

# Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para el procesamiento de carbón

## Introducción

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad son documentos de referencia técnica que contienen ejemplos generales y específicos de la práctica internacional recomendada para la industria en cuestión<sup>1</sup>. Cuando uno o más miembros del Grupo del Banco Mundial participan en un proyecto, estas Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad se aplican con arreglo a los requisitos de sus respectivas políticas y normas. Las presentes Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para este sector de la industria deben usarse junto con el documento que contiene las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**, en el que se ofrece orientación a los usuarios respecto de cuestiones generales sobre la materia que pueden aplicarse potencialmente a todos los sectores industriales. Los proyectos más complejos podrían requerir el uso de múltiples guías para distintos sectores de la industria. Para una lista completa de guías sobre los distintos sectores de la industria, visitar:

<http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>

<sup>1</sup> Definida como el ejercicio de la aptitud profesional, la diligencia, la prudencia y la previsión que podrían esperarse razonablemente de profesionales idóneos y con experiencia que realizan el mismo tipo de actividades en circunstancias iguales o semejantes en el ámbito mundial. Las circunstancias que los profesionales idóneos y con experiencia pueden encontrar al evaluar el amplio espectro de técnicas de prevención y control de la contaminación a disposición de un proyecto pueden incluir, sin que la mención sea limitativa, diversos grados de degradación ambiental y de capacidad de asimilación del medio ambiente, así como diversos niveles de factibilidad financiera y técnica.

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad contienen los niveles y los indicadores de desempeño que generalmente pueden lograrse en instalaciones nuevas, con la tecnología existente y a costos razonables. En lo que respecta a la posibilidad de aplicar estas guías a instalaciones ya existentes, podría ser necesario establecer metas específicas del lugar así como un calendario adecuado para alcanzarlas. La aplicación de las guías debe adaptarse a los peligros y riesgos establecidos para cada proyecto sobre la base de los resultados de una evaluación ambiental en la que se tengan en cuenta las variables específicas del emplazamiento, tales como las circunstancias del país receptor, la capacidad de asimilación del medio ambiente y otros factores relativos al proyecto. La decisión de aplicar recomendaciones técnicas específicas debe basarse en la opinión profesional de personas idóneas y con experiencia. En los casos en que el país receptor tenga reglamentaciones diferentes a los niveles e indicadores presentados en las guías, los proyectos deben alcanzar los que sean más rigurosos. Cuando, en vista de las circunstancias específicas de cada proyecto, se considere necesario aplicar medidas o niveles menos exigentes que aquellos proporcionados por estas Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad, será necesario aportar una justificación exhaustiva y detallada de las alternativas propuestas como parte de la evaluación ambiental en un sector concreto. Esta justificación debería demostrar que los niveles de desempeño escogidos garantizan la protección de la salud y el medio ambiente.

## Aplicabilidad

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para el procesamiento del carbón cubren el procesamiento del carbón destinado a transformarlo en químicos gaseosos o líquidos, incluidos los combustibles. Son aplicables a la producción de gas sintético (SynGas) mediante distintos procesos de gasificación y su transformación posterior en hidrocarburos líquidos (síntesis de Fischer-Tropsch), metanol o productos líquidos oxigenados, así como a la hidrogenación directa del carbón para obtener hidrocarburos líquidos.

Este documento está dividido en las siguientes secciones:

- Sección 1.0: Manejo e impactos específicos de la industria
- Sección 2.0: Indicadores y seguimiento del desempeño
- Sección 3.0: Referencias y fuentes adicionales
- Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

## 1.0 Manejo e impactos específicos de la industria

La siguiente sección contiene una síntesis de las cuestiones relativas al medio ambiente, la salud y la seguridad asociadas con el procesamiento del carbón, así como recomendaciones para su manejo. Por otra parte, en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones sobre el manejo de las cuestiones de este tipo que son comunes a la mayoría de los grandes establecimientos industriales durante las etapas de construcción y de desmantelamiento.

### 1.1 Medio ambiente

Los problemas ambientales que pueden plantearse en los proyectos de procesamiento del carbón incluyen:

- Emisiones al aire
- Aguas residuales
- Materiales peligrosos
- Residuos
- Ruido

#### Emisiones al aire

##### *Partículas y emisiones gaseosas fugitivas*

Las principales fuentes de emisiones en las instalaciones de procesamiento del carbón consisten en fuentes fugitivas de materia particulada (MP), compuestos orgánicos volátiles (COV), dióxido de carbono (CO) e hidrógeno. Las actividades de transporte, almacenamiento y preparación del carbón pueden contribuir de forma significativa a las emisiones fugitivas de MP de carbón. Entre las recomendaciones para prevenir y controlar las emisiones fugitivas de MP de carbón se incluyen:

- Diseñar la distribución de la planta o instalación para facilitar el manejo de las emisiones y reducir el número de puntos de transferencia del carbón;
- Emplear equipos de carga y descarga para minimizar la altura de la caída del carbón hasta las pilas de carbón;
- Emplear sistemas de pulverización del agua y/o revestimientos de polímeros para reducir la formación de polvo fugitivo durante el almacenamiento del carbón (por ejemplo, en las pilas de carbón) siempre que sea factible y dependiendo de los requisitos de calidad del carbón;
- Captar las emisiones de polvo de carbón procedentes de las actividades de trituración / clasificación, trasladándolas a una cámara de filtros u otros sistemas de control de partículas;
- Usar colectores centrífugos, seguidos de lavadores acuosos venturi de alta eficacia, para los secadores térmicos;
- Usar colectores centrífugos, seguidos de la filtración textil, para los sistemas de limpieza neumática del carbón;
- Utilizar transportadores cerrados en combinación con los equipos de extracción y filtración en los puntos de transferencia de los transportadores; y
- Eliminar el polvo durante el procesamiento (es decir, la trituración, clasificación y secado) y traslado (sistemas transportadores) del carbón empleando, por ejemplo, sistemas de pulverización de los productos junto con la recogida de agua y, posteriormente, tratar o reutilizar el agua recogida.

Las emisiones fugitivas de otros contaminantes del aire incluyen las fugas de compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO) e hidrógeno procedentes de distintos procesos, como son las unidades de producción de gas sintético; el almacenamiento de carbón; las unidades de

síntesis del metanol y Fischer-Tropsch (F-T); las unidades de renovación del producto; y los sistemas diseñados para aguas residuales oleosas e instalaciones de tratamiento de aguas residuales, especialmente estanques de compensación y/o separadores aceite / agua. Las emisiones fugitivas pueden deberse a fugas producidas en distintas fuentes, como tuberías, válvulas, conexiones, bridas, juntas, líneas abiertas, pérdidas durante el almacenamiento y funcionamiento en los tanques de almacenamiento de techo fijo y flotante y en las bombas de sellado, sistemas de transporte de gas, cierres de los compresores, válvulas de seguridad, fosos / recintos abiertos, y carga y descarga de hidrocarburos.

Se recomiendan las siguientes medidas para prevenir y controlar las fuentes fugitivas de contaminantes del aire:

- Reducir las emisiones fugitivas en tuberías, válvulas, juntas, tanques y otros componentes de la infraestructura, supervisando periódicamente los mismos con sistemas de detección de vapor y manteniendo o sustituyendo los componentes necesarios en orden de prioridad;
- Mantener una presión estable en los tanques y en el espacio de vapor:
  - Coordinar los calendarios de llenado y retirada e implementar la compensación de vapor entre los tanques (un proceso mediante el cual el vapor desplazado durante las actividades de llenado se transfiere al espacio de vapor del tanque vaciado o de otro contenedor antes de proceder a su recuperación);
  - Emplear pintura blanca o de otros colores con una baja absorción de calor para revestir el exterior de los tanques de almacenamiento de los destilados más ligeros (como la gasolina, el etanol o el metanol) para reducir la absorción de calor. Debe estudiarse la

posibilidad de que se produzcan impactos visuales a causa del reflejo de la luz en los tanques;

- Seleccionar, en función de la capacidad de almacenamiento del tanque y de la presión de vapor de los materiales almacenados, un tipo específico de tanque que minimice las pérdidas durante el almacenamiento y funcionamiento, cumpliendo con las normas de diseño aceptadas internacionalmente<sup>2</sup>;
- En los tanques de almacenamiento de techo fijo, minimizar las pérdidas durante el almacenamiento y el funcionamiento instalando techos flotantes internos y cierres<sup>3</sup>;
- En los tanques de techo flotante, diseñar e instalar cubiertas, accesorios y juntas en los bordes de acuerdo con las normas internacionales destinadas a minimizar las pérdidas por evaporación;<sup>4</sup>
- Estudiar la posibilidad de utilizar sistemas de abastecimiento y recuperación, mangueras de recuperación de vapor y camiones / vagones / depósitos estancos a los vapores durante la carga y descarga de los vehículos de transporte;

<sup>2</sup> Por ejemplo, según el API Standard 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage (1998), los tanques nuevos, modificados o reestructurados con una capacidad mayor o equivalente a 40.000 galones y que almacenen líquidos con una presión de vapor superior o equivalente a 0,75 psi e inferior a 11,1 psi, o con una capacidad mayor o igual a 20.000 galones y que almacenen líquidos con una presión de vapor superior o igual a 4 psi e inferior a 11,1 psi deben equiparse con: un techo fijo y un techo flotante interno con una junta básica de zapata mecánica que impida la fuga de líquidos; o bien con un techo flotante externo con una junta básica de zapata mecánica que impida la fuga de líquidos y una junta secundaria continua instalada sobre el anillo del techo. Ambas juntas deben cumplir con ciertos requisitos mínimos de recorte y juntas de estanqueidad en los accesorios del techo; o con un sistema cerrado de ventilación y un control eficaz de dispositivos del 95%.

