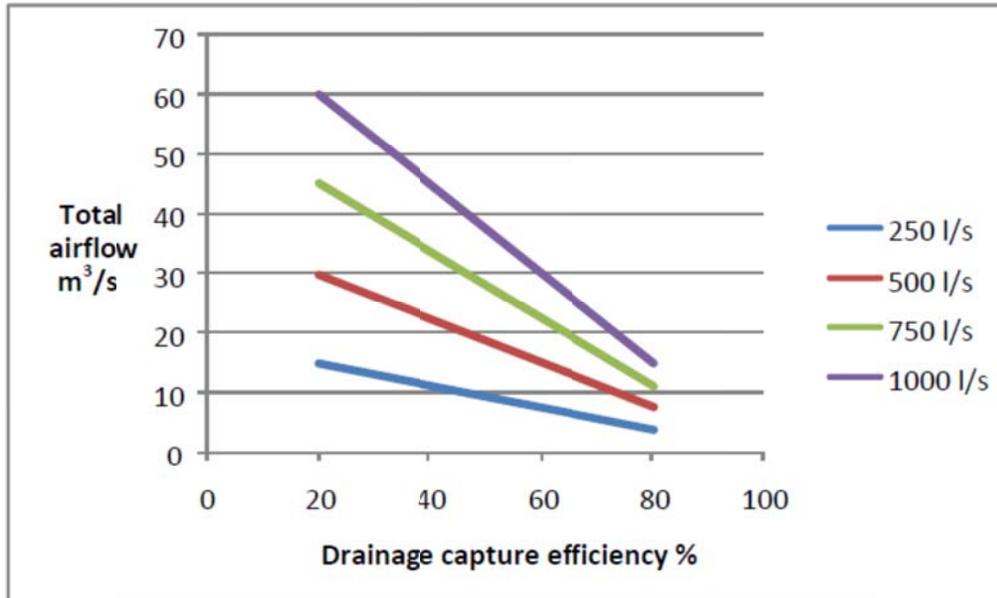
Estos gases se manejan en una de dos formas. En primer lugar, pueden ser autorizados a entrar en la corriente de aire de la mina donde haya aire suficiente disponible para diluir los flujos máximos esperados de gas en los conductos de ventilación a concentraciones seguras (Figura 4.1). Como un ejemplo, sólo un veta larga con ventilación en U, como se muestra en la Figura 4.2, y el 50% de la captura de metano puede manejar un flujo de gas total de 800 l/s (48 m³/min) de metano puro.⁶ Una buena práctica de veta larga multi-entrada y el 70% de captura de metano pueden controlar 5.333 l/s (320 m³/min) de metano puro, un aumento por un factor de más de seis.^{7 8}

⁶ Entrada simple de los conductos de ventilación y un retorno simple de ventilación, 2% de metano máximo y 30 m³/s de aire.

⁷ Entrada múltiple, 2% de metano máximo y 120 m³/s de aire

⁸ En ambos casos, se hace una provisión para los picos de 50% por encima de la media.

Figura 4.1 Flujos de Aire Requeridos para la Dilución de las Emisiones de Metano en Tajos Largos al 2%, Teniendo en Cuenta los Picos



(Cortesía de Sindicatum Carbon Capital)

En segundo lugar, cuando lo permita la propensión de combustión espontánea local o el comportamiento de los estratos locales, una parte del gas puede ser desviada a un pozo de purga detrás del frente, o a través de goafs viejos, para descargar en retornos principales o en pozos de purga de aire (p.e., eje vertical a través del cual el aire de gas se descarga de los distritos de trabajo). La eficacia de estos sistemas de "purga" depende de la distribución de las presiones de ventilación en el funcionamiento, los cuales están ajustados utilizando obstrucciones parciales (reguladores) en los conductos de ventilación. Las concentraciones de metano en los pozos de purga de aire, en algunos países están reguladas por debajo del 2% para reducir el riesgo de explosión.

Hay un límite superior práctico para la cantidad de aire que se puede pasar a lo largo de un corte vertical sin necesidad de crear un entorno de trabajo inaceptable, principalmente debido a las partículas de polvo en el aire. Las limitaciones del flujo de aire en la superficie expuesta de una veta de carbón, restringen la ventilación alcanzable en el sistema de ventilación-U convencional (Figura 4.2). Cuando el flujo de aire disponible no es suficiente para diluir el gas emitido desde el funcionamiento, el aire adicional se puede introducir de forma independiente mediante la adopción de los diseños de las minas en diversas configuraciones, tales como el "3-Road" y los sistemas "Y", que se muestran en la Figura 4.3. Estos sistemas de ventilación, sin embargo, requieren una mayor inversión, como la conducción de una calzada adicional, presa en la carretera (*pack wall*), y un fuerte apoyo de las calzadas que permanecen abiertas detrás del veta larga en el terraplén. En las figuras 4.2 y 4.3, las flechas azules muestran la dirección del minado, las flechas de color azul claro muestran la dirección del flujo de aire de entrada, y las flechas rojas muestran la dirección del flujo de aire de retorno.

Independientemente de cualquier sistema o del diseño que está siendo utilizado, un volumen suficiente de aire fresco debe llegar a la máquina de carbón de corte para diluir el gas delante del carbón (derivada del contenido de gas de la veta restante después de cualquier pre-drenaje) para satisfacer el límite estatutario local. El diseño seleccionado debe ser capaz de proporcionar un buen nivel de ventilación en los lugares más eficaces de perforación de drenaje de metano. Si no se logra esta norma, se traducirá en una menor eficiencia de drenaje, una mayor demanda de aire de ventilación y una producción de carbón reducida.

Figura 4.2 Sistema de Ventilación Tipo-U Convencional

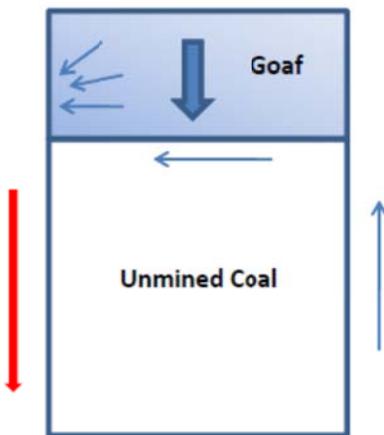
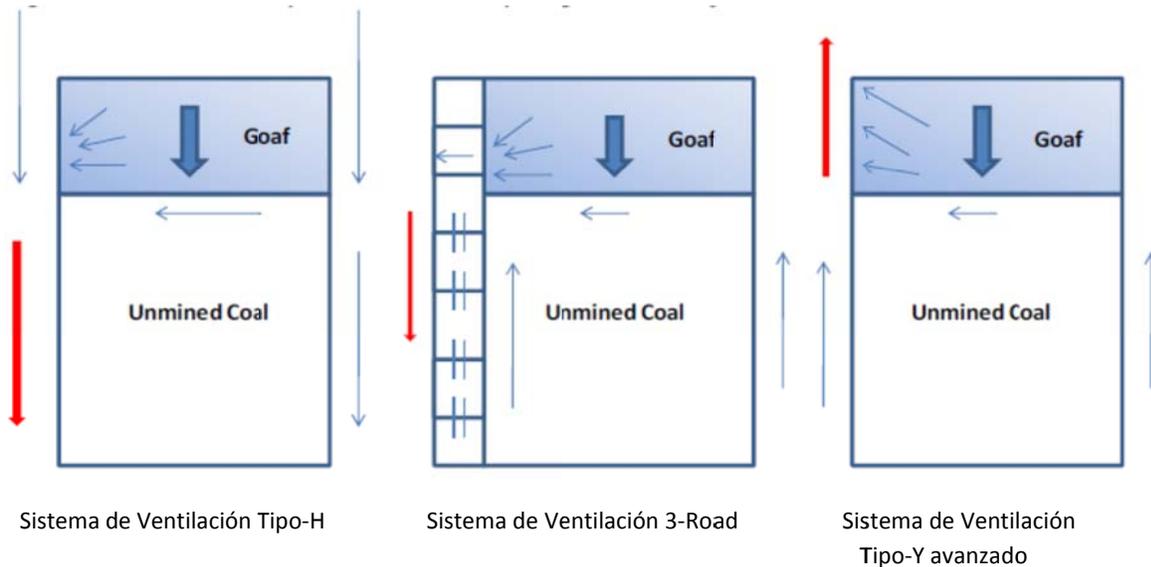


Figura 4.3: Distribución de Ventilación Utilizada en Frentes de Trabajo Gaseosos de Tajos Largos



El control del gas y el acceso para la perforación y regulación de pozos de drenaje de medida-transversal es más simple en el avance en comparación con los tajos largos retirados. Sin embargo, la mayor parte de la producción de carbón de veta larga en el mundo proviene de retirar de las superficies expuestas una veta de carbón, ya que estos son más productivos, y las configuraciones de ventilación se han desarrollado como intentos de incorporar las ventajas de ambos ventilando por detrás de las superficies expuestas de la veta de carbón, tales como "Y", "H" y los sistemas de respaldo-retorno.⁹

El sistema de ventilación debe incorporar algún medio de creación de un gradiente de presión en el frente-final del veta larga para asegurarse que las mezclas de gases inflamables no invadan el frente de trabajo. Esto puede implicar el uso de reguladores (obstrucciones parciales) en las calzadas y medidas de ventilación frente-final especiales para desviar el flujo de aire a lo largo del borde de residuos tras la superficie expuesta de la veta de carbón.

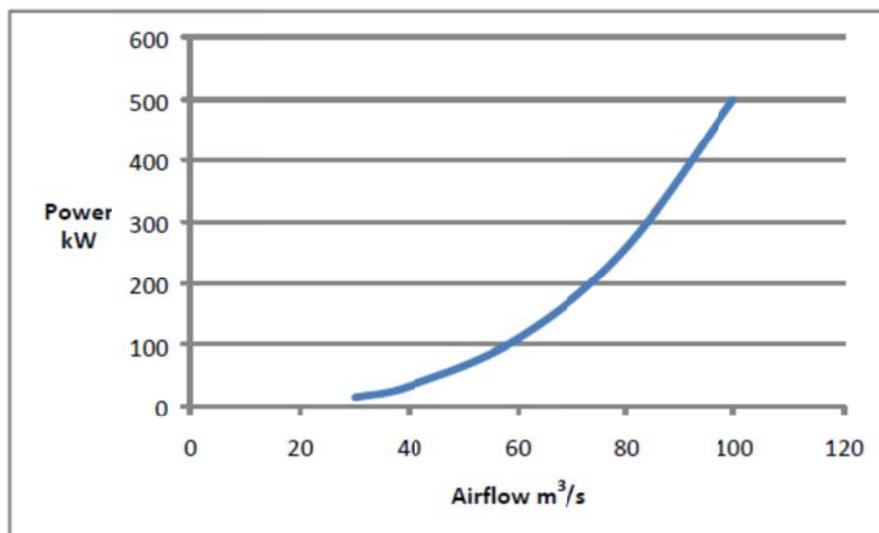
⁹ Ver la Figura 9.1 en el Caso de Estudio 1, para un ejemplo de un sistema de respaldo-retorno.

Los peligros de las capas de metano son una manifestación de una ventilación inadecuada en la mina. Su presencia indica la necesidad de monitoreo del gas, una velocidad de aire insuficiente para dispersar las capas de gas y la posible necesidad de mejorar el drenaje de gas para eliminar el gas en su origen.

4.4 Requisitos del Sistema de Alimentación de Ventilación

Un pequeño cambio en el volumen de aire transportado por el sistema de ventilación de la mina requiere un cambio mucho mayor en el consumo de energía y por lo tanto en el costo de ventilación. El requisito de energía del sistema de ventilación, que es uno de los costos operativos más importantes en una mina, es proporcional al cubo del flujo de volumen de aire (Figura 4.4). Por lo tanto, la introducción de drenaje de gases para aumentar la eficacia, a menudo representa una opción de menor costo que el aumento de los volúmenes de aire de ventilación, lo que también podría implicar el desarrollo de grandes infraestructuras en la mina.

Figura 4.4 Ejemplo de Requerimiento de Ventilación Potencia de Aire Contra Flujo de Aire



(Cortesía de Sindicatum Carbon Capital)

4.5 Ventilación de los Corredores de Carbón

El control eficaz del gas en los corredores horizontales sin salida y las minas de anchurón-y-pilar puede lograrse mediante una combinación de proporcionar la ventilación auxiliar y el uso de dispositivos de ventilación de corte-montado en la máquina para diluir el gas liberado durante el corte del carbón.

Los corredores de carbón son generalmente ventilados por un ventilador auxiliar y un sistema de conductos, ya sea por agotamiento o fuerza, o una combinación de los dos. Los peligros del gas pueden desarrollarse rápidamente en caso de cualquier fallo del sistema de ventilación auxiliar. Una vez que el gas se ha acumulado, a salvo de reingresar a un encabezamiento, requiere de procedimientos especiales. Para reducir los riesgos de acumulación de gas, algunas minas permiten el reinicio automático de los ventiladores subterráneos seguido de paradas cortas en determinadas condiciones.

Las fallas en el sistema de ventilación debido a interrupciones de energía, fallas mecánicas, y defectos en los conductos del ventilador auxiliar, han sido un factor que contribuye a muchos accidentes graves relacionados con el gas. Las fuentes de alimentación duales a las minas, la superficie de espera y los ventiladores de refuerzo subterráneos, garantizan redundancia en el sistema de ventilación principal.

4.6 Monitoreo de la Ventilación

El monitoreo de la ventilación se puede realizar de dos maneras principales: 1) utilizando continuamente transductores fijos de velocidad de aire de transmisión de datos a la superficie, o 2), utilizando periódicamente equipos de mano calibrados.

La precisión del monitoreo de flujo continuo depende de varios factores: el posicionamiento de los transductores, la calibración adecuada, el área de la sección transversal de la calzada, que puede cambiar con el tiempo como resultado de la perturbación del minado. Los flujos de aire en distritos de trabajo y los corredores, deben ser observados, ya que son fundamentales para la seguridad y la producción de carbón.

Las ubicaciones de la medición no deben estar situadas donde están estacionadas locomotoras u otros vehículos, ya que estos disturbios crearán cambios intermitentes en la velocidad del aire local.

Los anemómetros de paletas de mano son adecuados para su uso en cualquier lugar en una mina, incluyendo las zonas inestables, debido a que las dimensiones de los conductos de ventilación se pueden verificar con cada medición de la velocidad del aire. Los dispositivos de medición del aire deben ser recalibrados a intervalos fijos de tiempo para garantizar su exactitud

4.7 Control de la Ventilación

El control de distribución incluye la reorientación del flujo de aire a una ubicación a expensas de otras corrientes de aire. La relación entre la resistencia aerodinámica, la presión de aire, y la tasa de flujo de aire es bien conocida y se puede utilizar para predecir el resultado de la redistribución del flujo de aire.

El control general del sistema de ventilación de la mina está dirigido principalmente por el ventilador de superficie. El aumento de la presión del ventilador de superficie diferencial, aplicado en una mina, puede tener sólo un efecto insignificante sobre los flujos de aire en las partes más remotas de la mina. Por esta razón, el aumento de presión del ventilador de la superficie no puede resolver un problema de insuficiencia de los flujos de aire de ventilación en las zonas de trabajo remotas. Las presiones de los estratos pueden hacer que el techo, las paredes y el suelo converjan, lo que provoca el aumento de flujo de aire; por lo tanto, las calzadas deben ser mantenidas para facilitar la ventilación eficiente como fue diseñado.

No es aconsejable controlar continuamente y ajustar el ventilador principal. Un flujo de aire subterráneo, relativamente constante, minimiza el riesgo de combustión espontánea y ayuda en el control de los flujos de aire y los niveles de los contaminantes. Cuando una mina es servida por un sistema de ventilación de superficie, diseñado de forma redundante (uno o más ventiladores funcionando, y uno o más ventiladores en modo de espera), el uso de una instalación de cambio de ventilador es preferible para asegurar que los flujos de aire de la mina no se interrumpen cuando los ventiladores de la superficie sean parados para mantenimiento o para inspección de rutina.

Capítulo 5. Drenaje del Metano

Mensajes clave

La experiencia en los países industrializados muestra que la inversión en buenas prácticas de drenaje de gases da como resultado menos tiempo de inactividad de las minas debido a las condiciones gaseosas de éstas, entornos mineros más seguros, y la oportunidad de utilizar más gas y reducir las emisiones de metano de las minas.

Los problemas prácticos de drenaje de gas en las minas de carbón en general, se pueden resolver mediante la aplicación de conocimientos y técnicas existentes. La introducción de tecnologías nuevas o novedosas sólo debe considerarse después de la aplicación de las buenas prácticas, y sólo si las técnicas existentes no han proporcionado una solución satisfactoria. Pruebas rigurosas deben preceder a la introducción de cualquier tecnología en el ambiente minero para garantizar que la seguridad no se vea comprometida y se mantengan las mejores prácticas.

El rendimiento del sistema de drenaje de metano se puede mejorar a través de una correcta instalación, mantenimiento, monitoreo regular, y la implementación de planes de perforación sistemática.

El transporte de mezclas de metano-aire en concentraciones en o cerca del rango explosivo en las minas de carbón es una práctica peligrosa y debe ser prohibida.

5.1 Drenaje del Metano y Sus desafíos

El objetivo del drenaje del metano es capturar el gas de alta pureza en su origen antes de que pueda entrar en los conductos de aire de las minas. Para fines regulatorios, la cantidad de gas liberado en el flujo del aire no debe exceder la capacidad del ventilación del aire para diluir los contaminantes gaseosos hasta los niveles de seguridad obligatorios; sin embargo, hay un caso fuerte para maximizar la captura de gas con el fin de lograr una mayor seguridad, mitigar del daño al medio ambiente, y recuperar energía.

Hay una amplia gama de métodos de captura de gas. La elección de métodos inadecuados o la mala aplicación de esos métodos se traducirán en capturas ineficientes del drenaje y la entrada excesiva de las corrientes de aire productoras de gas de baja concentración. Cuando estos gases se encuentran en o cerca del rango explosivo durante el transporte y el uso, crean peligros.

5.2 Principios Básicos de las Prácticas de Drenaje de Metano Empleados Alrededor del Mundo

Las diferentes condiciones geológicas y mineras en las cuencas de carbón del mundo se han traducido en el desarrollo de diferentes técnicas de drenaje de metano.

La clasificación de los métodos de *drenaje de metano* involucra convencionalmente ya sean técnicas de pre-drenaje o post-drenaje. El *pre-drenaje* consiste en extraer el metano de la veta para ser trabajado antes del minado, mientras que el *post-drenaje* implica la captura del metano y otros gases liberados por las vetas de los alrededores, como consecuencia del movimiento de los estratos, relajación, y aumento de la permeabilidad inducido por el minado. Un resumen de los métodos de drenaje de metano más comunes se proporciona en el Apéndice 1.

La buena práctica de la técnica post-drenaje típicamente puede capturar del 50% al 80% del total de gas de un distrito de veta larga en la ausencia de condiciones geológicas inusuales. La captura del 50% del gas de toda la mina es un objetivo alcanzable en la mayoría de los casos. Las concentraciones de metano del 30% y superiores deberían ser alcanzables utilizando sistemas de post-drenaje no en todas, sino en las condiciones más exigentes de minería, y las concentraciones de un 60% y superiores deben ser alcanzables a partir de los métodos de pre-drenaje.

