

# Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de polímeros derivados del petróleo

## 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 aquellos proporcionados por estas Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad, será necesario aportar una justificación exhaustiva y detallada de las alternativas propuestas como parte de la evaluación ambiental en un sector concreto. Esta justificación debería demostrar que los niveles de desempeño escogidos garantizan la protección de la salud y el medio ambiente.

## Aplicabilidad

Las presentes guías son aplicables a la fabricación de polímeros derivados del petróleo donde los monómeros se

<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.

polimerizan para obtener pelets o gránulos para su posterior uso industrial<sup>2</sup>.

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

---

<sup>2</sup> Estas guías no abarcan las plantas de fabricación de elastómeros ni las plantas de fabricación de fibras.

## 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 polímeros, 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 ambiental

Los problemas medio ambientales que pueden plantearse en los proyectos de fabricación de polímeros incluyen:

- Emisiones a la atmósfera
- Aguas residuales
- Materiales peligrosos
- Residuos
- Ruido

#### Emisiones a la atmósfera

##### *Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) procedentes del secado y el acabado*

Las emisiones a la atmósfera más habituales en las plantas de polímeros son las de compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes del secado, el acabado y la purga. Las medidas recomendadas para controlar los COV durante las operaciones de secado y acabado incluyen:

- La separación y purificación de polímeros aguas abajo hasta el reactor<sup>3</sup>

- La separación instantánea de disolventes y monómeros
- El decapado con vapor o nitrógeno caliente
- Las fases de desgasificación en extrusionadoras, normalmente en vacío
- La condensación de COV a bajas temperaturas o en lechos de adsorción antes de ventilar el aire de escape. El secado reciclará el aire de escape o el nitrógeno junto con la condensación de los COV
- El uso de sistemas de purga de nitrógeno de circuito cerrado, el uso de extrusionadores de desgasificación y la recolección de los gases emitidos durante la extrusión en plantas de poliolefinas debido al riesgo de incendio relacionado con la inflamabilidad de los hidrocarburos y las altas temperaturas implicadas
- Los gases de respiradero emitidos por reactores, tanques de despresurización y decapantes y que contengan niveles significativos de MVC se recogerán y purificarán antes de emitirse a la atmósfera. El agua que presente niveles significativos de MVC, como por ejemplo el agua empleada en la limpieza de reactores que contengan MVC, líneas de transferencia, tanques de suspensión o de látex circulará por una columna de agotamiento para eliminar los MVC presentes en la fabricación de cloruro de polivinilo mediante el proceso de suspensión
- El uso de columnas de agotamiento específicamente diseñadas para agotar las suspensiones en la fabricación de cloruro de polivinilo mediante un proceso de suspensión
- La producción de látex estable y el uso de tecnologías adecuadas de agotamiento en las plantas de cloruro de polivinilo de emulsión, que combinan la polimerización de emulsión con el secado por pulverización de ciclo abierto
- La desgasificación multifásica en vacío de los polímeros fundidos para reducir los monómeros residuales a niveles

<sup>3</sup> La eficacia de la extracción depende de varios factores, incluida la volatilidad de los COV, las propiedades del polímero y el tipo de proceso de polimerización.

reducidos<sup>4,5</sup> en la fabricación de poliestirenos y en general en la fabricación de polímeros estirénicos<sup>6</sup>;

- La prevención de vertidos y fugas durante la polimerización de emulsiones de monómeros acrílicos debido al olor extremadamente fuerte, penetrante y de bajo umbral de todos los monómeros acrílicos<sup>7</sup>
- El tratamiento de gases residuales mediante la oxidación catalítica o técnicas equivalentes en la fabricación de tereftalato de polietileno
- La depuración húmeda de los conductos de ventilación en la fabricación de poliamidas
- El tratamiento catalítico o térmico de los residuos gaseosos y líquidos en toda la fabricación de polímeros termoendurecibles
- La instalación de sistemas cerrados con condensación de vapor y purificación de los conductos de ventilación en la fabricación de resinas de fenol formaldehído debido a la elevada toxicidad de los dos monómeros principales
- Los COV procedentes de las secciones de acabado y respiraderos de los reactores se tratarán por medio de técnicas de incineración catalítica antes de descargarse en la atmósfera. En el caso de los COV clorados, la tecnología de incineración garantizará unos niveles de emisión de dioxinas / furanos que cumplan los límites establecidos en el Cuadro 1.

