

# Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la industria química inorgánica de gran volumen de producción y la destilación de alquitrán de hulla

## 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>

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 aquéllos 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.

<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.

## Aplicabilidad

Las presentes guías sobre medio ambiente, salud y seguridad contienen información relevante para los proyectos e instalaciones de fabricación de sustancias químicas, y abarca la producción de compuestos inorgánicos en grandes volúmenes (LVIC), incluidos amoníaco, ácidos (nitríco, clorhídrico, sulfúrico, fluorhídrico, fosfórico), cloruro alcalino (por ejemplo cloro, sosa cáustica, carbonato de sodio, etc.), negro de carbón y destilación de alquitrán de hulla (naftaleno, fenantreno, antraceno). 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 a la fabricación de compuestos inorgánicos en grandes volúmenes (LVIC) y la destilación de alquitrán de hulla que tienen lugar durante la fase operacional, así como recomendaciones para su manejo.

Por otra parte, en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones sobre la gestión 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 posibles problemas ambientales asociados con la fabricación de LVIC incluyen:

- Emisiones a la atmósfera
- Efluentes líquidos
- Generación de residuos sólidos
- Gestión de materiales peligrosos
- Ruido
- Olores
- Desmantelamiento

#### Emisiones a la atmósfera

La fabricación y uso de sustancias químicas inorgánicas y de productos químicos suele generar un gran volumen de emisiones; sin embargo, la tecnología actual permite llevar a cabo las operaciones en sistemas cerrados, lo que reduce considerablemente las emisiones a la atmósfera.

Las fuentes de emisiones procedentes de los procesos químicos incluyen gases residuales de proceso, calentadores y calderas; válvulas, bridas, bombas y compresores; el almacenamiento y transferencia de materias primas, productos e sustancias intermedias; el manejo de aguas residuales; antorchas, y ventiladores de emergencia.

Aunque las emisiones procedentes de la fabricación de sustancias químicas varían en función del proceso específico y de las materias primas asociadas a éste, los contaminantes más frecuentes que pueden generarse desde fuentes fijas o fugitivas durante las operaciones rutinarias incluyen: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>), ácidos y nubes ácidas, gas de cloro y polvo. Los compuestos orgánicos volátiles y el humo de alquitrán suelen originarse en las plantas de destilación de negro de carbón y alquitrán de hulla.

Las emisiones gaseosas en la industria de fabricación de sustancias químicas pueden controlarse normalmente mediante adsorción o absorción. Las emisiones de partículas, cuyo diámetro aerodinámico suele estar por debajo de los 10 micrones, se controlan con sistemas altamente eficaces, como bolsas filtrantes, precipitadores electrostáticos, etc.

Las instalaciones de fabricación de sustancias químicas son grandes consumidoras de energía. Las emisiones de gases de escape producidas por la combustión de gas y otros combustibles en turbinas, calderas, compresores, bombas y otros motores dedicados a la generación de electricidad y calor constituyen una fuente significativa, sobre todo de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones sobre la gestión de pequeñas emisiones de fuentes de combustión con una capacidad de hasta 50 megavatios térmicos (MWth), incluidas normas de emisión a la atmósfera de emisiones de escape. Las

Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para las centrales térmicas contienen recomendaciones para el manejo de las emisiones de fuentes de combustión para las fuentes de generación de electricidad de mayor tamaño.

### *Gases de efecto invernadero (GEI)*

La fabricación de LVIC constituye una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Los GEI se generan durante el proceso, así como durante la producción de su elevada demanda de energía. Se adoptarán las medidas dirigidas a incrementar la eficiencia energética y se instalarán quemadores bajos de NO<sub>x</sub> para reducir la generación de CO<sub>2</sub>.

Se invertirán todos los esfuerzos necesarios para maximizar la eficiencia energética y diseñar instalaciones que minimicen el uso de energía. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen recomendaciones sobre eficiencia energética.

### *Emisiones fugitivas*

Las emisiones fugitivas se asocian con fugas en las tuberías, válvulas, conexiones, bridas, juntas, conductos abiertos, tanques de almacenamiento de techo flotante y juntas de las bombas, sistemas transportadores de gas, juntas de compresores, válvulas de seguridad, depósitos o fosas abiertas / contenedores, y la carga y descarga de productos. Dada la presencia de productos peligrosos en las plantas de fabricación de LVIC (es decir, NH<sub>3</sub> y cloro), se estudiarán e implementarán métodos para controlar y prevenir las emisiones fugitivas en el diseño, la operación y el mantenimiento de las mismas. La selección de las válvulas, bridas, accesorios, juntas y revestimientos se basará en su capacidad para reducir las fugas de gas y emisiones fugitivas.

Se evitará el uso de ventilación en los techos de los tanques mediante la instalación de válvulas de seguridad. Los almacenes y estaciones de descarga se equiparán con unidades de recuperación de vapor. Los sistemas de procesamiento de vapor pueden consistir en distintos métodos, como la adsorción, refrigeración, reciclado, recogida y quema de carbono.

Entre las medidas que pueden adoptarse para reducir la generación de emisiones fugitivas están:

- Implementar rigurosos programas de mantenimiento, especialmente para las cajas de estopa en vástagos de válvula y asientos en las válvulas de seguridad, para reducir o eliminar los vertidos accidentales
- Seleccionar las válvulas, bridas y conexiones adecuadas;
- Diseñar, construir, operar y mantener adecuadamente las instalaciones
- Implementar programas de detección y reparación de fugas
- Instalar sistemas de vigilancia continua en todas las áreas sensibles

### *Ventilación y combustión*

La ventilación y combustión son medidas operativas y de seguridad importantes en las instalaciones de procesamiento del carbón destinadas a garantizar la segura eliminación del gas durante la puesta en marcha y parada de las instalaciones o en caso de emergencia, fallo eléctrico o del sistema o cualquier condición anómala en la planta.

Los métodos recomendados para prevenir, minimizar y controlar las emisiones a la atmósfera generadas por la ventilación y la combustión incluyen:

- Emplear mejores prácticas y nuevas tecnologías para minimizar los vertidos y los posibles impactos asociados a la ventilación y la combustión (por ejemplo, puntas de antorcha eficaces, sistemas de piloto de ignición fiables, minimización de dispersión de líquidos, control de las emisiones de olor y humo visible, y ubicación de la antorcha a una distancia segura de los posibles receptores humanos y ambientales)
- Calcular los volúmenes de combustión y establecer objetivos de combustión para las nuevas instalaciones, registrando el volumen de gas quemado en todas las combustiones
- Desviar las emisiones de gas durante emergencia o condiciones alteradas hacia sistemas eficaces de combustión de gas. La ventilación de emergencia puede estar justificada en ciertas circunstancias, cuando la combustión de la corriente de gas no sea factible y sobre la base de un análisis de riesgo. Se documentará exhaustivamente la justificación para no emplear un sistema de quema de gas antes de proceder al venteo de gas de emergencia.

### *Emisiones de proceso a la atmósfera – Fabricación de amoníaco*

Las emisiones de proceso a la atmósfera procedentes de las plantas de amoníaco consisten principalmente en hidrógeno ( $H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ). Las emisiones concentradas de dióxido de carbono se originan durante la extracción de  $CO_2$  en estas instalaciones. Asimismo, pueden darse emisiones fugitivas de  $NH_3$  (por ejemplo de tanques de almacenamiento, válvulas, bridas y tuberías), especialmente durante el transporte o transferencia. Las emisiones no rutinarias asociadas con los fallos en el proceso o con accidentes pueden contener gas natural,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ , compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y  $NH_3$ .

Algunas de las medidas de prevención y control de emisiones recomendadas consisten en:

- Emplear el tratamiento gas de purga con  $NH_3$  sintético para recuperar el  $NH_3$  y  $H_2$  antes de quemar el resto en el reactor de reformado primario
- Incrementar el tiempo de permanencia de los gases emitidos en la zona de alta temperatura
- Conectar las emisiones de amoníaco de las válvulas de seguridad o dispositivos de control de presión de los depósitos o tanques a una antorcha o a un lavador de agua
- Combinar las instalaciones de amoníaco y urea para reducir (mediante la reutilización en la planta de urea) las emisiones de  $CO_2$  generadas durante el proceso de fabricación del amoníaco<sup>2</sup>. Otra alternativa industrial consiste en combinar la producción de amoníaco con la de metanol. Cabe destacar que en las instalaciones de producción de metanol, el hidrógeno se fabrica a partir del gas natural, mediante una unidad de reformado de vapor seguida de otra de metanol. Por consiguiente, este proceso no elimina totalmente las emisiones de  $CO_2$ , debido a la energía empleada para operar las unidades de producción de hidrógeno y de síntesis del metanol.

### *Emisiones de proceso a la atmósfera – Fabricación de ácido*

Las emisiones de proceso en las plantas de ácido incluyen:

- El óxido nitroso ( $N_2O$ ) y el  $NO_x$  procedentes de las plantas de fabricación de ácido nítrico, especialmente de las emisiones de gas de cola<sup>3</sup>

<sup>2</sup> El  $CO_2$  derivado del proceso de fabricación del amoníaco puede consumirse casi por completo cuando el amoníaco producido se transforma en urea (1t  $NH_3$  – 1,5 t de urea).

<sup>3</sup> Los niveles mínimos de emisiones de  $NO_x$  generados actualmente en las plantas modernas sin añadir técnicas de reducción de la contaminación oscilan entre los 1.000 y los 2.000 ppmv en el caso de la absorción a presión media y

- El  $\text{SO}_2$  procedente de la oxidación incompleta y el  $\text{SO}_3$  que resulta de la absorción incompleta y las gotículas de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) generados en las plantas de fabricación de ácido sulfúrico
- Los fluoruros gaseosos y el polvo de las plantas de ácido fosfórico / fluorhídrico
- El gas de ácido clorhídrico (HCl), el cloro y los compuestos orgánicos clorados procedentes principalmente de los gases de salida del sistema de purificación de HCl en la producción de HCl
- El flúor, el ácido fluorhídrico (HF) y el tetrafluoruro de silicio ( $\text{SiF}_4$ ) generados por la digestión de rocas y polvo fosfóricos durante la manipulación de roca fosfórica para la producción de HF. El material particulado emitido durante la manipulación y el secado del espato flúor. En las plantas de ácido fluorhídrico, la presencia de emisiones de flúor en los extractores finales suele ser muy escasa después de aplicar el tratamiento requerido.

Algunas de las medidas de prevención y control de emisiones recomendadas consisten en:

- Equipar la planta con precondensadores que extraigan el vapor de agua y la niebla de ácido sulfúrico, así como con condensadores, depuradores de ácido y depuradores de agua que minimicen el vertido de HF,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{SO}_2$ , y  $\text{CO}_2$  en los gases de cola
  - Utilizar el proceso de adsorción a alta presión en la producción de ácido nítrico para minimizar la concentración de  $\text{NO}_x$  en el gas de cola
  - Tratar los gases emitidos procedentes de las plantas de ácido nítrico empleando la extracción catalítica del  $\text{NO}_x$
- Estudiar la posibilidad de emplear el proceso de doble absorción en las plantas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Las plantas que utilicen un proceso único de absorción estudiarán la posibilidad de implementar las siguientes medidas:
    - Catalizador de cesio en el último lecho
    - Reducir el  $\text{SO}_2$  mediante la depuración con un compuesto neutralizante
    - Reducir el  $\text{SO}_2$  con peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )
  - Controlar las emisiones de polvo de los gases de combustión procedentes de secadores con calentamiento directo y/o gases de transporte neumático empleando ciclones y filtros
  - Recuperar el flúor como ácido fluosilícico; se utilizará una solución diluida de ácido fluosilícico como líquido de depuración. El flúor emitido durante la digestión de roca fosfórica y durante la concentración de ácido fosfórico se eliminará con sistemas de depuración
  - Controlar las emisiones de HF con equipos de condensación, depuración y absorción empleados en la recuperación y purificación de productos de ácido fluorhídrico y hexafluorosilícico
  - Minimizar las emisiones de HF manteniendo una presión ligeramente negativa en el horno durante las operaciones normales
  - Instalar lavadores cáusticos para reducir los niveles de contaminantes en el gas de cola de HF cuando sea necesario
  - Controlar las emisiones de polvo mediante el uso de bolsas filtrantes en los silos de espato flúor y secaderos. Recoger el polvo procedente de las corrientes de gas que salgan del horno en la producción de HF y devolver el polvo al horno para su posterior procesamiento
  - Controlar las emisiones de polvo durante la manipulación y el almacenamiento de espato flúor con cubiertas flexibles y aditivos químicos

entre 100 y 200 ppmv en el caso de la absorción a alta presión. En las plantas nuevas y en condiciones operativas normales, el nivel de emisiones de  $\text{NO}_x$  (excluyendo el  $\text{N}_2\text{O}$ ) puede situarse en torno a los 100 ppmv, lo que equivale a 0,65 kg  $\text{NO}_x$  (expresado como  $\text{NO}_2$ ) por tonelada de ácido nítrico al 100% producido.