<sup>3</sup> El acceso de los trabajadores a los tanques debe respetar los procedimientos de entrada autorizada en espacios cerrados descritos en las guías generales sobre MASS.

<sup>4</sup> Los ejemplos incluyen: API Standard 620: Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks (2002); API Standard 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage (1998) y la norma de la Unión Europea (UE) 12285-2:2005. Workshop fabricated steel tanks for the aboveground storage of flammable and non-flammable water polluting liquids (2005).

- Utilizar sistemas de llenado de camiones / vehículos ferroviarios de carga inferior para minimizar las emisiones de vapor; y
- Cuando las emisiones de vapor puedan contribuir o provocar niveles de calidad del aire ambiente que excedan la normativa sanitaria, estudiar la posibilidad de instalar controles secundarios de emisiones, tales como unidades de condensación y recuperación de vapor, catalizadores de oxidación, medios de adsorción de gas, refrigeración o unidades de absorción de aceite secante.

### *Gases efecto invernadero (GEI)*

La producción de gas sintético puede generar un volumen significativo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), especialmente durante el proceso del gas de agua, además de todos los procesos relacionados con la combustión (por ejemplo, la producción de electricidad y la incineración de subproductos o su uso en la cogeneración). Las recomendaciones para la conservación de energía y el manejo de las emisiones de gases efecto invernadero son específicas del proyecto y el emplazamiento, pero pueden incluir algunas de las descritas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**. En las instalaciones integradas, los operadores deben adoptar un enfoque global de toda la planta a la hora de seleccionar las tecnologías de proceso y de servicio.

### *Materia particulada, aceites pesados y metales pesados*

Las actividades de preparación del carbón (por ejemplo, el uso de secadores), la gasificación del carbón (por ejemplo, alimentación y eliminación de cenizas) y los procesos de licuefacción del carbón pueden generar fuentes puntuales de polvo y aceites pesados (alquitranes). Se seleccionará la tecnología más adecuada para minimizar las emisiones de partículas. Los metales pesados presentes en el carbón pueden

liberarse como emisiones al aire procedentes del proceso de gasificación del carbón.

La mayoría de los metales pesados pueden eliminarse utilizando un depurador húmedo. Es posible que sea necesario emplear una tecnología de absorción para eliminar el mercurio presente en el carbón con elevado contenido en mercurio. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen recomendaciones para controlar la materia particulada.

### *Gases ácidos y amoníaco*

Las emisiones de gas residual procedentes de la chimenea de la unidad Claus de recuperación de azufre consisten en una mezcla de gases inertes con dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y constituyen una fuente significativa de emisiones al aire derivadas del procesamiento del carbón. El proceso de gasificación puede generar también contaminantes como el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), el sulfuro de carbonilo (COS), el disulfuro de carbono (CS<sub>2</sub>), el monóxido de carbono (CO), el amoníaco (NH<sub>3</sub>) y el cianuro de hidrógeno (HCN). Por lo general, estos gases suelen ser altamente recuperables gracias a la purificación del gas sintético (>99 por ciento). Los procesos de licuefacción, incluidas las operaciones en los tanques de mezclado, pueden provocar vertidos de otros gases ácidos y sustancias orgánicas volátiles. Las estrategias recomendadas para manejar las emisiones de gas ácido y amoníaco incluyen:

- La instalación de un proceso de recuperación del azufre para evitar las emisiones de H<sub>2</sub>S (por ejemplo, Claus);
- Ventilar los depósitos de mezclado hacia el suministro de aire de combustión destinado a la generación de electricidad o calor;

- Instalar procesos de lavado, ya sean lavadores de óxido-reducción de gases de cola o lavadores Venturi, para reducir las emisiones de dióxido de azufre;
- Cuando se dispone de dispositivos de incineración destinados a la eliminación del azufre, operar la incineradora a temperaturas de 650 grados centígrados (°C) o más con una adecuada relación aire-combustible para combustionar totalmente el H<sub>2</sub>S; y
- Dotar las chimeneas de accesos para manejar los dispositivos de control (por ejemplo, para supervisar las emisiones de SO<sub>2</sub> generadas por el proceso Claus y las incineradoras).

### *Gases de escape*

La combustión de gas sintético o gasóleo para generar electricidad y calor en las instalaciones de procesamiento del carbón constituye una fuente significativa de emisiones a la atmósfera, incluyendo CO<sub>2</sub>, óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), SO<sub>2</sub> y, en caso de producirse un fallo del quemador, monóxido de carbono (CO).

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones para el manejo de pequeños procesos de combustión diseñados para suministrar potencia eléctrica o mecánica, vapor, calor, cualquier combinación de las anteriores, independientemente del tipo de combustible empleado, con una capacidad calorífica total de 50 megavatios térmicos (MWth). Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad para energía térmica** contienen orientaciones aplicables a procesos con una capacidad superior a los 50 MWth.

Las emisiones vinculadas al funcionamiento de fuentes eléctricas deben minimizarse mediante la adopción de una estrategia combinada que contemple la reducción de la

demanda de energía, el uso de combustibles más limpios y la aplicación de los controles de emisiones necesarios. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen recomendaciones sobre eficiencia energética.

### *Venteeo y combustión*

El venteeo y la combustión son medidas operativas y de seguridad importantes en las instalaciones de procesamiento del carbón destinadas a garantizar la segura eliminación del gas en caso de emergencia, un fallo eléctrico o del sistema y cualquier condición anómala en la planta. Las materias primas en estado puro y los gases combustibles derivados también se eliminan mediante el venteeo y la combustión. El exceso de gas no debe ventearse, sino enviarse a un sistema eficaz de combustión de gas para su eliminación.

Las recomendaciones para minimizar el venteeo y la combustión de gas incluyen:

- Optimizar los controles de planta para aumentar los índices de conversión de la reacción;
- Emplear materias primas en estado puro y gases combustibles derivados en la generación de electricidad o recuperación de calor, siempre que sea posible;
- Proporcionar sistemas complementarios para maximizar la fiabilidad de la planta; y
- Ubicar los sistemas de combustión a una distancia segura de los recintos destinados al personal y de las zonas residenciales, garantizando el correcto mantenimiento de los sistemas de combustión para lograr su máxima eficacia.

En caso de que la combustión de la corriente de gas no sea apropiada, puede recurrirse al venteeo de emergencia en ciertas condiciones. Para analizar tales situaciones se utilizarán procedimientos ordinarios de evaluación de los riesgos. Se

documentará exhaustivamente la justificación para no emplear un sistema de combustión de gas antes de proceder al venteo de gas de emergencia.

## Aguas residuales

### *Aguas residuales de procesos industriales*

Las aguas residuales de proceso pueden contaminarse con hidrocarburos, amoníaco y aminas, compuestos oxigenados, ácidos, sales inorgánicas y restos de iones de metales pesados. Las prácticas recomendadas para el manejo de las aguas residuales de proceso incluyen:

- Prevenir los vertidos accidentales de líquidos mediante la inspección y mantenimiento de los sistemas de almacenamiento y transporte, incluyendo las cajas de relleno donde se guardan las bombas y válvulas y otros focos potenciales de fugas, así como la implementación de planes de respuesta ante vertidos;
- Proporcionar una capacidad suficiente para diluir los fluidos de proceso y maximizar así la recuperación en el proceso y evitar la descarga masiva de líquidos de proceso en el sistema de drenaje de las aguas oleosas; y
- Diseñar y construir cuencas de contención de almacenamiento de aguas residuales y sustancias peligrosas con superficies impermeables para evitar la infiltración de aguas contaminadas en el suelo y en las aguas subterráneas.

Las disposiciones específicamente diseñadas para manejar las corrientes individuales de aguas residuales incluyen, entre otras:

- La recogida de los vertidos de aminas procedentes del sistema de eliminación alcalina del dióxido de carbono aguas abajo de la Unidad de Gasificación en un sistema

de drenaje dedicado y cerrado y, una vez completada la filtración, su reciclado para uso nuevamente en el proceso;

- Los efluentes de la columna de agotamiento de la Unidad de Síntesis F-T, que contiene hidrocarburos disueltos y compuestos oxigenados (principalmente alcoholes y ácidos orgánicos) y mínimas cantidades de cetonas, deben recircularse dentro de la Unidad de Síntesis F-T para recuperar los hidrocarburos y los compuestos oxigenados en otra columna de agotamiento;
- Los efluentes ácidos y cáusticos resultantes de la preparación del agua desmineralizada, que a su vez depende de la calidad del suministro de agua bruta en el proceso, deben neutralizarse antes de su vertido en el sistema de tratamiento de aguas residuales de las instalaciones;
- El agua de purga procedente de los sistemas de generación de vapor y torres de refrigeración debe enfriarse antes proceder a su descarga. El agua de refrigeración que contiene biocidas y otros aditivos también podría requerir un ajuste de la fluencia o el tratamiento en la planta de tratamiento de aguas residuales de las instalaciones antes de su descarga; y
- La planta de tratamiento de aguas residuales de las instalaciones debe tratar el agua contaminada por hidrocarburos procedente de las actividades de limpieza programadas durante la puesta en orden de las instalaciones (las labores de limpieza se llevan normalmente a cabo una vez al año y se prolongan unas semanas en el tiempo), los efluentes oleosos originados en las fugas del proceso y los efluentes con metales pesados procedentes de lechos fijos y fluidizados.