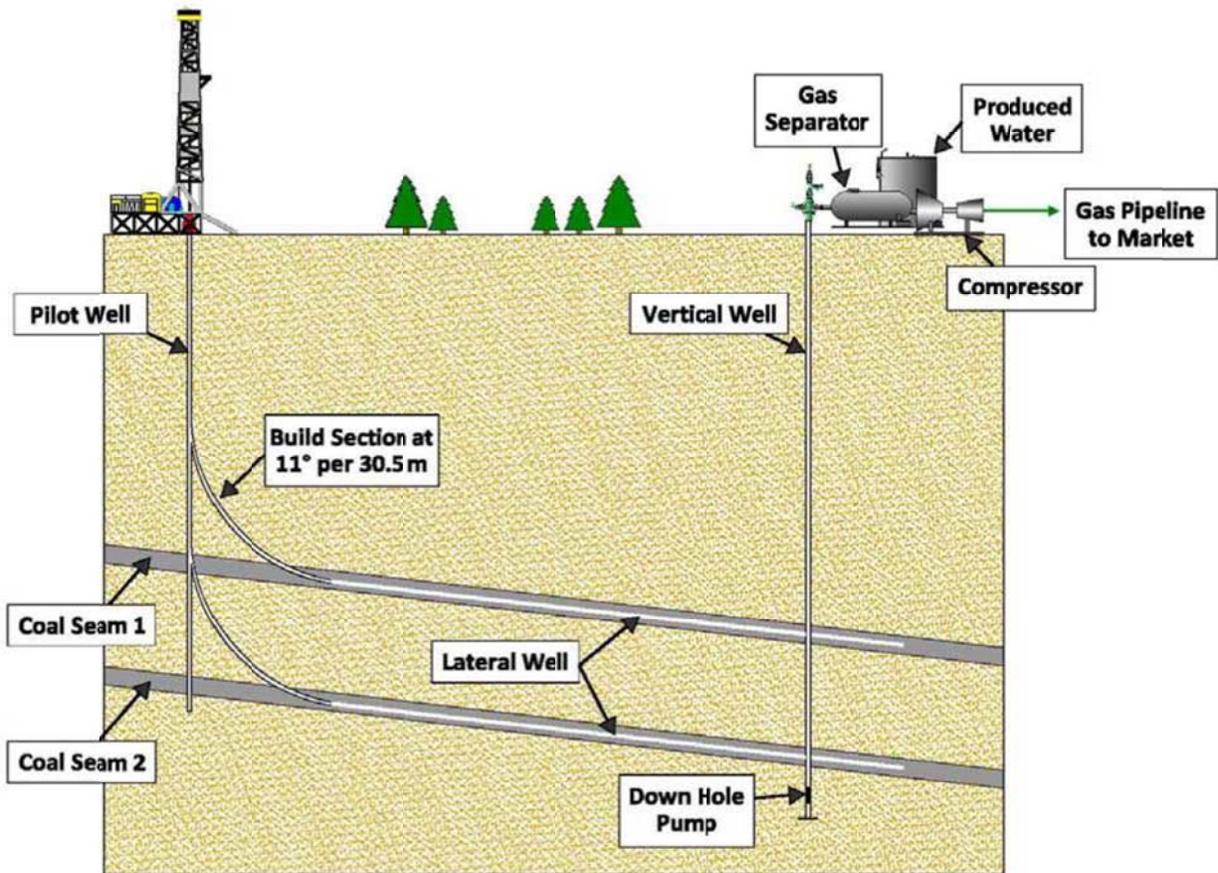
5.3 Fundamentos del Pre-Drenaje

El *pre-drenaje* es el único medio de reducir el flujo de gas directamente desde la veta en la que se trabaja, que puede ser importante si la veta de la que se extrae es la fuente principal de emisiones de gases. El *pre-drenaje* también es necesario a veces para reducir los riesgos de escape. Ya que el drenaje se realiza antes de ejecutar el minado, los sistemas de recolección no son susceptibles a ser perturbados por el movimiento de tierra, y si es factible, por lo general se pueden extraer relativas altas purezas de gas. El drenaje desde bloques de carbón antes de ejecutar el minado generalmente produce flujos de gas consistentes de alta pureza, a condición de que el contenido de permeabilidad de gas y de carbón sea suficiente para permitir un flujo de gas significativo. Los flujos de gas significativos en corredores horizontales vírgenes son indicativos de permeabilidad mediana y alta de la fractura y presenta potencial tanto para el *pre-drenaje* efectivo como para la utilización del gas.

La permeabilidad del carbón afecta directamente el tiempo requerido para drenar suficientemente la veta de carbón. Entre más baja sea la permeabilidad del carbón, más tiempo se necesita para drenar el gas para reducir el contenido de gas en la veta de carbón a un valor promedio requerido. Alternativamente, los carbones con baja permeabilidad requieren un número mayor de pozos de sondeo para alcanzar los niveles deseados de metano antes de ejecutar el minado. El tiempo disponible para la desgasificación y el costo de la operación de perforación determina la factibilidad final de desgasificación previa a el minado bajo las condiciones específicas del sitio.

Varias técnicas de *pre-drenaje* de minas están en uso en todo el mundo. La perforación rotatoria se emplea comúnmente para la perforación subterránea de agujeros en las vetas de 100 m a 200 m. Sin embargo, los pozos de 1.000 m o más pueden ser instalados utilizando técnicas de perforación direccionales subterráneas, lo que aumenta la eficiencia de desgasificación. Además, donde las minas no son demasiado profundas, la perforación extensiva en la veta y la desgasificación pueden llevarse a cabo desde la superficie. Las técnicas de perforación en la superficie a dentro de la veta han demostrado su eficacia en el *pre-drenaje* de vetas de carbón con un rango de permeabilidad de aproximadamente 0,5 milliDarcy (mD) a 10 mD (p.e., aproximadamente $5 \cdot 10^{-4} (\mu\text{m})^2$ a $10^{-2} (\mu\text{m})^2$) e incluso menos. Una combinación de *pre* y *post drenaje*, utilizando técnicas de perforación direccional en superficie se planea en Australia, donde el total de emisiones de las minas pueden llegar a 8.000 l/s y se requiere una captura de gran alcance con una eficiencia del 80% (Moreby, 2009). La experiencia en Australia y Estados Unidos (Von Schonfeldt, 2008) muestra que, cuando es posible la perforación en la superficie de la veta, la técnica es superior a la técnica utilizada para la perforación bajo la veta debido a que el pozo puede ser perforado con suficiente antelación a el minado y por lo tanto es menos probable que el tiempo permitido para el drenaje eficaz sea acortado por las actividades de producción de carbón (Black y Aziz, 2009). La gráfica 5.1 muestra una configuración de perforación potencial que se puede utilizar para drenar el gas a desde el carbón antes de que comience el minado. En este esquema, dos vetas explotables serán drenadas mediante la perforación de un pozo piloto desde el cual dos pozos laterales serán perforados en cada una de las vetas. Después de que se colocan los pozos laterales, otro pozo vertical será perforado para intersectar los laterales. Desde el pozo vertical se producen gas y el pozo piloto se cierra o es abandonado. La Figura 5.2 representa alternativas mineras - de *post-drenaje*, tales como pozos de medida cruzada y pozos de sondeo direccionados o guiados (antes del minado), que pueden ser perforados en la misma configuración.

Figura 5.1 Esquema de Drenaje de Pre-Minería desde Pozos Lateral Perforados desde la Superficie



(Cortesía del Raven Ridge Resources, Incorporated)

Para las vetas de poca o media profundidad de alta permeabilidad (> 10 mD), los pozos verticales perforados estimulados hidráulicamente desde la superficie, también conocidos como "pozos frac", tradicionalmente han sido aplicados para drenar metano antes del minado con un buen éxito, principalmente en los Estados Unidos. La Hidrofracturación o "fracking" ha sido utilizada sin poner en peligro la seguridad de las minas de carbón situadas en el este de Estados Unidos, pero se debe tener precaución para determinar si la técnica es adecuada para las condiciones geológicas y mineras específicas antes de ser empleada.

La ventaja de las técnicas basadas en la superficie es que el drenaje puede llevarse a cabo independientemente de la operación minera, pero la viabilidad de una aplicación depende de la profundidad de la perforación, la integridad y permeabilidad del carbón, y las limitaciones impuestas por la topografía o la superficie de edificios.

5.4 Fundamentos del Postdrenaje

En muchas de las cuencas de carbón del mundo, la baja permeabilidad de las capas de carbón ($< 0,1$ mD) y las características geológicas de las vetas (p.e., carbones blandos, con error) no son propicias para las técnicas de pre-drenaje. Como las reservas superficiales son minadas y el minado se traslada a las vetas más profundas en muchos países, esto puede llegar a ser aún más común. Cualquier drenaje eficaz de metano en estas cuencas de carbón se basa en la mejora de la fractura y la permeabilidad causada por el hundimiento de los estratos a medida que el carbón se extrae progresivamente.

Los métodos de *post-drenaje* implican la interceptación del metano liberado por la perturbación de minería antes de que pueda entrar en un conducto de ventilación de la mina y obtenga acceso a la zona de perturbación superior, y también a veces inferior, de la veta que se está trabajando.

Cuando existen una o más vetas de carbón por encima o por debajo de la veta en la que se está trabajando, las emisiones de estas fuentes pueden exceder significativamente las emisiones de la veta en la que se está trabajado dependiendo principalmente del neto espesor del carbón y el contenido de gas de estas vetas. Por lo tanto, un flujo de gas de un volumen más alto a menudo se puede drenar mediante técnicas de post-drenaje en comparación con los métodos de pre-drenaje. Asegurar concentraciones suficientemente altas de gas para el drenaje eficiente y la utilización segura requiere un diseño cuidadoso y la gestión de estos sistemas. A mayor incidencia de carbón en el techo y el piso de una veta de carbón gaseosa trabajada, el post-drenaje se vuelve más importante.

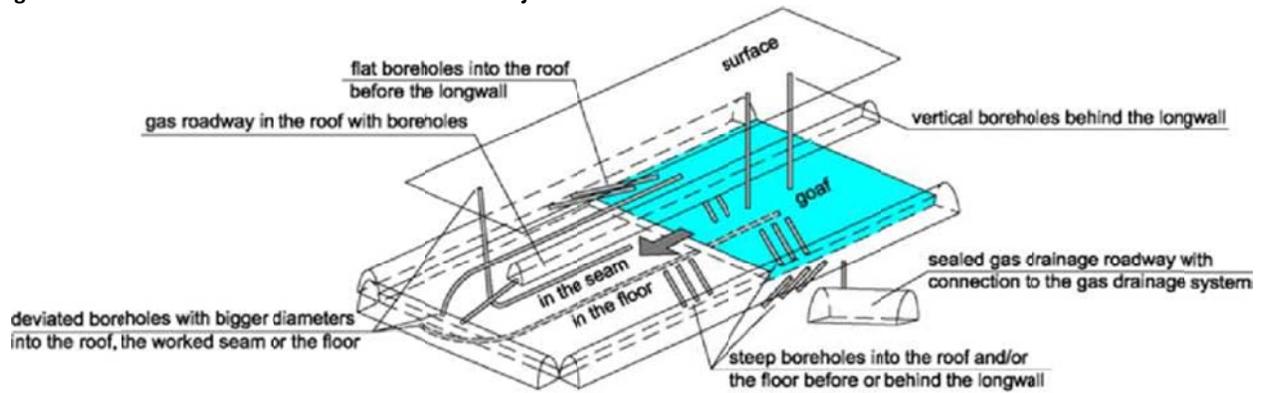
La gráfica 5.2 proporciona una vista sinóptica de técnicas de drenaje que pueden ser empleadas para drenar gas desde un panel de veta larga después de que el carbón se haya extraído. En este diagrama, se muestran tres modos de perforación:

- Pozos de sondeo horizontales guiados: Perforado desde una carretera o desde galerías de perforación especialmente preparadas. Las perforaciones pueden ser hechas en estratos circundantes que se liberarán como los retiros del frente de trabajo. Los estratos relajados producen gas en zonas que actúan como vías y puntos de recogida de gas a medida que se desplazan hacia arriba. Esta ilustración representa pozos que se han perforado encima del panel de estratos en el techo y debajo del piso en estratos subyacentes al piso.
- Pozos de sondeo de Medida Cruzada: Aquí se muestra cómo está perforado en varias configuraciones y diseñado para drenar estratos del techo y del suelo de roca, ya que se relaja en respuesta a eliminar el estrés causado por la extracción de carbón. Un conjunto se perfora antes de la retirada de la superficie del veta larga en la roca del techo superpuesta detrás del lado expuesto del manto carbonífero. Este tipo tiende a obtener mejores resultados a los mostrados antes de que el minado tenga lugar, ya que invariablemente sufren daños en la superficie del estrato que pasa después de que la superficie del veta larga ya se ha formado. Generalmente, las perforaciones de medida-cruzada detrás de la superficie del frente largo alcanzan eficiencias de captura más altas y mantienen las purezas del gas más altas que las perforadas en el lado expuesto del manto carbonífero. Es, sin embargo, necesario mantener la entrada detrás de la superficie mediante la construcción de muros de carga, y en algunos casos también formar un sellamiento en el lugar dejado por el terraplén. Los sellos en el lugar de excavación en la carretera abierta detrás de la superficie sirven para mejorar el apoyo de la calzada y aislar el terraplén de la entrada de aire para minimizar el riesgo de combustión espontánea.
- Pozos de sondeo en la superficie del lugar de excavación: Estos son perforados desde la superficie hasta los límites superiores de el terraplén, por lo general antes del minado. Estos pozos se perforan de manera que la parte inferior de los agujeros de los desagües del gas vayan hacia arriba desde los estratos subyacentes relajados y rotos. Los agujeros son generalmente operados bajo un vacío parcial. Se debe tener cuidado de que la aspiración no sea tan excesiva como para que entre una gran cantidad de aire de la mina y se diluya la pureza del metano por debajo del 30%. Cuando la pureza cae por debajo de 25% al 30%, estos agujeros de excavación deben cerrarse.

Además de las técnicas que se muestran en la Figura 5.2, la conducción de las galerías de drenaje de gas por encima o por debajo del funcionamiento de veta larga y el drenaje de gas de funcionamiento anteriores, que se encuentran dentro de la zona perturbada, son un medio eficaz de reducir las emisiones de metano en las explotaciones mineras activas.

La estrategia de drenaje de gas post-minera puede emplear una o todas estas técnicas de drenaje. La elección y configuración de un programa de drenaje post-minero dependerá de la eficiencia requerida del drenaje de gas, el minado y las condiciones geológicas, la idoneidad de la técnica para la orientación de la zona responsable de los mayores flujos de gas, y el costo. En la Figura 5.2 se representan alternativas de drenaje después del minado, pero los pozos de medida-cruzada y perforaciones direccionales o guiadas pueden hacerse en la misma configuración para producir gas en paneles desarrollados antes de que comience la producción de veta larga.

Figura 5.2 Varios Métodos de Perforación Post-drenaje



(Cortesía de DMT GmbH & Co. KG)

Algunos métodos de drenaje de gas, tales como la ubicación de tuberías de desagüe en el lugar de excavación a través de las barreras construidas detrás de la superficie, permiten volúmenes excesivos de aire que se pueden extraer en el sistema para diluir el metano que sólo a veces está dentro del rango explosivo. Este y otros tipos de sistemas de drenaje de metano, que sólo captan CMM en baja pureza, se debe evitar ya que son altamente ineficientes y fomentan la acumulación de mezclas de gases explosivos en los lugares de excavación al final del regreso de tajos largos a ser retirados. Estos métodos de drenaje también son generalmente ineficaces en la prevención de la formación y la migración de las capas de metano.

El deterioro de la capacidad de drenaje conduce a un rápido incremento de las concentraciones de metano en los conductos de aire (suponiendo que el flujo de ventilación de aire total en la mina se mantiene constante). Por lo tanto, los sistemas de drenaje de gas requieren seguimiento y gestión detallada continua.

5.5 Consideraciones sobre el Diseño de Sistemas de Drenaje de Metano

La capacidad de un sistema de captación de metano debería ser diseñada para acomodar la mezcla máxima esperada de los flujos de gas capturado (metano y aire) de todas las fuentes en la mina, incluyendo las superficies en las que se está trabajando, las superficies agotadas de las cuales se retira el equipo, y las áreas abandonadas (cerradas o selladas). El volumen previsto de gas metano producido se puede estimar usando un método de predicción de metano. El flujo más alto que tiene que ser transportado a través de la red de tuberías está dado por el flujo de gas capturado esperado más alto con las concentraciones más bajas de metano (pureza) que puedan surgir durante las operaciones normales. El resultado de la tasa del flujo debe estar dentro de la capacidad prevista del sistema cuando todas las bombas están funcionando.

La calidad del gas es una característica de diseño del sistema de drenaje de gas, no una característica inherente o natural. La pureza del gas de menos del 30% de metano en el aire deberá ser considerada como inaceptable tanto por razones de seguridad como de eficiencia. El mantenimiento de la pureza del gas en los sistemas subterráneos de drenaje depende de la calidad del sellado del pozo, incluyendo la correcta instalación de columnas de alimentación, regulación sistemática de pozos individuales, y la presión de succión aplicada a la planta de extracción de superficie. El aumento de succión en un esfuerzo por aumentar el flujo de gas introducirá más aire y por lo tanto reducirá la pureza del gas. Por el contrario, la reducción de la succión reducirá el flujo total de la mezcla, pero mejorará la pureza del gas. Más importante, la succión y el flujo en la planta de la superficie se deben ajustar sólo con un conocimiento completo de la situación bajo tierra y manteniendo la comunicación con los supervisores de ventilación del veta larga.

Al planificar, implementar y administrar un sistema de drenaje de metano, los siguientes factores deben ser tomados en cuenta:

- Seguridad de acceso para la perforación, vigilancia y regulación.
- Estabilidad del suelo y sistemas de apoyo necesarios para estabilizar los pozos
- Configuraciones de pozos de drenaje de gas, teniendo en consideración las diferencias entre el rendimiento esperado del post-drenaje en los pozos del techo y suelo.
- Capacidad de desagüe, diámetros de tubería, bomba de extracción, y necesidades de infraestructura.
- Ubicación, instalación y puesta en servicio de la red de tuberías de drenaje.
- Trampas de agua e instalaciones de desagüe.
- Control operacional y mantenimiento del sistema de drenaje y la infraestructura.
- El monitoreo de pozos, redes de tuberías, y la planta de extracción de la superficie.
- Protección de los tubos de drenaje de gases del aplastamiento detrás de las superficies de retiro del veta larga.

5.6 Infraestructura de la tubería de Gas Subterránea

Los materiales adecuados se deben utilizar para el drenaje de gas en la infraestructura de tuberías de trabajo. Acero, plástico reforzado con vidrio (GRP) y tubo de drenaje de gas de polietileno (PE) están disponible.

Las tuberías GRP son relativamente frágiles y no se deben utilizar en los distritos de producción de carbón; sin embargo, su facilidad de manejo e instalación, en comparación con el tubo de acero, hace de ellos el material preferido para las principales líneas troncales.

Cuando el espacio es limitado y la línea podría ser vulnerable a daños físicos (p.e., desde deformación de la carretera o vehículos con libre dirección), se debe utilizar tubería de acero y se conecta mediante juntas flexibles patentadas para permitir el movimiento.

La tubería PE se utiliza en algunos países, pero la fusión a alta temperatura de estas juntas de tubería subterránea o segmentos debe ser evitada. Los reguladores de seguridad en algunos países permiten esta práctica en áreas bien ventiladas bajo la supervisión del personal de seguridad calificado en las minas, mientras que en otros países, se considera inaceptable. Además, un medio conductor es necesario para reducir el riesgo de descarga estática.

Independientemente de la elección y del posicionamiento del material, los sistemas de tuberías subterráneos son vulnerables a los daños incluso en las minas más reguladas. La posible fuente principal de daños es el equipo de minería, incluyendo los transportadores de minerales, los sistemas de transporte por cable, locomotoras y sus cargas, y las actividades de explosión. También existe la posibilidad de daños causados por el movimiento de estratos y el colapso del techo. Por consiguiente, el sistema de drenaje debe ser diseñado y operado con la premisa de que existe un riesgo finito de fallo de integridad.

5,7 *Monitoreo de Sistemas de Drenaje de Gas*

Los sistemas de monitoreo manuales o remotos se deben utilizar para determinar la efectividad del sistema de drenaje de gas. El monitoreo de la calidad depende de la fiabilidad, la ubicación, el mantenimiento, la calibración, y el uso.

Es necesario realizar medidas en pozos individuales, en las tuberías de drenaje de gas, y en la planta de extracción de metano de la superficie que alberga las bombas que extraen el gas drenado fuera de la mina. Los parámetros a ser monitoreados incluyen el flujo de la mezcla, la concentración del gas, la presión manométrica, y la temperatura. La presión barométrica también se debe registrar para facilitar la normalización de los datos de flujo. En algunos casos, el gas siendo drenado o emitido en los trabajos de la mina puede contener otros componentes tales como humedad, compuestos de azufre, o hidrocarburos gaseosos más pesados (p.e., etano o propano) que pueden provocar mediciones inexactas del metano. Se debe tener cuidado al diseñar un programa de monitoreo y medición capaz de corregir cualquier componente adicional para que estén garantizadas las medidas exactas.

El monitoreo debe ser utilizado para evaluar el rendimiento real del sistema instalado en contra del concepto del diseño original.