- Controlar las emisiones de polvo procedentes de roca fosfórica durante su transporte, manipulación y almacenamiento, empleando sistemas cerrados y bolsas filtrantes.

### *Emisiones de proceso a la atmósfera – Plantas de cloruro alcalino*

Los principales procesos en la producción de cloruro alcalino son la electrólisis de celda de mercurio, diafragma y membrana. Las emisiones más significativas generadas por los tres procesos son emisiones de gas de cloro, tanto fugitivas como de fuentes puntuales. Las fuentes de posibles emisiones significativas de cloro se asocian normalmente con la unidad de destrucción de cloruro, donde se tratan las emisiones de los gases no condensables que quedan después de la licuefacción ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) con un contenido en cloro, procedentes de entre el 1 y el 8 por ciento del gas crudo de cloro producido. Otras emisiones procedentes de las plantas de cloruro alcalino son las asociadas a la purificación de la salmuera. Las emisiones a la atmósfera procedentes de la tecnología de celda de mercurio incluyen vapores de mercurio emitidos como emisiones fugitivas en las celdas (por ejemplo gas de ventilación de la sala de celda).

Las principales emisiones a la atmósfera procedentes de la fabricación de carbonato de sodio son las emisiones de proceso y las partículas de dióxido de carbono generadas por los calcinadores de mineral, los refrigeradores y secadores de carbonato de sodio, las operaciones de aplastado, cribado y transporte de mineral, y las operaciones de manejo y transporte de productos. Las emisiones de productos de combustión (como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre), se dan en las unidades de calentamiento directo, como los hornos de calcinación de mineral y los secadores de carbonato de sodio. También puede emitirse amoníaco. Los óxidos de nitrógeno se producen en pequeñas

cantidades dentro del horno mediante la oxidación del nitrógeno contenido en el aire y empleado en el proceso de combustión, y los óxidos de azufre mediante la oxidación de compuestos que contengan azufre en el carbonato cálcico.

Algunas de las medidas de prevención y control de emisiones recomendadas consisten en:

- Interrumpir el uso de los procesos de celda de mercurio y diafragma siempre que sea posible y adoptar procesos nuevos de celda de membrana. O bien instalar materiales mejorados en las piezas de la celda (por ejemplo ánodos dimensionalmente estables (DSA®), diafragma modificado) cuando sea necesario.
- Elaborar balances de masa para dejar constancia del uso de mercurio
- Optimizar el proceso para mantener las celdas tan juntas como sea posible
- Instalar unidades de destilación de mercurio para recuperar el mercurio.
- Garantizar que las cajas de salida y las cajas alcalinas de la celda de mercurio estén debidamente selladas, eliminando así los vertidos fugitivos
- Diseñar la unidad de absorción de cloro con una capacidad de tratamiento suficiente para absorber toda la producción de la sala de celda e impedir las emisiones de gas de cloro en caso de producirse un fallo en el proceso y hasta llevar a efecto la parada de la planta. La unidad de absorción se diseñará para reducir el contenido en cloro en el gas emitido a menos de  $5 \text{ mg/m}^3$  en el peor de los casos.
- Dirigir todas las corrientes de gas residual que contenga cloro hacia la unidad de absorción de cloro y garantizar que el sistema sea estanco a los gases
- Instalar los detectores de gas de cloro en zonas expuestas al riesgo de fugas de cloro y así facilitar la detección inmediata de fugas

- Emplear procesos de licuefacción y purificación de tetracloruro de carbono-cloro libre. Se evitará e interrumpirá el uso de tetracloruro de carbono ( $\text{CCl}_4$ ) para extraer el tricloruro de nitrógeno ( $\text{NCl}_3$ ) y para absorber el gas de cola.
- En las plantas de carbonato de sodio, controlar las emisiones de partículas generadas durante las operaciones de manejo de mineral y producto mediante lavadores venturi o cámaras de filtros, precipitadores electrostáticos y/o ciclones, y reciclar las partículas recogidas.

#### *Emisiones de proceso a la atmósfera – Fabricación de negro de carbón*

Otra fuente importante de emisiones a la atmósfera es el gas de cola procedente del reactor después de la separación del negro de carbón, que es un gas de bajo poder calorífico con un alto contenido en humedad debido al vapor de agua de enfriamiento. La composición del gas de cola varía considerablemente en función de la calidad de negro de carbón producido y de la materia prima empleada. Puede contener  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , compuestos de azufre reducido ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CS}_2$  y  $\text{COS}$ ),  $\text{SO}_2$ , compuestos de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HCN}$  y  $\text{NH}_3$ ), COV como el etano y el acetileno, y partículas de negro de carbón no captadas por las bolsas filtrantes diseñadas para la separación del producto.

Algunas de las medidas de prevención y control de emisiones recomendadas consisten en:

- Usar materias primas primarias con un contenido en azufre que oscile entre el 0,5 – 1,5 por ciento<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Los niveles específicos de emisiones de 10 – 50 kg  $\text{SO}_x$  (como  $\text{SO}_2$ ) por tonelada de negro de carbón para caucho producido son factibles como promedio anual.

- Precalear el aire de proceso en recuperadores de calor, empleando los gases calientes (que contienen negro de carbón) que salen del reactor de negro de horno
- Instalar y mantener bolsas filtrantes de alto rendimiento para garantizar una elevada eficiencia en la recogida de negro de carbón y unas pérdidas mínimas de producto de negro de carbón residual en el gas de cola filtrado
- Utilizar el contenido energético del gas de cola (mediante la quema del gas y empleando la energía producida)
- Aplicar técnicas primarias de reducción de  $\text{NO}_x$  para reducir el contenido en  $\text{NO}_x$  del humo originado durante la combustión del gas de cola en los sistemas generadores de energía<sup>5</sup>
- Instalar filtros textiles en el sistema transportador de aire, el sistema de ventilación y el gas de purga de los secadores<sup>6</sup>
- Ventilar el gas de cola no combustionado sólo en caso de emergencia, en los períodos de puesta en marcha y parada y durante las épocas de cambio de calidad

#### *Emisiones de proceso a la atmósfera – Destilación de alquitrán de hulla*

Aunque las emisiones generadas por la destilación del alquitrán de hulla se dan en condiciones operativas normales, las emisiones esenciales de estos procesos que precisan control son aquéllas consistentes en humo de alquitrán, olores, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y material particulado, todo lo cual puede originarse en los procesos de la planta, incluido el transporte, almacenamiento, calentamiento, mezclado y refrigeración del alquitrán.

<sup>5</sup> Los niveles de emisiones en las plantas asociados con el uso de BAT se sitúan por debajo de los 0,6 g  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$  como promedio a la hora de  $\text{O}_2$  al 3% durante la producción normal.

<sup>6</sup> En los sistemas de transporte de aire y ventilación a bajas temperaturas, el nivel de emisiones oscila entre los 10 y los 30  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  como promedio cada media hora. Para el filtro de purga del secador, las emisiones se sitúan entre menos de 20 y 30  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  como promedio cada media hora.



Algunas de las medidas de prevención y control de emisiones recomendadas consisten en:

- Utilizar bombas en tierra y otros métodos para optimizar los suministros de alquitrán y reducir las emisiones de humo y olor de alquitrán
- Ubicar los tanques de almacenamiento en la dirección del viento de los posibles receptores cercanos, controlar la temperatura de los materiales almacenados<sup>7</sup> e implementar procedimientos de manipulación especial para impedir las molestias provocadas por los olores
- Implementar métodos de prevención de desbordamiento para los tanques de almacenamiento a granel, como son alarmas de alto nivel o indicadores de volumen
- Emplear sistemas locales de ventilación de escape diseñados para recoger y tratar las emisiones de COV procedentes de los tanques de mezclado y otros equipos de proceso.

## Efluentes líquidos

Los efluentes líquidos incluyen aguas de proceso y refrigeración, las aguas pluviales y otras descargas específicas (por ejemplo aguas de pruebas hidrostáticas y limpieza, principalmente durante la puesta en marcha y reacondicionamiento de las instalaciones)<sup>8</sup>. Las descargas de aguas de proceso procedentes de las plantas de fabricación de LVIC pueden incluir lavados ácidos empleados durante las actividades de limpieza y purgas programadas como parte de las operaciones diarias. Otras fuentes potenciales de efluentes pueden ser los lavadores empleados como sistemas de control de emisiones. Los vertidos o fugas accidentales de los tanques de almacenamiento de producto, como el almacenamiento de amoníaco y ácido refrigerado, también pueden generar

<sup>7</sup> El índice de emisiones de humo se duplica aproximadamente para cada aumento de 11°C de temperatura.

<sup>8</sup> El reacondicionamiento de las instalaciones se limitan normalmente a una vez cada tres o cuatro años y duran unas semanas.

efluentes. Otras fuentes incluyen efluentes ácidos y cáusticos procedentes de la preparación de agua de alimentación de las calderas para los distintos sistemas de vapor. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** describen la gestión de aguas de refrigeración y aguas pluviales.

A continuación se describen los efluentes y controles específicos de las distintas clases de plantas de fabricación de sustancias químicas.

### *Efluentes – Fabricación de amoníaco*

Las descargas de las plantas durante las operaciones normales pueden darse debido a la presencia de condensados de proceso y a la depuración de gases residuales que contengan amoníaco y otros productos. Durante la oxidación parcial, la extracción de hollín y ceniza puede afectar al agua descargada en caso de no manipularse debidamente.

Las recomendaciones para prevenir, minimizar y controlar los efluentes procedentes de las plantas de amoníaco incluyen:

- Recuperar el amoníaco absorbido en los gases de purga e instantáneos en un sistema de circuito cerrado para impedir que se produzcan emisiones acuosas de amoníaco
- Recuperar el hollín procedente de la gasificación durante los procesos de oxidación parcial y reciclar el material recuperado en el proceso.

### *Efluentes – Fabricación de ácidos*

Los efluentes generados por las plantas de ácido nítrico pueden estar contaminados con compuestos de nitrógeno. Los efluentes de las plantas de ácido clorhídrico pueden variar en función de los procesos de fabricación a partir de restos de HCl cuando reacciona el H<sub>2</sub> al Cl, a la sal mineral (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) cuando

el ácido se produce mediante la reacción del cloruro de sodio al ácido sulfúrico.

Los vertidos líquidos procedentes de las plantas de ácido fosfórico consisten principalmente en efluentes líquidos originados en los condensadores refrigeradores al vacío y sistemas de depuración de gas empleados para condensar y limpiar los vapores generados en las distintas fases de proceso. Estos vapores ácidos condensados contienen principalmente flúor y pequeñas cantidades de ácido fosfórico. El flúor emitido por el reactor y los evaporadores puede recuperarse como subproducto comercial (ácido fluorosilícico al 20-25 por ciento).

Las recomendaciones para prevenir, minimizar y controlar los efluentes procedentes de las plantas de ácido incluyen:

- Emplear reactores de circuito cerrado y evaporadores para eliminar las aguas residuales de proceso
- Recircular el agua usada para transportar el yeso fosforado en el proceso después de la sedimentación
- Tratar el efluente del depurador con cal o carbonato cálcico o usar agua marina como líquido de depuración para precipitar el flúor como fluoruro de calcio
- Instalar un separador para extraer las gotas de ácido fosfórico de las emisiones procedentes de los enfriadores de vacío instantáneos y evaporadores en vacío antes de la depuración y así minimizar la contaminación en el efluente del depurador con pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ )
- Recuperar el ácido fluorosilícico ( $H_2SiF_6$ ) procedente del tratamiento de los gases de cola en las unidades fluorhídricas para usarlo como material de alimentación o para la fabricación de fluoruros o silicofluoruros. El  $H_2SiF_6$  también puede combinarse químicamente para producir  $CaF_2$  y sílice.