### *Tratamiento de aguas residuales de procesos*

Las técnicas empleadas para tratar las aguas residuales de proceso en este sector incluyen la clasificación por origen y el

pretratamiento de corrientes de aguas residuales concentradas. Las fases del tratamiento de aguas residuales suelen incluir: filtros de grasas, equipos colectores de flotación, flotación por presurización-despresurización o separadores de agua/aceite para separar los aceites de los sólidos flotantes; filtración por separación de sólidos filtrables; equalización de flujo y carga; sedimentación para la reducción de sólidos en suspensión utilizando clarificadores; tratamiento biológico, normalmente aeróbico, para reducir las sustancias orgánicas solubles (DOB); eliminación de nutrientes químicos o biológicos para la reducción de nitrógeno y fósforo; cloración de los efluentes siempre que se requiera la desinfección; drenaje y eliminación de residuos en vertederos designados para residuos peligrosos. Es posible que se precisen controles de ingeniería adicionales para (i) el confinamiento y el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles extraídos en las operaciones de diversas unidades en el sistema de tratamiento de aguas residuales; (ii) la eliminación avanzada de metales empleando filtros de membrana y otras técnicas de tratamiento físico/químico, (iii) eliminación de compuestos orgánicos recalcitrantes, cianuro y DQO no biodegradable empleando carbón activo u oxidación química avanzada; (iii) la reducción de la toxicidad en los efluentes empleando la tecnología adecuada (por ejemplo, ósmosis inversa, intercambio iónico, carbón activado, etc.) y (iv) el confinamiento y la neutralización de olores molestos.

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** explican el manejo de aguas residuales industriales y ofrecen ejemplos de enfoques para su tratamiento. El empleo de estas tecnologías y técnicas recomendadas para el manejo de aguas residuales debería permitir que las instalaciones cumplieren los valores para la descarga de aguas residuales que se indican en el cuadro correspondiente de la Sección 2 del presente documento para la industria. Las recomendaciones para reducir el consumo de agua, especialmente en aquellos

sitios en que pueda ser un recurso natural escaso, se analizan en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

### *Consumo de agua y otras corrientes de aguas residuales*

En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se dan orientaciones sobre el manejo de aguas residuales no contaminadas procedentes de operaciones de servicios públicos, aguas pluviales no contaminadas y aguas de alcantarillado. Las corrientes contaminadas deberían desviarse hacia el sistema de tratamiento de aguas residuales de procesos industriales. A continuación se detallan guías específicas adicionales.

Aguas pluviales: Las aguas pluviales pueden contaminarse como resultado de los vertidos de líquidos de proceso y la migración de filtraciones procedentes de las zonas de almacenamiento del carbón y que contienen hidrocarburos y metales pesados. Las recomendaciones específicas para el sector incluyen:

- Pavimentar las zonas dedicadas al proceso, segregar las aguas pluviales contaminadas de las no contaminadas e implementar planes de control de vertidos. Canalizar las aguas pluviales desde las zonas de proceso hasta la unidad de tratamiento de aguas residuales; y
- Diseñar y ubicar las instalaciones de almacenamiento del carbón y sistemas asociados para la recogida de lixiviados para evitar su impacto en los recursos terrestres e hídricos. Las zonas de pilas de carbón deben pavimentarse para separar las aguas potencialmente contaminadas, que se transferirán a la unidad de tratamiento de aguas residuales en las instalaciones.

**Agua de refrigeración:** El agua de refrigeración puede aumentar los índices de consumo del agua, así como el vertido de aguas a elevadas temperaturas, biocidas residuales y residuos procedentes de otros agentes antiincrustantes empleados en el sistema de refrigeración. Las estrategias recomendadas para el manejo de residuos procedentes de la refrigeración incluyen:

- La adopción de las medidas de conservación del agua para sistemas de refrigeración en plantas descritas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**;
- El uso de métodos de recuperación del calor (así como mejoras en la eficacia energética) y otros métodos de refrigeración diseñados para reducir la temperatura del agua caliente antes de su descarga, garantizando así que la temperatura del agua de descarga no resulte en un incremento de la temperatura ambiente superior a los 3°C en el límite de una zona determinada científicamente con base en la calidad del agua ambiente, uso de las aguas receptoras, capacidad de asimilación, etc.;
- Minimizar el uso de sustancias químicas antiincrustantes y anticorrosivas garantizando una correcta profundidad de la toma de agua y el uso de filtros; seleccionar las opciones menos peligrosas en términos de toxicidad, biodegradabilidad, biodisponibilidad y posible bioacumulación; y dosificar según los requisitos normativos locales y las recomendaciones del fabricante; y
- Analizar los biocidas residuales y otros contaminantes preocupantes para comprobar la necesidad de efectuar ajustes en la dosificación o tratar el agua de refrigeración antes de proceder a su descarga.

**Agua de pruebas hidrostáticas:** Las pruebas hidrostáticas a las que se someten equipos y tuberías miden la presión con agua (por lo general, agua bruta) para verificar su integridad y las

fugas existentes. Pueden añadirse aditivos químicos, normalmente anticorrosivos, un destructor de oxígeno y un colorante. Se implementarán las siguientes medidas de prevención y control de la contaminación para el manejo de las aguas de pruebas hidrostáticas:

- Reutilizar el agua en múltiples pruebas para conservarla y minimizar las descargas de efluentes potencialmente contaminados;
- Reducir el uso de sustancias anticorrosivas y otros agentes químicos minimizando el tiempo durante el cual el agua de prueba permanece dentro de los equipos o tuberías; y
- Elegir las opciones menos peligrosas en términos de toxicidad, biodegradabilidad, biodisponibilidad y bioacumulación potencial, dosificando según los requisitos de la normativa local y las recomendaciones del fabricante.

Cuando la descarga de aguas de pruebas hidrostáticas en el mar o en aguas superficiales sea la única opción viable, debe elaborarse un plan de eliminación de aguas de pruebas hidrostáticas que tenga en cuenta la ubicación y el ritmo de descarga, el uso y dispersión de sustancias químicas, el riesgo ambiental y el seguimiento necesario. Se evitará el vertido de aguas de pruebas hidrostáticas en aguas costeras superficiales.

### *Materiales peligrosos*

Las instalaciones de procesamiento del carbón generan cantidades considerables de materiales peligrosos, incluidos los productos intermedios/finales y los subproductos. La manipulación, almacenamiento y transporte de estos materiales peligrosos debe gestionarse adecuadamente para evitar o minimizar posibles impactos ambientales. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se formulan recomendaciones sobre el manejo de materiales

peligrosos, incluida su manipulación, almacenamiento y transporte.

## Residuos

Entre los residuos no peligrosos se incluyen la ceniza de fondo de horno del carbón, la escoria, las cenizas volátiles y los lodos de almacenamiento del carbón. La ceniza y la escoria depositadas<sup>5</sup> son subproductos bastos, granulados e incombustibles recogidos del fondo de los gasificadores. También se recogen las cenizas volátiles originadas en el reactor. La cantidad de escoria y ceniza generada suele ser considerable y depende de la calidad del carbón empleado en la planta. El estado físico de la ceniza suele estar relacionado con el proceso de gasificación.

Los residuos potencialmente peligrosos incluyen, entre otros, catalizadores usados, aceite, disolventes, soluciones reactivas, filtros, lechos de filtrado saturados, fracciones pesadas procedentes de la purificación de síntesis, contenedores usados, trapos aceitosos, esencias minerales, edulcorantes usados, aminos empleadas en la eliminación del CO<sub>2</sub>, filtros de carbón activado y lodos oleosos procedentes de los separadores aceite agua, así como fluidos gastados o usados en operaciones y mantenimiento, como son aceites y líquidos de pruebas, y lodos de tratamiento de las aguas residuales.

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen recomendaciones generales para el manejo de residuos peligrosos y no peligrosos. Las prácticas de manejo de los residuos específicos del sector incluyen:

### *Ceniza depositada, escoria y cenizas volátiles de carbón*

Dependiendo de su toxicidad y radiactividad, la ceniza depositada, la escoria y las cenizas volátiles del carbón también podrán reciclarse con base en las opciones comercial y técnicamente viables a disposición. Los métodos recomendados para su reciclado son:

- Utilizar la ceniza depositada como agregado en bloques de hormigón ligero, como materia prima en la producción de cemento Portland, como agregado para la capa y subcapa de base de carreteras, o como material de relleno agregado fino en los pavimentos de asfalto y relleno fluido;
- Utilizar la escoria para el granallado, como gránulos para el recubrimiento de tejas, para el control de nieve y hielo, como agregado en los pavimentos de asfalto, relleno estructural y aplicaciones de capa y subcapa de base de carreteras;
- Utilizar las cenizas volátiles en materiales de construcción que precisen materiales puzolánicos.

En caso de no poder reciclar estos materiales debido a sus propiedades tóxicas / radioactivas o a la ausencia de opciones comercial o técnicamente viables, se eliminarán en un vertedero autorizado diseñado y operado de acuerdo con las buenas prácticas internacionales de la industria<sup>6</sup>.

### *Lodos de almacenamiento del carbón*

Los lodos de polvo de carbón generados durante el almacenamiento y preparación del carbón deben secarse y reutilizarse o reciclarse siempre que sea factible. Las posibles opciones son la reutilización como materia prima en el proceso de gasificación, dependiendo de la tecnología elegida para ello. La manipulación, el transporte y el manejo dentro y fuera del

<sup>5</sup> Recycling Materials Resource Center (RMRC), Coal Bottom Ash/Boiler Slag, disponible en <http://www.rmrc.unh.edu/Partners/UserGuide/cbabs1.htm>

<sup>6</sup> Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad para las instalaciones de manejo de residuos** contienen orientaciones adicionales relativas a la eliminación de residuos industriales peligrosos e inoocuos.

recinto de todos los lodos deben realizarse según las recomendaciones contenidas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** para el manejo de los residuos industriales no peligrosos.

### *Catalizadores usados*

Los catalizadores usados se obtienen al sustituir los lechos de catalizador durante las puestas a punto programadas para la desulfuración del gas sintético, el proceso de reacción Fischer – Tropsch (F-T), la isomerización, el craqueo catalítico y las síntesis del metanol. Los catalizadores usados pueden contener cinc, níquel, hierro, cobalto, platino, paladio y cobre, dependiendo del proceso concreto en el que intervengan.