Capítulo 6. Utilización y Reducción del Metano

Mensajes clave

Las minas de carbón subterráneas son una de las mayores fuentes de emisiones antropogénicas de metano, pero estas emisiones pueden reducirse sustancialmente mediante la aplicación de las mejores prácticas. El metano tiene un Potencial de Calentamiento Atmosférico (GWP) más de 20 veces mayor que el dióxido de carbono, el Gas de Efecto Invernadero (GHG) más importante a nivel mundial.

Gran parte del metano producido en las minas subterráneas puede ser utilizado o destruido por la industria minera. Las opciones incluyen la explotación del gas drenado, quema del exceso de gas drenado, y el uso o abatimiento del VAM de la mina. Con las condiciones técnicas y de mercado adecuadas, el objetivo final debe estar cerca a cero emisiones de metano.

En la carrera por explotar CMM, las normas de seguridad y de ingeniería necesarias a veces se han descuidado, creando nuevos riesgos en las minas de carbón. Cualquier aumento en el riesgo subterráneo se debe evitar en la planificación de la utilización de metano.

6.1 Metano de Mina de Carbón y Mitigación del Cambio Climático

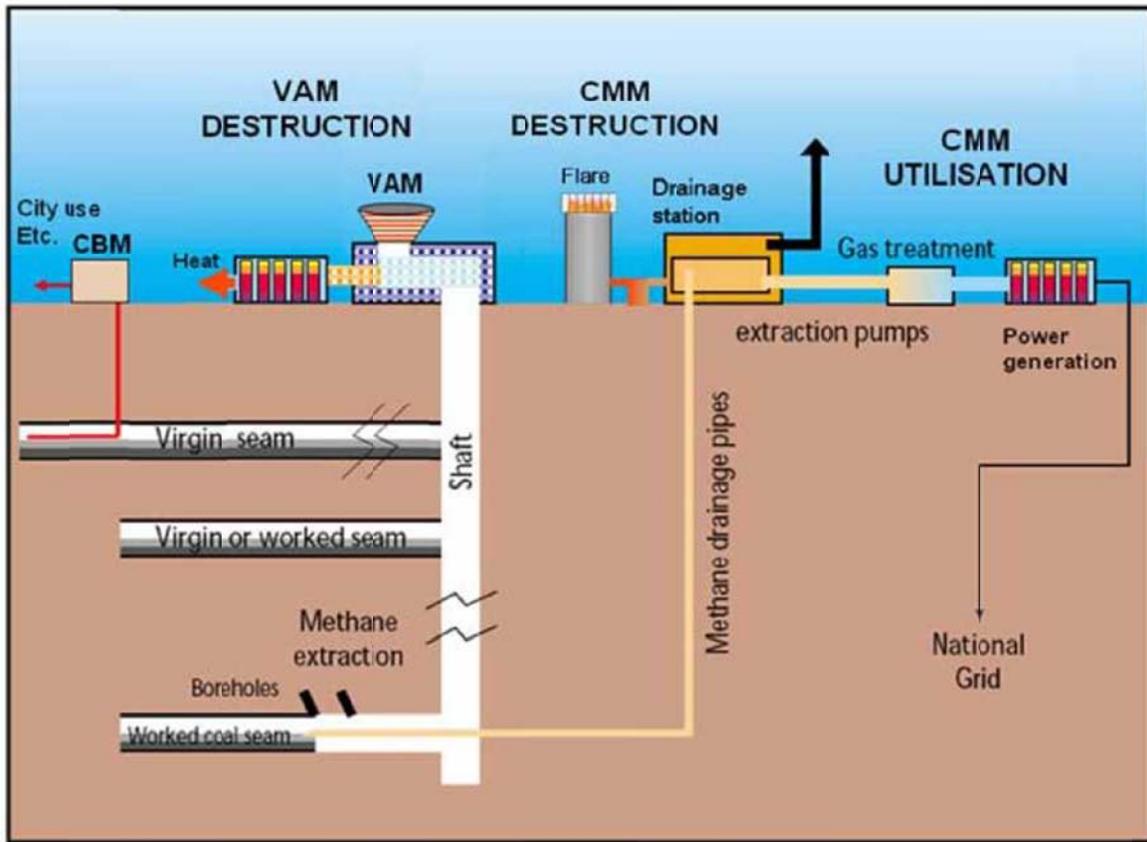
La reducción de emisiones de metano es una prioridad internacional en la que las minas de carbón pueden jugar un papel importante. El metano cuenta con el 14% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GHG) antropogénicas, y las minas de carbón constituyen el 6% de las emisiones de metano, o alrededor de 400 MtCO₂e al año (EPA, 2006a; IPCC, 2007; Metano para Mercados, 2008). Las emisiones globales de CMM son pequeñas en comparación con otras fuentes de emisiones de GHG relacionadas con el carbón (p.e., el dióxido de carbono de la combustión de carbón), pero no son insignificantes. Más importante aún, las tecnologías para recuperar y utilizar el CMM están disponibles y probadas comercialmente, haciendo de la utilización de CMM una solución atractiva de reducción de GHG a corto y mediano plazo para la industria del carbón.

6.2 Metano de Mina como Fuente de Energía

La captura y uso del metano puede añadir un valor significativo a la operación minera. El CMM capturado puede ser usado directamente para el suministro o la generación de energía, aprovechando el valor de un recurso natural. A su vez, esto puede proporcionar mejores rendimientos económicos para la mina a través de la venta de energía o el ahorro de costos. Por otra parte, la utilización de metano agrega valor intrínseco mediante la generación de capital que puede ser reinvertido en el equipo y las operaciones de seguridad en las minas.

La tecnología existente es capaz de optimizar la recuperación de energía y prácticamente eliminar un porcentaje sustancial de las emisiones de metano procedentes de la minería subterránea del carbón (Figura 6.1). Las buenas normas y prácticas de drenaje de gas producirán gas de calidad estable y utilizable, y facilitarán la aplicación de las oportunidades de utilización de bajo costo. Debido a las variaciones de minería, el suministro de gas fluctuará y la utilización del equipo fallará ocasionalmente o se necesitará interrumpir el mantenimiento. El gas no utilizado puede ser quemado en tea para minimizar las emisiones. El metano que no puede ser capturado y utilizado se diluye en el aire de ventilación y se emite a la atmósfera como VAM. Las tecnologías para reducir las emisiones de VAM han estado en desarrollo durante muchos años. En general, es técnicamente factible oxidar el VAM a concentraciones superiores a 0.20%, y hay varios proyectos comerciales actualmente en funcionamiento en todo el mundo.

Figura 6.1 Optimización de la Recuperación de Energía Emisiones de Metano en la Minería Cercanas a Cero



(Cortesía de Sindicatum Carbon Capital)

La seguridad siempre debe seguir siendo la máxima prioridad en la gestión del metano en las minas subterráneas de carbón. En la carrera por explotar el CMM, las normas de seguridad y de ingeniería necesarias a veces se han descuidado, creando nuevos riesgos en las minas de carbón. En la planificación de la utilización de metano, cualquier incremento en el riesgo debe ser evitado.

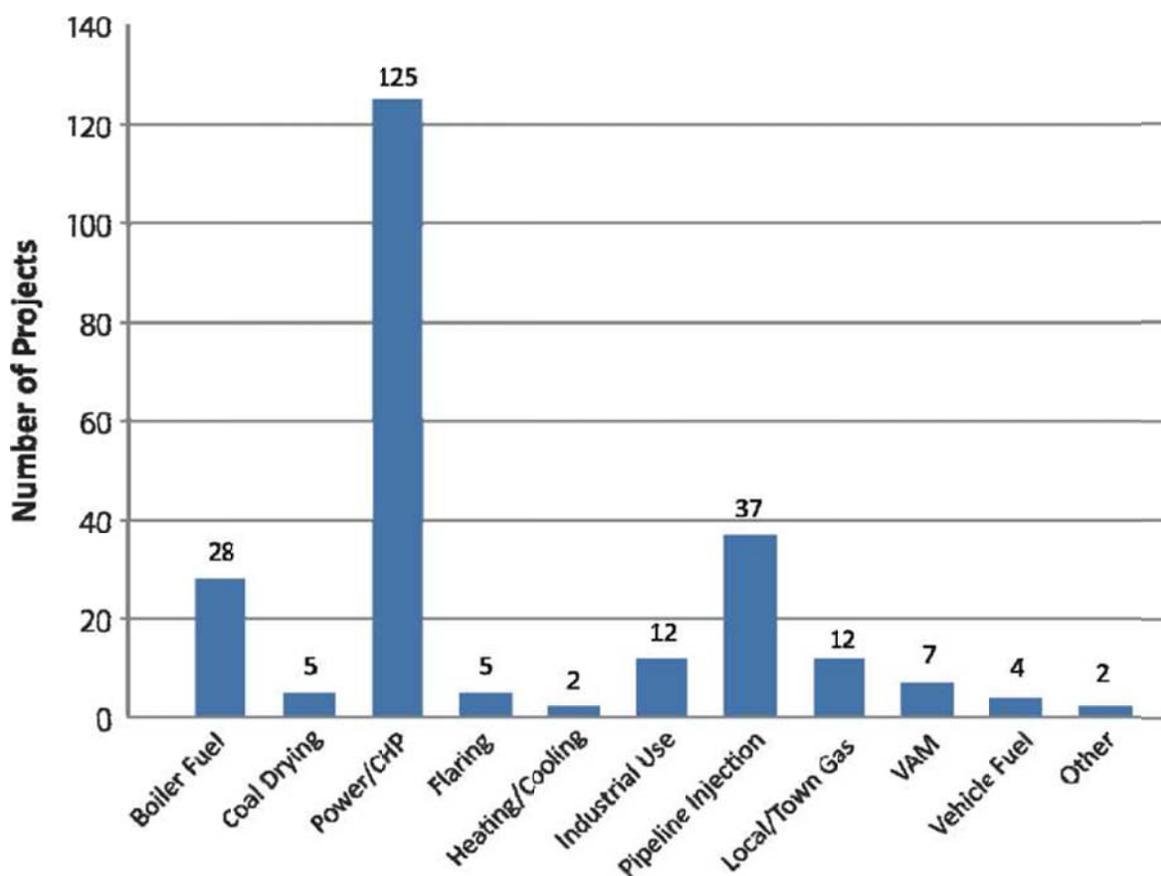
6.3 Opciones de Uso

Existe un potencial de utilización del CMM en el rango de 30% al 100% de metano en una gran variedad de aplicaciones que incluyen: 1) la utilización como combustible en los hornos de acero, hornos y calderas; 2) en la combustión interna (IC) de motores o turbinas para la generación de energía; 3) para la inyección de tuberías de gas natural; 4) como materia prima en la industria de fertilizantes; o 5) como combustible para vehículos (LNG o CNG). Para usos fuera de las instalaciones de gas, especialmente para los clientes civiles, a menudo son construidos tanques de almacenamiento para que los picos de demanda se puedan cumplir y amortiguar la oferta en el caso de una interrupción de la extracción de gas. El alto costo, el uso del suelo, el impacto visual, y los riesgos asociados con el almacenamiento de grandes volúmenes de mezcla de gases inflamables se evitan generalmente en las plantas de energía de CMM a base de minas, muchas de las cuales operan con éxito en una conexión directa con la mina.

La Asociación Metano para Mercados (www.methanetomarkets.org) ha identificado más de 240 proyectos CMM/VAM actuales, planificados, y formados en las minas activas y abandonadas en todo el mundo. La gráfica 6.2 resume la distribución de los tipos de proyectos CMM/VAM, con energía, tuberías de gas natural, y calderas. Tomados en conjunto, los proyectos suponen 1.263 megavatios (MW) de capacidad de generación eléctrica y 156 MW de capacidad de energía

térmica, entregando 1.582 millones de m³ por año de las ventas de gas natural, y con rendimiento de las reducciones de emisiones anuales equivalentes a 7MtCO₂e (Metano para Mercados , 2009).

Figura 6.2 Distribución de Proyectos CMM alrededor del Mundo



(Fuente: Asociación de Metano para Mercados, 2009)

Hasta la fecha, la mayoría de los proyectos que hacen uso de metano capturado se han llevado a cabo en Australia, China, República Checa, Alemania, Polonia, la Federación Rusa, Ucrania, el Reino Unido y los Estados Unidos. Con el advenimiento de los mercados de carbono, hay un valor creciente de la reducción de emisiones de carbono en algunos países y la creación resultante de los créditos de carbono u otros productos ambientales, además de las materias primas energéticas generadas por este tipo de proyectos (véase la Sección 7). Esto ha provocado una creciente actividad de proyectos en muchos países, notablemente en China, al tiempo que sustenta el crecimiento de proyectos que dependen exclusivamente de los créditos de carbono como fuente de ingresos principal (p.e., la quema y reducción de VAM) del proyecto.

6.4 Reducción y Utilización de Metano Drenado

La utilización del metano drenado depende de la cantidad y la calidad del gas producido. Históricamente, se requirieron concentraciones de metano de al menos 30%. En los últimos años, motores de combustión que son capaces de utilizar el gas de las minas con concentraciones de metano de menos del 30% han empezado a aparecer en el mercado. Esta guía diferencia el uso de metano drenado de concentración media/alta y de baja concentración (<30%), porque el transporte de gas de baja concentración es extremadamente peligroso y se debe evitar.

6.4.1 Concentración Mediana y Alta de Metano CMM

Las tecnologías en esta categoría generalmente requieren un flujo bastante constante y una calidad del metano de los sistemas de drenaje con una concentración de metano mínima de 30% por razones de seguridad en el transporte. Algunas aplicaciones sólo son comercialmente viables con gas de alta calidad y drenado antes de la ejecución del minado. No hay "único mejor uso." Cada proyecto debe ser evaluado por sus propios méritos fundamentados en la calidad y cantidad de gas producido y el mercado, minería, explotación y condiciones legales en cada mina. Por ejemplo, las tarifas de alimentación han sido un motor importante para el uso de CMM en Alemania, alentando la producción de energía basada en CMM. Muchas minas de Estados Unidos tienen acceso a un sistema de transporte de gas natural bien desarrollado con liderazgo favorable de precios de gas natural en una serie de proyectos de ventas de tuberías de gas natural.

Tabla 6.1 Comparación de Usos de CMM

Uso	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Generación de poder	Generadores de gas generadores que producen energía para el uso en minas o exportación a la red	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología probada • Recuperación del calor residual para la calefacción de edificios de la mina, baños de los mineros y la calefacción y la refrigeración del eje 	<ul style="list-style-type: none"> • Salida interrumpible y variable; por lo tanto, puede no ser propicio para la red eléctrica • El mantenimiento regular requiere el compromiso del operador de la mina • Altos costos de capital en la etapa inicial del proyecto
Gas de Tubería de Alta Calidad	CMM purificado de alta calidad	<ul style="list-style-type: none"> • Equivalente de gas natural • Rentable donde los precios del gas son fuertes • Buena opción donde existe infraestructura de cartera sólida 	<ul style="list-style-type: none"> • Los estándares de pureza son altos y la purificación es costosa • Sólo es factible para CMM de alta calidad, pre drenado o CMM tratado • Requiere un acceso razonable a la tubería
Gas industrial o domiciliario de calidad media	> 30% de metano para uso residencial, calefacción urbana y uso industrial, tal como hornos de cocción	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de combustible de bajo costo • Beneficios localizados • Puede requerir limpieza de gas mínima o ninguna 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo del sistema de distribución y mantenimiento • Calidad variable y la oferta • Gasómetros costosos necesarios para gestionar los picos de demanda
Materia prima química	Gas de alta calidad para la fabricación de carbón negro, formaldehído, combustibles sintéticos y éter di-metilo (DME)	<ul style="list-style-type: none"> • Un uso para los suministros de CMM de alta calidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de procesamiento • No tiene el potencial del CDM cuando se puede liberar de carbono
Sitio de la mina	Calefacción, cocina, calderas, secado de carbón fino, residencias de mineros	<ul style="list-style-type: none"> • Desplaza el uso del carbón • Limpio, fuente de energía de bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser menos beneficioso económicamente utilizar en el lugar que fuera de las instalaciones
Vehículos	Gas de alta calidad, pre-drenado y CBM para el GNC y GNL	<ul style="list-style-type: none"> • Acceso a los mercados para el suministro de gas confinados • Precios de los combustibles de vehículos son muy altos 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos de procesamiento, almacenamiento, manipulación y transporte • Las normas de purificación son muy altas

Nota: Todos los proyectos pueden ser elegibles para generar créditos de carbono, créditos de energía renovable, o tarifas de alimentación donde los proyectos satisfagan los criterios requeridos.

En la tabla 6.1 se comparan los usos finales más comunes de gas drenado, destacando brevemente sus ventajas y desventajas. Para obtener más información, se recomienda a los usuarios a visitar las fuentes principales de información, incluyendo la página web de la Asociación de Metano para Mercados (www.methanetomarkets.org).

6.4.2 Metano Drenado de Baja Concentración

Métodos de drenaje de gas inadecuados y normas de implementación pobres resultan en eficiencias de captura de drenaje bajas y entrada excesiva de las corrientes de aire de la producción de gas de baja-concentración, a veces en el rango explosivo. Esta guía recomienda fuertemente evitar el intento de transportar o utilizar el gas en el rango explosivo para evitar una explosión catastrófica que ponga en peligro la vida de los trabajadores de las minas, causar daños estructurales en la mina, y dar lugar a costes sustanciales en la explotación minera.

6.4.3 Tecnologías de Purificación para Diluir Metano de los Sistemas de Drenaje

En algunos casos, puede ser ventajoso mejorar la calidad del CMM, especialmente el metano a partir de las áreas de excavación. El enfoque inicial debe ser mejorar los estándares de drenaje de metano subterráneos para evitar los altos costos asociados con la purificación del gas drenado. Esto mejora la calidad del gas y aumenta la seguridad dentro de la mina.

Una segunda opción es actualizar la mejorar del gas. Los sistemas para mejorar la calidad del gas pueden ser costosos. Antes de instalar un sistema de este tipo, un gran cuidado debe ser tomado para evaluar las opciones y sopesar los costos y beneficios frente a los objetivos del proyecto de CMM. Si la actualización de gas es el enfoque que se desea, la solución más sencilla consiste en mezclar el gas de menor calidad del terraplén con gas de alta calidad en el drenaje pre-minería para lograr una combinación óptima. La otra opción es liberar al gas de las minas de contaminantes (oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono, sino también el sulfuro de hidrógeno), usando una de las tres tecnologías básicas: 1) de adsorción por cambio de presión (PSA); 2) adsorción de tamiz molecular (MSA), una variante de PSA; y 3) separación criogénica.

- **Adsorción por Cambio de Presión:** En la mayoría de los sistemas de eliminación de nitrógeno PSA, a través de los poros de carbono moleculares preferentemente absorben metano durante cada ciclo de presurización. El proceso recicla gas rico en metano de manera que la proporción de metano aumenta con cada ciclo. El PSA recupera hasta el 95% del metano disponible y puede funcionar de forma continua con una atención mínima en el sitio.
- **Tamiz Molecular de Adsorción:** MSA emplea un proceso de PSA con un tamiz molecular ajustable. Permite que el tamaño de poro se ajuste a 0.1 angstrom. El proceso se vuelve poco económico con un contenido de gas inerte de más del 35%.
- **Separación Criogénica:** El proceso criogénico -una solución económica, estándar para la mejora de gas por debajo de especificaciones desde campos de gas natural- usa una serie de intercambiadores de calor para licuar la corriente de gas de alimentación de alta presión. Las plantas criogénicas tienen la tasa de recuperación de metano más alta de cualquiera de las tecnologías de purificación con alrededor del 98%, pero son muy caras y por lo tanto más apropiadas para proyectos a gran escala.

La publicación de U.S. EPA, *Upgrading Drained Coal Mine Methane to Pipeline Quality: A Report on the Commercial Status of System Suppliers (EPA-430-R-08-004)*, contiene información adicional sobre la actualización de drenado de CMM. <http://epa.gov/cmop/docs/red24.pdf>.

6.4.4 Quema

La quema de CMM es una opción de reducción que puede ser atractiva si la utilización de CMM no es factible. Idealmente, cada planta de utilización debe estar equipada con una instalación para la quema en caso de avería o cuando el mantenimiento programado requiere que la planta se cierre temporalmente, y durante la etapa de desarrollo temprano de la mina, cuando la producción de metano aún no haya llegado a niveles comercialmente viables. Esta acción minimiza las emisiones de metano a la atmósfera y por lo tanto protege el medio ambiente cada vez que la utilización no sea posible.