### *Efluentes – Plantas de cloruro alcalino*

La salmuera constituye una corriente residual clave para la industria de cloruro alcalino. Las celdas de membrana pueden usar salmuera reciclada que precise declaración. Especialmente cuando se trata de las tecnologías de membrana, la purificación de la salmuera tiene una importancia crucial para prolongar la vida útil de la membrana y su alta eficacia. Los principales componentes en los residuos generados durante la purificación de la salmuera son el sulfato, el cloruro, oxidantes libres, clorato, bromato y tetracloruro de carbono.

Las fuentes principales de efluentes líquidos generados por los procesos de carbonato de sodio suelen ser aguas residuales procedentes de las aguas empleadas en la destilación y en la purificación de la salmuera. Los efluentes se caracterizan por elevados niveles de sólidos en suspensión<sup>9</sup>. Otra cuestión importante es la posible descarga de metales pesados presentes en las principales materias primas<sup>10</sup>.

Las recomendaciones para prevenir, minimizar y controlar los efluentes procedentes de las plantas de cloruro alcalino incluyen:

- Purificar la salmuera mediante el ajuste del pH, la precipitación, la floculación y la filtración para mantener unos niveles aceptables de impurezas. El consumo de sustancias químicas empleadas para purificar la salmuera varía de unas plantas a otras en función de las impurezas presentes en la salmuera
- Reciclar la salmuera con tecnología de membrana, extrayendo las impurezas mediante unidades de resina de

<sup>9</sup> Las cargas de sólidos en suspensión descargados en las aguas residuales suelen ser significativas y oscilan entre los 90 y 700 kg/t de carbonato de sodio, con un valor promedio que se sitúa en torno a los 240 kg/t de carbonato de sodio.

<sup>10</sup> En una planta de carbonato de sodio con capacidad para producir aproximadamente 600 kt/año, pueden alcanzarse las 10 toneladas al año.

intercambio iónico. La regeneración de resinas requiere el lavado con sosa cáustica y ácido.

- Minimizar el consumo y la descarga de ácido sulfúrico mediante la reconcentración en el emplazamiento en evaporadores de circuito cerrado. El ácido empleado se empleará para controlar el pH en el proceso y en las corrientes de aguas residuales; volverá a venderse a los usuarios que acepten la calidad de este ácido; o se devolverá a un fabricante de ácido sulfúrico para su reconcentración.
- Emplear la reducción catalítica de lecho fijo, la reducción química u otros métodos igualmente efectivos para minimizar la descarga de oxidantes libres<sup>11</sup>
- Adoptar procesos de licuefacción y purificación de tetracloruro de carbono-cloro libre
- Aprovechar las condiciones ácidas en el anólito (pH 1-2) para minimizar la formación de clorato ( $\text{ClO}_3$ ) y bromato ( $\text{BrO}_3$ ), y la destrucción de clorato en el circuito de la salmuera para extraer el clorato antes de purgar las plantas de membranas<sup>12</sup>.

### *Efluentes – Destilación de negro de carbón / alquitrán de hulla*

Los efluentes de aguas residuales tienen una importancia relativamente limitada para la industria del negro del carbón y las unidades de destilación de alquitrán de hulla.

La descarga nula en el agua es factible para ciertas clases de plantas de negro de carbón. Sin embargo, la producción de algunos cauchos y casi todos los productos específicos de negro de carbón requieren agua limpia de enfriamiento. Los sólidos en suspensión (principalmente negro de carbón) se

filtrarán antes de su descarga (o reutilización) hasta alcanzar niveles inferiores a los 20 mg/l. Terminada la filtración, las corrientes de proceso podrán reutilizarse.

Se vigilarán las concentraciones de sólidos en suspensión, BOD y HAP en los efluentes procedentes de las unidades de destilación de alquitrán de hulla.

### *Agua de pruebas hidrostáticas*

Las pruebas hidrostáticas de equipos y tuberías suelen requerir cantidades considerables de agua (por ejemplo, los tanques de  $\text{NH}_3$  pueden tener una capacidad superior a los 20-30.000 m<sup>3</sup>). Los aditivos químicos (normalmente inhibidores de la corrosión, un barredor de oxígeno y tintes) se añaden a menudo para impedir la corrosión interna.

Se implementarán las siguientes medidas de prevención y control de la contaminación para el manejo de las aguas de pruebas hidrostáticas: optimizar el consumo de agua, y garantizar una dosificación óptima y una cuidadosa selección de las sustancias químicas necesarias.

Cuando la descarga de aguas de pruebas hidrostáticas en el mar o en aguas superficiales sea la única alternativa factible, se elaborará un plan de eliminación de aguas de pruebas hidrostáticas. El plan incluirá, como mínimo, las características del/los punto/s de descarga, la tasa de descarga, el uso y dispersión de sustancias químicas y el seguimiento necesario.

Se evitará el vertido de aguas de pruebas hidrostáticas en aguas costeras superficiales.

### **Residuos**

Las plantas bien gestionadas de fabricación de sustancias químicas no deberían generar cantidades significativas de residuos sólidos durante la operación normal de las mismas. Los residuos que suelen generarse incluyen aceites residuales,

<sup>11</sup> El nivel de emisión de oxidantes libres al agua asociado con las mejores técnicas disponibles es inferior a 10 mg/l.

<sup>12</sup> El nivel de clorato asociado con las mejores técnicas disponibles en el circuito de la salmuera es de 1-5 g/l y el nivel asociado de bromato es de 2-10 mg/l, y depende del nivel de bromuro en la sal.

catalizadores usados, lodos procedentes de las unidades de tratamiento de aguas residuales, el polvo recogido en las cámaras de filtros, las cenizas del fondo de las calderas, lodos y tortas de las unidades de filtración, etc.

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

- Una adecuada gestión in situ de los catalizadores usados 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
- La gestión fuera del emplazamiento por parte de empresas especializadas que puedan recuperar y reciclar metales pesados (o metales preciosos procedentes de los catalizadores de las plantas de ácido nítrico) siempre que sea posible.

El almacenamiento, manipulación y eliminación de los residuos peligrosos y no peligrosos se realizará de acuerdo con las buenas prácticas sobre medio ambiente, salud y seguridad para el manejo de residuos descritas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

### *Residuos – Fabricación de amoníaco*

Los procesos de fabricación de amoníaco no producirán residuos sólidos significativos<sup>13</sup>. El manejo de los catalizadores usados y de los tamices moleculares se realizará según lo descrito anteriormente.

<sup>13</sup> Los catalizadores usados y otros residuos sólidos constituirán menos del 0,2 kg por tonelada de producto.

### *Residuos – Fabricación de ácidos*

El yeso fosforado es el subproducto más significativo en la producción húmeda de ácido fosfórico<sup>14</sup>. El yeso fosforado contiene una amplia gama de impurezas, algunas de las cuales se consideran un riesgo potencial para el medio ambiente y la salud pública<sup>15,16</sup>.

El sulfato cálcico (anhidrita) se produce como subproducto de la fabricación de ácido fluorhídrico (HF), que contienen entre 0,2 y 2,0 % del CaF<sub>2</sub> no reaccionado y menos de 1,0 % de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Asimismo, contiene la mayoría de las trazas de impurezas presentes en el espato flúor<sup>17</sup>.

Las medidas recomendadas para prevenir o minimizar la generación de residuos sólidos y manejar los residuos sólidos procedentes de las plantas de ácido incluyen:

- La eliminación del yeso fosforado en instalaciones en tierra diseñadas para impedir las filtraciones en las aguas subterráneas o superficiales. Se invertirán todos los esfuerzos que sean necesarios para reducir el impacto del vertido de yeso fosforado y posiblemente mejorar la calidad del yeso para su reutilización. El vertido en el mar no se considera una práctica aceptable.
- El refinado y la venta del sulfato cálcico anhidrita procedente de la producción de HF para su uso en otros productos (por ejemplo cemento) cuando sea posible.

<sup>14</sup> Se producen alrededor de 4 - 5 toneladas de yeso fosforado (principalmente sulfato cálcico, CaSO<sub>4</sub>) por cada tonelada de ácido fosfórico producido.

<sup>15</sup> Las impurezas presentes en la roca fosfórica se distribuyen entre el ácido fosfórico producido y el sulfato cálcico (yeso); el mercurio, el plomo y los componentes radioactivos, en caso de estar presentes, acaban principalmente en el yeso, mientras que el arsénico y otros metales pesados como el cadmio van a parar en el ácido. La radioactividad de la roca fosfórica obedece principalmente a los radionúclidos en la desintegración radiactiva del uranio - 238.

<sup>16</sup> La roca fosfórica, el yeso fosforado y los efluentes producidos en la planta de ácido fosfórico registran por lo general una radioactividad inferior a los vapores de excepción establecidos en la normativa y las guías internacionales pertinentes (por ejemplo, la Directiva de la UE 96/26/EURATOM)

<sup>17</sup> Se producen alrededor de 3,7 toneladas de anhidrita como subproducto por tonelada de HF.

### *Residuos – Plantas de cloruro alcalino*

Los lodos de salmuera constituyen una de las principales corrientes de residuos en la industria de cloruro alcalino. El volumen de lodos de salmuera de filtración depende principalmente de las características de la sal entrante, empleada para purificar la salmuera. Las sales precipitadas se extraen de la salmuera mediante la decantación / clarificación y filtración. Los lodos pueden extraerse de forma discontinua mediante el lavado con una solución de ácido hidroclorehídrico débil. El ácido hace que el precipitado se disuelva, obteniéndose una solución relativamente inocua que puede descargarse en el efluente líquido. Los residuos generados durante la purificación secundaria de la salmuera consisten en materiales usados, como los materiales de prevestimiento y materiales básicos hechos de celulosa. Los lodos de filtración de revestimiento procedentes de la suavización con salmuera consisten principalmente en alfa celulosa contaminada con hidróxido de hierro y sílice<sup>18</sup>. Las resinas empleadas para el intercambio iónico durante la purificación secundaria de salmuera rara vez cambian<sup>19</sup>. Las membranas usadas<sup>20</sup> y juntas de las celdas de membrana constituyen otra fuente de corrientes de residuos.

Los principales residuos sólidos procedentes de las unidades de carbonato de sodio son los finos de carbonato cálcico (30 – 300 kg/t de carbonato de sodio) y partículas no reciclados en el apagador (10 – 120 kg/t de carbonato de sodio).

Las medidas recomendadas para prevenir o minimizar la generación de residuos sólidos y manejar los residuos sólidos procedentes de las plantas de cloruro alcalino incluyen:

- Tratar de descubrir opciones para reutilizar los residuos sólidos procedentes de la purificación de la salmuera; cuando los residuos deban eliminarse, se estudiará el uso de depósitos naturales, como por ejemplo cavidades de salmuera.
- Seleccionar carbonato cálcico con un alto contenido en CaCO<sub>3</sub>, las características físicas adecuadas y un contenido limitado en metales pesados y otras impurezas.

### *Residuos – Destilación de negro de carbón / alquitrán de hulla*

Los procesos de negro de carbón generan una cantidad muy limitada de residuos peligrosos (residuos oleosos). La brea de alquitrán de hulla es un residuo sólido negro procedente de la destilación del alquitrán de hulla. La recuperación de las sustancias químicas del alquitrán resulta en la generación de aceites residuales, incluyendo la nafta pesada, aceite carbólico desfenolado, aceite de naftaleno escurrido, aceite de lavado, aceite de antraceno filtrado y aceite pesado.

Las medidas recomendadas para prevenir o minimizar la generación de residuos sólidos y manejar los residuos sólidos incluyen:

- Siempre que sea posible, reutilizar los aceites usados, los lodos oleosos y los residuos de la destilación del alquitrán de hulla como materia prima o combustible
- Reciclar el negro de carbón fuera de especificación en el proceso

### **Manejo de materiales peligrosos**

Las plantas dedicadas a la fabricación de sustancias químicas deben evaluar los riesgos asociados con el uso y la manipulación de materiales peligrosos e implementar prácticas que prevengan y minimicen dichos riesgos. Como indican las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad,**

<sup>18</sup> Las plantas de celdas de membrana registran cifras de 600 g/t para los lodos procedentes de la suavización con salmuera.