Entre las estrategias recomendadas para el manejo de catalizadores usados se encuentran:

- Una adecuada gestión de catalizadores usados in situ incluirá la inmersión en agua de los catalizadores pirofóricos usados durante su almacenamiento temporal y hasta su transporte al lugar donde se realizará el tratamiento definitivo para evitar reacciones exotérmicas no controladas;
- Devolución al fabricante para su regeneración; y
- La gestión externa de los catalizadores usados por parte de empresas especializadas incluye la recuperación de metales pesados o preciosos mediante procesos de recuperación y reciclaje (siempre que sea posible) o mediante su manejo y eliminación de acuerdo con las recomendaciones de gestión de residuos peligrosos e inoocuos descritas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**. Los catalizadores que puedan contener platino o paladio deben enviarse a un centro de recuperación de metales nobles;

### *Fracciones pesadas*

Las fracciones pesadas originadas en la sección de purificación de la Unidad de Síntesis del Metanol suelen quemarse en una caldera de vapor utilizando un quemador dedicado.

### **Ruido**

Las principales fuentes de ruido en las instalaciones de procesamiento del carbón incluyen el procesamiento físico del mismo (por ejemplo, clasificación, trituración, clasificación y selección), así como las grandes máquinas giratorias (a saber, compresores, turbinas, bombas, motores eléctricos, refrigeradores de aire y calentadores encendidos). Durante una despresurización de emergencia, pueden generarse elevados niveles de ruido debido a la liberación de gases de combustión a alta presión y/o la liberación de vapor en la atmósfera. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen recomendaciones generales para manejar el ruido.

## **1.2 Higiene y seguridad ocupacional**

Los peligros relacionados con la higiene y la salud ocupacional en la planta deberían identificarse con base en los análisis de seguridad laboral y evaluaciones exhaustivas de peligros y riesgos que empleen metodologías tales como el estudio de identificación de peligros [HAZID], estudio de peligros y operabilidad [HAZOP] o análisis cuantitativo de riesgos [QRA].

En general, la planificación de la gestión de higiene y seguridad incluirá la adopción de una aproximación sistemática y estructurada para la prevención y el control de los peligros físicos, químicos, biológicos y radiológicos para la higiene y la seguridad descritas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Los riesgos más notables para la higiene y la seguridad en el trabajo se producen durante la fase operativa de las instalaciones de procesamiento del carbón, incluyendo principalmente:

- La seguridad en los procesos
- La liberación de gases enriquecidos con oxígeno
- Atmósferas deficientes en oxígeno
- Riesgos de inhalación
- Incendios y explosiones

### Seguridad en los procesos

Los programas de seguridad en los procesos deberán implementarse debido a las características específicas del sector, entre ellas las complejas reacciones químicas, el uso de sustancias peligrosas (por ejemplo, compuestos tóxicos, reactivos, inflamables o explosivos) y reacciones de síntesis orgánica de etapas múltiples. El manejo de la seguridad en los procesos incluye las siguientes acciones:

- Pruebas de riesgos físicos para materiales y reacciones;
- Estudios de análisis de riesgos para revisar las prácticas químicas y de ingeniería del proceso, incluyendo termodinámica y cinética;
- Examen del mantenimiento preventivo y la integridad mecánica de los sistemas y servicios de proceso;
- Capacitación de trabajadores; y
- Elaboración de instrucciones operativas y procedimientos de respuesta ante situaciones de emergencia.

### Liberación de gases enriquecidos con oxígeno

El gas enriquecido con oxígeno puede filtrarse en las unidades de separación de aire y provocar un riesgo de incendio debido a la presencia de una atmósfera enriquecida con oxígeno. Las atmósferas enriquecidas con oxígeno pueden conducir a la saturación de oxígeno de materiales, cabello e indumentaria, pudiendo prenderse fuego con facilidad. Las medidas de prevención y control para reducir la exposición dentro y fuera del emplazamiento a las atmósferas enriquecidas con oxígeno incluyen:

- La instalación de un Sistema automático de Parada de Emergencia que pueda detectar y alertar sobre la liberación no controlada de oxígeno (incluida la presencia de atmósferas enriquecidas con oxígeno en las zonas de trabajo<sup>7</sup>) y emprender acciones de parada para minimizar la duración de estos vertidos y eliminar las posibles fuentes de ignición;
- Diseñar las instalaciones y sus componentes de acuerdo con la normativa de seguridad del sector, evitando colocar tuberías de conducción de oxígeno en espacios cerrados, utilizando instalaciones eléctricas inherentemente seguras y empleando sistemas de venteo del oxígeno en toda la planta para prevenir el posible impacto del gas venteado;
- Implementar procedimientos de trabajo a temperaturas elevadas y entrada autorizada a espacios cerrados que tengan en cuenta de forma específica la posible liberación de oxígeno;
- Implementar buenas prácticas de mantenimiento para evitar la acumulación de materiales combustibles;
- Planificar e implementar planes de preparación y respuesta ante situaciones de emergencia que incorporen explícitamente procedimientos de manejo de los vertidos incontrolados de oxígeno; y
- Suministrar los equipos adecuados de prevención y control de incendios que se describen a continuación (Riesgos de incendio y explosiones).

### Atmósferas deficientes en oxígeno

Los posibles vertidos y acumulación de gas nitrógeno en las zonas de trabajo pueden causar condiciones asfixiantes provocadas por el desplazamiento de oxígeno de estos gases.

<sup>7</sup> Las zonas de trabajo donde pueden darse atmósferas enriquecidas con oxígeno deben dotarse de sistemas de supervisión de zona capaces de detectar dichas condiciones. Los trabajadores también deberán estar equipados con sistemas de supervisión personal. Ambos sistemas dispondrán de una alarma configurada para activarse cuando la concentración de O<sub>2</sub> en el aire alcance el 23,5 por ciento.

Las medidas de prevención y control para reducir los riesgos asociados con la liberación de gas asfixiante incluyen:

- Diseñar y colocar sistemas de venteo de nitrógeno de acuerdo con las normas internacionalmente reconocidas;
- Instalar un Sistema automático de Parada de Emergencia que permita detectar y alertar sobre la liberación no controlada de nitrógeno (incluida la presencia de atmósferas deficientes en oxígeno en las zonas de trabajo<sup>8</sup>), iniciar la ventilación forzada y minimizar la duración de estos vertidos; e
- Implementar procedimientos de entrada en espacios cerrados tal y como describen las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** en relación con los peligros específicos de las instalaciones.

### Riesgos de inhalación

La exposición a sustancias químicas en las instalaciones de procesamiento del carbón se asocia principalmente a la inhalación de polvo de carbón, partículas volátiles de brea de hulla, monóxido de carbono y otros vapores como el metano o el amoníaco. Los trabajadores expuestos al polvo de carbón pueden desarrollar lesiones pulmonares y fibrosis. La exposición al monóxido de carbono resulta en la formación de la carboxihemoglobina (COHb), que inhibe la capacidad de transportar oxígeno de los glóbulos rojos. Los síntomas leves de exposición incluyen dolores de cabeza, mareos, disminución de la capacidad de concentración, una menor coordinación manos-ojos, debilidad, confusión, desorientación, somnolencia, náuseas y perturbaciones de la vista. La exposición prolongada puede provocar la pérdida de conciencia y la muerte.

<sup>8</sup> Las zonas de trabajo donde puedan darse atmósferas deficientes en oxígeno deben dotarse de sistemas de supervisión de zona capaces de detectar dichas condiciones. Los trabajadores también deberán estar equipados con sistemas de supervisión personal. Ambos sistemas dispondrán de una alarma configurada para activarse cuando la concentración de O<sub>2</sub> en el aire alcance el 19,5 por ciento.

La posible exposición a la inhalación de emisiones químicas durante las operaciones rutinarias en planta se manejará de acuerdo con los resultados obtenidos a partir de los análisis de seguridad en el trabajo y la encuesta sobre higiene industrial, de conformidad con las orientaciones sobre higiene y seguridad en el trabajo descritas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**. Las medidas de protección incluyen la capacitación de los trabajadores, los sistemas de permisos de trabajo, el uso de equipos de protección personal (EPP) y sistemas de alarma de detección de gas tóxico.

### Riesgos de incendio y explosión

#### *Almacenamiento y preparación del carbón*

La combustión espontánea del carbón se debe principalmente a la oxidación de la pirita y otros contaminantes sulfídicos presentes en el carbón<sup>9,10</sup>. Las operaciones de preparación del carbón también presentan un riesgo de incendio y explosiones debido a la generación de polvo de carbón, que puede prenderse dependiendo de su concentración en el aire y presencia de fuentes de ignición. Por consiguiente, el polvo de carbón entraña un riesgo significativo de explosión en las instalaciones de almacenamiento y manejo de carbón donde las nubes de polvo de carbón pueden darse en espacios cerrados. Las nubes de polvo también se dan al acumularse el polvo suelto de carbón, como sucede en las rocas madre estructurales. Las técnicas recomendadas para prevenir y controlar el riesgo de combustión y explosión en los almacenamientos cerrados de carbón incluyen:

- Almacenar las pilas de carbón para prevenir o minimizar el riesgo de combustión, lo que incluye:

<sup>9</sup> Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA). Standard 850: Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations (2000).

<sup>10</sup> NFPA. Standard 120: Standard for Fire Prevention and Control in Coal Mines (2004).