La industria del carbón y de las autoridades reguladoras de las minas en algunos países se han opuesto a la quema en las minas por la preocupación de que la llama podría propagarse hacia abajo a través del sistema de drenaje en la mina, causando una explosión. Por lo menos, la quema segura requiere la incorporación de un diseño riguroso de llama y supresores de detonación, sellos, sensores y otros dispositivos de seguridad. La quema de CMM ha operado con éxito en una serie de países, entre ellos Australia, China y el Reino Unido. Conceptualmente, el riesgo para la seguridad no es diferente al de una caldera de CMM, una aplicación bien establecida.

Las llamaradas pueden ser tanto antorchas de llama abiertas tipo "mechero" o antorchas de llama oculta (tierra). Las antorchas de llamas encerradas pueden costar mucho más que las abiertas, pero la eficacia de destrucción será consistentemente mayor. En "condiciones perfectas," las eficiencias son casi iguales y pueden acercarse de 98% a 99%, pero la eficiencia de las antorchas de llama abierta caen dramáticamente cuando el viento y otros factores se introducen (Universidad de Alberta, 2004). La Junta Ejecutiva del Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM), p.e., tiene valores de falla establecidos de 90% para antorchas de llama oculta y el 50% para antorchas de llamas abiertas (Junta Ejecutiva del CDM, 2009). Las eficiencias reales pueden ser medidas y utilizadas para antorchas de llamas cerradas. Una consideración final es que las antorchas de llamas cerradas tienen un mayor atractivo estético por que la llama no es visible y los contaminantes de la combustión se pueden gestionar mejor.

6.5 Disminución o Utilización de Metano de Baja Concentración de la Ventilación de Aire (VAM)

Las minas subterráneas son, por mucho, la mayor fuente de emisiones fugitivas de metano en el sector del carbón, y se estima que el 70% o más de todas las emisiones relacionadas con la minería del carbón mundial son de la ventilación del aire subterráneo. La VAM se agota en la atmósfera por lo general en concentraciones de metano de menos del 1%.

En los últimos años, se han desarrollado tecnologías que pueden destruir concentraciones muy bajas de metano proveniente de la ventilación del aire de la mina por oxidación térmica. El propósito principal de estas tecnologías es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Algunas de estas tecnologías se pueden combinar con un sistema de recuperación de calor para su uso en la mina o distrito de calefacción, o para ejecutar turbinas de vapor para generación de energía.

Las dos tecnologías de oxidación disponibles en el mercado hoy en día son Oxidantes Térmicos Regenerativos (RTO), también conocidos como Reactores de Inversión del Flujo Térmico (TFRR), y Oxidantes Regenerativos Catalíticos (RCO), también conocido por el término Reactor Reverso de Flujo Catalítico (CFRR). Ambos utilizan un proceso de inversión de flujo para mantener la temperatura del núcleo del reactor y sólo se diferencian en el uso de la RCO de un catalizador en el proceso de oxidación. Antes de la aplicación de VAM, estas tecnologías han tenido un uso generalizado para el control de la contaminación en las operaciones comerciales y de manufactura, específicamente para oxidar compuestos orgánicos volátiles, olores y otros contaminantes del aire. Los RTO para VAM a escala comercial se han instalado y han demostrado mitigación de iones de metano en minas en Australia, China, y los Estados Unidos. La recuperación de energía del VAM se ha demostrado con éxito en Australia, el uso del VAM como aire de combustión en los motores de IC, y el uso de los RTO para convertir la VAM en electricidad en una planta eléctrica en la boca de la mina. Los RCO para VAM han sido probados en una demostración a gran escala en una unidad de prueba.

En general, las tecnologías actuales para la VAM no son capaces de procesar las concentraciones de metano por debajo de 0,2% sin el uso de combustible adicional, pero los esfuerzos de investigación están en marcha para reducir el umbral de

concentración porque las concentraciones en la VAM en muchas minas en todo el mundo caen por debajo de 0,2%. Las operaciones que utilizan la VAM para generar energía pueden necesitar optimizar las concentraciones de entrada y aumentar la concentración de entrada en la VAM al dispositivo de oxidación. Un método que se ha empleado es el enriquecimiento del gas de metano a partir de otras fuentes, como el terraplén o el pre-drenaje de gas. Si se está considerando el enriquecimiento, el uso de gas drenado de baja calidad (<30%) no debe ser utilizado debido al peligro de explosión. El uso de concentraciones de gas más altas (> 30%) podría desviar el gas desde un costo menos de generación de energía a partir de CMM, y esto debe ser evaluado como parte de la viabilidad del proyecto.

Es necesario garantizar que los RTO/RCO y la infraestructura necesaria para transportar el aire que retorna a la mina a los reactores no creen contrapresión adicional en el ventilador de la mina, reducir al mínimo el consumo de energía parasitaria en la medida de lo posible, y contener analizadores de metano y otros equipos de seguridad (p.e., supresores de llama, sistemas de derivación).

Otras tecnologías de VAM en desarrollo incluyen el reactor catalítico monolítico (CMR), turbinas de combustión, reportadas para utilizar el VAM en concentraciones de 1,5% y más bajo, y los hornos rotatorios que mezclan la VAM con residuos finos de carbón (Su, 2006).

En este momento, la viabilidad comercial de las tecnologías de VAM, donde la VAM es una fuente primaria de combustible depende de los ingresos proporcionados por créditos de carbono. Los proyectos de VAM reportan entregas de tasas de rentabilidad positivas en los precios del carbono a partir de tan sólo U.S. \$5 a U.S. \$10/tCO₂e.

6.6 Monitoreo del Metano

La eficacia y seguridad de la utilización de metano se pueden mejorar considerablemente si la concentración real de metano en el gas extraído se puede medir con precisión.

El gas drenado transportado para su conversión en energía, o el quemado en tea, se puede transportar de forma más segura si los datos exactos están disponibles respecto al verdadero contenido de metano en el gas. Los beneficios se extienden más allá de la seguridad, sin embargo, para mejorar las posibilidades de comercialización del metano o productos producidos a partir de la utilización o reducción de metano. Por ejemplo, los motores de gas tienen una estrecha banda de aceptación de la concentración de metano, y un flujo de gas garantizado y constante aumentarán la eficiencia de los motores, mientras se reducen los costos de operación y mantenimiento (O&M). El metano emitido a una tubería de gas natural debe cumplir con las especificaciones muy estrictas o se puede enfrentar un posible rechazo- o incluso sanciones- desde el operador de canalización.

Para los proyectos de VAM, es esencial medir con precisión los flujos de ventilación para evaluar las fluctuaciones en las concentraciones de la VAM y el total de los flujos de la VAM previos al diseño del proyecto. Una vez en funcionamiento, un régimen de monitoreo minucioso proporcionará datos operativos, pero el programa de monitoreo es especialmente crítico para la medición exacta de la reducción de emisiones. Esto puede requerir un régimen de pruebas muy diferente del utilizado normalmente en la operación minera donde el monitoreo del metano se realiza por razones de seguridad y los flujos de ventilación están medidos para la optimización de la ventilación. Por ejemplo, muchos protocolos de GHG requieren monitoreo continuo de emisiones del flujo de la VAM y el muestreo continuo o regular de analizadores de metano.

Capítulo 7. Costo y Asuntos Económicos

Mensaje clave

Hay un sólido argumento de negocios para la instalación y operación de los sistemas de drenaje de gas de alta eficiencia y la utilización del gas capturado. Hay una amplia gama de posibles usos finales del CMM que han sido comercialmente rentables y empleados a nivel mundial. Los altos costos asociados con la purificación del drenado del gas para mejorar la concentración de metano para un uso final particular, a menudo se pueden evitar mediante la mejora de las prácticas de drenaje subterráneo de metano.

7.1 El Caso de Negocio para el Drenaje de Metano

En las minas modernas de carbón, un alto nivel sostenido de producción de carbón es necesario para obtener un rendimiento financiero aceptable de la inversión. El aumento de las tasas de extracción de carbón a menudo resulta en mayores tasas de emisiones de metano. La producción de carbón sostenible no debe estar limitada por la incapacidad para evitar la concentración de gases en la mina que exceda los límites de seguridad reglamentarios, ni comprometida por incidentes no controlados relacionados con el gas. La infracción de las normas de seguridad de gas puede dar lugar a multas o a las explosiones que ponen en peligro la vida humana. Cualquier pérdida de vidas humanas es inaceptable y debe ser evitada. Aparte de los efectos directos sobre los dependientes del trabajador, cualquier accidente fatal dañará una empresa y su fuerza de trabajo más allá de los aspectos monetarios que resultan de la responsabilidad penal, la indemnización, interrupción de la producción, y que podría ocasionar multas contractuales. El costo de un solo accidente mortal a una gran operación minera podría oscilar entre US \$ 2 millones a más de US \$ 8 millones a través de la pérdida de producción, costos legales, indemnizaciones y multas punitivas. En algunos países, un grave accidente en una mina puede conducir a la suspensión del minado del carbón en una amplia zona por un período de un par de semanas hasta que las autoridades hayan completado las inspecciones e inicie la respuesta para evitar recurrencias.

Los costos de drenaje de metano son una parte intrínseca de los costos totales de producción minera y de explotación. Por lo tanto, existe una sólida justificación para invertir en la extracción eficaz de gas para asegurar que los tajos largos cumplan con los objetivos de producción legal y segura. El impacto financiero puede ser ilustrado. Un moderno veta larga de alta producción trabajando una veta moderadamente grande (p.e., alrededor de 3 m) puede producir 2-4 millones de toneladas por año (Mtpa) en buenas condiciones geológicas. Si el precio del carbón es de US\$ 40/t, entonces cualquier restricción relacionada con las emisiones de gas que reduzca o detenga la producción el 10% de las veces le costaría a la empresa minera de US \$ 8 millones a US \$ 16 millones por año en ingresos perdidos.

Una vez que un sistema de drenaje de gas está en su lugar, invertir en la captura de gas adicional proporciona una oportunidad de ahorro o ingresos adicionales, a través de una posible reducción en el costo de energía de ventilación o un aumento en el potencial de la producción de carbón.

7.2 Costos comparativos de Drenaje Metano

Los costos del sistema de drenaje de metano dependen de un número de factores (p.e., equipo, servicio, acceso a la superficie, adquisición de tierras y mano de obra) y varían considerablemente de un país a otro. Estas diferencias de costos se ven agravadas por las variaciones debido a las condiciones geológicas y mineras dentro de cada país y, por lo tanto la generalización inevitablemente conduce a amplios intervalos. La Tabla 7.1 presenta una comparación de costos generalizados, respecto de los métodos de drenaje de gas por tonelada de carbón producido (precios en 2009). La base de comparación es el drenaje de un panel nocional, gaseoso, de veta larga de 2 kilómetros (km) de largo y 250 m de ancho a 600 m de profundidad con un espesor de la veta de 3 m con las tasas de extracción de 2,0 Mtpa a 0,5 Mtpa como punto de referencia a partir de datos procedentes de China y Australia.

Tabla 7.1 Costos Relativos por Tonelada de Carbón producido en 2009 en US \$ de los Distintos Métodos de Drenaje del Gas

Método	Tecnología Básica	De mayor costo	Las principales variables de costos	Costo estimado en US\$/t
Pre-drenaje Subterráneo	Pozos de sondeo direccionales largos, en la veta a lo largo de la longitud del panel	Perforadores Especializados y equipos	Diámetro y longitud de la perforación	0,4-3,2
	Pozos perforados rotarios a lo largo de todo el panel	Plataforma rotatoria de perforación y equipo	Diámetro y longitud de la perforación	0,6-4,0
Pre-drenaje en la Superficie	Pozo vertical con estimulación de fractura convencional	Contrato de perforación, carcasa y servicios de fracturación; Sellado al ser abandonado	Profundidad y número de vetas de sondeo a ser completado	01.02 a 09.06
	Superficie al pozo en la veta con laterales múltiples	Contrato de perforación, carcasa y especialización, dirigido a los servicios de perforación de pozos; Sellado al ser abandonado	Profundidad de la perforación y longitud total de laterales perforados en la veta; El costo puede aumentar rápidamente en caso de dificultades de perforación	1,0-8,0
Post-drenaje Subterráneo	Pozos de medida cruzada (de calzadas existentes)	Plataforma de perforación Rotatoria y equipo	Diámetro y longitud de la perforación	0,1-1,6
	Galerías de drenaje	Desarrollo adicional de calzada	Distancia por encima / por debajo de la veta trabajada y dimensión de la calzada	0,3-11,2
	Perforaciones súper-adyacentes (o sub-adyacentes) o pozos horizontales guiados	Perforadores especializados y equipos de perforación dirigidos al fondo del pozo	Dificultad de perforación para el radio de curvatura	0,5 a 4,0
Post-drenaje en la Superficie	Excavación de Pozos	Contrato de Perforación y carcasa; Sellado al ser abandonado	Profundidad	1,4-15,2

Nota: Los valores anteriores son muy generalizados y no tienen en cuenta la variación en los costos de los métodos de superficie con profundidad.

El método de drenaje seleccionado debe ser adecuado para el minado y la situación geológica. Por ejemplo, medidas cruzadas de perforaciones subterráneas en los estratos por encima de una veta que se está trabajando con pocas vetas en el techo no proporcionarán control efectivo del gas. Los costos de los métodos fundamentados en la superficie aumentan con la profundidad de trabajo así como aumenta la profundidad, los métodos subterráneos serán cada vez más atractivos en términos financieros.

En las minas muy gaseosas, una combinación de métodos puede ser necesaria antes de que altas tasas de producción de carbón se puedan lograr de forma segura. Los costos de los sistemas de drenaje aumentan con la complejidad geológica. Debe haber suficiente redundancia en el sistema para permitir el fallo de uno de pozo, o la galería de drenaje, sin comprometer la seguridad del minado subterránea. Un rango de costo operacional típico estimado para la extracción de CMM del subsuelo en forma de metano puro es de US\$0,06/m³ a US\$0.24/m³.

7.3 Economía de Utilización del Metano

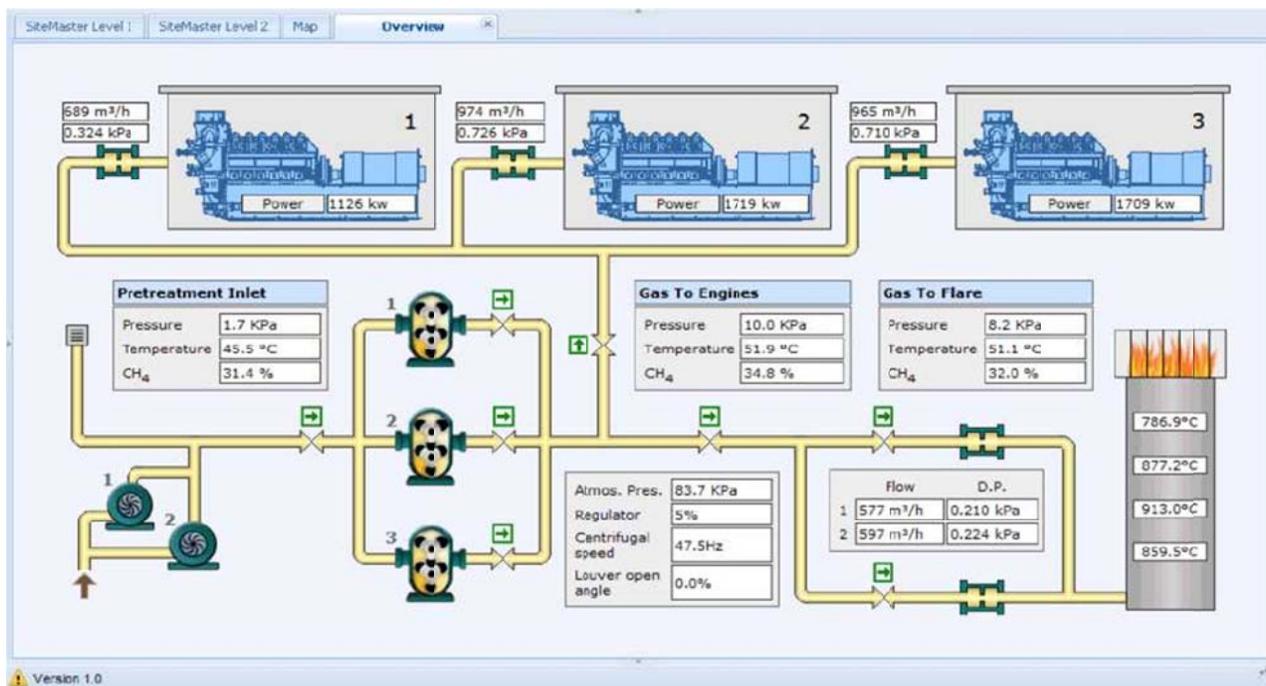
La utilización de gas drenado para la generación de energía requiere una inversión adicional, pero generará un flujo de ingresos o reducirá los costos de energía a la mina. Las cuestiones financieras a considerar al invertir en

un proyecto de generación de energía son la variabilidad del suministro de gas y la calidad, costo de oportunidad, y fuente de financiamiento.

Los costos de inversión por megavatio de capacidad eléctrica (MW_e) para una planta eléctrica de cogeneración de CMM (todos los equipos incluyendo el acondicionamiento del gas) son de aproximadamente US\$ 1,0 millones a US\$ 1.5 millones para los generadores de alta eficiencia de nivel internacional (2008). Los costos de operación y mantenimiento (todo incluido) en términos de promedio de la electricidad producida son alrededor de US\$ 0.02 a US\$ 0,025/kilovatio-hora (kWh) durante todo el ciclo de vida de la planta de cogeneración (2008).

El desempeño financiero de una planta de energía CMM depende de la disponibilidad de gas, la fiabilidad de los equipos (y por lo tanto, las horas de funcionamiento), aceptación de la energía por parte del usuario o de la red nacional, y la facturación de potencia recibida o de ahorros a través de la mina usando la energía obtenida por el CMM. Como el gas se drena por razones de seguridad y por producción de carbón en cualquier caso, el costo marginal del drenaje se excluye del análisis. En algunos casos, los costos adicionales pueden estar implicados en el aumento de flujo de gas y calidad. Una combinación de buen diseño del proyecto, uso de equipo probado, un esquema O&M robusto, y monitoreo del rendimiento en tiempo real son críticos para el éxito. La gráfica 7.1 muestra una captura de pantalla ejemplar del software de monitoreo.

Figura 7.1 Generación de Energía y Reducción de CMM: Monitoreo del Rendimiento en Tiempo Real que Muestra el Diagrama de Flujo y Parámetros de Rendimiento de CMM usados en Tres Motores de Gas y una Llama



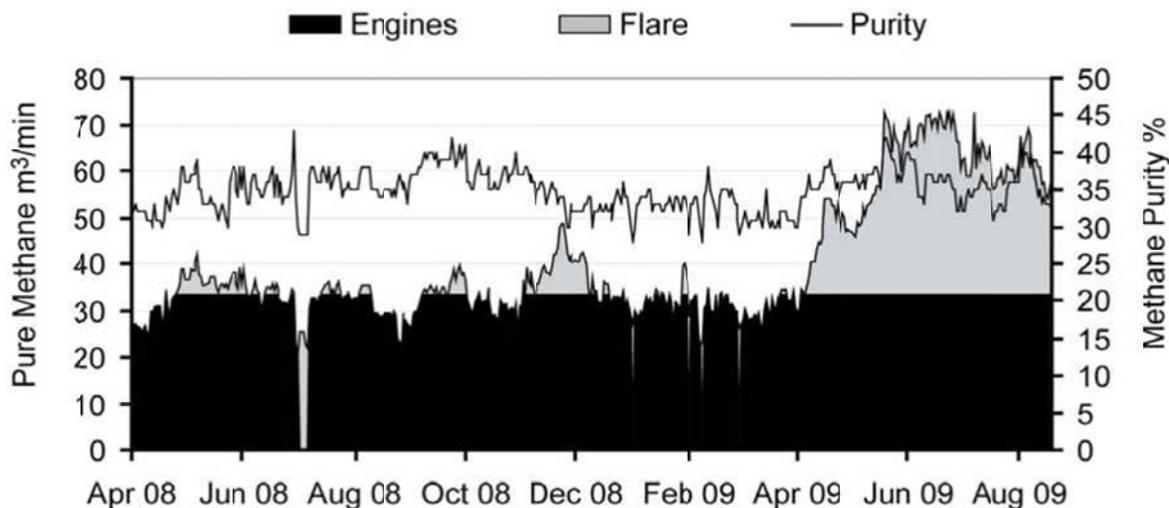
(Cortesía de Formac Electronics and Sindicatum Carbon Capital)

Al dimensionar una planta de energía de CMM, la variabilidad del flujo de gas y la pureza asociada a la actividad minera normal deben ser tenidas en cuenta, y si es necesario, las normas de drenaje deben ser expuestas para asegurar que el gas es de calidad segura y legal para su utilización. Los datos históricos se pueden usar para determinar la capacidad potencial de generación en una disponibilidad de gas predeterminada (p.e., 85%) con la quema para destruir el gas no utilizado (Figura 7.2). Como se ha demostrado por muchas plantas termoeléctricas de CMM de gran tamaño -y, por tanto, de bajo rendimiento-, este ejercicio es importante porque la economía de las plantas termoeléctricas de CMM demanda más horas de operación por encima de un mínimo de 7.500 horas anuales. Por lo tanto, la capacidad del motor de gas no debe ser diseñada para utilizar también el suministro de gas de carga pico, sino más bien debe ser diseñado para una carga base segura en términos de disponibilidad de

gas. Los picos tanto en cantidad de gas y (hacia abajo) calidad deberían idealmente ser destruidos por la quema para maximizar los beneficios ambientales.