<sup>19</sup> Las resinas se regeneran unas 30 veces al año.

<sup>20</sup> Las membranas tienen una vida útil de entre 2 y 4 años.

la aplicación de estas prácticas de gestión se documentará por escrito en un Plan de Gestión de Materiales Peligrosos<sup>21</sup>. La finalidad de este plan es establecer e implementar un conjunto de acciones preventivas sistemáticas frente a los vertidos accidentales de sustancias que puedan provocar graves daños al público en general y al medio ambiente durante la exposición a corto plazo y mitigar la gravedad de los vertidos que lleguen a producirse.

Algunas de las medidas específicas de la industria recomendadas para la prevención y el control de la contaminación consisten en:

- Prevenir los vertidos accidentales mediante la inspección y el mantenimiento de los sistemas de almacenamiento y transporte, incluyendo cajas de estopa en las bombas y válvulas y otros focos potenciales de fugas. Los vertidos de sustancias intermedias y productos peligrosos se contendrán y recuperarán o neutralizarán tan pronto como sea posible.
- La contención secundaria para los tanques de almacenamiento de líquidos (es decir, el amoníaco, los ácidos, etc.) y la provisión de capacidad adicional para productos peligrosos como el cloro, como describen las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.
- Mantener buenas prácticas de mantenimiento, realizando las actividades de transferencia en zonas pavimentadas y recogiendo inmediatamente los pequeños vertidos que puedan producirse.

## Ruido

En las plantas de fabricación de sustancias químicas, las principales fuentes de ruido son las máquinas giratorias de gran

tamaño, como compresores y turbinas, bombas, motores eléctricos, refrigeradores de aire y calentadores caldeados. Durante una despresurización de emergencia, pueden generarse elevados niveles de ruido debido a la liberación de gases a alta presión para quemar y/o la liberación de vapor en la atmósfera.

Las estrategias de prevención y reducción de ruido incluyen:

- Optimizar el diseño y la distribución de la planta, usando los edificios de mayor tamaño como barreras del ruido y ubicando las fuentes de ruido tan lejos como sea posible de los receptores existentes
- Usar equipos generadores que emitan niveles reducidos de ruido
- Instalar barreras aislantes de sonido y silenciadores

Las medidas de reducción y control del ruido son similares a las de otras grandes industrias y descritas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

## Olores

Los procesos de fabricación de LVIC pueden generar olores procedentes de las emisiones fugitivas de vapor o de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Se implementarán controles adecuados para eliminar las fugas y minimizar los vertidos fugitivos y evitar las molestias ocasionadas por el olor.

## Desmantelamiento

Las plantas de fabricación de sustancias químicas pueden registrar la presencia de grandes cantidades de materiales sólidos y líquidos peligrosos, como por ejemplo las soluciones para la extracción de CO<sub>2</sub>, el amoníaco líquido, el cloro, la sosa, los ácidos y los productos presentes en los sistemas de proceso y almacenamiento, productos fuera de especificación,

<sup>21</sup> Ver el Hazardous Waste Management Manual (Manual para el manejo de residuos peligrosos) de la IFC.

catalizadores usados y mercurio procedente de las plantas de cloruro alcalino que emplean celdas de mercurio.

Se recomiendan las siguientes prácticas de manejo de las actividades de desmantelamiento:

- En el caso de las plantas de cloruro alcalino que emplean celdas de mercurio, se planificarán cuidadosamente todas las etapas de desmantelamiento para minimizar los vertidos de mercurio y de otras sustancias peligrosas (incluidos dioxinas y furanos en caso de emplearse ánodos de grafito) y proteger la higiene y seguridad de los trabajadores, elaborando un plan para la eliminación del mercurio restante.
- Recoger las soluciones de extracción de CO<sub>2</sub> en las plantas de amoníaco y todos los productos peligrosos para su posterior manejo y eliminación como material residual peligroso
- Retirar los catalizadores usados en las plantas de NH<sub>3</sub> y HNO<sub>3</sub> para su posterior manejo según lo descrito en la sección anterior sobre residuos sólidos.
- Recuperar y manejar posteriormente el NH<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, ácidos y otros productos procedentes de la sección de síntesis y tanques de almacenamiento, así como todos los productos y sustancias intermedias de los tanques de almacenamiento según las recomendaciones para el manejo de materiales peligrosos descritas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen recomendaciones para las actividades de desmantelamiento y recuperación de tierras contaminadas.

## 1.2 Higiene y seguridad en el trabajo

Las consecuencias que la construcción, la operación y el desmantelamiento de las instalaciones de fabricación de LVIC

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 peligros relacionados con la higiene y la salud laboral en planta deberían identificarse en base a 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 descrita en las **Guías Generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Además, las cuestiones relativas a la higiene y la seguridad en el trabajo específicas de las operaciones con sustancias químicas incluyen:

- Los riesgos de origen químico asociados con la exposición intensa y crónica a gases tóxicos y a otros componentes peligrosos
- Riesgos mayores, incluyendo incendios y explosiones.

Los riesgos mayores se gestionarán de acuerdo con las normas internacionales y mejores prácticas existentes (por ejemplo, las Recomendaciones de la OCDE<sup>22</sup>, la Directiva Seveso II de la UE<sup>23</sup>, y la 'Risk Management Program Rule' de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos<sup>24</sup>).

<sup>22</sup> OCDE, Principios Orientadores de la OCDE para la Prevención, Preparación y Respuesta en caso de Accidentes Químicos, Segunda edición (2003).

<sup>23</sup> Directiva del Consejo de la UE 96/82/CE, conocida como Directiva Seveso II, ampliada por la Directiva 2003/105/CE.

<sup>24</sup> EPA, 40 CFR Parte 68, 1996 - Chemical accident prevention provisions.

## Riesgos de origen químico

La industria se caracteriza por la presencia de compuestos tóxicos, incluyendo el gas de cloro, amoníaco, ácidos, sosa cáustica, aminas, componentes del alquitrán de hulla (por ejemplo hidrocarburos aromáticos mononucleares y policíclicos, fenoles y bases de piridina), que pueden resultar tóxicos en caso de ingestión, inhalación o absorción por la piel. El mayor riesgo para la salud asociado normalmente con el alquitrán de hulla y sus productos es su carcinogénesis en presencia de exposiciones continuadas de la piel a largo plazo a brea de alquitrán de hulla sólida finamente dividida (polvo).

Las recomendaciones para prevenir, minimizar o controlar los impactos en la higiene ocupacional provocados por la exposición a sustancias tóxicas en estas plantas incluyen:

- Evaluar y minimizar las concentraciones de sustancias tóxicas en las áreas de trabajo en condiciones tanto normales como de emergencia. La aplicación de rigurosos protocolos de vigilancia en el lugar de trabajo como parte del sistema global de gestión de la higiene y la seguridad ocupacional. La provisión de indumentaria, incluida protección para los ojos y guantes de PVC, respiradores aptos y revisiones médicas periódicas para todo el personal siempre que sea necesario.
- Instalar detectores de gas en zonas de riesgo siempre que sea posible. Por ejemplo, se colocarán detectores de cloro en las zonas donde puedan producirse fugas de cloro, notificando de forma inmediata la presencia y ubicación de fugas.
- Garantizar una efectiva ventilación en las zonas donde se manipulen productos con puntos de ebullición inferiores
- Proporcionar y utilizar cremas protectoras formuladas para los hidrocarburos aromáticos

## Riesgos mayores

Los impactos más notables en términos de seguridad están relacionados con la manipulación y el almacenamiento de  $\text{NH}_3$  (volátil y venenoso en elevadas concentraciones), cloro (altamente venenoso), sosa cáustica, ácido nítrico, clorhídrico, sulfúrico, fluorhídrico, fosfórico y compuestos orgánicos y gases combustibles como son el gas natural, el CO y el  $\text{H}_2$  y otras sustancias químicas empleadas en el proceso. Estos impactos pueden incluir exposiciones agudas significativas para los trabajadores y la posibilidad de que éstas se produzcan en las comunidades vecinas, dependiendo de las cantidades y tipos de sustancias químicas vertidas accidentalmente y de la existencia de condiciones favorables a eventos reactivos o catastróficos, como incendios y explosiones.

Las plantas de fabricación de LVIC pueden generar o procesar grandes volúmenes de gases combustibles, como el gas natural, el  $\text{H}_2$ , el CO y otras sustancias químicas empleadas en el proceso. El gas sintético (síntesis de gas; que contiene  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}^{25}$ ) generado en plantas de amoníaco puede provocar “dardos de fuego” en caso de prenderse en la sección de escapes 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, del grado de confinamiento de la nube y de la congestión en la zona ocupada por la nube inflamable.

El riesgo de incendios, explosiones y otros riesgos mayores se minimizarán aplicando las siguientes medidas:

- Diseñar la planta de modo que se reduzca la frecuencia de las transferencias de producto y la probabilidad de vertidos

<sup>25</sup> El hidrógeno y el monóxido de carbono combustionan espontáneamente a temperaturas que oscilan entre los 500°C y los 609°C respectivamente; por consiguiente, en algunos puntos de la unidad de generación de gas sintético donde la temperatura del gas es mayor los gases emitidos podrían autocombustionarse sin necesidad de una fuente de ignición.



accidentales, facilitando a la vez la recogida de los vertidos accidentales.

- La temprana detección de vertidos
- Limitar el inventario susceptible de verse mediante el aislamiento de los inventarios de gran tamaño y el aislamiento y despresurización de inventarios de gases inflamables presurizados. Se segregarán las áreas de proceso, almacenamiento, servicios y seguridad, preferentemente mediante la adopción de distancias de seguridad. Las distancias pueden determinarse en base a los análisis específicos de las instalaciones, teniendo en cuenta la incidencia de los riesgos o las normas y guías aplicables (por ejemplo, API, NFPA);
- Retirar las posibles fuentes de ignición
- Retirar o diluir los vertidos y restringir la zona afectada por las pérdidas de contención.

Las medidas específicas de la industria recomendadas para minimizar los riesgos mencionados incluyen:

- Minimizar el inventario de cloro líquido y la longitud de la tubería que contenga el cloro líquido
- Diseñar tanques de almacenamiento atmosférico de amoníaco (-33°C) con paredes dobles y una pared externa de hormigón con un techo que descansa sobre la pared exterior y que utilice un margen adecuado entre la presión operativa y el escape de presión. Se optará por el almacenamiento refrigerado para almacenar grandes volúmenes de amoníaco líquido, dado que el vertido inicial de amoníaco en caso de producirse un fallo en la línea o en el tanque es más lento que en los sistemas de almacenamiento presurizado de amoníaco.
- Diseñar los tanques de almacenamiento de cloro sobre la base de análisis específicos de fallos o riesgos mayores de accidente y sus consecuencias y que tengan en cuenta la posibilidad de recuperar y manejar de forma segura

cualquier vertido de producto—estudiar la posibilidad de proporcionar almacenamiento a bajas temperaturas (-34°C) para los tanques de gran capacidad, y disponer de al menos un tanque vacío de idéntica capacidad al tanque de mayor envergadura destinado al almacenamiento de cloro como reserva de emergencia

- Dada su naturaleza altamente corrosiva y tóxica, se prestará especial atención al manejo y almacenamiento de ácidos, incluida la prevención de fugas o vertidos en corrientes de agua mediante la provisión de contención secundaria; la separación de los canales de drenaje fundamentales; y sistemas de vigilancia continua y de detección y alarma (como el control automático del pH) en las redes de contención y drenaje en peligro
- Evitar la presurización durante la descarga de grandes volúmenes de ácido nítrico. El material recomendado para los tanques, depósitos y accesorios es el acero inoxidable austenítico de bajo carbón.
- Sólo personal y contratistas especialmente capacitados y certificados se encargarán de los suministros y la transferencia de todas las sustancias químicas empleadas en el proceso, incluidas las sustancias químicas empleadas en la unidad de extracción de CO<sub>2</sub> en la planta de amoníaco.