- Compactar las pilas de carbón para reducir la cantidad de aire presente en las mismas,
- Minimizar los períodos de almacenamiento del carbón,
- Evitar la colocación de pilas de carbón sobre fuentes de calor tales como conductos de vapor u orificios de acceso,
- Construir estructuras destinadas al almacenamiento del carbón con materiales no combustibles,
- Diseñar las estructuras de almacenamiento del carbón de tal forma que se minimicen las superficies donde el polvo de carbón pueda asentarse y proporcionar sistemas de eliminación de polvo, y
- Supervisar de forma continua los focos calientes (carbón incandescente) empleando sistemas de detección de temperatura. Una vez detectado el foco caliente, se retirará el carbón incandescente. Se proporcionará acceso para las unidades de extinción de incendios;
- Eliminar la presencia de fuentes potenciales de ignición y proporcionar los equipos de puesta a tierra adecuados para minimizar los riesgos derivados de la electricidad estática. Toda la maquinaria y sistemas eléctricos situados dentro de la zona o estructura cerrada de almacenamiento de carbón deben someterse a controles para su uso en lugares peligrosos, y dotarse de motores a prueba de chispas;
- Diseñar todos los circuitos eléctricos de modo que puedan detenerse de forma automática a distancia; y
- Instalar un sistema adecuado de ventilación lateral en las zonas cerradas de almacenamiento para reducir las concentraciones de metano, monóxido de carbono y productos volátiles derivados de la oxidación del carbón por aire y hacer frente al humo producido en caso de incendio.

Las técnicas recomendadas para prevenir y controlar el riesgo de explosiones provocadas por la preparación del carbón en zonas cerradas incluyen:

- Llevar a cabo la clasificación, aplastamiento, limpieza en seco, trituración, pulverización de la hulla seca y otras operaciones que generan polvo de carbón empleando un colchón de nitrógeno u otras técnicas de prevención de explosiones, tales como la ventilación;
- Ubicar las instalaciones de forma que se minimice la exposición a los incendios y explosiones de otras edificaciones y equipos;
- Estudiar la posibilidad de controlar el contenido de humedad del carbón antes de su uso, dependiendo de los requisitos de la tecnología de gasificación empleada;
- Instalar dispositivos de control a prueba de fallos para las concentraciones de metanol en el aire e interrumpir las operaciones al alcanzarse una concentración de metano del 40 por ciento sobre el límite mínimo de explosión;
- Instalar y mantener adecuadamente sistemas de recogida de polvo para captar las emisiones fugitivas procedentes del equipo o maquinaria de manejo del carbón.

### *Procesamiento del carbón*

El riesgo de incendios y explosiones generado por las operaciones de proceso incluye el vertido accidental de gas sintético (que contiene monóxido de carbono e hidrógeno), oxígeno, metanol y amoníaco. Los vertidos de gas sintético a altas presiones pueden provocar "dardos de fuego" o dar lugar a explosiones de nubes de vapor (VCE, por sus siglas en inglés), "bolas de fuego" o "fogonazos", dependiendo del volumen de sustancias inflamables presentes y del grado de confinamiento de la nube. Los gases de hidrógeno y monóxido de carbono pueden inflamarse aún en ausencia de fuentes de ignición si alcanzan temperaturas de 500°C y 609°C,

respectivamente. Los vertidos de líquidos inflamables pueden provocar "incendios de charco". Las medidas recomendadas para prevenir y controlar el riesgo de incendios y explosiones durante las operaciones de proceso incluyen:

- Instalar dispositivos de detección temprana de escapes (por ejemplo, supervisando la presión en los sistemas transportadores de gas y líquidos), además de los detectores de humo y calor para prevenir los incendios;
- Limitar los posibles vertidos aislando las operaciones de proceso de las grandes existencias almacenadas;
- Evitar las posibles fuentes de ignición (por ejemplo, diseñando la distribución de las tuberías para evitar los vertidos sobre conductos a altas temperaturas, equipos y/o máquinas giratorias);
- Controlar los posibles efectos de incendios y explosiones segregando y empleando distancias de separación entre zonas de proceso, almacenamiento, servicios y seguridad. Las distancias de seguridad pueden determinarse con base en análisis específicos de seguridad para las instalaciones y mediante la aplicación de normas de seguridad contra incendios reconocidas internacionalmente<sup>11</sup> ;
- Limitar las zonas que puedan verse afectadas en caso de producirse escapes accidentales mediante las siguientes medidas:
  - Definir las zonas de incendio y equiparlas con sistemas de drenaje capaces de recoger y transportar los vertidos accidentales de líquidos inflamables hasta una zona segura de contención que disponga de depósitos de almacenamiento para la contención secundaria,

- Reforzar los edificios o instalar paredes cortafuegos / cortaexplosiones en las zonas en que no puedan aplicarse las distancias de separación adecuadas, y
- Diseñar un sistema de aguas residuales oleosas que impida la propagación de incendios.

### 1.3 Higiene y seguridad en la comunidad

Las consecuencias que la construcción, la operación y el desmantelamiento de las instalaciones de procesamiento del carbón pueden acarrear para la higiene y seguridad en la comunidad son comunes a la mayoría de los establecimientos industriales, y se explican en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**. Los riesgos más significativos para la higiene y la salud de la comunidad en lo que atañe a las instalaciones de procesamiento del carbón se producen durante la fase de operación e incluyen accidentes de gran magnitud ocasionados por incendios y explosiones o vertidos accidentales de materias primas o productos acabados durante su transporte desde la planta de procesamiento. A continuación se describen las orientaciones encaminadas a la gestión de este tipo de incidentes, también presentes en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**: Manejo de materiales peligrosos (incluidos riesgos mayores), seguridad del tráfico, transporte de materiales peligrosos y preparación y respuesta de emergencia. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** para el Transporte, los Ferrocarriles, Puertos y Zonas Portuarias, y Terminales de Crudo y Productos derivados del Petróleo proporcionan orientaciones adicionales aplicables al transporte por mar y por tren y a las instalaciones costeras.

<sup>11</sup> Por ejemplo, NFPA Standard 30: Flammable and Combustible Liquids Code (2003).

## 2.0 Indicadores y seguimiento del desempeño

### 2.1 Medio ambiente

#### Guías sobre emisiones y efluentes

En los Cuadros 1 y 2 se presentan las guías sobre emisiones y efluentes para este sector. Las cantidades correspondientes a las emisiones y efluentes de los procesos industriales en este sector son indicativas de las prácticas internacionales recomendadas para la industria, reflejadas en las normas correspondientes de los países que cuentan con marcos normativos reconocidos. Dichas cantidades pueden alcanzarse en condiciones normales de funcionamiento de instalaciones adecuadamente diseñadas y utilizadas mediante la aplicación de las técnicas de prevención y control de la contaminación que se han analizado en las secciones anteriores de este documento.

Las guías sobre emisiones son aplicables a las emisiones procedentes de la combustión. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones sobre las emisiones asociadas con actividades de producción de energía eléctrica y vapor generadas por una fuente de combustión con capacidad igual o inferior a 50 megavatios térmicos, mientras que las **Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para energía térmica** contienen disposiciones sobre las emisiones generadas por una fuente de energía más grande. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se proporciona orientación sobre cuestiones ambientales teniendo en cuenta la carga total de emisiones.

Las guías sobre efluentes se aplican a los vertidos directos de efluentes tratados a aguas superficiales de uso general. Los

niveles de vertido específicos del emplazamiento pueden establecerse basándose en la disponibilidad y condiciones de los sistemas de tratamiento y recogida de aguas de alcantarillado público o, si se vierten directamente a las aguas superficiales, basándose en la clasificación del uso del agua receptora que se describe en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**. Estos niveles se deben lograr, sin dilución, al menos el 95% del tiempo que opera la planta o unidad, calculado como proporción de las horas de operación anuales. El incumplimiento de estos niveles debido a las condiciones de determinados proyectos locales se debe justificar en la evaluación ambiental correspondiente.

#### Uso de recursos, consumo de energía, generación de emisiones y residuos

El Cuadro 3 contiene ejemplos de indicadores de consumo de recursos de energía y agua para el sector. El Cuadro 4 contiene ejemplos sobre indicadores de generación de emisiones y residuos. Los valores de referencia de la industria se consignan únicamente con fines comparativos, y cada proyecto debería tener como objetivo lograr mejoras continuas en estas áreas. Los valores de referencia relevantes para las plantas de procesamiento del carbón pueden extraerse a partir de la gasificación del carbón en plantas eléctricas de mayor envergadura. Las emisiones producidas por las plantas de gasificación que producen gas sintético para la síntesis Fischer-Tropsch (F-T) serán sustancialmente inferiores debido a los requisitos de pureza del catalizador de síntesis.

#### Seguimiento ambiental

Se llevarán a cabo programas de seguimiento ambiental para este sector en todas aquellas actividades identificadas por su potencial impacto significativo en el medio ambiente, durante las operaciones normales y en condiciones alteradas. Las actividades de seguimiento ambiental se basarán en

indicadores directos e indirectos de emisiones, efluentes y uso de recursos aplicables al proyecto concreto. La frecuencia del seguimiento debería permitir obtener datos representativos sobre los parámetros objeto del seguimiento. El seguimiento deberá recaer en individuos capacitados, quienes deberán aplicar los procedimientos de seguimiento y registro y utilizar un equipo adecuadamente calibrado y mantenido. Los datos de seguimiento se analizarán y revisarán con regularidad, y se compararán con las normas vigentes para así adoptar las medidas correctivas necesarias. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones adicionales sobre los métodos de muestreo y análisis de emisiones y efluentes.