Como la captura de gas se mejora progresivamente, se pueden añadir otros motores; un flujo de metano puro de 4 m³/min soportará aproximadamente 1 MW_e.

Figura 7.2 Flujo de Metano y Fluctuaciones de Pureza del Drenado Mostrando la Capacidad Optimizada y Uso de Motores y de la Llama



(Cortesía de Sindicatum Carbon Capital)

Además de la opción de utilización de la generación de energía a partir de CMM como combustible, existe una amplia gama de otras opciones, como el uso de CMM como gas domiciliario, en las calderas para producir calor, y como materia prima para productos químicos como se discutió en el Capítulo 6. En esos casos, la economía depende en gran medida de las circunstancias individuales y una visión más generalizada de cómo la generación de energía es difícil.

Como la mayoría de las emisiones de metano de minas de carbón están en la forma de VAM, algunos principios de la utilización de VAM son garantizados. Las misiones de oxidación de calor de la VAM, pueden ser utilizadas para producir vapor y generar electricidad. Las unidades de oxidación VAM con una capacidad de 35 metros cúbicos normales por segundo (Nm³/s) de aire de ventilación que contienen 0,5% de metano podrían generar alrededor de 1,3 MW_e. Con el fin de lograr una potencia de salida constante, se necesita una fuente de CMM drenado para estabilizar la concentración de la VAM y se requiere una concentración relativamente alta de la VAM para optimizar el rendimiento. El costo de capital por unidad de energía producida es más del doble que el de la generación de energía convencional por medio de CMM, y hay un "costo de oportunidad del medio ambiente" con respecto a la reducción de emisiones cuatro a cinco veces más grande del que podría haberse logrado con un nivel similar de inversión. En la actualidad los precios de energía y la ausencia de altas tarifas de alimentación, la generación de energía por medio de la VAM no es comercialmente viable sin asegurar un flujo de largo plazo de los ingresos de carbón. Además, la mejora del drenaje de gas puede aumentar la generación de energía por medio de CMM a un costo mucho menor, reduciendo así las emisiones de VAM.

La economía de cualquier uso de CMM o VAM para la generación de energía depende en gran medida del precio de la electricidad conseguida para un proyecto en particular y el valor de los créditos de reducción de emisiones y otros incentivos.

7.4 Financiamiento de Carbón y Otros Incentivos

Los créditos de reducción de emisiones ofrecen una opción de financiamiento adicional en algunos países para complementar el financiamiento de proyectos convencionales a través de préstamos bancarios o de inversión de capital privado. Hay una gran variedad de regímenes de acreditación de emisiones como el CDM flexible y la Aplicación Conjunta (JI) en el marco del Protocolo de Kyoto, así como regímenes voluntarios que son el fundamento de tal opción de financiamiento adicional.

Otros incentivos para ayudar al financiamiento de los planes de utilización de metano incluyen subvenciones, créditos fiscales, esquemas verdes de inversión (GIS) y tarifas de alimentación (p.e., en Alemania y República Checa). A falta de estos incentivos, el financiamiento de carbón se convierte en la opción preferida para activar la implementación de esquemas de utilización de CMM y VAM.

La base del apalancamiento de la financiación del efecto del carbón puede brindar una unidad de reducción de emisiones que es equivalente a una tonelada de dióxido de carbono. La cantidad de 66.4 m^3 de metano es aproximadamente equivalente a una tonelada de dióxido de carbono. Los cálculos han de tener en cuenta las ganancias por destrucción del metano, que tiene un efecto de emisión de GHG más de 20 veces mayor que la de dióxido de carbono, y la liberación de $2,75 \text{ tCO}_2$ emitido por tonelada de metano quemado en tea. Como regla general, 1 MW de la capacidad instalada de producción de electricidad a partir de CMM, utilizando $250 \text{ m}^3/\text{h}$ de las emisiones de metano puro puede resultar en una reducción anual de 30.000 tCO_2 emisiones. Dependiendo de las horas de funcionamiento y la eficiencia del sistema, más de siete veces la reducción de emisiones que una turbina eólica de 1-MW_e produciría.

Antes de elegir tomar ventaja del apalancamiento de financiamiento de carbón y/u otros incentivos, los temas a considerar incluyen el mecanismo de acreditación, el proceso y los costos de transacción, el tiempo, la complejidad, las reglas locales, y la incertidumbre de precios de los créditos de reducción de emisiones, algunos de los cuales vale la pena elaborar a profundidad utilizando el CDM y la JI como ejemplos para la ilustración.

El CDM implementado bajo el Protocolo de Kyoto permite a los países desarrollados desarrollar y afirmar el CER de la aplicación de las metodologías aprobadas en los países en desarrollo (no Anexo 1). El JI facilita proyectos en países sin CDM o países con límites de emisiones bajas según el Protocolo de Kyoto. Hay varias normas voluntarias para la acreditación de las reducciones de emisiones. Los proyectos VER no están sujetos a los procesos de validación y verificación rigurosos y que consumen mucho tiempo de los proyectos CDM y JI bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC); sin embargo, los proyectos VER enfrentan un mercado más pequeño y precios considerablemente más bajos.

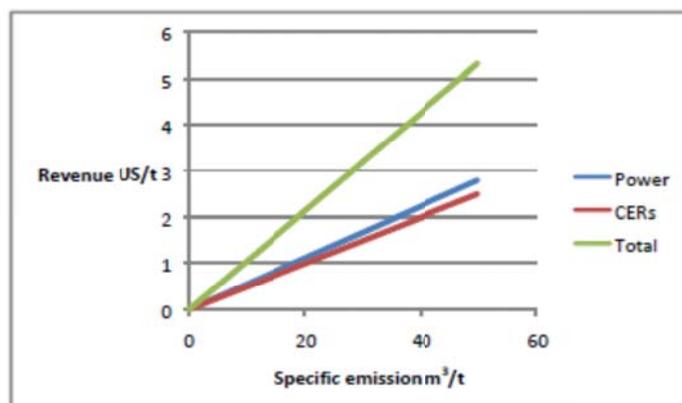
Se requiere una prueba sólida de "adicionalidad" para que un proyecto califique para el CDM y el JI. Un proyecto adicional es el que reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero de origen humano por debajo de aquellas que hubieran ocurrido en ausencia del proyecto; p.e., en comparación con el caso de negocios usual como hasta ahora. Los costos de inversión para plantas de co-generación de CMM en términos de potencial de reducción de emisiones durante 10 años de operaciones son de aproximadamente US\$ 3 a US\$ 5/ tCO_2 de equivalente evitado. La generación de CER/ERU implica la preparación, validación, verificación, y los costos del servicio de proyectos CDM/JI, junto con los equipos de utilización/destrucción del metano y su mantenimiento. Cuando se toman todos los costos en cuenta, incluyendo el costo de capital, riesgo financiero, y servicios especializados CDM/JI, el total puede ascender a US\$10/CER o ERU.

Por ejemplo, una mina gaseosa de nivel medio (emisión específica de $10 \text{ m}^3/\text{t}$) gana, en términos brutos, 0.042 CER/t de carbón producido, mientras que una mina muy gaseosa (emisión específica de $40 \text{ m}^3/\text{t}$) produce 0,168 CER/t de

carbón.¹⁰ Este cálculo supone que el 40% del total de gas se extraiga, de los cuales el 80% se utiliza. Este nivel de rendimiento se espera como mínimo para proyectos en los que se aplican los métodos y normas de mejores prácticas y donde no hay grandes limitaciones geológicas y mineras. El valor real de las CER o ERU depende del mercado y el momento de la venta.

La inversión en la utilización de una mina gaseosa de nivel medio (p.e., 10 m³/t) 4Mtpa, con un acuerdo de compra de reducción de emisiones (ERPA) con un precio de US\$ 12/t CO₂e (40% de captura de gas y el 80% de disponibilidad), alcanzaría a unos US\$2 millones por año a partir de CER o URE, más ingresos o ahorros en costos de ventas de generación eléctrica o de gas.¹¹ El metano capturado, asumiendo un suministro estable de gas, sería suficiente para generar 5 MW_e (2,5 millones de m³ por año de metano puro genera aproximadamente 1 MW_e), y el ingreso por energía estaría cerca de US\$ 0,05/kWh y 7.000 horas de funcionamiento al año ascenderían a US\$1.75 millones. El ingreso total por reducción de emisiones y generación de energía por lo tanto sería igual a 3,75 millones de dólares. En este caso, los créditos de carbono casi doblan el ingreso del proyecto tal como se documenta en la Figura 7.3, que muestra los ingresos modelados en US\$/t de carbón producido derivado de las ventas de electricidad y CER en función de las emisiones de metano específicas de la mina en m³(Puro)/t.

Figura 7.3 Ingresos Duales de Generación de Energía a partir de CMM: 40% del Gas Capturado, el 80% Utilizado



Sustancialmente una mayor rentabilidad potencialmente podría obtenerse en las minas de gas más altas. Una mina muy gaseosa (40 m³/t de emisión específica) produciendo 4 Mtpa generaría ingresos de US\$8 millones de la reducción de emisiones y tienen un potencial de generación de 20 MW_e que podría producir US\$9 millones. Por lo tanto, el ingreso potencial bruto total es de US\$ 17 millones.¹¹

Sólo son posibles rendimientos financieros en proyectos de reducción de emisiones si las reducciones de emisiones pueden ser probadas al proporcionar mediciones precisas del flujo y pureza del metano. Los proyectos de drenaje y utilización del metano están -y pueden llegar a estar incluso más- bajo el escrutinio para proporcionar pruebas confiables de reducción de emisiones. La complejidad de la vigilancia y las medidas se subestima a menudo y esto puede dar lugar a riesgos para la seguridad y la pérdida de ingresos.

7.5 Costo de Oportunidad de Utilización

El costo promedio de capital de una planta de utilización de metano depende de la escala y el tipo de proceso de utilización elegido. Como una primera estimación de los costos de capital para la utilización, una cifra de alrededor

¹⁰ Destrucción solamente, pero puede también ser un beneficio de cambio de combustible desde la generación eléctrica del carbón desplazado.

¹¹ No se han hecho en materia de fiscalidad CER.

¹¹ Una vez más, no se han hecho en materia de fiscalidad CER

de US \$ 1/t de capacidad de producción de carbón se puede suponer razonablemente. En comparación, los costos marginales para ampliar la capacidad de producción de carbón en China, p.e., se estiman en alrededor de US\$12/t (donde las licencias, aprobaciones, recursos, geología, condiciones de minería, infraestructura subterránea y de superficie, y el mercado lo permiten). La inversión de US \$1/t de capacidad de producción de carbón en el minado en lugar del uso del gas por lo tanto da lugar a un aumento marginal de la capacidad de producción de carbón de 1/12, o 0.083 toneladas. Así, p.e., la capacidad de una mina de 4-Mtpa incrementaría a $1.083 \times 4 = 4.332$ Mtpa mediante el uso de los fondos necesarios para la utilización de gas para un aumento de la capacidad de producción de carbón. A un precio de carbón de US\$30/t, el ingreso adicional anual sería de aproximadamente de US\$ 10 millones. El costo de oportunidad de US\$ 2,50/t es alto y por lo tanto, las decisiones de inversión en la mayoría de las minas son propensas a favorecer la expansión de la capacidad de producción de carbón en lugar de la generación de energía por medio de CMM. Cuando los ingresos adicionales en forma de reducciones de emisión de créditos están disponibles, p.e., la generación de energía comienza a emerger como una alternativa económicamente viable para las minas de carbón con emisiones específicas por encima de $20\text{m}^3/\text{t}$ (véase la Figura 7.3 más arriba). Un corolario de este argumento es que la generación de energía a partir de CMM es adicional. A medida que aumenta el precio del carbón, la generación de energía por medio de CMM se vuelve cada vez más atractiva.

El panorama cambia con la inversión de terceros en la utilización, apoyada por la financiación del carbono -una propuesta atractiva para una mina- ya que como el costo de oportunidad es obviado, el metano que antes no se utilizaba crea valor adicional.

7.6 Costos Ambientales

En la actualidad, la mayoría de las empresas mineras consideran el drenaje de gas como un costo de minería, mientras que los costos incurridos por la utilización del gas o la mitigación de las emisiones ambientales se clasifican como un costo de inversión adicional. Como la mitigación del cambio climático y la recuperación de energía limpia se convierten en una parte intrínseca de la cadena de valor, sin embargo, los operadores de minas podrían tener que tomar una visión más integral de estos factores. Los propietarios de la mina pueden en el futuro ser necesarios para elevar el rendimiento del drenaje de gas más allá de las necesidades de seguridad de las minas para cumplir con los objetivos de protección del medio ambiente.

En virtud de un escenario de "negocio usual", las estimaciones para China muestran que el costo de la internalización del impacto de las emisiones de metano de minas de carbón sería de aproximadamente US\$12/t de producción de carbón (ESMAP, 2007). Ningún país ha tratado de imponer un costo de esta magnitud hasta ahora, pero la cifra en dólares proporciona una indicación del costo potencial de una mina de carbón que no logra minimizar las emisiones ambientales. Rusia, p.e., ya impone una multa a las emisiones de metano de minas de carbón, pero muy inferior a la cifra anterior.

Capítulo 8. Conclusiones y Resumen para Responsables de Políticas

El mundo ha basado en el carbón una parte significativa de su producción de energía primaria desde la Revolución Industrial. Las economías emergentes más importantes, industrializadas y en transición -y, por tanto, la economía mundial- seguirán beneficiándose y dependerán de los recursos de energía de carbón en el futuro previsible. Hoy en día, el carbón suministra el 25% de la energía mundial primaria y, el 40% de la electricidad mundial, y casi el 70% de acero y de aluminio del mundo. La Agencia Internacional de Energía (IEA) prevé que en las economías emergentes la demanda de energía crecerá un 93% en 2030, impulsado en gran medida por el crecimiento de la demanda en China e India, y se espera que el carbón sea el combustible principal para satisfacer esta demanda creciente (IEA, 2009).

La extracción de carbón y la gestión eficaz de metano serán cada vez más difíciles ya que las reservas superficiales se agotarán y las vetas más profundas y gaseosas se extraen. Al mismo tiempo, las sociedades son cada vez más exigentes y esperarán mejores resultados ambientales y condiciones de trabajo más seguras en la industria.

Idealmente, las empresas modernas mineras de carbón reconocen los beneficios de la adopción de un sistema holístico de gestión de gas que integra constructivamente el control del gas subterráneo, la utilización de metano, y la reducción de las emisiones nocivas. Del mismo modo, desde la política y las perspectivas de regulación, un enfoque integral de la gestión de CMM cosechará beneficios múltiples. Establecer y hacer cumplir las regulaciones para la extracción segura de gas, el transporte y la utilización alienta la creación de estándares superiores de drenaje de metano, así como el aumento de la producción de energía limpia y una mayor reducción de las emisiones de metano de minas.

La experiencia en los países industrializados muestra que la inversión en las buenas prácticas de drenaje de gases resulta en menos tiempo de inactividad de las minas debido a las condiciones gaseosas de las minas, entornos mineros más seguros, y la oportunidad de utilizar más gas y reducir las emisiones de metano de las minas. Este documento de orientación debe considerarse como un punto de partida para la elaboración de estrategias y el desarrollo de programas de apoyo para las mejoras necesarias de seguridad y prácticas para aumentar la seguridad de la mina mientras se reducen drásticamente las emisiones de metano de minas.

Los principios fundamentales de este documento son los siguientes:

1. Hay un tremendo conocimiento de la industria mundial y experiencias sobre la gestión de los riesgos de explosión de metano. La aplicación global del conocimiento acumulado actualmente disponible de la industria y las prácticas sobre ocurrencia, predicción, control y gestión del metano podrían reducir significativamente los riesgos de explosión resultantes del metano en minas de carbón.

2. Independientemente de las limitaciones, la seguridad del trabajador de la mina es de suma importancia y no debe ser comprometida. Las condiciones de trabajo seguras en entornos de minas gaseosas no pueden alcanzarse sólo a través de la legislación o incluso la tecnología más avanzada. Por el contrario, sistemas de gestión racional y eficaz, organización de gestión y prácticas de gestión son fundamentales para la seguridad de las operaciones. Otros elementos críticos de seguridad en las minas son la educación y la formación adecuada tanto para administrativos como para la mano de obra, y motivar a los trabajadores a que adopten las prácticas de seguridad laboral.

3. Un enfoque de evaluación de riesgos para minimizar los riesgos de explosión se debe combinar con una fuerte aplicación de la ventilación robusta y regulaciones de seguridad de utilización. Este enfoque permite mejorar las cantidades de drenaje de gases y sus cualidades. Los flujos de gas metano en las minas de carbón bajo condiciones normales en el estado estacionario son generalmente predecibles. La emisión inusual y eventos de explosión no son fáciles de predecir, pero las condiciones en las que pueden ocurrir son razonablemente bien conocidas.

Métodos detallados para la reducción de riesgos en estas condiciones se han desarrollado y deben aplicarse siempre que se identifican riesgos significativos. En tales circunstancias, las condiciones de trabajo seguras dependen del rigor de ejecución y seguimiento de métodos de control de gas. La importancia de no sólo instalar controles en el subsuelo por razones de seguridad en las minas que se encuentran operativas, sino la recopilación y el uso de los datos para la planificación de la seguridad no pueden ser exageradas.

4. Los sistemas de ventilación de la mina son componentes críticos de un sistema general para eliminar efectivamente el metano de las explotaciones mineras. Un sistema de ventilación de la mina se ha diseñado para lograr tres objetivos: 1) proporcionar aire fresco respirable para los trabajadores, 2) controlar la temperatura del aire de la mina, y 3) diluir o eliminar los gases peligrosos y polvo respirable en el aire con eficacia.

5. Las mejoras en los sistemas de drenaje de metano a menudo pueden proporcionar una solución más rápida y rentable para explotar los problemas de gas más que simplemente aumentar el suministro de aire de la mina. Los problemas prácticos del drenaje de gas en las minas de carbón en general, se pueden resolver mediante la aplicación de conocimientos y técnicas existentes. La introducción de tecnologías nuevas o novedosas sólo debe considerarse después de la aplicación de las buenas prácticas, y sólo si las técnicas existentes no han logrado proporcionar una solución satisfactoria. El rendimiento del sistema de drenaje de metano se puede mejorar a través de la correcta instalación, mantenimiento, monitoreo regular, y la implementación de planes sistemáticos de perforación.

6. El transporte de mezclas de metano-aire en concentraciones en o cerca del rango explosivo en las minas de carbón es una práctica peligrosa y debe ser prohibida. El metano es un gas explosivo en intervalos de concentración del 5% al 15% de metano en el aire. Como regla general, un factor de seguridad es de por lo menos 2.5 del valor más bajo y 2.0 el más alto de este rango debe ser estrictamente observado.

7. Las minas de carbón subterráneas son una fuente importante de emisiones antropogénicas de metano (alrededor del 6% de metano mundial de las emisiones relacionadas al humano-), pero estas emisiones pueden reducirse sustancialmente mediante la aplicación de las mejores prácticas. El metano tiene un potencial de calentamiento atmosférico más de 20 veces mayor que el dióxido de carbono, el GHG más importante a nivel mundial. Gran parte del metano producido en las minas subterráneas puede ser recuperado y utilizado productivamente o destruido (mitigar su efecto en el calentamiento global mediante la conversión a dióxido de carbono). Las opciones incluyen la recuperación de energía a partir del gas drenado, la quema del exceso de gas drenado, y el uso o reducción de VAM. Con las condiciones técnicas y de mercado adecuadas, el objetivo final debe ser la reducción de las emisiones de metano a casi cero.