### 1.3 Higiene y seguridad en la comunidad

Las consecuencias que la construcción, la operación y el desmantelamiento de las instalaciones 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**. Estos impactos incluyen entre otros el polvo, el ruido y las vibraciones procedentes del tránsito de vehículos de construcción y las

enfermedades contagiosas asociadas con la afluencia de trabajadores temporales de la construcción.

Los riesgos más significativos para la higiene y la seguridad de la comunidad durante la operación de las plantas de fabricación de sustancias químicas están relacionados con:

- El manejo y almacenamiento de materiales peligrosos, incluidas materias primas, sustancias intermedias, productos y residuos próximos a zonas pobladas
- El transporte de productos peligrosos (amoníaco, cloro, ácidos, negro de carbón), con la posibilidad de que se produzcan fugas accidentales de gases tóxicos e inflamables
- La eliminación de residuos sólidos (yeso fosforado, lodos).

El diseño de la planta y sus operaciones incluirán salvaguardias destinadas a minimizar y controlar los riesgos para la comunidad, incluyendo las siguientes medidas:

- Identificar durante el diseño los supuestos en los que puedan producirse fugas
- Evaluar los efectos de las posibles fugas en las zonas circundantes, incluida la contaminación de aguas subterráneas y suelos
- Seleccionar adecuadamente la ubicación de la planta teniendo en consideración las zonas habitadas, condiciones meteorológicas (por ejemplo la dirección predominante del viento) y recursos hídricos (por ejemplo, la vulnerabilidad de las aguas subterráneas) e identificar las distancias de seguridad entre la zona de la planta y las áreas comunitarias
- Identificar las medidas de prevención y mitigación necesarias para evitar o minimizar los riesgos.

Cuando las instalaciones estén situadas en la costa, el tráfico de buques asociado con la planta se tendrá en cuenta en la

evaluación, analizándose el impacto potencial del tráfico en el tráfico marítimo local y en las actividades y los impactos potenciales de fugas líquidas durante las operaciones de carga y descarga. Se evaluarán las medidas dirigidas a evitar los impactos accidentales y a minimizar las perturbaciones que puedan causar en otras actividades marinas en la zona. El análisis de riesgo y la planificación de las emergencias incluirán cuando menos la elaboración de un Plan de Gestión de Emergencia, preparado con la participación de las autoridades locales y de las comunidades potencialmente afectadas. Las consecuencias 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**.

Las consecuencias que el desmantelamiento de las instalaciones puede 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**. Estos impactos incluyen, entre otros, la seguridad del transporte, la eliminación de los residuos de demolición que puedan contener materiales peligrosos, y otros impactos relacionados con las condiciones físicas y la presencia de materiales peligrosos una vez abandonado el emplazamiento. La Sección 1.2 junto con las secciones correspondientes en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** (incluida la sección sobre “Planificación, ubicación y diseño” y “Preparación y respuesta ante emergencias”) proporcionan recomendaciones para gestionar estas cuestiones en las plantas de fabricación de sustancias químicas.

## 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. 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.

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**.

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.

Cuadro 1. Niveles de emisiones a la atmósfera		
Contaminante	Unidades	Valor indicativo
<b>Plantas de amoníaco</b>		
NH <sub>3</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	50
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	300
Material particulado	mg/Nm <sup>3</sup>	50
<b>Plantas de ácido nítrico</b>		
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	300
N <sub>2</sub> O	mg/Nm <sup>3</sup>	800
NH <sub>3</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	10
<b>Plantas de ácido sulfúrico</b>		
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	450 (2 kg/t ácido)
SO <sub>3</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	60 (0.075 kg/t ácido)
H <sub>2</sub> S	mg/Nm <sup>3</sup>	5
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	200
<b>Plantas de ácido fosfórico / fluorhídrico</b>		
Fluoruros (gaseosos) como HF	mg/Nm <sup>3</sup>	5
Material particulado/CaF <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	50 (0,10 kg/t roca fosfórica)
<b>Plantas de cloruro alcalino / ácido clorhídrico</b>		
Cl <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	1 (licuefacción parcial) 3 (licuefacción completa)
HCl	ppmv	20
Hg	mg/Nm <sup>3</sup>	0.2 (emisiones promedio anuales de 1 g/t de cloro)
<b>Plantas de carbonato de sodio</b>		
NH <sub>3</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	50
H <sub>2</sub> S	mg/Nm <sup>3</sup>	5
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	200
Material particulado	mg/Nm <sup>3</sup>	50
<b>Negro de carbón</b>		
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	850
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	600
CO	mg/Nm <sup>3</sup>	500
Material particulado	mg/Nm <sup>3</sup>	30
COV	mg/Nm <sup>3</sup>	50
<b>Destilación de alquitrán de hulla</b>		
Humo de alquitrán	mg/Nm <sup>3</sup>	10
COV	mg/Nm <sup>3</sup>	50
Material particulado	mg/Nm <sup>3</sup>	50

Cuadro 2. Niveles de efluentes		
Contaminante	Unidades	Valor indicativo
pH	S.U.	6-9
Aumento de temperatura	°C	<3
<b>Plantas de amoníaco</b>		
NH <sub>3</sub>	mg/l	10 (0,1 kg/t) <sup>1</sup>
SST	mg/l	30
<b>Plantas de ácido nítrico</b>		
NH <sub>3</sub>	mg/l	10
Nitratos	g/t	25
SST	mg/l	30
<b>Plantas de ácido sulfúrico</b>		
Fósforo	mg/l	5
Fluoruro	mg/l	20
SST	mg/l	30
<b>Plantas de ácido fosfórico</b>		
Fósforo	mg/l	5
Fluoruro	mg/l	20
SST	mg/l	30
<b>Plantas de ácido fluorhídrico</b>		
Fluoruros	kg/ton HF	1
Sólidos en suspensión	kg/ton HF	1
	mg/l	30
<b>Plantas de cloruro alcalino / ácido clorhídrico</b>		
SST	mg/l	20 <sup>2</sup>
DQO	mg/l	150 <sup>2</sup>
AOX	mg/l	0,5 <sup>2</sup>
Sulfuros	mg/l	1
Cloruro	mg/l	0,2 <sup>2</sup>
Mercurio	--	0,05 mg/l 0,1 g/t cloro
Toxicidad para larvas de pez	T <sub>F</sub>	2
<b>Plantas de carbonato de sodio</b>		
Sólidos en suspensión	kg/t	270
Fósforo	kg/t	0,2
SST	mg/l	30
Amoníaco (como N)	mg/l	10
<b>Plantas de negro de carbón</b>		
DQO	mg/l	100
Sólidos en suspensión	mg/l	20
<b>Plantas de destilación de alquitrán de hulla</b>		
DBO <sub>5</sub>	mg/l	35 (promedio mensual) 90 (máximo diario)
SST	mg/l	50 (promedio mensual) 160 (máximo diario)
Antraceno, naftaleno y fenantreno (cada uno)	µg/l	20 (promedio mensual) 60 (máximo diario)
<b>Notas:</b>		
1. Valor de referencia basado en la carga: 0,1 kg/t de producto		
2. Plantas de diafragma sin amianto		

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

Los Cuadros 3 y 4 proporcionan ejemplos de indicadores de consumo de recursos y generación de residuos para este

sector. 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.

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

Producto	Unidad	Valor de referencia de la industria
<b>Amoniaco</b>	GJ poder calorífico inferior (LHV)/ton NH <sub>3</sub>	28,8 a 31,5 <sup>(1)</sup>
<b>Ácido fosfórico</b>	Tonelada de roca fosfórica/ton P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,6-3,5 <sup>(1)</sup>
	KWh/ton P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	120-180 <sup>(1)</sup>
	m <sup>3</sup> agua de refrigeración /ton P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	100-150 <sup>(1)</sup>
<b>Ácido fluorhídrico</b>	Ton CaF <sub>2</sub> /ton HF	2,1-2,2 <sup>(4)</sup>
	Ton H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /ton HF	2,6-2,7 <sup>(4)</sup>
	KWh/ton HF	150-300 <sup>(4)</sup>
<b>Cloruro alcalino</b>	KWh/ton Cl <sub>2</sub>	3000 sin licuefacción de Cl 3200 con licuefacción de Cl / evaporación <sup>(3)</sup>
	Ton NaCl/ton Cl <sub>2</sub>	1,750 <sup>(3)</sup>
	g Hg/ton de capacidad de cloro (plantas de celda de mercurio)	0,2-0,5 <sup>(3)</sup>
<b>Carbonato de sodio</b>	GJ/ton de carbonato de sodio	9,7-13,6 <sup>(2)</sup>
	Ton de carbonato cálcico/ton de carbonato de sodio	1,09-1,82 <sup>(2)</sup>
	Ton NaCl/ton carbonato de sodio	1,53-1,80 <sup>(2)</sup>
	m <sup>3</sup> agua de refrigeración/ton carbonato de sodio	50-100 <sup>(2)</sup>
<b>Negro de carbón</b>	KWh/ton negro de carbón	430-550 <sup>(2)</sup>
	GJ/ton negro de carbón	1,55-2 <sup>(2)</sup>

**Notas:**

1. Asociación Europea de Fabricantes de Fertilizantes (EFMA), 2000;
2. IPPC de la UE- Documento de referencia sobre mejores prácticas disponibles en la industria química inorgánica de gran volumen de producción- Sólidos y otras industrias, diciembre de 2006;
3. IPPC de la UE - Documento de referencia sobre mejores prácticas disponibles en la industria de fabricación de cloro-alcalí, diciembre de 2001;
4. IPPC de la UE - Documento de referencia sobre mejores prácticas disponibles en la industria química orgánica de gran volumen de producción- amoniaco, ácidos y fertilizantes, octubre de 2006.

**Cuadro 4. Generación de emisiones, efluentes y residuos**

Parámetro	Unidad	Valor de referencia de la industria
<b>Plantas de amoniaco</b>		
CO <sub>2</sub> de proceso	ton/ton NH <sub>3</sub>	1,15-1,3 <sup>(1)</sup>
NO <sub>x</sub> (procesos avanzados de reformado convencional y procesos de reformado primario reducido)	kg/ton NH <sub>3</sub>	0,29 – 0,32
NO <sub>x</sub> (reformado autotérmico recuperación de calor)	kg/ton NH <sub>3</sub>	0,175
<b>Plantas de ácido nítrico</b>		
N <sub>2</sub> O	kg/ton 100% HNO <sub>3</sub>	0,15-0,6 <sup>(4)</sup>
NO <sub>x</sub>	ppmv	5-75 <sup>(4)</sup>
<b>Plantas de ácido sulfúrico</b>		
SO <sub>2</sub> (quema de azufre, contacto doble/absorción doble)	mg/Nm <sup>3</sup>	30-350 <sup>(1)(4)</sup>
SO <sub>2</sub> (contacto único/absorción única)	mg/Nm <sup>3</sup>	100-450 <sup>(4)</sup>
<b>Plantas de ácido fosfórico / fluorhídrico</b>		
Fluoruros	mg/Nm <sup>3</sup>	0,6-5 <sup>(4)</sup>
SO <sub>2</sub>	kg/ton HF	0,001 – 0,01 <sup>(4)</sup>
Residuos sólidos (yeso fosforado)	ton/ton P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4-5 <sup>(1)</sup>
Anhidrita (CaSO <sub>4</sub> )	ton/ton HF	3,7 <sup>(4)</sup>
<b>Plantas de cloruro alcalino</b>		
Cl <sub>2</sub> (licuefacción parcial)	mg/Nm <sup>3</sup>	<1 <sup>(3)</sup>
Cl <sub>2</sub> (licuefacción total)	mg/Nm <sup>3</sup>	<3 <sup>(3)</sup>
Cloratos (circuito de la salmuera)	g/l	1-5 <sup>(3)</sup>
Bromatos (circuito de la salmuera)	mg/l	2-10 <sup>(3)</sup>
<b>Plantas de carbonato de sodio</b>		

CO <sub>2</sub>	Kg/ton carbonato de sodio	200-400 <sup>(2)</sup>
Cl	Kg/ton carbonato de sodio	850-1100 <sup>(2)</sup>
Ca	Kg/ton carbonato de sodio	340-400 <sup>(2)</sup>
Na	Kg/ton carbonato de sodio	160-220 <sup>(2)</sup>
Aguas residuales/sólidos en suspensión	m <sup>3</sup> /ton/ ton carbonato de sodio	8,5-10,7 / 0,09-024 <sup>(2)</sup>
<b>Plantas de negro de carbón</b>		
SO <sub>2</sub>	kg/ton de caucho de negro de carbón	10-50 <sup>(2)</sup>
NO <sub>x</sub>	Mg/Nm <sup>3</sup>	<600 <sup>(2)</sup>
VOC	Mg/Nm <sup>3</sup>	<50 <sup>(2)</sup>
<b>Cuadro 4 Notas:</b>		
5. Asociación Europea de Fabricantes de Fertilizantes (EFMA), 2000;		
6. IPPC de la UE- Documento de referencia sobre mejores prácticas disponibles en la industria químicos inorgánica de gran volumen de producción- Sólidos y otras industrias, diciembre de 2006;		
7. IPPC de la UE - Documento de referencia sobre mejores prácticas disponibles en la industria de fabricación de cloro-alcalí, diciembre de 2001;		
8. IPPC de la UE - Documento de referencia sobre mejores prácticas disponibles en la industria química orgánica de gran volumen de producción- amoniaco, ácidos y fertilizantes, octubre de 2006.		