**Cuadro 1. Niveles de emisiones a la atmósfera para las plantas de procesamiento del carbón**

Contaminante	Unidad	Valor de referencia
<b>Planta de preparación del carbón</b>		
Secador térmico Partículas	mg/Nm <sup>3</sup>	70
Secador térmico Opacidad de los gases	%	20
Equipos de limpieza neumática de carbón Partículas	mg/Nm <sup>3</sup>	40
Equipos de limpieza neumática de carbón Opacidad	%	10
Transporte, almacenamiento y preparación Opacidad de los gases	%	10
<b>Global</b>		
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	150-200
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	200-400 <sup>(1)</sup>
Hg	mg/Nm <sup>3</sup>	1.0
Materia particulada	mg/Nm <sup>3</sup>	30-50 <sup>(1)</sup>
COV	mg/Nm <sup>3</sup>	150
Metales Pesados Totales	mg/Nm <sup>3</sup>	1,5
H <sub>2</sub> S	mg/Nm <sup>3</sup>	10 <sup>(2)</sup>
COS + CS <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	3
Amoniaco	mg/Nm <sup>3</sup>	30
<b>Notas:</b>		
1. El valor mínimo para las plantas de >100 MWth o equivalente; el valor máximo para las plantas de <100 MWth o equivalente.		
2. Emisiones procedentes de unidades Claus (Austria, Bélgica, Alemania).		
- Los niveles de emisiones de proceso se revisarán teniendo en cuenta las emisiones originadas por la actividad para lograr el menor índice global de emisiones en las instalaciones.		
- Gas seco 15% O <sub>2</sub>		

**Cuadro 3. Consumo de recursos y energía**

Parámetro	Unidad	Valor de referencia de la industria
<b>Electricidad</b> Consumo de electricidad en plantas de transformación de carbón en líquido	MWhr/ Tonelada métrica de productos licuados del carbón	0,05 – 0,1

Consumo de electricidad de las plantas de metanol	MWhr/Tonelada métrica de metanol	0,07
---	----------------------------------	------

**Cuadro 2. Niveles de efluentes para las plantas de procesamiento de carbón**

Contaminante	Unidad	Valor de referencia
pH		6 - 9
DBO5	mg/l	30
DQO	mg/l	150 (40 agua de refrigeración)
Nitrógeno amoniacal (como N)	mg/L	5
Total de nitrógeno	mg/L	10
Total de fósforo	mg/L	2
Sulfuro	mg/l	1
Aceite y grasa	mg/l	10
Sólidos suspendidos totales	mg/L	35
Total de metales	mg/L	3
Cadmio	mg/L	0,1
Cromo (total)	mg/L	0,5
Cromo (hexavalente)	mg/l	0,1
Cobre	mg/l	0,5
Cobalto	mg/l	0,5
Cinc	mg/l	1
Plomo	mg/l	0,5
Hierro	mg/l	3
Niquel	mg/l	1
Mercurio	mg/l	0,02
Vanadio	mg/l	1
Manganeso	mg/l	2
Fenol	mg/l	0,5
Cianuro	mg/l	0,5

**Cuadro 4. Generación de emisiones y residuos<sup>(1)</sup>**

Parámetro	Unidad	Valor de referencia de la industria
SO <sub>2</sub>	g/Nm <sup>3</sup> de gas sintético	0,3 – 0,5
SO <sub>2</sub> (Carbón-Metanol-Gasolina) <sup>(4)</sup>	toneladas/día	6-14
SO <sub>2</sub> (Fischer-Tropsch) <sup>(4)</sup>	toneladas/día	9-14
NO <sub>x</sub>	g/Nm <sup>3</sup> de gas sintético	0,35-0,6
NO <sub>x</sub> (Carbón-Metanol-Gasolina) <sup>(4)</sup>	toneladas/día	5-15,5
NO <sub>x</sub> (Fischer-Tropsch) <sup>(4)</sup>	toneladas/día	5-23,6
MP10	g/Nm <sup>3</sup> de gas sintético	0,12
Partículas (Carbón-Metanol-Gasolina) <sup>(4)</sup>	toneladas/día	0,5-7,5
Partículas (Fischer-Tropsch) <sup>(4)</sup>	toneladas/día	1-6
CO <sub>2</sub> <sup>(2)(3)</sup>	kg/kg de carbón	1,5
CO <sub>2</sub> (Carbón-Metanol-Gasolina y Fischer-Tropsch) <sup>(4)</sup>	toneladas/día	21.000
Amoniaco	g/Nm <sup>3</sup> de gas sintético	0,004
Residuos sólidos (ceniza, escoria y sulfuro) <sup>(2)</sup>	kg/tonelada de carbón	50 – 200
<b>Notas:</b>		
1. Producción: 1.300 – 1.500 Nm <sup>3</sup> de gas sintético de carbón		
2. Dependiendo del grado y calidad del carbón; calculado para un GHP = 30 GJ/kg		
3. Sin captura y almacenamiento de carbono (CCS)		
4. Referencia: Edgar, T.F. (1983). Para una planta de licuefacción de carbón de 50.000 bbl/día		

## 2.2 Desempeño de la higiene y la seguridad ocupacional

### Guía sobre higiene y seguridad ocupacional

Para evaluar el desempeño en materia de higiene y seguridad ocupacional deben utilizarse las guías sobre exposición que se

publican en el ámbito internacional, entre ellas: las guías sobre la concentración máxima admisible de exposición profesional (TLV®) y los índices biológicos de exposición (BEIs®) publicados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)<sup>12</sup>, la Guía de bolsillo sobre riesgos químicos publicada por el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad del Trabajo de los Estados Unidos (NIOSH)<sup>13</sup>, los límites permisibles de exposición publicados por la Administración de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos (OSHA)<sup>14</sup>, los valores límite indicativos de exposición profesional publicados por los Estados miembros de la Unión Europea<sup>15</sup>, u otras fuentes similares.

### Tasas de accidentes y letalidad

Deben adoptarse medidas para reducir a cero el número de accidentes entre los trabajadores del proyecto (sean empleados directos o personal subcontratado), especialmente los accidentes que pueden causar una pérdida de horas de trabajo, diversos niveles de discapacidad o incluso la muerte. Como punto de referencia para evaluar las tasas del proyecto puede utilizarse el desempeño de instalaciones en este sector en países desarrollados, que se obtiene consultando las fuentes publicadas (por ejemplo, a través de la Oficina de Estadísticas Laborales de los Estados Unidos y el Comité Ejecutivo de Salud y Seguridad del Reino Unido)<sup>16</sup>.

### Seguimiento de la higiene y la seguridad ocupacional

Es preciso realizar un seguimiento de los riesgos que pueden correr los trabajadores en el entorno laboral del proyecto concreto. Las actividades de seguimiento deben ser diseñadas

<sup>12</sup> Disponible en <http://www.acgih.org/TLV/> y <http://www.acgih.org/store/>

<sup>13</sup> Disponible en <http://www.cdc.gov/niosh/hpg/>

<sup>14</sup> Disponible en [http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDARDS&p\\_id=9992](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992)

<sup>15</sup> Disponible en [http://europe.osha.eu.int/good\\_practice/risks/ds/oel/](http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/)

<sup>16</sup> Disponible en: <http://www.bls.gov/iif/> and <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

y realizadas por profesionales acreditados<sup>17</sup> como parte de un programa de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo. En las instalaciones, además, debe llevarse un registro de los accidentes y enfermedades laborales así como de los sucesos y accidentes peligrosos. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones adicionales sobre los programas de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo.

---

<sup>17</sup> Los profesionales acreditados pueden incluir higienistas industriales certificados, higienistas ocupacionales diplomados o profesionales de la seguridad certificados o su equivalente.

### 3.0 Referencias y fuentes adicionales

Administración del Uso Coordinado de la Atmósfera de los Estados del Nordeste (NESCAUM). 2003. Mercury Emissions from Coal -Fired Power Plants: The Case for Regulatory Action. Octubre de 2003. Boston, MA: NESCAUM

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 2005. 40 CFR Part 60, Standards of Performance for New and Existing Stationary Sources: Electric Utility Steam Generating Units, Clean Air Mercury Rule. Washington, DC: US EPA.

Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA). 2004. Standard 120: Standard for Fire Prevention and Control in Coal Mines. 2004 Edition. Quincy, MA: NFPA.

Asociación Nacional de Protección contra Incendios. NFPA. 2003. Standard 30: Flammable and Combustible Liquids Code. 2003 Edition. Quincy, MA: NFPA.

Asociación Nacional de Protección contra Incendios. NFPA. 2000. Standard 850: Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. 2000 Edition. Quincy, MA: NFPA.

Comisión Europea. 2006. Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (EIPPCB). Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles (BAT, por sus siglas en inglés) para las grandes instalaciones de combustión. Julio de 2006. Sevilla, España: EIPPCB. Disponible en [www.eper.es/data/docs/Fondo%20documental/Tratamientodesuperficies\\_A2D2-4DEA-920B-056A36BF8CC1.pdf](http://www.eper.es/data/docs/Fondo%20documental/Tratamientodesuperficies_A2D2-4DEA-920B-056A36BF8CC1.pdf)

Comisión Europea. 2003. Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (EIPPCB). Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles (BAT, por sus siglas en inglés) en la industria de refinado de petróleo y gas. Febrero de 2003. Sevilla, España: EIPPCB. Disponible en [www.eper.es/data/docs/Fondo%20documental/Tratamientodesuperficies\\_A2D2-4DEA-920B-056A36BF8CC1.pdf](http://www.eper.es/data/docs/Fondo%20documental/Tratamientodesuperficies_A2D2-4DEA-920B-056A36BF8CC1.pdf)

Congreso de Estados Unidos. 2005. Ley de Cielos Claros de 2005. (Inhofe, S.131 in 109<sup>th</sup> Congress). Washington, DC: Biblioteca del Congreso. Disponible en [yosemite.epa.gov.../b1ab9f485b098972852562e7004dc686/662090946df0e285256c0f00493bd2?](http://yosemite.epa.gov.../b1ab9f485b098972852562e7004dc686/662090946df0e285256c0f00493bd2?)

Edgar, T.F. 1983. Coal Processing and Pollution Control. Houston: Gulf Publishing Company.