8. Hay un sólido argumento de negocios para la instalación y operación de los sistemas de drenaje de gas de alta eficiencia y la utilización del gas capturado. Hay una amplia gama de posibles usos finales del CMM que han sido comercialmente rentables y empleados a nivel mundial. Los altos costos asociados con la purificación del drenado del gas para mejorar la concentración de metano para un uso final particular, a menudo se pueden evitar mediante la mejora de las prácticas de drenaje subterráneas de metano.

Capítulo 9. Casos Prácticos

Los siguientes casos de estudio ofrecen a los lectores siete ejemplos donde las mejores prácticas que se discuten en esta guía se han implementado en minas en operación en todo el mundo. Los Casos de Estudio del 1 al 3 discutirán sobre la evaluación, la planificación y las prácticas de gestión del metano implementadas en tres minas de veta larga para dirigir los problemas de control del metano. El Estudio de Caso 4 se refiere a la reducción de los riesgos de explosión en las minas de anchurones y pilares. En el Estudio de Caso 5, se examina la captura y utilización del metano para la generación de energía. Los Casos de Estudio 6 y 7 se centran en la reducción y la utilización de VAM.

Los casos de estudio son necesariamente breves y sólo tienen por objeto resaltar los puntos clave en cada caso.

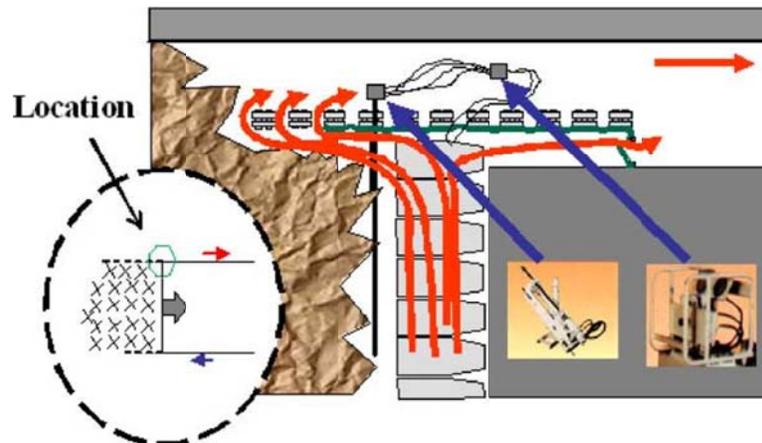
Estudio de Caso 1: Alcanzando la Producción Planeada de Carbón de Operación de Tajo Largo con Retirada, en Presencia con Estrés de Estratos Severo y una Veta de Carbón Propensa a Combustión Espontánea - Reino Unido

Condiciones iniciales: 980 m de profundidad de trabajo, 50 m³/t de emisiones específicas desde un veta larga retirado de 2 m requerido para producir 1 Mtpa, alto riesgo de combustión espontánea del carbón, ultra-baja permeabilidad del carbón, esfuerzos horizontales graves en el lado expuesto del manto carbonífero y piso de dureza alta en las calzadas de acceso al veta larga – un ingreso y un retorno.

Problemas de control de gas: El pre-drenaje no era factible debido a la baja permeabilidad del carbón y los pozos de medida cruzada en ángulo por encima de la parte frontal del tajo de la superficie fueron interrumpidos por el alto estrés; Por lo tanto, la captura de gas y la pureza era demasiado baja. El riesgo de combustión espontánea era alto y era necesario que el pilar tuviese gran tamaño para la estabilidad, lo que impidió el uso de los sistemas multi-entrada o sistemas viales de purga.

Solución: La producción requerida se logró utilizando la ventilación disponible de 30 m³/s de aire de mediante la perforación de pozos de sondeo de medida cruzada detrás de la superficie en un "retorno trasero" especialmente apoyado y ventilado (Figura 9.1). El patrón de perforación óptimo se encontró como una serie de agujeros superiores, en ángulos correctos sobre la calzada del veta larga, en ángulo superior de 55° al plano de la veta, y 7.5 m de separación. Los agujeros inferiores se perforaron a 100 m de distancia para minimizar los riesgos de emisiones del suelo.

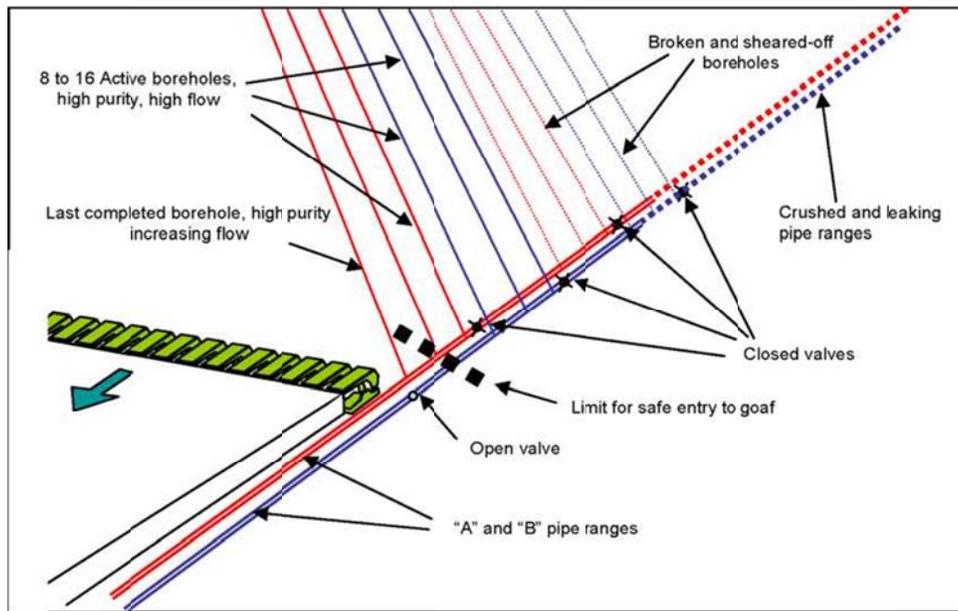
Figura 9.1 Sistema de Retorno Trasero



(Cortesía de Green Gas International)

Dos tubos de recolección de drenaje se instalaron en paralelo. Los pozos fueron conectados progresivamente a uno de los tubos hasta que la calidad del gas disminuyó; a continuación, la tubería se reguló para evitar la dilución excesiva del gas y pozos de sondeo se conectaron posteriormente a la otra tubería de colección. Se continuó este proceso de "salto", dejando al menos ocho pozos que permanecen conectados al sistema de drenaje de gas en cualquier momento (ver Figura 9.2). La regulación fue suficiente para optimizar la calidad y la cantidad del gas y una tasa de captura del 67% se logró sin necesidad de personal para incursionar en el terraplén de manera peligrosa para ajustar los pozos individuales.

Figura 9.2 Sistema de "Salto"



(Cortesía de Green Gas International)

La tasa de retirada del veta larga fue muy rápida, y el espacio disponible para las operaciones de perforación fue limitado, por lo que cada pozo tuvo que ser perforado, el tubo vertical instalado y sellado, y conectado a la tubería de colección de drenaje dentro de un ciclo de aproximadamente 10 horas. Esto se logró utilizando una máquina de perforación pequeña, portátil y de gran alcance (Figura 9.3) alimentada desde el circuito hidráulico de los soportes del techo del veta larga para obviar la necesidad de la electricidad.

Figura 9.3 Medida Cruzada de la Plataforma de Perforación



(Cortesía de EDECO Ltd.)

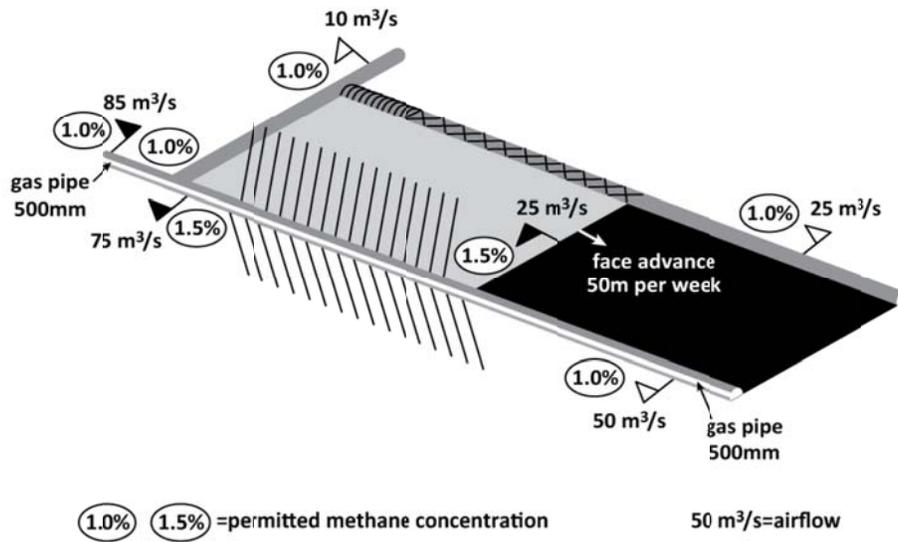
Estudio de Caso 2: Operaciones de Tajo Largo de Alto Rendimiento en Áreas con Altas Emisiones de Gas - Alemania

Condiciones iniciales: En una veta de 1,5 m de espesor, un veta larga con una longitud de 300 m, y una producción prevista de 4.000 toneladas por día (t/d), y una tasa de avance nominal de alrededor de 50 m/semana. La profundidad de sobrecarga es 1200 m, cerca de la veta horizontal, y no hay actividad previa para desgasificar las vetas de carbón parcialmente. Las predicciones de gas indicaron emisiones de gases de probabilidades específicas de 25 m³/t desde el techo, 3 m³/t desde la veta donde se está trabajando, y 8 m³/t desde el piso (en total 36 m³/t). El carbón era conocido por ser propenso a la combustión espontánea.

Problema de control de gas: El caudal máximo de metano que debe ser capturado o diluido con ventilación a una concentración segura es 1.875 m³/s (112,5 m³/min). El pre-drenaje fue evaluado y se determinó que no es eficaz. Había dos limitaciones principales. En primer lugar, un flujo de aire máximo permisible de 25 m³/s en todo el lado expuesto del manto carbonífero del veta larga que sólo podría diluir un flujo máximo de gas de 0,37 m³/s (22.2 m³/min), a pesar de la relajación por la autoridad minera que elevó el máximo permitido de concentración de metano de 1,0% a 1,5% (una reducción en el factor de la seguridad 5,0 a 3,3). El último cambio fue condicionado a la mejora del seguimiento y el drenaje de gas. Es importante que tales cambios sólo se hagan en las bases específicas del sitio y se adopten medidas adicionales para garantizar un aumento que no sea significativo en términos de riesgo. La otra limitación fue el conducto de aire en el que el aire de ventilación del distrito era descargado, en el que se permite un máximo de 1% de metano.

Solución: Un sistema de ventilación Y (Figura 9.4) fue diseñado para introducir otros 50 m³/s de aire y añadir a los 25 m³/s que pasa a través de la superficie, el flujo combinado pasando por detrás de la superficie diluyendo el metano emitido por el corte vertical y el terraplén. La configuración de la ventilación permite que ciertas perforaciones de medida cruzada sean perforadas, conectado al sistema de drenaje Y individualmente, que sean monitoreados y regulados generalmente en los pozos de medida cruzada perforados detrás de la superficie del veta larga y así lograran capturas más altas y el mantenimiento de purezas de gas superiores que aquellas perforadas frente a la superficie del lado expuesto del manto carbonífero. Estos agujeros de drenaje tienen una larga vida útil y una alta eficacia, y se espera capturar el 70% del gas del techo y el 40% del gas del suelo.

Figura 9.4 Tajo largo con forma de Y, Diseño Avanzado de Ventilación y Drenaje de los Pozos de Sondeo en el techo y el suelo detrás del veta larga



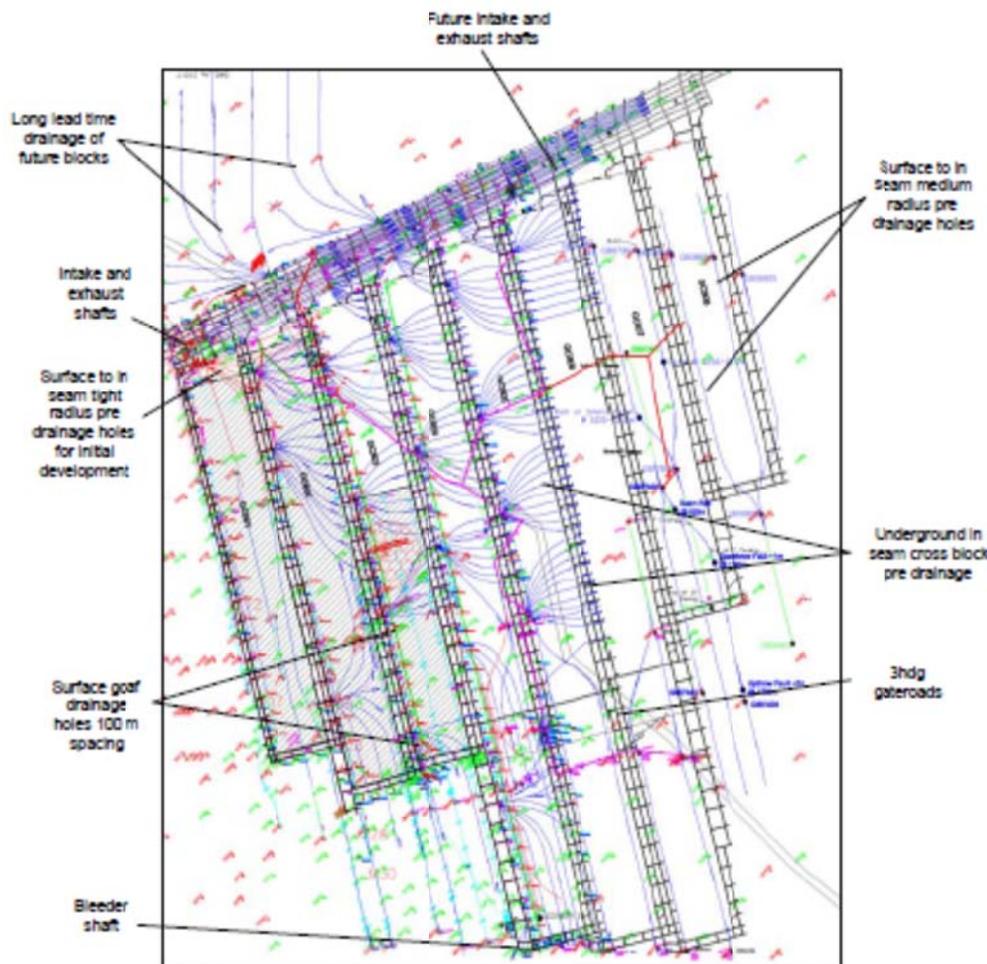
(Fuente: DMT GmbH & Co. KG)

Los sellos (paquete) en el sitio de excavación de la calzada abierta detrás de la superficie sirven para mejorar el apoyo de la calzada y aislar el terraplén de la entrada de aire para minimizar el riesgo de combustión espontánea y las concentraciones de metano creado dentro del intervalo explosivo.

La concentración limitante de 1% en la dirección lejana a la superficie expuesta del manto carbonífero limita la producción de carbón a 4.000 t/d, que estaba de acuerdo con el objetivo previsto. Alrededor de 80.000 m³/d de metano puro puede ser aspirado por el sistema de drenaje de gas y se utiliza en una central eléctrica. A pesar de la gravedad de las condiciones de explotación, el veta larga fue un éxito debido al diseño avanzado de ventilación y el drenaje de gas altamente eficaz.

Condiciones iniciales: Una nueva serie de bloques de veta larga se encuentra a 2,8 m de altura en la veta con contenidos de metano de entre 8 y 14 m³/t. La profundidad de la cubierta es de 250 m hasta 500 m con acceso en la superficie generalmente sin restricciones por las características de la superficie. El contenido de gas in situ deberá haberse reducido hasta o por debajo de 7,5 m³/t para satisfacer el código de prevención de explosión y por debajo del límite autoimpuesto para el control de encendido por fricción de 5,75 m³/t con el método de pre-drenaje. Hay una sola veta en el piso y ocho vetas en el techo que contienen de 10 m a 15 m de carbón dentro de la zona de espeleología nominal. Los bloques de veta larga son de 300 m de ancho y hasta 3,6 km de longitud (Figura 9.5), con una tasa de producción prevista de 110.000 toneladas por semana.

Figura 9.5 Plan de Disposición de la Mina Mostrando los Sistemas de Drenaje del Gas



(Fuente: MoreBy, 2009)

Los valores de emisión de gases de alto potencial llevaron a la mina a desarrollar una puerta de tres corredores en los tajos largos desde el principio con el fin de proporcionar un sistema de ventilación de alta capacidad volumétrica para la dilución del gas. Una puerta de tres corredores permite sustancialmente que más aire sea proporcionado para la dilución del gas al extremo de retorno de una superficie de veta larga, sin aumentar las velocidades de la superficie del aire, en comparación con un sistema convencional de ventilación en U. Esta es actualmente la única mina en Australia en emplear caminos de puerta de tres corredores.

Problemas de Control de Gas: Las predicciones de emisiones de gas indican emisiones probables de 15 a 30 m³/t de fuentes de veta de carbón. En las tasas de producción previstas, esto equivaldría a 3.500 a 7.000 l/s de CH₄, que por lo general aumenta con la profundidad. Sin embargo, los estudios anteriores en una mina adyacente demostraron gas libre sustancial que podría aumentar significativamente las tasas totales de emisión. Las emisiones de los tres primeros tajos largos eran controlables con el diseño existente pero era mayor a lo esperado para las profundidades relativamente poco profundas. La extrapolación de los tajos largos profundos indicaba predicciones de que la etapa de factibilidad indicada se superaría con emisiones posiblemente alcanzadas de 9,500 l/s.

Soluciones: Explosiones en la fase de desarrollo y límites de ignición por fricción son alcanzados utilizando una combinación de técnicas de perforación de radio medio en la superficie de la veta (MRD) complementadas con agujeros direccionales subterráneos y huecos complementarios que no tienen núcleo para las pruebas de contenido de gas. El área inicial del fondo del foso fue drenada con técnicas de pre perforación de radio estrecho (TRD).

El plan original de emplear caminos de puerta de tres corredores era correcta en el suministro de la capacidad del circuito de ventilación de un veta larga de 100 a 120 m³/s (2.000 a 2.400 l/s CH₄ en el límite de retorno de 2.0%). Es importante señalar que, siguiendo el desastre de Moura de 1994, donde murieron 11 mineros, los reglamentos de minas de carbón, las directrices y los usos y costumbres en Queensland previenen a las minas de emplear un sistema completo de estilo americano para el sistema de purga de ventilación de inundaciones. Sin embargo, la purga controlada con la debida consideración a la ubicación de las mezclas y el control de combustión espontánea explosiva es posible.

En cualquier caso, la capacidad de dilución real de un sistema de purga en estos bloques está muy por debajo de las tasas de emisión de gases de veta larga totales y se requieren estrategias alternativas. Hasta la fecha, la mina ha empleado con éxito la superficie convencional para el terraplén de agujeros de drenaje (de 300 milímetros de diámetro a 100 m de espaciamiento localizado en el lado de retorno lado de retorno) para reducir la carga de emisiones de gas en el sistema de ventilación. Esta estrategia logró un promedio del 65% de captura (drenaje de excavación más ventilación) con picos de aproximadamente el 80% en la corriente de gas de alta pureza (> 90% CH₄).

La infraestructura de recolección de gas está en la superficie, utilizando tubos de 450 milímetros de diámetro, incluidas las conexiones verticales de agujeros direccionales subterráneos. Todas las corrientes de gas de la superficie de pre-drenaje subterráneo, superficie de pre-drenaje MRD, y los agujeros excavación se agotan en una estación de bombeo central desde donde alrededor de 2.200 l/s de gas se descarga a motores de gas de 16 x 2.0 MW con llama equilibrada. La directiva del sitio consiste en evitar la descarga directa del gas capturado si es posible.