## 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 formados, 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.

## 2.2 Desempeño de la higiene y la seguridad en el trabajo

### Guías sobre higiene y seguridad en el trabajo

Para evaluar el desempeño en materia de higiene y seguridad en el trabajo deben utilizarse las guías sobre la materia que se publican en el ámbito internacional, entre ellas: 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>26</sup>, la Guía de bolsillo sobre riesgos químicos publicada por el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo de los Estados Unidos (NIOSH)<sup>27</sup>, los límites permisibles de exposición publicados por la Administración de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos (OSHA)<sup>28</sup>, los valores límite indicativos de exposición profesional publicados por los Estados miembros de la Unión Europea<sup>29</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 (ya sean empleados directos o personal subcontratado), especialmente los accidentes que pueden causar la pérdida de horas de trabajo, diversos niveles de discapacidad e 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

<sup>26</sup> Disponibles en: <http://www.acgih.org/TLV/> y <http://www.acgih.org/store/>.

<sup>27</sup> Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>.

<sup>28</sup> Disponibles 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>29</sup> Disponibles en: [http://europe.osha.eu.int/good\\_practice/risks/ds/oe/](http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oe/).

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>30</sup>.

## **Seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo**

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 y realizadas por profesionales acreditados<sup>31</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>30</sup> Disponibles en: <http://www.bls.gov/iif/> y <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.

<sup>31</sup> Los profesionales acreditados pueden incluir a higienistas industriales certificados, higienistas ocupacionales diplomados o profesionales de la seguridad certificados o su equivalente.

### 3.0 Referencias

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). Office of Compliance. 1995. Sector Notebook Project. Profile of the Inorganic Chemical Industry. Washington, DC

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 60, Standards of Performance for New and Existing Stationary Sources: Subpart G—Standards of Performance for Nitric Acid Plants. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 60, Standards of Performance for New and Existing Stationary Sources: Subpart H—Standards of Performance for Sulfuric Acid Plants. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 60, Standards of Performance for New and Existing Stationary Sources: Subpart T—Standards of Performance for the Phosphate Fertilizer Industry: Wet-Process Phosphoric Acid Plants. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 63, National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories: Subpart AA—National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants From Phosphoric Acid Manufacturing Plants. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 63, National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories: Subpart IIII—National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Mercury Emissions From Mercury Cell Chlor-Alkali Plants. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 63, National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories: Subpart NNNNN—National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Hydrochloric Acid Production. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 414, Subpart G—Bulk Organic Chemicals. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 414, Subpart I—Direct Discharge Point Sources That Use End-of-Pipe Biological Treatment. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 414, Subpart J—Direct Discharge Point Sources That Do Not Use End-of-Pipe Biological Treatment. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 415, Subpart F—Chlor-alkali Subcategory (Chlorine and Sodium or Potassium Hydroxide Production). Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 415, Subpart H—Hydrofluoric Acid Production Subcategory. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 418, Subpart A—Phosphate Subcategory. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 418, Subpart B—Ammonia Subcategory. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 418, Subpart E—Nitric Acid Subcategory. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 422, Subpart D—Defluorinated Phosphate Rock Subcategory. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 422, Subpart E—Defluorinated Phosphoric Acid Subcategory. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006)

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 458, Subpart A—Carbon Black Furnace Process Subcategory. Washington, DC. Disponible en: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html> (con acceso en octubre de 2006) Australian Government, Department of the Environment and Heritage. 2004. Emission Estimation Technique Manual for Inorganic Chemicals Manufacturing. Version 2.0. Canberra, Australia

Agencia de Protección Ambiental del Reino Unido. 1999a. IPC Guidance Note Series 2 (S2) Chemical Industry Sector. S2 4.03: Inorganic Acids and Halogens. Bristol, UK

Agencia de Protección Ambiental del Reino Unido. 1999b. IPC Guidance Note Series 2 (S2) Chemical Industry Sector. S2 4.04: Inorganic Chemicals. Bristol, UK

Agencia de Protección Ambiental del Reino Unido. 2004a. Sector Guidance Note IPPC S4.03. Guidance for the Inorganic Chemicals Sector. Bristol, UK

Agencia de Protección Ambiental del Reino Unido. 2004b. Process Guidance Note 6/42 (04). Secretary of State's Guidance for Bitumen and Tar Processes. Bristol, UK

Asociación Europea de Fabricantes de Fertilizantes (EFMA). 2000a. Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry. "Production of Ammonia," Booklet No. 1. Bruselas, Bélgica



Asociación Nacional de Protección contra el Fuego de Estados Unidos (NFPA). 2000. Standard 850: Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. 2000 Edition. Quincy, Massachusetts

Asociación Nacional de Protección contra el Fuego de Estados Unidos (NFPA). 2004. Standard 120: Standard for Fire Prevention and Control in Coal Mines. 2004 Edition. Quincy, Massachusetts

Comisión de Helsinki. 2002. Helcom Recommendation 23/6. Reduction of Emissions and Discharges of Mercury from Chloralkali Industry. Helsinki, Finlandia.

Comisión de París. 1990. Parcom Decision 90/3 of 14 June 1990 on Reducing Atmospheric Emissions from Existing Chlor-Alkali Plants. París, Francia

Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (EIPPCB). 2001. Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC) Documento de referencia sobre mejores prácticas disponibles en la industria de fabricación de cloro-alcalí. Diciembre de 2001. Sevilla, España

Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación EIPPCB. 2006a. Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC) Documento de referencia sobre mejores prácticas disponibles en la industria química inorgánica de gran volumen de producción– Sólidos y otras industrias. Octubre de 2006. Sevilla, España

Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación EIPPCB. 2006b. Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC) Documento de referencia sobre mejores prácticas disponibles en la industria química orgánica de gran volumen de producción– amoníaco, ácidos y fertilizantes. Diciembre de 2006. Sevilla, España

Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación EFMA. 2000b. Mejores técnicas disponibles para la prevención y el control de la contaminación en la industria europea de fertilizantes. "Producción de ácido nítrico", Booklet N° 2. Bruselas, Bélgica

Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación EFMA. 2000c. . Mejores técnicas disponibles para la prevención y el control de la contaminación en la industria europea de fertilizantes. "Producción de ácido sulfúrico", Booklet n° 3. Bruselas, Bélgica

Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación EFMA. 2000d. Mejores técnicas disponibles para la prevención y el control de la contaminación en la industria europea de fertilizantes. "Producción de ácido fosfórico", Booklet n° 4. Bruselas, Bélgica

Gobierno Federal alemán. 2002. First General Administrative Regulation Pertaining the Federal Immission Control Act (Technical Instructions on Air Quality Control – TA Luft). Berlín, Alemania

Kirk-Othmer, R.E. 2006. Encyclopedia of Chemical Technology. 5ª edición. John Wiley and Sons Ltd., Nueva York, NY

Ministerio Federal para el Medio Ambiente, la Conservación de la Naturaleza y la Seguridad Nuclear de Alemania. 2004. Promulgation of the New Version of

the Ordinance on Requirements for the Discharge of Waste Water into Waters (Waste Water Ordinance - AbwV) of 17. June 2004. Berlín, Alemania

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2006. Informe Especial, La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono, marzo de 2006. Ginebra, Suiza

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

Las presentes Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de sustancias inorgánicas en grandes volúmenes (LVIC) y la destilación del alquitrán de hulla abarca los sectores de fabricación de amoníaco; el cloruro alcalino (es decir, cloro, sosa cáustica, carbonato de sodio, etc.); ácidos (nitríco, clorhídrico, sulfúrico, fluorhídrico, fosfórico); negro de carbón; y la destilación del alquitrán de hulla (naftalena, fenantreno, antraceno). Las guías hacen referencia a la producción de sustancias intermedias y productos para la industria aguas abajo, abarcando sectores muy variados, que van desde los fertilizantes hasta los plásticos. Se caracteriza por la producción de grandes volúmenes, que pueden alcanzar el millón de toneladas anuales y se obtienen en grandes instalaciones.

### Amoníaco<sup>32</sup>

Cerca de un 80 % del amoníaco (NH<sub>3</sub>) se utiliza actualmente como fuente de nitrógeno para los fertilizantes, mientras que el 20 % restante se utiliza en varias aplicaciones industriales, como es la fabricación de plásticos, fibras, explosivos, hidracina, aminas, amidas, nitrilos y otros compuestos orgánicos de nitrógeno que sirven de sustancias intermedias en la fabricación de tintes y productos farmacéuticos. Los productos inorgánicos más importantes fabricados a partir del amoníaco son el ácido nítrico, la urea y el cianuro de sodio. El amoníaco líquido es un importante disolvente y también se utiliza como refrigerante.

Las plantas de amoníaco pueden ser autónomas o bien hallarse integradas con otras plantas en un emplazamiento dado, normalmente dedicadas a la producción de urea. Sin embargo,

las tendencias más recientes apuntan a la producción combinada de amoníaco y metanol. La producción de hidrógeno y / o monóxido de carbono también puede integrarse con las plantas de fabricación de amoníaco. Por lo general, una planta de amoníaco produce alrededor de 2.000 toneladas al día, aunque hay plantas pueden llegar a producir hasta 3.400 toneladas diarias.

El gas natural reformado con vapor y aire es la forma más sencilla y eficiente de producir gas sintético de amoníaco y es el método empleado con mayor frecuencia.

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. 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. El amoníaco en estado licuado se almacena ya sea en grandes tanques atmosféricos a temperaturas de -33 grados centígrados o en grandes esferas con presiones de hasta 20 atmósferas a temperatura ambiente. 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 planta de licuefacción de aire. El hidrógeno puede encontrarse en varias fuentes, incluido el gas natural, el crudo, la nafta o los gases residuales procedentes de procesos como los hornos de coque o las refinerías.

El proceso de producción de amoníaco a partir del gas natural 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

<sup>32</sup> EIPPCB. 2006b; EFMA. 2000a.

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 otros dos procesos no convencionales son: 1) añadir más aire de proceso al reformado secundario mediante la eliminación criogénica del exceso de nitrógeno; y 2) el intercambio de calor del reformado autotérmico. El segundo proceso comporta algunas ventajas ambientales dado que puede prescindirse del reformado primario y la posibilidad de consumir menos energía. Se trata de una tecnología reciente y hasta la fecha tiene una capacidad de aproximadamente 500 toneladas de NH<sub>3</sub> al día.