European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). Sub-sectoral Environmental Guidelines: Coal Processing. Londres: EBRD. Disponible en <http://www.ebrd.com>

German Federal Ministry of the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). 2002. First General Administrative Regulation Pertaining to the Federal Emission Control Act (Technical Instructions on Air Quality Control – TA Luft). Bonn: BMU. Disponible en [http://www.bmu.de/english/air\\_pollution\\_control/ta\\_luft/doc/36958.php](http://www.bmu.de/english/air_pollution_control/ta_luft/doc/36958.php)

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2006. Informe especial sobre captura y almacenamiento de dióxido de carbono, Marzo de 2006. Ginebra: IPCC.

Kirk-Othmer, R.E. 2006. Encyclopedia of Chemical Technology. 5<sup>th</sup> Edition. New York: John Wiley and Sons Ltd.

Lockhart, N. 2002. Advances in Coal Preparation. Londres: World Energy Council. Disponible en [http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/default/tech\\_papers/17th\\_congress/1\\_2\\_02.asp](http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/default/tech_papers/17th_congress/1_2_02.asp)

Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 2005. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Disponible en <http://www.wiley-vch.de/vch/software/ullmann/index.php?page=home>

University of New Hampshire Recycled Materials Resource Center (RMRC). Coal Bottom Ash/Boiler Slag. Disponible en <http://www.rmrc.unh.edu/>

US EPA. 40 CFR Part 60. Standards of Performance for New Stationary Sources. Subpart Y—Standards of Performance for Coal Preparation Plants. Washington, DC: US EPA.

US EPA. 40 CFR Part 434—Coal Mining Point Source Category BPT, BAT, BCT Limitations and New Source Performance Standards. Washington, DC: US EPA.

Zhu D. y Y. Zhang. Major trends of new technologies for coal mining and utilization beyond 2000 - Technical scenario of the chinese coal industry. China Coal Research Institute, Ministry of Coal Industry, Beijing, China. Disponible en [http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/default/tech\\_papers/17th\\_congress/3\\_1\\_11.asp](http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/default/tech_papers/17th_congress/3_1_11.asp)

## Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

El procesamiento del carbón para su transformación en sustancias químicas gaseosas o líquidas, incluido el carburante, consta de los siguientes procesos e instalaciones auxiliares:

- La gasificación del carbón en gas sintético – SynGas (CO + H<sub>2</sub>)
- La licuefacción indirecta, (es decir, la síntesis Fischer - Tropsch de carburante para automóviles (gasolina y gasoil) a partir de gas sintético)
- El amoniaco obtenido a partir de gas sintético
- El metanol a partir de gas sintético
- La licuefacción directa (es decir, la licuefacción del carbón mediante hidrogenación directa)

### Carbón

El carbón es uno de los recursos energéticos más abundantes en el mundo y su uso tiende a crecer a medida que surgen tecnologías para eliminar los gases efecto invernadero, principalmente el CO<sub>2</sub>. El carbón puede adoptar una amplia gama de formas y calidades. El grado de transformación de la materia en la planta o carbonificación se denomina “grado”. El carbón pardo o lignito, el carbón subbituminoso, el carbón bituminoso y la antracita representan los distintos grados con un creciente contenido en carbón. El Cuadro A.1. muestra la clasificación de la American Society for Testing and Materials (ASTM)<sup>18</sup>.

El carbón con menos del 69 por ciento de carbón fijo se clasifica según su Potencia Calorífica Bruta (PCB):

- **Bituminoso** cuando la PCB > 24.400 kilojulios por kilogramo (kJ/kg), aglomerante
- **Subbituminoso** cuando 19.300 kJ/kg < PCB < 26.700 kJ/kg, no aglomerante
- **Lignítico** cuando 14.600 kJ/kg < PCB < 19.300 kJ/kg, no aglomerante

**Cuadro A.1. Clasificación del carbón según la ASTM**

		Carbón fijo <sup>(1)</sup> (%)		Materia volátil <sup>(1)</sup> (%)	
		min	max	min	max
Antracítico No aglomerante	Meta-antracita	98			2
	Antracita	92	98	2	8
	Semiantracita	86	92	8	14
Bituminoso Normalmente aglomerante	Volatilidad baja	78	86	14	22
	Volatilidad media	69	78	22	31
	Volatilidad alta		69	31	
<b>Notas:</b>					
<sup>(1)</sup> Base seca y libre de minerales					

Para el comercio internacional y dentro de la Unión Europea se han acordado distintos sistemas de clasificación para la hulla, el carbón pardo y el lignito.

Las impurezas en los carbones, principalmente sulfuro, nitrógeno y ceniza, explican las diferencias en calidad. Los carbones más comerciales tienen una concentración entre el 0,5 – 4,0 de azufre, presente en forma de sulfato, pirita y azufre orgánico. El contenido en nitrógeno suele oscilar entre el 0,5 – 2,0 por ciento. Dado que el nitrógeno se fija sobre todo a las moléculas orgánicas, no puede eliminarse físicamente. La ceniza de carbón proviene del contenido mineral del carbón después de su combustión o utilización. Las cenizas del carbón pueden contener restos de arsénico, berilio, cadmio, cromo, cobre, flúor, plomo, manganeso y mercurio.

<sup>18</sup> Kirk-Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology, 5ª edición (2006).

## Gasificación del carbón

El tamaño de las plantas de gasificación del carbón varía considerablemente dependiendo del destino final del gas sintético producido. Durante la fabricación química, la capacidad de diseño suele basarse en una tasa de alimentación de 1.500-2.000 toneladas al día (t/d) de carbón. La capacidad puede ser mayor, sobre todo en el caso de la producción de metanol. En la producción de combustible líquido, las instalaciones existentes utilizan 120.000 t/d (cerca de 40 megatoneladas al año (Mt/a)) de carbón para producir 160.000 barriles al día (b/d) (cerca de 10 Mt/a) equivalentes de petróleo de combustible líquido.

### *Logística y preparación del carbón*

Las grandes plantas de licuefacción de carbón suelen estar situadas cerca de las minas de carbón y comparten zonas e instalaciones de almacenamiento. El carbón suele suministrarse por medio de cintas transportadoras a las cubas, tolvas y compuertas en la planta. Las plantas más pequeñas pueden ubicarse lejos de las minas. En este caso, el carbón se transporta por ferrocarril, barcazas o canalizaciones para los lodos de carbón y se almacena en escombreras. Normalmente, es necesario preparar el carbón antes de su envío y utilización, dependiendo de las características de la mina y el carbón y de la tecnología de extracción<sup>19</sup>. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad para la explotación de minas** describen el proceso de preparación del carbón. Antes de su utilización, el carbón almacenado en las instalaciones de procesamiento de carbón adopta los estados físicos necesarios para el reactor de producción de gas sintético, que difieren según la tecnología de producción del gas sintético. Las operaciones normales incluyen el secado del carbón y su reducción de tamaño (trituration, molturación o pulverización).

### *Instalaciones de producción de gas sintético*

La gasificación del carbón consiste en la reacción del carbón al oxígeno, el vapor y el dióxido de carbono para formar un producto gaseoso (el gas sintético) que contiene hidrógeno y monóxido de carbono. Básicamente, la gasificación consiste en la combustión incompleta en un ambiente reductor. La principal diferencia operativa respecto a la combustión completa del carbón es que la gasificación consume calor producido durante la combustión. En el ambiente reductor de la gasificación, el azufre en el carbón se libera como sulfuro de hidrógeno en vez de dióxido de azufre, y el nitrógeno en el carbón se convierte principalmente en amoníaco en lugar de óxidos de nitrógeno. Estas formas reducidas de azufre y nitrógeno se pueden aislar, captar y utilizar fácilmente.

Dependiendo del tipo de gasificador y de las condiciones operativas, la gasificación puede emplearse para producir un gas sintético ideal para una variedad de aplicaciones. El Gráfico A.1. muestra una versión simplificada del proceso de gasificación.

El carbón preparado se gasifica con oxígeno y vapor. Dependiendo del tipo concreto de gasificador, el gas sintético procedente del reactor puede enfriarse y refrigerarse y el calor se recupera como vapor de alta presión. La ceniza se recupera del fondo del reactor junto con el alquitrán, ya sea sólido o en ceniza (dependiendo del proceso). El gas sintético se mezcla con vapor y suministra al reactor de conversión para ajustar el coeficiente de H<sub>2</sub>/CO al valor exigido. El gas sintético se purifica a continuación de H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, COS, NH<sub>3</sub>, HCN para cumplir con las especificaciones exigidas. Se utilizan tres clases principales de reactores de gasificación: reactores de lecho fijo, reactores de lecho fluidizado y reactores de flujo laminar.

<sup>19</sup> Lockhart, N., World Energy Council. *Advances in Coal Preparation* (2002).

### **Reactores de lecho fijo**

Los primeros reactores fueron los gasificadores de lecho fijo a contracorriente. Durante este proceso, el aire y el vapor se introducen en el fondo y viajan hacia arriba a través de un lecho de carbón. El carbón se suministra a la superficie del lecho y viaja hacia abajo a contracorriente hasta el flujo de gases. Los lechos fijos tienen varias ventajas. El flujo ascendente de gases calientes procedentes de la zona de combustión precalienta el carbón, lo que mejora la eficiencia calórica. La conversión de carbones de alto grado se logra mediante la corriente continua de sólidos a través de las zonas de gasificación y combustión, y los tiempos de permanencia relativamente prolongados del combustible en el reactor. El gas resultante sale a temperaturas relativamente bajas y sin sólidos contaminantes. No obstante, la posible presencia de aceite y alquitrán podría provocar la incrustación de los equipos aguas abajo.

El inconveniente de los gasificadores de lecho fijo es su incapacidad para procesar los carbones aglutinantes (por ejemplo, carbón de grado bituminoso), que tienden a hincharse y aglutinarse al contacto con el calor. Estos carbones pueden perturbar los flujos de gases y sólidos, lo que resulta en un fallo del proceso.