Reconociendo que, en bloques de futuros, la emisión de gases a la red de ventilación del 65% de captura en el sitio de excavación aún resultará problemático para el sistema de ventilación, la mina está ahora intentando también el pre-drenaje del techo de las vetas gruesas utilizando agujeros de aproximadamente 2,0 km de largo perforados a lo largo de ejes del veta larga. Estos agujeros servirán inicialmente como pre-drenaje y después, en operación, como agujeros de drenaje del terraplén dirigidos a la emisión de gases del frente más cercano. La finalización de múltiples pozos frac convencionales en la veta también puede considerarse como un requerimiento para el pre-drenaje adicional para futuros trabajos más profundos.

Estudio de Caso 4: Reducción de los Riesgos de Explosión en Minas de Anchurones y Pilares - Sur África

Condiciones iniciales: Un aumento en la severidad de las explosiones en vetas de carbón muy gruesas (4-6m de altura) con bajo contenido de gas (1 a 2 m³/t), generó que se estén usando métodos mecanizados de anchurones y pilares. En esta minería particular de la región, se requiere una respuesta normativa y práctica para reducir el riesgo. Alrededor del 75% de las explosiones fueron iniciadas en o cerca de las entradas en la superficie con la fuente dominante de ignición siendo friccionada (Landman, 1992). Un número todavía importante de explosiones en zonas no frontales destacó las dificultades de control de metano en las minas de anchurones y pilares usando métodos de ventilación. El flujo de aire en las habitaciones difiere del de los tajos en funcionamiento debido a las expansiones y contracciones bruscas repetidas, donde las calzadas longitudinales intersectan los cortes transversales. El flujo de aire puede tener estática en algunos de los cortes transversales en trabajos extensivos.

La acumulación de gases en las secciones de alta producción con una ventilación inadecuada y la transmisión de la llama a las capas del techo donde no se ha detectado metano (Tabla 9.1) se consideraron riesgos significativos que deben ser controlables (Creedy & Phillips, 1997).

Tabla 9.1 Una Evaluación de Riesgos de Ignición de Metano en las Capas de las Minas De Anchurones Y Pilares

Fracaso Potencial	Las posibles causas de un fallo	Medidas Preventivas
El fracaso al evitar una ignición	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilación independiente inadecuada o poco fiable en los diferentes corredores. • Deficiencias en los sistemas de ventilación de la máquina. • Picos desgastados, aerosoles bloqueados, baja presión de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> • El uso de equipos adecuadamente diseñados y protegidos. • Altos estándares de mantenimiento. • Seguimiento eficaz.
El no excluir las fuentes de ignición	<ul style="list-style-type: none"> • La energía eléctrica y fuentes de ignición por fricción asociadas con mineros continuos. • Fumar y otras actividades ilegales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estricto entrenamiento y supervisión del personal. • Búsquedas de contrabando en la entrada a la mina.
El fracaso al dispersar capas metano	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de ventilación insuficiente. • Medios de ventilación locales inadecuados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimientos de control de metano. • Disponibilidad de motores de aire y otros equipos adecuados.
El fracaso al detectar capas de metano	<ul style="list-style-type: none"> • Lugares de monitoreo incorrectos. • Falta de equipo de monitoreo adecuado. • Personal inadecuadamente capacitado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Programa de control específico del sitio. • Sondas de monitoreo adecuadas, especialmente para los tramos altos de calzada. • Entrenamiento.
El fracaso para evitar la estratificación de metano	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidades de ventilación demasiado bajas. • Ventilación no fiable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación de ventilación. • Mejorar localmente la ventilación del techo.
El fracaso para evitar la emisión de metano	<ul style="list-style-type: none"> • Las emisiones de metano son una consecuencia natural del trabajo de carbón subterráneo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Drenaje de metano.

Problemas de Control de Gas: La ventilación de superficies de trabajo requiere ventilación independiente aspirando aire desde el último tramo a través de la calzada. Las secciones minadas comprenden un tablero extenso de calzadas y pilares, los cuales no pueden ser ventilados de manera efectiva debido a las enormes cantidades de aire requerido y la dificultad de distribuir de manera uniforme el mismo. Para asegurar que los flujos principales de ventilación alcanzan los frentes de trabajo, estas zonas agotadas se cierran con pantallas temporales; Por lo tanto, el gas se puede acumular en las áreas cerradas detrás de la superficie.

En las minas de donde se identificaron las acumulaciones de presiones de agua y metano como una posible causa de la caída del techo se realizaron perforaciones en el techo con pernos que se intercalan con pozos abiertos y el drenaje libre de los pozos de sondeo. Algunos gases emitidos con tasas de corrientes bajas, que podrían formar extensas capas de metano no se detectarían a menos que se haga un sondeo cerca del nivel del techo, algo difícil en las calzadas altas.

Soluciones: El control de gas donde se practican métodos de minería de extracción parcial pueden ser asistido por un pre-drenaje dentro de la veta; el post-drenaje rara vez se requiere porque los estratos de techos y pisos que contienen carbón no están perturbados significativamente. En las vetas de bajo contenido de gas, el pre-drenaje es de poco beneficio. El drenaje del gas no es una opción viable para esta región. Una solución práctica es necesaria para mejorar la práctica de ventilación.

No es posible ventilar secciones ya trabajadas al mismo nivel que las secciones de trabajo debido a la oferta limitada de aire disponible. El énfasis está en estas nuevas circunstancias, por lo tanto, dirigido a la introducción de horarios efectivos de vigilancia relacionados con la detección de gas en el monitoreo del techo y la velocidad del aire en el cuerpo general de los trabajos de anchurones y pilares en los que la cantidad de ventilación se haya reducido dependiendo del sellado.

Fue considerado que la zona de mayor riesgo son las superficies de trabajo y un código de prácticas para ventilar secciones mecanizadas fue desarrollado por el regulador del gobierno (Departamento de Asuntos de Minerales y Energía, 1994). Un criterio fundamental fue que las concentraciones de gases inflamables deben ser inferiores a 1,4%, y con el fin de asegurar esto las siguientes medidas fueron recomendadas:

- Una velocidad mínima del aire en el último camino a través de la calzada de al menos 1,0 m/s (muchas minas eligieron instalar un monitor continuo, de velocidad a distancia).
- El uso de la ventilación auxiliar eficaz en los diferentes corredores (ventilación secundaria).
- Medición regular y el registro de los datos de ventilación críticos.
- Inspecciones de las secciones gaseosas a intervalos no superiores a una hora.
- Aislamiento eléctrico automático de corte mecánico, si el sistema de ventilación secundario deja de operar.
- Precauciones especiales cuando se acercan a las zonas de riesgo de emisión asociadas a las intrusiones ígneas y anomalías geológicas
- Monitoreo de gas continuo en el rubro que está siendo minado.

Condiciones iniciales: Una planta nueva de extracción de gas en la superficie se había instalado y terminado en mayo de 2007 en una zona de montaña de 1.600 m de distancia por encima de una mina de carbón con una capacidad de producción de carbón de 5 Mtpa, una emisión específica de 17,7 m³/t, y en la que drenan el metano en un flujo puro promedio de 22 m³/min. La eficiencia global de captura de metano de las minas fue del 15%, el 85% restante se emite con el aire de ventilación.

Problemas de Control de Gas: La pureza del gas en la planta de extracción fue variable y a veces menor al 30% mínimo permitido para la utilización y eficiencia de la captura de gas. Se esperaba que las cantidades de gas drenadas fluctúen debido a las variaciones en el ciclo del minado de veta larga y a las fases de funcionamiento en diferentes vetas; Por lo tanto, la capacidad de la planta de energía a partir de CMM necesita estar dimensionada para garantizar el 85% de disponibilidad para satisfacer los requisitos de inversión. Un objetivo del proyecto era optimizar la recuperación de energía y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero. Un motor integrado y un sistema de quema fueron requeridos -por primera vez en China. Por lo tanto, se espera que la demanda de transferencia de tecnología sea alta.

Solución: Un equipo de especialistas locales e internacionales en el drenaje de gases y sistemas de ingeniería se aplicaron al proyecto para trabajar con el personal de la mina para garantizar la entrega de gas, la ampliación del tamaño del proyecto, y la integración de la planta y el rendimiento.

La pureza del metano fue planteada por la mejora del sellado y la regulación de los pozos de medida cruzada. Se aumentó la capacidad de gas de la infraestructura de drenaje, los dispositivos de monitoreo de flujo de alta resistencia fueron reemplazados, y un plan fue preparado para el aumento de la captura de gas. La perforación intensiva de pre-drenaje en dos paneles futuros del veta larga suministraron gas enriquecido y el flujo complementado también eventualmente contribuyó al 23% del gas drenado, el resto proviene del post-drenaje y a pozos en el techo de medida cruzada. Estos últimos fueron perforados por delante de la superficie e inevitablemente algunos sufrieron daños y no funcionaron correctamente una vez estuvieron en el terraplén. Un pozo de demostración fue perforado sobre el terraplén detrás de la superficie, tuvo un buen desempeño, pero la técnica aún no ha sido adoptada por razones regulatorias locales, y este método de drenaje no se ha practicado históricamente en esta región.

La fase 1 del sistema implica la instalación de 5 MW_e con de recuperación de calor para la calefacción de edificios y el aire de ventilación interno en invierno. También se instaló una antorcha de 5.000 m³/hora. Una empresa especializada se dedica a diseñar e instalar un sistema de monitoreo de la ejecución a distancia para la utilización y destrucción de equipos.

Una vez que la captura de gas se había incrementado de forma demostrable a más de 50 m³/min (puro), la construcción de la Fase 2 se llevó a cabo en octubre de 2009 para aumentar la capacidad de generación eléctrica de 12 MW_e.

Reducción de las Emisiones de VAM, y Generación de Agua Caliente a partir de la Energía Liberada en la Oxidación de VAM.

Figura 9.6 VAM Reducción y Recuperación Energética implementada en China



(Cortesía de ZhengZhou Mining Group, MEGTEC Systems, y EcoCarbone)

Condiciones iniciales: Una mina grande de carbón situada en la provincia de Henan, República Popular de China, con una capacidad de producción de carbón de 1,5 Mtpa emitía alrededor de 12 millones de m^3 anuales de metano. La VAM representó el 56% de las emisiones con el 44% restante de metano eliminado a través de un programa de drenaje. Las concentraciones de la VAM variaron entre 0,3% y 0,7%.

Problemas de control de gas: La utilización o reducción de las emisiones de VAM no se habían demostrado previamente en China porque no había ningún incentivo para llevar a cabo este tipo de proyectos de créditos de carbono ausente.

Solución: Un mercado de CDM en funcionamiento está proporcionando el conductor financiero para implementar proyectos de reducción de VAM. El grupo minero estatal trabajó con un desarrollador de proyectos CDM y un proveedor líder de tecnología para diseñar, comisionar, y operar un proyecto comercial de demostración VAM utilizando un único lecho RTO sin llamas. Con la ayuda del promotor del proyecto, este proyecto fue el primer proyecto CDM validado y VAM registrado en el marco del Protocolo de Kyoto.

El primer proyecto está concebido como un proyecto de demostración comercial, pero la tecnología específica VAM utilizada en la mina es de naturaleza modular con la capacidad de agrupar unidades como instalaciones de operación individuales. Esto permitirá a la mina dimensionar el proyecto para procesar grandes volúmenes de VAM. Las unidades adicionales de VAM también podrían ser desplegadas a otras minas dentro del mismo grupo minero.

La instalación de VAM en la mina consta de una sola RTO con una capacidad de caudal de $62.500 \text{ Nm}^3/\text{hora}$ ($17 \text{ Nm}^3/\text{s}$) que es el 17% del flujo total de $375.000 \text{ Nm}^3/\text{s}$. La conexión con el ventilador de la mina es de naturaleza indirecta de modo que si se interrumpe la instalación de procesamiento VAM, todo el aire de ventilación va a la atmósfera. Una disposición importante de seguridad incluye una longitud suficiente del conducto de manera que en caso de emergencia (p.e., si se detecta una concentración demasiado elevada), hay tiempo para operar una compuerta de bypass permitiendo que el flujo pase a través del bypass. El RTO es capaz de la operación auto-sostenida de hasta 0,2% de metano, y es por lo tanto capaz de operar con éxito dentro de la gama de concentraciones de VAM producidas por la mina.

El proyecto comenzó a funcionar en octubre de 2008 y ha operado con una eficiencia de destrucción del 97%. La producción CER depende de la cantidad de metano destruido, y probablemente será entre 20.000 toneladas ($0,3\% \text{ CH}_4$) y 40.000 toneladas ($0,6\% \text{ CH}_4$) de dióxido de carbono equivalente por año para la unidad individual. Con

la oxidación sin llama, el sistema no genera emisiones de óxido nitroso. En momentos en que la concentración de metano está por debajo del nivel de auto-sostenimiento de 0,2%, el sistema será cerrado.

Una cantidad significativa de energía se puede recuperar desde el interior del RTO. La instalación en la mina está generando agua caliente para las duchas de los mineros y para la calefacción de los edificios cercanos. La recuperación de calor se logra mediante la aplicación de un intercambiador de calor de aire-agua instalado entre el RTO y su tubo de escape, recuperando la energía en el aire de escape caliente. La siguiente tabla compara cantidades de energía que se pueden recuperar en forma de agua a 70°C y 150°C, respectivamente, en diversas concentraciones de VAM.

Tabla 9.2 Cantidades de Energía que se puede Recuperar de una Instalación de Cubo de VAM bajo Varias Concentraciones de VAM

Resultado del intercambio secundario de calor	En 0,3% VAM	En 0,6% VAM	En 0,9% VAM
Agua a 70°C	1 MW	8 MW	15 MW
Agua a 150°C	- No es posible -	2 MW	10 MW

Estudio de Caso 7: VAM - Australia

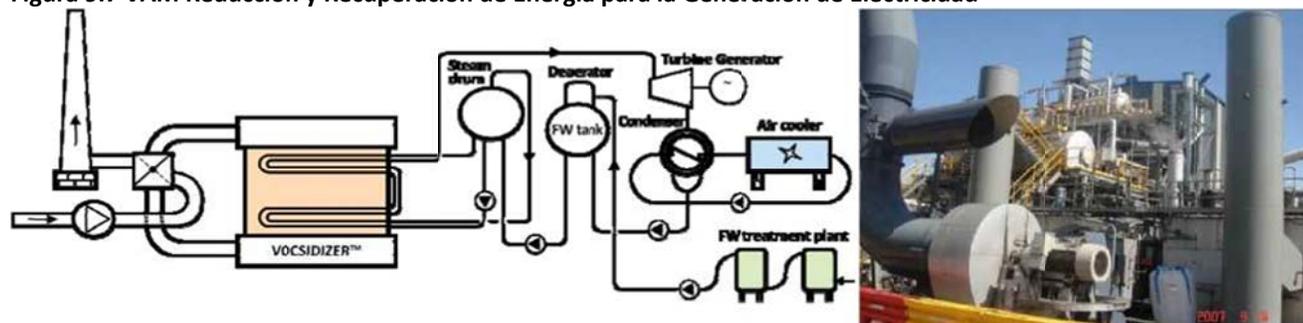
Reducción de las Emisiones de VAM, y la Utilización de la Energía Liberada en la Oxidación de VAM para Generar Electricidad.

Condiciones iniciales: La VAM de una mina de carbón importante en Nueva Gales del Sur, Australia se empezó a emitir a la atmósfera en concentraciones de alrededor de 0,9% CH₄. Además, el drenaje de gas con una concentración superior a 25% se estaba emitiendo a la atmósfera cerca de la chimenea de escape.

Problemas de Control del Gas: La utilización o reducción de VAM a gran escala no se había demostrado con anterioridad en ninguna parte del mundo debido a la naturaleza de la emisión con un flujo de aire muy grande y concentraciones de metano extremadamente diluidas. La utilización o reducción de VAM a pequeña escala se había aplicado en una larga demostración de 12 meses desde 2001 hasta 2002 en la mina de carbón de Appin de BHP Billiton en Australia. Allí, un RTO de pequeño tamaño había estado procesando la VAM y la utilización de la energía liberada para generar vapor -demostrando capacidad a largo plazo de la manipulación de los cambios naturales en las concentraciones de VAM y la recuperación eficiente de la energía a largo plazo.

Solución: Trabajar con el fabricante de la RTO utilizado en el Appin Colliery. La mina aplicó cuatro RTO integrados en el ciclo de vapor de una central eléctrica de vapor, llevando a la utilización eficaz de la RTO como hornos especiales que puedan funcionar con el combustible extremadamente diluido de VAM (Figura 9.7). La empresa minera ha recibido subvenciones sustanciales de fuentes gubernamentales para implementar el proyecto.

Figura 9.7 VAM Reducción y Recuperación de Energía para la Generación de Electricidad



(Cortesía de los Sistemas de MEGTEC y División Carbón Illawarra de BHP Billiton)

La planta de energía alimentada por VAM está diseñada para procesar 250.000 Nm³/hora (150.000 pies cúbicos estándar por minuto o SCFM) de aire de ventilación, que corresponde al 20% del volumen total disponible en el escape/chimenea de la mina. El diseño de la planta de energía se basa en la concentración media de VAM de 0,9%. Los RTO están diseñados para manejar las variaciones en las concentraciones de VAM, pero si la turbina de vapor es para operar continuamente a velocidad óptima, la energía en el aire de ventilación procesado necesita mantenerse relativamente estable en el punto de diseño. Por esta razón, el drenaje de gas del 25%, o una concentración mayor, se inyecta en el flujo de aire de ventilación antes del proceso de los ventiladores cuando la concentración de VAM está por debajo del punto de diseño, que en el caso de dicha mina es 0,9%.

La planta de energía a base de VAM estaba en pleno funcionamiento en abril de 2007. La disponibilidad de la planta de energía reportada en el primer año fiscal (julio de 2007 hasta junio 2008) fue del 96%, incluyendo dos paradas de mantenimiento programadas. Para el año 2009, toda la instalación se había generado más de 500.000 créditos de carbono (comercializados con régimen local de comercio de Nueva Gales del Sur) y más de 80.000 MWh de electricidad.

Para una planta de energía a partir de VAM exitosa:

- La concentración de VAM debería ser 0,7% o superior.
- El volumen de aire de ventilación disponible deberá ser como mínimo de 500.000 Nm³/h (300,000 scfm).
- Debe haber drenaje de gas (concentración mínima 25%) disponible para la inyección en el aire de ventilación para compensar el déficit en la concentración de VAM.
- Hacer que el agua esté disponible para fines de refrigeración.
- La ubicación debe estar cerca de la red de distribución de alta tensión eléctrica para la exportación de energía generada.

El enriquecimiento de la VAM utilizando metano drenado se discute en la Sección 6.3. El uso de metano de baja concentración se debe evitar debido al riesgo de explosión.

Apéndice 1. Comparación de Métodos de Drenaje de Gas

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Pre-drenaje mediante pozos de sondeo superficiales verticales	Consiste en la fracturación de una serie de vetas de carbón utilizando fluidos de alta presión bombeados a un pozo de sondeo en la superficie. Las fracturas se mantienen abiertas mediante la inyección de un material de soporte. Por lo tanto, el gas y otros líquidos, capaces de fluir a través de la veta de carbón, pueden entrar en el pozo de sondeo sin estar limitados por la resistencia del carbón circundante. Otros métodos de completamiento del pozo de sondeo también se han utilizado como una formación de cavidad sencilla en carbones de alta permeabilidad.	<ul style="list-style-type: none"> • El gas se elimina antes de ejecutar el minado. • Por lo general se obtiene gas de alta pureza de valor comercial. • La eliminación de gas independientemente de las actividades de minería subterránea. • Cuando se trabaja a través del carbón hidrofracturado, las condiciones del techo no suelen ser afectadas negativamente. • Potencial para convertir a pozos de sondeo de excavación después del minado. • Una oportunidad para reducir las emisiones de metano a la atmósfera (reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero) a partir de fuentes relacionadas con minas de carbón. 	<ul style="list-style-type: none"> • Completarlo es costoso. • Se necesitan ductos de recolección de superficie para facilitar la utilización. • Arreglos en la superficie pueden ser difíciles en términos de propiedad, acceso e intrusión visual. • Elimina el agua salina que a veces se produce. • La permeabilidad puede ser demasiado baja en vetas profundas. • Los costos de perforación pueden ser prohibitivos para las capas de carbón profundas. • Las vetas de carbón deben tener una alta permeabilidad natural de fractura. • Difícil para coordinar con el plan del minado. • El diseño de la terminación de un pozo de sondeo es una tarea especializada.
Pre-drenaje utilizando pozos de sondeo horizontales en la veta	Los pozos de sondeo grandes son hechos desde calzadas subterráneas, o la base de ejes, en las futuras áreas de trabajo del carbón, y el gas se extrae durante un período prolongado de tiempo para reducir el flujo del gas en los corredores de desarrollo y futuros tajos largos del lado expuesto del manto carbonífero.	<ul style="list-style-type: none"> • El gas se elimina antes de ejecutar el minado. • Se produce gas de alta pureza adecuado para su uso. • El drenaje del gas es independiente de las operaciones de extracción de carbón. • Menos costoso que perforar pozos de sondeo verticales de la superficie. • Aplicable en minas profundas sujeto a la permeabilidad del carbón. • Puede reducir el riesgo de explosión en las vetas que son propensas a la explosión. • Permite altas tasas de desarrollo en los corredores gaseosas. • Elimina el gas que no puede ser interceptado durante el post-drenaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se necesitan pozos de sondeo antes de ejecutar el minado. • La veta de carbón debe tener una permeabilidad natural moderada a alta para facilitar una reducción significativa en el contenido de gas de la veta durante un período de tiempo razonable. • Sólo reduce las emisiones de gases de la veta que se está trabajando, no de vetas adyacentes perturbadas por el minado de veta larga. • Las emisiones al agua, estabilidad del pozo de sondeo y el control direccional de la perforación pueden ser problemáticas en algunos lugares de la veta. • Se requiere un grupo entrenado de perforadores subterráneos.