El amoníaco licuado en las plantas de producción se emplea directamente en las plantas aguas abajo o se transfiere a tanques de almacenamiento. Desde los tanques de almacenamiento, el amoníaco puede transportarse hasta los usuarios mediante camiones cisterna, vagones cisterna o embarcaciones. El amoníaco suele almacenarse empleando uno u otro de los tres métodos siguientes:

- El almacenamiento plenamente refrigerado en grandes tanques con capacidades que suelen oscilar entre las 10.000 y las 30.000 toneladas (hasta 50.000)
- Esferas o cilindros presurizados de almacenamiento con una capacidad de aproximadamente 1.700 toneladas
- Tanques semirefrigerados

Existen distintos tipos de almacenamiento para los productos líquidos refrigerados. Los más importantes son:

- Contención única: un tanque aislado de pared única, normalmente dotada de un dique de contención a su alrededor
- Doble contención: tanques equipados con dos paredes verticales, ambas diseñadas para contener el líquido almacenado y soportar su presión hidrostática. El techo descansa sobre la pared interna.
- Contención plena: tanques cerrados con dos paredes, al igual que los de doble contención, pero cuyo techo descansa sobre la pared externa y emplean un margen adecuado entre la presión operativa y la despresurización.

### Ácido nítrico<sup>33</sup>

Las etapas de producción para la fabricación de ácido nítrico incluyen: la evaporación del amoníaco líquido; la mezcla de vapor con aire y la quema de dicha mezcla en un catalizador de platino / rodio; la refrigeración del óxido nítrico resultante (NO) y su oxidación para obtener dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) con oxígeno residual; y la absorción del dióxido de nitrógeno en agua en una columna de absorción para que reaccione y se convierta en ácido nítrico. Las plantas de gran capacidad suelen contar con un diseño de doble presión (por ejemplo combustión a presión media y absorción a alta presión), mientras que las plantas pequeñas llevan a cabo la combustión y la absorción a la misma presión. La alta presión en la columna de absorción reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). La generación de NO<sub>x</sub> y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), un gas de efecto invernadero, en las plantas de ácido nítrico es significativa; sin embargo, las técnicas de conversión catalítica pueden reducir los niveles de emisión en más del 80 por ciento.

El material recomendado para los tanques, depósitos y accesorios es el acero inoxidable austenítico de bajo carbono.

<sup>33</sup> EIPPCB. 2006b; EFMA. 2000b.

La transferencia hasta los depósitos de transporte se realiza normalmente mediante bombeo o por gravedad. Se evitará la presurización a la hora de descargar grandes volúmenes. El ácido nítrico se transporta empleando vagones cisterna, camiones cisterna y, con menos frecuencia, embarcaciones.

La capacidad normal de las plantas modernas dedicadas a la producción de ácido nítrico es de aproximadamente 1.000 toneladas al día.

### **Ácido sulfúrico<sup>34</sup>**

El uso más importante del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) se da en la industria de fertilizantes de fosfato. El ácido sulfúrico se obtiene a partir del dióxido de azufre ( $SO_2$ ) producido mediante la combustión de azufre elemental. El azufre líquido es un producto de la desulfuración de gas natural o de la limpieza del gas de combustión de carbón; otra posible vía es la fusión del azufre sólido en estado natural. La industria de metales también produce dióxido de azufre mediante procesos de tostado y fusión que generan gases de combustión con concentraciones suficientemente elevadas de  $SO_2$  para facilitar el procesamiento directo del  $H_2SO_4$ . El proceso de oxidación térmica de los ácidos usados como materias primas es otra forma de producir  $SO_2$  y  $H_2SO_4$ . La oxidación exotérmica del dióxido de azufre en las distintas capas de catalizadores adecuados (es decir, pentóxido de vanadio) para producir trióxido de azufre ( $SO_3$ ) es el proceso que emplean en la actualidad la mayoría de las plantas de producción de ácido sulfúrico. Las plantas modernas pueden diseñarse para ser muy eficientes en términos de conversión del dióxido de azufre (más del 99%) y de recuperación de la energía.

El ácido sulfúrico se obtiene a partir de la absorción de  $SO_3$  y agua en  $H_2SO_4$  (con una concentración de al menos 98%). El  $SO_3$  se absorbe en un absorbedor intermedio instalado después de la segunda o tercera capa del catalizador en un proceso de doble contacto en el que los gases se transportan hasta la capa o las capas finales del catalizador y el  $SO_3$  formado aquí se absorbe en un absorbedor final. El absorbedor final se instala después de la última capa de catalizador en un proceso de contacto único. El ácido caliente producido se agita con aire en una columna o torre destinada a recoger el  $SO_2$  restante en el ácido; el aire cargado de  $SO_2$  se devuelve al proceso.

### **Ácido fosfórico<sup>35</sup>**

El ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) se utiliza principalmente en la fabricación de sales de fosfato (fertilizantes y suplementos de alimentos para consumo animal). Pueden emplearse dos procesos distintos para fabricar ácido fosfórico. En el primero, conocido como proceso térmico, el fósforo elemental se produce a partir de la roca fosfórica, el coque y el sílice en un horno de resistencia eléctrica y se oxida e hidrata para formar el ácido. El ácido generado térmicamente es considerablemente puro, aunque también caro, y por lo tanto se produce en pequeñas cantidades, principalmente para la fabricación de fosfatos industriales. El segundo proceso se conoce como el proceso en húmedo, donde se digieren fosfatos naturales con un ácido (es decir, ácido sulfúrico, nítrico o clorhídrico). La digestión húmeda de roca fosfórica con ácido sulfúrico es el proceso de elección en términos de volumen. El fosfato tricálcico obtenido a partir de la roca fosfórica reacciona al ácido sulfúrico concentrado para producir ácido fosfórico y sulfato cálcico, que es una sal no soluble. Las condiciones operativas

<sup>34</sup> EIPPCB. 2006b; EFMA. 2000c.

<sup>35</sup> EIPPCB. 2006b; EFMA. 2000d.

permiten precipitar el sulfato cálcico en estado dihidratado (DH) o hemihidratado (HH).

Las principales fases de producción son: la trituración de roca fosfórica; la reacción al ácido sulfúrico en una serie de reactores agitados separados a temperaturas de 70-80 °C; y la filtración para separar el ácido fosfórico del sulfato de calcio.

El ácido fosfórico suele almacenarse en tanques de acero revestidos de caucho, aunque también se emplean los de acero inoxidable, poliéster y hormigón revestido de polietileno. Los tanques de almacenamiento suelen equiparse con medios para mantener los sólidos en suspensión y evitar la costosa limpieza de los tanques.

### Ácido fluorhídrico<sup>36</sup>

El fluoruro de hidrógeno (HF) se produce en dos formas: como fluoruro de hidrógeno anhidro y como ácido fluorhídrico acuoso. La forma predominante es el fluoruro de hidrógeno, un líquido o gas incoloro e hidrosoluble que genera humo al entrar en contacto con el aire. El fluoruro de hidrógeno es a la vez un subproducto fortuito de la fabricación de fertilizantes de superfosfato. El ácido fluorhídrico se emplea en el grabado y pulido de vidrio, la alquilación del petróleo y decapado del acero inoxidable. El ácido fluorhídrico se emplea también para producir fluorocarbonos para la fabricación de resinas, disolventes, quitamanchas, agentes tensoactivos y productos farmacéuticos.

El ácido fluorhídrico se obtiene a partir de la reacción del espato flúor de calidad ácida (CaF<sub>2</sub>) con ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). La reacción endotérmica se lleva a cabo en hornos horizontales giratorios caldeados de forma externa a 200-250°C. El espato

flúor seco y un ligero exceso de ácido sulfúrico se alimentan continuamente al extremo frontal de un pre reactor estacionario para la mezcla o directamente al horno por medio de un transportador helicoidal. El sulfato cálcico (CaSO<sub>4</sub>) se extrae por medio de una esclusa de aire en el extremo opuesto del horno.

Los productos gaseosos de la reacción - fluoruro de hidrógeno y el exceso de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> derivado de la reacción primaria, y el tetrafluoruro de silicio (SiF<sub>4</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua producidos en reacciones secundarias- se extraen del extremo frontal del horno junto con el material particulado arrastrado. El material particulado se extrae a continuación de la corriente de gas y se devuelve al horno. El ácido sulfúrico y el agua se extraen en un precondensador. Los vapores de fluoruro de hidrógeno se condensan entonces en condensadores refrigerantes para formar HF crudo, que se envía a tanques intermedios de almacenamiento. La corriente de gas restante atraviesa una torre de absorción de ácido sulfúrico o depurador ácido, eliminando la mayor parte del fluoruro de hidrógeno restante y ácido sulfúrico residual, que son igualmente enviados al tanque de almacenamiento intermedio. Los gases que abandonan el depurador ácido se tratan en lavadores de agua, donde tanto el SiF<sub>4</sub> como el HF restante se recuperan como ácido hexafluor hexafluorosilícico (H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>). Los gases de cola del depurador de agua se pasan por un depurador cáustico antes de emitirse a la atmósfera. El fluoruro de hidrógeno y el ácido sulfúrico se envían desde los tanques de almacenamiento intermedio hasta las columnas de destilación, donde el ácido fluorhídrico se extrae con una pureza del 99,98 por ciento. Para producir concentraciones más débiles (normalmente de entre el 70 al 80 por ciento) se requiere una etapa final de dilución con agua.

El HF anhidro es un líquido que alcanza el punto de ebullición a 19,5 °C. El HF líquido se mantiene a bajas temperaturas,

<sup>36</sup> EIPPCB. 2006b.

preferentemente por debajo de los 15 °C, mediante la refrigeración o la instalación de condensadores en los conductos de almacenamiento de aire, que condensan el HF evaporado. El HF líquido suele almacenarse a presión atmosférica en tanques de acero al carbono, donde se forma una delgada capa protectora de  $\text{FeF}_2$ , que previene la corrosión adicional de las paredes del tanque. La velocidad del líquido en los conductos debería situarse por debajo de 1 m/s para evitar la erosión de la capa de  $\text{FeF}_2$ . El ácido fluorhídrico con una concentración de al menos el 70 % se almacena también en tanques de acero al carbono, mientras que el ácido con concentraciones inferiores al 70 % se almacena en tanques revestidos de acero o en tanques de polietileno.

### Ácido clorhídrico<sup>37</sup>

El ácido clorhídrico (HCl) es una sustancia química versátil empleada en distintos procesos químicos, incluido el procesamiento hidrometalúrgico, las síntesis de dióxido de cloro, la producción de hidrógeno y las operaciones de limpieza y grabado. También se trata de un ingrediente habitual en muchas reacciones químicas y un ácido empleado con frecuencia en los procesos orgánicos de catalización.

El ácido se obtiene mediante distintos procesos. Los procesos de producción más habituales consisten en la reacción del cloruro de sodio al ácido sulfúrico, y otro más reciente mediante el cual el ácido se genera como subproducto del proceso de reacción de cloración (por ejemplo, la producción de disolventes y sustancias orgánicas cloradas).

<sup>37</sup> Gobierno de Australia, Department of the Environment and Heritage. 2004.

### Cloruro alcalino<sup>38</sup>

La industria de cloruro alcalino produce cloro ( $\text{Cl}_2$ ) y álcali (es decir, sosa cáustica o hidróxido sódico ( $\text{NaOH}$ ) y hidróxido potásico ( $\text{KOH}$ )) mediante la electrólisis de una solución de sal, empleando principalmente el cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) como materia prima o el cloruro potásico ( $\text{KCl}$ ) para la producción de hidróxido potásico. El proceso de producción de cloruro alcalino consume un volumen importante de electricidad.

Las principales tecnologías de fabricación de cloruro alcalino son la electrólisis de celda de mercurio, diafragma y membrana. En el proceso de producción del cloro, el gas de cloro abandona los electrolizadores a aproximadamente 80-90 °C y se saturan con vapor de agua. También contiene impurezas como niebla de salmuera, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y restos de hidrocarburos clorados. Tras la refrigeración directa o indirecta y la extracción de impurezas, el cloro se pasa por torres de secado con ácido sulfúrico concentrado. El gas se comprime a continuación y se licúa a distintos niveles de presión y temperatura. El cloro licuado se almacena en tanques a granel a temperaturas ambiente o bajas.