### **Reactores de lecho fluidizado**

Los gasificadores de lecho fluidizado ofrecen una mejor mezcla y uniformidad en las temperaturas, lo que permite al oxígeno reaccionar con los productos de la desvolatilización. En los gasificadores de lecho fluidizados secos, las temperaturas deben mantenerse por debajo del punto de fusión de la ceniza, lo que conduce a la transformación incompleta del carbón en los carbones no reactivos. Los gasificadores de ceniza aglutinante operan a temperaturas superiores (hasta 1.150 °C), próximas al punto de reblandecimiento de ceniza, lo que mejora la transformación del carbón y la gasificación de carbones de

alto grado y carbones aglutinantes. Las temperaturas más altas aumentan los índices de gasificación, la producción de carbón y la eficiencia. La principal ventaja de los gasificadores de lecho fluido es la flexibilidad para utilizar carbones aglutinantes, así como carbones de baja calidad y alto contenido en ceniza. Además, los gasificadores de lecho fluido pueden funcionar con una amplia gama de cargas operativas o productos sin sufrir por ello una merma en la eficiencia del proceso.

### **Reactores de flujo laminar**

En estos reactores, los gasificadores pueden ser de dosificación de sustancias en seco, presurizados, de soplado con oxígeno y de escorificación. El carbón se seca y pulveriza hasta lograr partículas de un diámetro < 0,1 mm antes de transportarse al gasificador con ayuda de un gas, normalmente nitrógeno. El carbón, el oxígeno y el vapor entran en el gasificador a través de quemadores horizontalmente opuestos. El gas de combustión bruto se produce a partir de reacciones de gasificación a altas temperaturas y fluye hacia arriba. Contiene algunas partículas en suspensión compuestas de ceniza y pequeñas cantidades de carbón puro.

El reactor a altas temperaturas convierte la ceniza restante en escoria líquida que fluye por las paredes del gasificador y pasa a un baño de enfriamiento de escoria. El gas combustible bruto puede enfriarse al salir del reactor con gas combustible refrigerado y reciclado para reducir la temperatura por debajo del punto de fusión de la ceniza e impedir la entrada de sólidos viscosos en el refrigerador de gases combustibles brutos. El refrigerador de gas bruto enfría aún más el gas y genera un vapor de alta presión que se suministra al ciclo de vapor. Los sólidos recuperados gracias a los filtros de partículas se reciclan para devolver al reactor. Este tipo de reactores puede manejar con facilidad los carbones de cualquier grado.

## Licuefacción indirecta del carbón

### *Producción de hidrocarburos líquidos*

Los procesos F-T pueden emplearse para producir un petróleo crudo sintético ligero (crudo sintético) y olefinas ligeras, o hidrocarburos parafínicos pesados. El crudo sintético puede refinarse para obtener gasolina y gasoil, y los hidrocarburos pesados para conseguir parafinas específicas o, cuando se descompone por hidrogenación y/o se isomeriza, puede utilizarse para producir gasoil, aceites lubricantes y nafta, una materia prima empleada para descomponer las olefinas. Se emplean catalizadores de hierro a base de potasio y cobre.

Para la reacción F-T suelen emplearse reactores de baja temperatura (LTFT, reactores de lecho fluidizado) y reactores de alta temperatura (HTFT, reactores de lecho fluido).

Los **reactores de lecho fluido** consisten en un depósito que contiene una parafina fluida derivada del proceso e incluye un catalizador. Las burbujas de gas sintético se introducen en el lecho fluido a temperaturas que oscilan entre los 220 y 250 °C y 2,5–4,5 megapascales (MPa) y se transforman en hidrocarburos. El calor generado pasa del lecho fluido a los serpentines de enfriamiento dentro del reactor para generar vapor de agua. Los hidrocarburos ligeros, que se encuentran en la fase de vapor, se retiran de la superficie libre situada sobre el reactor junto con los agentes reactivos no convertidos y se condensan en un tren de condensación. Los hidrocarburos líquidos más pesados se mezclan con los lodos de carbón para eliminarse a continuación mediante un proceso de separación de sólidos.

Los **reactores de lecho fluido** consisten en un tanque que contiene un lecho fluidizado y un catalizador de hierro reducido. Las burbujas de gas sintético se canalizan por el lecho mediante un distribuidor de gas donde se convierte

catalíticamente en hidrocarburos que, en condiciones de proceso de alrededor de 340 °C y 2,5 MPa, se hallan en la fase de vapor. Los productos y gases sin convertir abandonan el reactor a través de ciclones internos.

### *Alquilación*

El objetivo de la alquilación es producir carburante de alta calidad. El término alquilación se emplea para describir la reacción de las olefinas con el isobutano para formar isoparafinas de peso molecular superior con un elevado índice de octano. El proceso implica unas condiciones de reacción a bajas temperaturas en presencia de ácidos fuertes (ácido fluorhídrico (HF) o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)).

### *Isomerización*

La isomerización se utiliza para alterar la ordenación molecular sin afectar a la composición de la molécula original. Las parafinas de reducido peso molecular (C<sub>5</sub> – C<sub>6</sub>) se transforman en isoparafinas con un índice de octano muy superior. En la actualidad se emplean tres clases distintas de catalizadores en este proceso: alúmina clorada, zeolita y circonia sulfatada.

### *Desintegración catalítica*

La desintegración se emplea para transformar hidrocarburos más pesados en otros más valiosos de menor punto de ebullición. El proceso precisa de calor y de un catalizador para descomponer las moléculas de hidrocarburo de mayor tamaño en otras más pequeñas y ligeras. Las unidades de desintegración catalítica de fluido (FCC) más frecuentemente empleadas se dividen en tres secciones: Una sección de reactor–regenerador que consta a su vez de un ventilador de aire y una caldera de recuperación; la principal sección de fraccionamiento, que se compone de un compresor de gas húmedo; y la estación de gas no saturado. Durante el proceso de FCC, el aceite y el vapor de aceite precalentado a 250-

425°C se pone en contacto con el catalizador caliente (zeolita) a aproximadamente 680–730°C de temperatura en el reactor de lecho transportado. Para mejorar la vaporización y la posterior desintegración, el material se atomiza con vapor. El proceso de desintegración se produce a temperaturas que oscilan entre los 500 y 540°C y presiones de 1,5-2,0 bares. La mayor parte de los catalizadores empleados para la desintegración son zeolitas ayudados por silicato amorfo de alúmina con metales.

### *Hydrogenación con compuestos oxigenados*

En este proceso se hidrogenan los compuestos oxigenados en una mezcla de alcohol.

### **Producción de amoníaco**

Las plantas de producción de amoníaco (NH<sub>3</sub>) pueden constituirse en unidades independientes o integrarse con otras plantas, normalmente dedicadas a la producción de urea y metanol. La producción de hidrógeno y / o monóxido de carbono también puede integrarse con las plantas de fabricación de amoníaco. El amoníaco resulta de la reacción exotérmica del hidrógeno y el nitrógeno. Esta reacción se lleva a cabo en presencia de catalizadores de óxidos metálicos a altas presiones. La fuente de materia prima del nitrógeno es el aire en la atmósfera y puede emplearse en estado natural como aire comprimido o nitrógeno puro generado por una unidad de separación de aire. El hidrógeno puede encontrarse en varias fuentes, incluido el gas natural, el crudo, la nafta o los gases residuales procedentes del procesamiento de carbón.

El proceso de producción de amoníaco a partir del gas sintético consta de las siguientes fases: la eliminación de restos de azufre en la materia prima; el reformado primario y secundario; la conversión del monóxido de carbono; la eliminación de dióxido de carbono; la metanización; la compresión; la síntesis del amoníaco; y la refrigeración del producto de amoníaco. El

carbón se elimina en forma de dióxido de carbono concentrado (CO<sub>2</sub>), que puede emplearse en la fabricación de urea y otros usos industriales para evitar su vertido en la atmósfera. Los catalizadores utilizados en el proceso pueden contener cobalto, molibdeno, níquel, óxido de hierro / óxido de cromo, óxido de cobre / óxido de cinc y hierro.

Los dos procesos no convencionales son: añadir más aire de proceso al reformado secundario mediante la eliminación criogénica del exceso de nitrógeno; y el intercambio de calor del reformado autotérmico. Este último proceso tiene algunas ventajas ambientales, ya que puede prescindirse del reformado primario y permite consumir menos energía.

### **Producción de metanol**

Normalmente, la síntesis del metanol consiste en la reacción, el reciclado de gases y la purificación. Durante la fase de reacción, el monóxido de carbono y el hidrógeno reaccionan a alrededor de los 250°C y 50-80 bares en presencia de un catalizador de cobre para producir metanol. Los reactores comercialmente disponibles incluyen los de tipo tubular de lecho fijo o los radiales adiabáticos de varios lechos. El metanol se condensa aguas abajo del reactor y el gas sin convertir se recicla en la unidad de producción de gas sintético. La sección de purificación está compuesta por dos torres de fraccionamiento donde las fracciones ligeras y pesadas (alcoholes de alto peso molecular) se eliminan del metanol producido. Suelen recuperarse las fracciones ligeras como gas combustible. Las fracciones pesadas suelen quemarse en una caldera de vapor mediante un quemador dedicado.

### **Licuefacción directa del carbón**

Muchos países han dedicado esfuerzos a la investigación y el desarrollo de la licuefacción directa del carbón. La mayoría de los procesos en curso se basan en la hidrogenación catalítica

de carbón disperso y parcialmente disuelto en un disolvente orgánico. La reacción depende enormemente del grado, calidad y envejecimiento de carbón. Para carbones de grado bajo, mezclas de agua, hidrógeno y CO (gas sintético) son los agentes de hidrogenación más eficaces. La contaminación del catalizador con las impurezas del carbón constituye un problema, junto con el tratamiento de aguas residuales. Las grandes plantas piloto y de demostración han funcionado correctamente.

Gráfico A.1: Diagrama esquemático de la gasificación del carbón