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Pre-drenaje utilizando perforación direccional en la superficie de la veta	Un agujero vertical o inclinado se perfora, a partir de este se inicia la perforación direccional para entrar en la veta o vetas de destino que luego se seguirán durante un máximo de 1000m o más. Varias configuraciones complejas de perforación de veta se utilizan para maximizar el rendimiento y las más rentables son las que tienen en cuenta la dirección del estrés de los estratos.	<ul style="list-style-type: none"> • El gas se elimina antes de ejecutar el minado. • Se produce gas de alta pureza adecuado para su uso. • El drenaje del gas es independiente de las operaciones de extracción de carbón. • Recuperación más eficaz del gas que en los pozos de sondeo verticales frac. • Potencial re-uso de agujeros en las vetas superiores de la operación para el post-drenaje. • Ubicación de perforación flexible sin limitación por las características superficiales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo. • No todas las vetas de carbón son explorables. • Requiere arreglos de deshidratación para mantener su eficacia. • Requiere permeabilidad del carbón moderada. • Una falla en la perforación no es fácilmente corregible. • Los equipos de perforación especializados y habilidades requeridas.
Pre-drenaje de precaución utilizando hoyos cortos en el techo de los corredores	Los pozos de sondeo verticales pequeños se hacen en estratos del techo en los corredores para controlar las emisiones de Metano Húmedo desde las fracturas discretas en los estratos del techo de arenisca. El gas puede fluir desde una veta de carbón por encima y entrar en contacto con los estratos fracturados o puede ocurrir naturalmente en la piedra arenisca. Los pozos de sondeo de ángulo bajo a veces son perforados en el techo por delante de la cara para liberar el gas antes de ejecutar el minado para reducir los riesgos de ignición por fricción en los corredores mecanizados.	<ul style="list-style-type: none"> • Método de bajo costo para reducir los riesgos de ignición por fricción y control de las emisiones de Metano Húmedo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo flujo de gas. • Las conexiones del sistema de drenaje de Metano Húmedo se consideran necesarias.

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Post-drenaje mediante pozos de sondeo de medida cruzada</p>	<p>Los pozos de sondeo de sondeo se perforan en un ángulo por encima o por debajo del terraplén desde el retorno de la vía aérea de la del frente del veta larga y conectado a un sistema de extracción de Metano Húmedo. En algunas minas de veta larga a ser retiradas, un mejor rendimiento de drenaje ha sido obtenido de pozos de sondeo perforados detrás de la cara en comparación con los pre-perforados antes del lado expuesto del manto carbonífero. Acceso detrás de las caras de retiro es, sin embargo, a veces difícil de mantener.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es posible la alta captura antes del lado expuesto del manto carbonífero del veta larga. • Son practicables trabajos Profundos en la veta de carbón. • Distancia de perforación corta a la fuente primaria de gas. • El gas puede ser extraído y canalizado a un lugar de la superficie fija y común, para la explotación comercial o utilización en el sitio de la mina. • Eficaz en las vetas de carbón de baja permeabilidad. • Los pozos de sondeo del suelo pueden reducir el riesgo de emisiones repentinas de gas en funcionamiento susceptible. • Patrón de perforación flexible y fácil de modificar. • El método menos costoso de los métodos de drenaje de gas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencias difíciles de captura alta para sostener en las caras de retiro. • Para obtener la máxima eficacia, se necesita perforar detrás de la cara en los tajos largos de retiro. • La vida productiva de los pozos de sondeo es generalmente corta. • Se obtiene gas de media a baja pureza debido al aire de ventilación que ingresa al sistema de extracción de gas a través de roturas inducidas por el minado en los estratos. • Se requiere un equipo entrenado de perforación subterránea. • Infraestructura subterránea de tuberías necesaria para la superficie o en el lugar de descarga segura en un camino de retorno.
<p>Post-drenaje mediante pozos de sondeo de excavación de la superficie</p>	<p>Un pozo de sondeo de ventilación está perforado y entubado a poca distancia de la veta para ser trabajado. La carcasa en la parte inferior, la longitud productiva del pozo de sondeo es generalmente con ranuras. A veces, un pozo de sondeo se perfora y es entubado a 30 m por encima de la veta y luego se abre un agujero de diámetro más pequeño a través del horizonte de la veta que se está trabajado antes o después de pasarse el lado expuesto del manto carbonífero. Un método seguro y fiable de colocar el pozo de sondeo implica la perforación para intersectar la veta en la que se está trabajado y luego se junta la parte inferior de 30 m. Los pozos de sondeo se localizan generalmente hacia el lado del retorno de las conductos de ventilación de un veta larga.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Operaciones de drenaje de gas independientes de las operaciones subterráneas. • Capaz de ventilar flujos sustanciales de Metano Húmedo en el terraplén del veta larga. • Método probado y rentable en profundidades poco profundas hasta profundidades moderadas. • Se puede obtener gas de alta pureza a menudo. La vida productiva puede extenderse a varios meses. • Puede responder a los cambios en el plan del minado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso para vetas de carbón profundas. • Riesgo de entrada de agua en los principales acuíferos que recubren la veta de carbón. • No hay drenaje de gas directo de vetas en el suelo de trabajo. • No se pueden utilizar los pozos de sondeo de excavación hasta que el lado expuesto del manto carbonífero haya pasado a alguna distancia más allá del pozo de sondeo para evitar fugas de ventilación a la superficie. • La colección del gas para su explotación requiere una costosa infraestructura de gasoductos en la superficie. • Sólo se aplica cuando no existen restricciones de acceso de superficie. • Puede aprovechar y ventilar más gas del que sería liberado en las labores subterráneas.

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Post-drenaje utilizando agujeros largos horizontales direccionales perforados por encima o por debajo de la veta que se ha trabajado	Un número de pozos de sondeo se perforan utilizando técnicas de perforación direccional en un horizonte competente de 20 m a 30 m por encima o por debajo de la veta que se ha trabajado por toda la longitud proyectada de un panel del veta larga. Si no se encuentra disponible ningún sitio de perforación en el horizonte apropiado, el pozo de sondeo es dirigido al nivel requerido desde el horizonte minado.	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser útil en un modo de pre-drenaje antes del minado. • Potencialmente mayor eficiencia de captura que con medidas transversales pozos de sondeo perforados desde la veta minada. • Actividades de drenaje de gas separadas de las actividades de producción de carbón. • Se puede obtener gas de alta pureza. • Captura el gas que está cerca a los sitios de liberación iniciales cerca de la línea del corte vertical. 	<ul style="list-style-type: none"> • La perforación direccional es relativamente costosa. • Problemática en piedras y carbones blandos. • La reparación de pozos de sondeo derrumbados o dañados es difícil. • Inflexible a los cambios en las operaciones mineras. • Depende de la precisión y la velocidad de perforación para asegurar que un sistema satisfactorio esté en su lugar antes de que comience la producción de carbón. • Habilidades de perforación subterráneos especializadas y equipos necesarios.
Post-drenaje de las galerías subyacentes o yacentes	Una calzada es impulsada por encima o por debajo de la veta en la que se ha trabajado antes del minado. Los corredores son detenidos y se conectan al sistema de drenaje de Metano Húmedo a través de un tubo a través de la interrupción. El área de influencia del corredor de drenaje se puede aumentar mediante la perforación de pozos de sondeo de ventiladores antes de sellar.	<ul style="list-style-type: none"> • Puede complementarse con medidas transversales de perforación desde la galería. • Potencialmente alta eficiencia en la captura de gas que con pozos de sondeo de medidas transversales perforados desde el horizonte minado. • Actividades de drenaje de gas separadas de las actividades de producción de carbón. • Para reducir los costos de los corredores o antiguos trabajos existentes por encima o por debajo, a veces se puede utilizar el distrito de producción de carbón. • Generalmente puede obtenerse moderadamente gas de alta pureza. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso para conducir el acceso desde la veta que se ha trabajado al nivel de la galería. • Riesgo de incendio espontáneo en vetas de carbón de combustiones propensas a fugas de ventilación. • Costoso a menos que sean expulsados en una veta de carbón razonablemente gruesa. • Inflexible a los cambios en las operaciones mineras. • Puede ser ineficaz donde los estratos fuertes competentes están presentes entre la galería de drenaje y la cara de frente largo.
Post-drenaje utilizando perforación direccional de la superficie en la veta	Una aplicación relativamente nueva de una tecnología establecida para pozos de sondeo de dirección de la superficie en las vetas superiores una veta trabajado logrando una configuración similar a la perforación direccional desde el subsuelo para post-drenaje.	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere acceso subterráneo. • Potencialmente alcanzable mediante la reutilización de superficie para pozos de sondeo en la veta perforada para pre-drenaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo. • El re-uso de los pozos de sondeo de pre-drenaje podría ser peligroso durante el minado. • No reemplaza la necesidad de pozos de sondeo subterráneos de medida cruzada cerca de la cara para lograr un control efectivo del gas.

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Post-drenaje de cámaras o tubos en el sitio de excavación del veta larga</p>	<p>Una cámara está construida en el terraplén detrás de la cara y está conectada a través de suspensiones al sistema de drenaje de gas. Alternativamente, un tubo de drenaje de gas con un extremo abierto cerca de la línea de salida de la cara se extiende como los retiros cara.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce la concentración de metano en el retorno extremo de una cara de veta larga retiro. • La cantidad de gas que entra en el distrito es reducida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiende a lidiar con la captura y transmisión de las mezclas de gases inflamables que crean un riesgo inaceptable. • El drenaje de metano de alta capacidad es necesario debido a la pureza del gas de baja capturado que es ineficiente. • La eficiencia de captura es baja. • Bajo volumen de gas capturado.
<p>Post-drenaje de cortes transversales en el terraplén de veta larga (variante del método anterior)</p>	<p>Cortes transversales son expulsados de una calzada paralela al lado del distrito trabajado para interceptar el terraplén. El sistema de drenaje de gas está conectado a una tubería a través de una suspensión construida en el corte transversal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Puede reducir la necesidad de medidas de perforación transversales del drenaje de Metano Húmedo en algunas circunstancias. • Las actividades de drenaje de gas son independientes de las actividades de extracción de carbón. • Reduce las concentraciones de metano en el extremo de retorno de la cara del veta larga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede conducir a la captura y transmisión de las mezclas de gases inflamables que crean un riesgo inaceptable. • Alta capacidad de drenaje de metano es necesario debido a la baja pureza del gas capturado. • La eficiencia de captura en general es baja. • Sólo es posible cuando existe un camino adecuado a partir del cual se puedan desarrollar cortes transversales en el terraplén. • Costo de corte transversal adicional.

Referencias

- Black, D. & Aziz, N. (2009). *Reducing Coal Mine GHG Emissions Through Effective Gas Drainage and Utilisation*. 2009 Coal Operators Conference, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Illawarra Branch, pp. 217-224.
- CDM Executive Board. (2006). *Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane*. Meeting 28. Bonn, Germany: Clean Development Mechanism (CDM) Executive Board.
- Coward, H.F. (1928). *Explosibility of atmospheres behind stoppings*. *Trans Inst Min Engs*, 77, pp. 94 - 115.
- Creedy, D.P. (1986). Methods for the Evaluation of Seam Gas Content From Measurements on Coal Samples. *Mining Science and Technology*, Vol. 3, pp. 141 - 160. Amsterdam: Elsevier.
- Creedy, D.P. (2001). *Effective Design and Management of Firedamp Drainage*. *UK Health and Safety Executive, Contract Research Report 326/2001*, pp. 48, 1 annex, HSE Books.
- Creedy, D.P. & Phillips, H.R. (1997, July). *Methane Layering in Bord-and-Pillar Workings*. *Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC) Final Report. Project COL 409*. Johannesburg, South Africa: Safety in Mines Research Advisory Committee.
- Creedy, D.P., Saghafi, A., & Lama, R. (1997, April). *Gas Control in Underground Coal Mines: IEA Coal Research*. International Energy Agency (IEA) CR/91, pp. 120. London: The Clean Coal Centre.
- Department of Mineral and Energy Affairs. (1994, October). *Guidelines for a Code of Practice for the Ventilating of Mechanical Miner Sections in Coal Mines in terms of Section 34(1) of the Minerals Act 1991, Second Edition*, Ref. *GME16/2/1/20*.
- Diamond, W.P. & Levine, J.R. (1981). *Direct Method of Determination of the Gas Content of Coal: Procedures and Results. Report of Investigation 8515*. Pittsburgh, PA (U.S.): United States Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Diamond, W.P. & Schatzel, S.J. (1998). Measuring the Gas Content of Coal: A Review. *Int. Journ. of Coal Geology* 35, pp. 311 - 331. Amsterdam: Elsevier.
- ESMAP. (2007, July). *A Strategy for Coal Bed Methane (CBM) and Coal Mine Methane (CMM) Development and Utilization in China: Formal Report 326/07*, pp. 109. Washington, D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development (IBRD)/WORLD BANK Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP).
- Gaskell, P. (1989). *A Study of Sub-Surface Strata Movement Associated with Longwall Mining*. PhD. Thesis. University of Nottingham.
- IEA. (2009). *World Energy Outlook*. Paris, France: International Energy Agency (IEA).
- ILO. (2006). *Code of Practice on Safety & Health in Underground Coal Mines*. International Labour Office (ILO).
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. Geneva, Switzerland: International Panel on Climate Change (IPCC).
- Janas, H. F. & Ophale, M. (1986). Improvement of Gas Content Determination. *Glückauf-Forschh* 47, pp. 83 - 89. Essen, Germany.

Kissell, F. N. (2006). *Handbook for Methane Control in Mining*. Pittsburgh, PA (U.S.): Pittsburgh Research Laboratory, National Institute for Occupational Safety and Health.

Kissell, F. N, et al. (1973). *Direct Method of Determining Methane Content of Coalbeds for Ventilation Design*. Report of Investigation RI7767. U.S. Bureau of Mines.

Landman, G v R. (1992). *Ignition and initiation of coal mine explosions*. PhD. Thesis, University of the Witwatersrand, pp. 252.

Methane to Markets Partnership. (2008). *Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities*. Washington, D.C.: Methane to Markets Administrative Support Group.

Methane to Market Partnership. (2009, September). International Coal Mine Methane Projects Database. www.methanetomarkets.org.

MSHA (2009). *Injury experience in coal mining*, MSHA IR1341. Washington, D.C.: U.S. Department of Labor, Mine Safety & Health Administration (MSHA).

Moreby, R. (2009). Private communications.

SAWS (2009). China State Administration of Worker Safety.

Shi Su, et al. (2006, January). *Development of Two Case Studies on Mine Methane Capture and Utilization in China*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO).

University of Alberta. (2004). *Flare Research Project: Final Report 1996-2004*. Kostiuk, L., Johnson, M., and Thomas, G. Edmonton, Alberta, Canada: University of Alberta.

US EPA. (2006a). *Global Anthropogenic Emissions of Non-CO₂ Greenhouse Gases: 1990-2020*. EPA-430-R- 06-003. Washington, D.C. (U.S.): U.S. Environmental Protection Agency.

US EPA. (2006b). *Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases*. EPA-430-R-06-005. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.

von Schoenfeldt, H. (2008, January). "Advanced CMM and CBM Extraction Technologies." CBM Conference. Singapore.

Recursos Adicionales

Boxho, J., Stassen, P., Mücke, G., Noack, K., Jeger, C., Lescher, L., Browning, E., Dunmore, R., & Morris, I. (1980). *Firedamp Drainage Handbook for the Coalmining Industry in the European Community*, p. 415. Coal Directorate of the Commission of the European Communities. Essen: Verlag Glückauf GmbH.

Brandt, J. & Kunz, E. (2008). *Gas Drainage in High Efficiency Workings in German Coal Mines*. Presentation at the 21st World Mining Congress, session "Methane Treatment," pp. 41 - 50. Krakau.

Creedy, D.P. (1996). *Methane Prediction in Collieries. Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC) Final Report, Project COL 303*. Johannesburg, South Africa: Safety in Mines Research Advisory Committee.

ESMAP. (2008, December). *Economically, socially and environmentally sustainable coal mining sector in China: World Bank Report No. 47131*, pp. 258. Washington, D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development (IBRD)/WORLD BANK Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP).

Hinderfeld, G. (1985). State and Perspectives of Gas Drainage. *Bergbau 2*, pp. 7. Essen, Germany.

Kravits, S. J & Li, J, (1995, March). Innovative in-mine gas recovery techniques implemented by Resource Enterprises. In: *International Symposium-Cum-Workshop on Management Control of High Gas Emission and Outbursts*, pp. 523 - 532. Wollongong, NSW, Australia.

Lama, R.D. & Bodziony, J. (1998). Management of outburst in underground coal mines. *Int. Journ. of Coal Geology 35*, pp. 83 - 115, Amsterdam: Elsevier.

Lunorzewski, L .W. (1998). Gas Emission Prediction and Recovery in Underground Coal Mines. *Int. Journ. of Coal Geology 35*, pp. 117 - 145, Amsterdam: Elsevier.

Mine ventilation handbook, Mine Ventilation Society of South Africa.

Moore, S., Freund, P., Riemer, P., & Smith, A. (1998, June). *Abatement of Methane Emissions*. Paris, France: International Energy Agency (IEA) Greenhouse Gas R&D Programme.

Mutmansky, J. M. & Thakur, P.C. (1999). *Guidebook on Coalbed Methane Drainage for Underground Coal Mines*, pp. 46.

Noack, K. (1998). Control of gas emissions in underground coal mines. *Int. Journ. Of Coal Geology 35*, pp. 57 - 82. Amsterdam: Elsevier.

Schlotte, W. & Brandt, J. (2003). *50 Years of Coal Research - Gas Emissions, Ventilation and Climate. Glückauf 139*, pp. 402 - 408. Essen, Germany.

Sdunowski, R. & Brandt, J. (2007). Optimizing the Gas Drainage in High Performance Longwalls. *Glückauf 143*, pp. 528 - 534. Essen, Germany.

Skiba, J. (2009, November). Central Mining Institute of Katowice. Personal communication.

Somers, M.J. & Schultz, H.L. (2008). *Thermal Oxidation of Coal Mine Ventilation Air Methane*. 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium 2008, Reno, NV (U.S.): Wallace.

Thakur, P.C. (1997). Methane Drainage from Gassy Mines - A Global Review. *Proc. Of the 6th Int. Mine Vent. Congr.* pp. 415 - 422. Pittsburgh, PA (U.S.).

US EPA. (2003, July). *Assessment of the Worldwide Market Potential for Oxidizing Coal Mine Ventilation Air Methane*.

EPA-430-R-03-002. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.

www.epa.gov/cmop/resources/index.html

US EPA. (2009, July). *Coal Mine Methane Finance Guide*. EPA-400-D-09-001. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.

US EPA. (2009, July). *Coal Mine Methane Recovery: A Primer*. EPA-430-R-09-013. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.

US EPA. (2008, January). *Upgrading Drained Coal Mine Methane to Pipeline Quality: A Report on the Commercial Status of System*