El proceso de celda de membrana cuenta con ventajas ambientales con respecto de los otros dos procesos, más antiguos, además de constituir el proceso más ventajoso en términos económicos. Ánodos y cátodos se separan mediante una membrana impermeable al agua y conductora de iones. La solución de salmuera circula por el compartimento de ánodo, donde los iones del cloruro se oxidan para obtener gas de cloro. Los iones de sodio migran a través de la membrana hasta el compartimento de cátodos que contiene la solución de sosa cáustica. El agua desmineralizada añadida al circuito catódico se hidroliza y libera gas de hidrógeno e iones de hidróxido. Los

<sup>38</sup> EIPPCB. 2001.

iones de sodio e hidróxido se combinan para producir sosa cáustica, normalmente a concentraciones del 32-35%, mediante la recirculación de la solución antes de su descarga de la celda. Se obtienen concentraciones más elevadas a partir de la concentración del licor cáustico mediante la evaporación de vapor. La producción de sosa cáustica es proporcional a la de cloro (se producen 1.128 toneladas de sosa cáustica (100%) mediante electrólisis por tonelada de cloro). Debido a la membrana, la solución de sosa cáustica contiene una cantidad muy limitada de sal debido a la migración del cloruro, como sucede en el proceso de celda de diafragma. La salmuera empobrecida se descarga del compartimento de ánodos y se vuelve a saturar con sal.

El material catódico empleado en las celdas de membrana es el acero inoxidable o el níquel, y los ánodos utilizados son de metal. Los cátodos se recubren a menudo con un catalizador que aumenta la superficie y reduce la sobretensión. Los materiales de revestimiento incluyen mezclas de Ni-S, Ni-Al y Ni-NiO, así como mezclas de níquel y metales del grupo del platino. Las membranas empleadas en la industria de cloruro alcalino están fabricadas con polímeros perfluorados.

El cloro se produce a menudo cerca de los consumidores. El almacenamiento y transporte del cloro requiere manipular y usar mejores prácticas para minimizar los riesgos potenciales. El cloro se transporta por conductos, carretera y tren.

El hidrógeno es un coproducto de la electrólisis de la salmuera (28 kg por 1 tonelada de cloro) y se emplea por lo general como combustible en el emplazamiento, enviándose como tal a otras empresas o vendiéndose y transportándose como sustancia química. Puede emplearse en instalaciones integradas para ciertas aplicaciones por su elevada pureza, incluyendo la

síntesis del amoníaco, el metanol, el ácido clorhídrico, el peróxido de hidrógeno, etc.

Además de la electrólisis de celda, existen fases de procesamiento comunes a todas las tecnologías e incluyen: la descarga y almacenamiento de sal, la purificación y restauración de salmuera, cloro, sosa cáustica y el procesamiento de hidrógeno.

El proceso de purificación de salmuera consiste en un sistema primario para las tecnologías de mercurio y diafragma y un sistema secundario adicional para la tecnología de membrana. Esta operación es necesaria para eliminar las impurezas (aniones de sulfato, cationes de calcio, magnesio, bario y metales) que pueden afectar al proceso electrolítico.

La purificación primaria de salmuera emplea carbonato de sodio e hidróxido de sodio para precipitar los iones de calcio y magnesio como carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) e hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). Los metales también se precipitan como hidróxido durante esta operación. El sulfato sódico puede controlarse añadiendo cloruro cálcico ( $\text{CaCl}_2$ ) o sales de bario (a pesar de que pueden representar un riesgo debido a su toxicidad) para extraer los aniones de sulfato mediante la precipitación de sulfato cálcico ( $\text{CaSO}_4$ ) o sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ). Terminada la precipitación, las impurezas se eliminan mediante la sedimentación, la filtración o una combinación de ambas. Otros procedimientos para extraer los sulfatos son la ultrafiltración y la purga de salmuera.

La purificación secundaria de salmuera consiste en una fase de filtración de pulido y suavización con salmuera en una unidad de intercambio iónico dotada por lo general de filtros para reducir la materia en suspensión lo bastante y proteger la resina de intercambio iónico de posibles daños. El tratamiento con

resinas quelantes de intercambio iónico está diseñado para reducir los metales alcalinotérreos a niveles de traza. La resina se regenera de forma periódica con soluciones de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio de alta pureza.

En vez de diluir los gases restantes después de la condensación parcial del gas de cloro, el hidrógeno se elimina mediante la reacción del gas de cloro en una columna. Esta fase produce ácido clorhídrico gaseoso que puede recuperarse en una unidad de ácido clorhídrico.

### **Carbonato de sodio<sup>39</sup>**

El carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) o sosa es una materia prima fundamental para las industrias del vidrio, jabones y detergentes y sustancias químicas. Se producen dos tipos de carbonato de sodio (sosa calcinada): el 'carbonato de sodio ligero' y el 'carbonato de sodio denso'. El carbonato de sodio denso se emplea en la industria del vidrio y para el transporte económico a grandes distancias. El ligero se utiliza principalmente en el mercado de detergentes y ciertas sustancias intermedias químicos.

El carbonato de sodio suele fabricarse en grandes plantas altamente integradas de producción, con una capacidad de planta que oscila entre los 150 y 1.200 kt al año.

El proceso de Solvay implica la saturación de la salmuera con amoníaco y gas de dióxido de carbono. El proceso utiliza salmuera ( $\text{NaCl}$ ) y carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) como materias primas. El amoníaco se regenera y recicla casi por completo. La principal ventaja de este proceso es la amplia disponibilidad de materias primas relativamente puras que permiten operar las

unidades de producción a distancias relativamente próximas al mercado.

El proceso de Solvay produce 'carbonato de sodio ligero' con una densidad de colada de aproximadamente  $500 \text{ kg/m}^3$ . El 'carbonato de sodio ligero' se transforma primero mediante la recristalización del carbonato sódico monohidratado, obteniéndose a continuación el 'carbonato de sodio denso' después del secado (deshidratación). El carbonato de sodio denso tiene una densidad de colada de alrededor de  $1.000 \text{ kg/m}^3$ . También puede obtenerse carbonato de sodio denso mediante la compactación.

### **Negro de carbón<sup>40</sup>**

El negro de carbón se obtiene a partir de la oxidación parcial o descomposición térmica de hidrocarburos. Cerca del 65 – 70 % del consumo de negro de carbón en el mundo se destina a la producción de neumáticos y productos para neumáticos de automóviles y otros vehículos. Aproximadamente el 25 - 30% se emplea para fabricar otros productos de caucho y un pequeño porcentaje se emplea para producir plásticos, tinta para imprimir, pintura, papel y aplicaciones varias.

El negro de carbón se diferencia de otros materiales de carbón en muchos aspectos, especialmente en lo que se refiere a la densidad de la carga. Las mezclas de hidrocarburos gaseosos o líquidos constituyen las materias primas de preferencia en la producción industrial, mientras que los hidrocarburos aromáticos tienen un mejor rendimiento.

Los procesos se dividen en dos grupos: aquéllos que recurren a la combustión incompleta o parcial y los basados en el craqueo térmico. En los procesos de combustión parcial, el aire se

<sup>39</sup> EIPPCB. 2006a.

<sup>40</sup> EIPPCB. 2006a.



emplea para quemar parte de las materias primas, produciendo así la energía requerida para llevar a cabo la pirólisis, mientras que en el proceso de craqueo térmico, el calor se genera de forma externa y se introduce luego en el proceso.

El proceso de negro de horno constituye en la actualidad el proceso de producción más importante. Representa más del 95% de la producción total a nivel mundial. Se trata de un proceso continuo y sus ventajas son una gran flexibilidad y mejor economía en comparación con otros procesos. La tasa habitual de producción es de aproximadamente 2.000 kg/h para un reactor moderno de negro de horno. En negro de horno, se inyectan por atomización materias primas aromáticas pesadas en una corriente de alta velocidad de gases de combustión y se queman parcialmente y se craquean casi por completo (45 – 65%) para producir negro de carbón e hidrógeno a temperaturas que oscilan entre los 1200 y 1700° C. Después de enfriarse con agua, el negro de carbón se recupera con ciclones y bolsas filtrantes, se peletizan, secan y envían para su almacenamiento (silos) o transporte.

### ***Destilación del alquitrán de hulla***

En la actualidad, el alquitrán de hulla se destila casi por completo, sobre todo en alambiques continuos con una capacidad diaria de 100–700 toneladas. Se trata de un producto de condensación obtenido a partir del enfriamiento del gas emitido durante la destilación de la hulla (pirólisis o carbonización de la hulla). El alquitrán de hulla es un líquido viscoso más denso que el agua. La brea del alquitrán de hulla es un residuo negro muy viscoso, sólido o semisólido procedente de la destilación del alquitrán de hulla.

El producto de alquitrán de hulla, que se destila a aproximadamente 400°C a presión atmosférica, constituye

básicamente una compleja mezcla de hidrocarburos aromáticos monocíclicos y policíclicos. Una parte de ellos se sustituyen por grupos de alquilos, hidroxilos, aminas y/o hidrosulfuros, y en menor medida por sus análogos de azufre, nitrógeno y oxígeno. El alquitrán producido a menores temperaturas de carbonización también contiene hidrocarburos aromáticos, alcanos y alquenos. Los residuos generados durante la destilación representan al menos un 50% de los productos de alquitrán de hulla obtenidos a partir de la carbonización a altas temperaturas y consisten en una continuación de la secuencia de compuestos aromáticos polinucleares, aromáticos y heterocíclicos, hasta moléculas que contienen entre 20 y 30 anillos.

La corrosión metálica asociada con la destilación continua del alquitrán de hulla constituye un problema habitual a tener en cuenta en la gestión de la planta. Las sales de amoníaco (principalmente cloruro amónico), asociadas con el licor en suspensión presente en el alquitrán tras la deshidratación, tienden a disociarse de la producción de ácido clorhídrico. Este ácido puede deteriorar las piezas de los equipos que contengan vapores a temperaturas superiores a los 240°C, incluyendo los condensadores de las columnas de deshidratación y fraccionamiento. La corrosión se controla añadiendo álcali (ya sea una solución de carbonato de sodio o sosa cáustica) al alquitrán.

Un patrón de destilación primaria de producto en las plantas de procesamiento de alquitrán sólo puede generar una fracción, el aceite de naftaleno obtenido a temperaturas situadas entre los 180 y los 240°C, o dos fracciones, creosota ligera o aceite medio (230–300°C) y creosota o aceite pesado (por encima de los 300°C) entre el aceite de naftaleno y la brea de hulla.

Los ácidos cresólicos con puntos de ebullición más elevados son mezclas de cresoles o xilenoles con fenoles de con puntos de ebullición más altos. Se utilizan principalmente en las resinas de fenol-formaldehído, disolventes para esmaltes de revestimiento de cable, agentes para el desengrasado de metal, agentes de flotación y agentes curtiertes sintéticos.

El naftaleno es el principal componente de los alquitranes de horno de coque y el único componente que puede concentrarse hasta obtener un alto contenido durante la primera destilación<sup>41</sup>. Puede aumentarse la calidad de los aceites de naftaleno empleando distintos métodos, principalmente basados en la cristalización de aceite primario de naftaleno para convertirlo en ftálico o convertir este último en aceites de antraceno de calidad química más pura. El naftaleno se utiliza tradicionalmente para la producción de anhídrido ftálico,  $\beta$ -naftol y sustancias intermedias colorantes. Más recientemente, el naftaleno se utiliza para fabricar productos de condensación a partir de ácidos sulfónicos de naftaleno, empleando el formaldehído como aditivo para mejorar las propiedades de flujo del hormigón. Otra aplicación es la producción de diisopropilnaftalenos.

El antraceno crudo se aísla de los aceites de antraceno de horno de coque. Cuando el aceite de antraceno genera residuos limitados a 360°C, el aceite se diluye empleando aceite de naftaleno escurrido o un aceite ligero de lavado y esta mezcla se enfría a 35°C. Los lodos sólidos-líquidos resultantes se filtran o centrifugan para obtener un aceite crudo de antraceno que contiene entre 40–45% de antraceno.

La recuperación de las sustancias químicas del alquitrán genera aceites residuales, incluyendo nafta pesada, aceite carbólico

desfenolado, aceite de naftaleno escurrido, aceite de lavado, aceite de antraceno filtrado y aceite pesado. Estos se mezclan para obtener aceites de creosota, que se utilizan como preservativos de la madera. La creosota de alquitrán de hulla también se emplea como materia prima para la fabricación de negro de carbón. Otros mercados menores para la creosota son el alquitrán de hulla fundente, brea de hulla y betún.

<sup>41</sup> Los aceites de naftaleno procedentes de los alquitranes de horno de coque contienen por lo general entre un 60–65% de naftaleno.