### COV de las purgas de proceso

Las purgas de proceso se asocian con la purificación de las materias primas, el llenado y vaciado de reactores y otros equipos, la extracción de los subproductos de reacción en la

policondensación, bombas de vacío y despresurización de depósitos. Algunas de las medidas recomendadas para la prevención y el control de la contaminación consisten en:

- Las purgas de vapores de proceso se recuperarán mediante la compresión o refrigeración y la condensación de componentes licuefactables o se enviarán a un sistema de llama de alta eficacia que pueda garantizar una eficiente destrucción
- Los gases no condensables se suministrarán a un sistema de quema de gases residuales específicamente diseñado para garantizar una total combustión con emisiones bajas y para prevenir la formación de dioxinas y furanos
- En las plantas de cloruro de polivinilo (PVC), los gases contaminados con MVC (aire y nitrógeno) procedentes de la sección de recuperación de MVC se recogerán y tratarán mediante la absorción o adsorción de MVC mediante técnicas de incineración que se ajusten a las normas aceptadas internacionalmente o mediante la oxidación térmica / catalítica antes de emitirse a la atmósfera
- En la fabricación de poliestireno de alto impacto (HIPS), las emisiones a la atmósfera procedentes de los sistemas de disolución de polibutadieno se minimizarán empleando sistemas continuos, líneas de balance de vapor y tratamiento de escapes
- En las unidades de poliéster insaturado y resinas alquídicas, las corrientes de gas residual generadas por los equipos de proceso se tratarán mediante oxidación térmica o, cuando lo permitan las concentraciones de emisiones, adsorción de carbón activado
- El uso de depuradores de glicol o cámaras de sublimación para la recuperación de vapor anhídrido procedente de los respiraderos de los tanques de almacenamiento de poliéster insaturado y resinas alquídicas

<sup>4</sup> Directiva de la Comisión de la UE 2002/72/CE y enmiendas subsiguientes.

<sup>5</sup> Food, Drug and Cosmetic Act, enmendada en virtud de la Food Additive Regulation 21 CFR §.

<sup>6</sup> Esta situación puede darse a causa de la volatilidad relativamente baja de monómeros (estireno) o disolventes (etilbenceno) comparada con las reducidas concentraciones necesarias en el proceso (por ejemplo para productos de aplicación alimentaria).

<sup>7</sup> Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, red de Transferencia de Tecnología, sitio web sobre Tóxicos del aire (Air Toxics), acrilato etílico.

- En la producción de resinas fenólicas, las emisiones de proceso contaminadas con COV, especialmente aquéllas procedentes de los conductos de ventilación de los reactores, se recuperarán o incinerarán.
- En la fabricación de poliamidas alifáticas, emplear depuradores húmedos, condensadores y adsorbedores de carbón activado junto con la oxidación térmica

### *COV procedentes de las emisiones fugitivas*

Las emisiones fugitivas en las instalaciones de fabricación de polímeros se asocian principalmente con la liberación de COV originada en fugas de tuberías, válvulas, conexiones, bridas, envases, líneas abiertas, tanques de almacenamiento de techo flotante y juntas, juntas de bombas, sistemas de transporte de gas, juntas de compresores, por ejemplo compresores de etileno y propileno, válvulas de seguridad, operaciones de carga y descarga de materias primas y sustancias químicas (por ejemplo tanques de techo cónico), la preparación y mezclado de sustancias químicas (por ejemplo la elaboración de soluciones de ayudas de polimerización y aditivos de polímeros) y las unidades de tratamiento de aguas residuales (WWTU). El sistema de proceso se diseñará para minimizar las emisiones fugitivas de gases tóxicos e hidrocarburos. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** proporcionan recomendaciones generales sobre COV y emisiones fugitivas. Las recomendaciones específicas para el sector incluyen:

- En la fabricación de polietileno, las fugas de monómeros procedentes de los compresores alternativos empleados en las plantas de polietileno de alta presión se recuperarán y reciclarán en la fase de succión a baja presión.
- En la fabricación de cloruro de polivinilo, se minimizará la apertura de los reactores para el mantenimiento, adoptándose sistemas de limpieza automática.

### *Material particulado*

Las emisiones de material particulado (es decir, finos de polímero y / o aditivos como agentes antiadherentes, etc.) se asocian con las operaciones de secado y envasado de polímeros. Otras fuentes de material particulado incluyen el transporte, transferencia y extracción de polvo de los pelets. Las estrategias recomendadas para la gestión de material particulado incluyen:

- La optimización del diseño del secador
- El uso de circuitos cerrados de gas
- La reducción en origen (por ejemplo los sistemas de transferencia de granulación) y la captación mediante instalaciones de elutriación
- La instalación de precipitadores electrostáticos, bolsas filtrantes o depuración húmeda
- La instalación de sistemas automáticos de embolsado y la ventilación eficaz durante las operaciones de envasado
- Operaciones de servicio adecuadas

### *Venteo y quema en antorcha*

El venteo y la quema en antorcha son importantes medidas de seguridad empleadas en las instalaciones de fabricación de polímeros para garantizar la segura eliminación de todos los gases de proceso originados durante el almacenamiento y las unidades de proceso en caso de apertura de un disco o válvula de seguridad, fallo de la electricidad o los equipos y otras condiciones alteradas en la planta. Las descargas de emergencia procedentes de los reactores y otros equipos críticos de proceso se transportarán hasta los tanques de despresurización donde se recuperan los reactivos (por ejemplo mediante el decapado con vapor o en vacío) antes de descargarse los residuos tratados o mediante la depuración y quema de alta eficacia. Las medidas específicas del sector incluyen:

- El etileno venteado procedente de las plantas de polietileno de alta presión y baja densidad (PEBD) y de propileno lineal de baja densidad (PELBD) no puede transportarse hasta la antorcha debido a la apertura de los discos de seguridad del reactor a alta presión, sino que deberá ventearse a la atmósfera mediante una chimenea después de diluirse con vapor y enfriarse por medio de la depuración con agua para minimizar los riesgos de nubes explosivas. El uso de sistemas específicamente diseñados operados mediante sensores de detonación.
- Se utilizarán válvulas de seguridad de presión (PSV) en las plantas de polimerización para reducir la cantidad de sustancias químicas liberadas mediante la activación de un dispositivo de sobrepresión/purga, descargándose directamente a la atmósfera.
- Dada la posibilidad de taponamiento de los conductos provocada por la formación de polímeros, se recomienda la utilización de sistemas de seguridad redundantes sometidos a frecuentes inspecciones. Las líneas de PSV se protegerán aguas arriba mediante PSD para evitar las pérdidas y los taponamientos. Se proporcionarán conexiones que permitan la comprobación de los sistemas de seguridad durante la operación de la planta.
- En la fabricación de cloruro de polivinilo, se minimizará la incidencia del venteo de emergencia en los reactores de polimerización debido a la reacción incontrolada por medio de una o más de las siguientes técnicas:
  - Instrumentación específica de control para las condiciones de alimentación y operación del reactor
  - Un sistema de inhibición química para detener la reacción
  - La capacidad de refrigeración de emergencia del reactor
  - El suministro eléctrico de emergencia para la agitación del reactor
- El venteo controlado de emergencia hacia el sistema de recuperación de MVC<sup>8</sup>
- En caso de formarse espuma durante el venteo de emergencia, ésta se reducirá mediante la adición de antiespumantes para evitar el taponamiento del sistema de venteo.
- Durante el venteo de emergencia, el contenido del reactor se descargará en un tanque de despresurización y se decapará con vapor antes de su descarga.
- En la fabricación de látex acrílico, se evitará el venteo de emergencia hacia el sistema de quema en antorcha de los reactores debido a la polimerización incontrolada mediante una o más de las siguientes técnicas:
  - La adición continua controlada por ordenador de reactivos en el reactor en base a la actual cinética de polimerización
  - Un sistema de inhibición química para detener la reacción
  - La capacidad de refrigeración de emergencia del reactor
  - El suministro eléctrico de emergencia para la agitación del reactor
  - La descarga del contenido del reactor en un tanque de despresurización.

### *Fuentes de combustión y eficacia energética*

Las plantas de polimerización consumen grandes cantidades de energía y vapor, que suelen producirse en las instalaciones de cogeneración del emplazamiento. Las emisiones vinculadas a la operación de fuentes eléctricas deberán minimizarse mediante la adopción de una estrategia combinada que contemple la reducción de la demanda de energía, el uso de combustibles más limpios y la aplicación de los controles de emisiones necesarios. Las **Guías generales sobre medio ambiente,**

<sup>8</sup> EIPPCB BREF (2006).

**salud y seguridad** contienen recomendaciones sobre eficiencia energética.

Las plantas de polimerización operan en una amplia gama de condiciones (de temperatura y presión) y normalmente es posible y resulta útil incluir una cascada de temperatura o energía en su diseño para recuperar el calor (por ejemplo el vapor a baja presión para el decapado o la calefacción) y la energía de compresión. La correcta selección y diseño de las operaciones de purificación según su eficiencia termodinámica constituye un componente esencial para reducir los requisitos de energía. El secado y el acabado de polímeros son aspectos importantes a tener en cuenta, dada su demanda de energía y la sensibilidad de los polímeros a la tensión calorífica y mecánica. Otras áreas con oportunidades potenciales para la reducción del consumo de energía son los sistemas de deshidratación, los sistemas de refrigeración de agua de circuito cerrado, el secado de gas inerte de circuito cerrado, el uso de extrusores de cizalla reducida para la preparación de compuestos, el incremento de la concentración de polímeros y las bombas de engranaje para la peletización.

### *Gases ácidos*

Las trazas de cloruro de hidrógeno (HCl), originadas durante la hidrólisis de los compuestos orgánicos clorados mediante catalizador, pueden estar presentes en el aire de escape procedente del secado de polímeros producidos mediante la catálisis iónica. Aunque el ácido suele estar presente en cantidades reducidas, se recomienda someter la corriente de gas a pruebas y adoptar medidas de control de la contaminación, como por ejemplo la depuración húmeda, en caso de registrarse niveles significativos.

### *Dioxinas y furanos*

Las plantas de fabricación de polímeros suelen disponer de instalaciones auxiliares de incineración de residuos gaseosos,

líquidos y sólidos. La incineración de compuestos orgánicos clorados (por ejemplo clorofenoles) puede generar dioxinas y furanos. Ciertos catalizadores en forma de compuestos metálicos de transición (por ejemplo el cobre) también facilitan la formación de dioxinas y furanos. Entre las estrategias recomendadas para la prevención y el control se incluyen:

- La operación de instalaciones de incineración según las normas técnicas reconocidas internacionalmente<sup>9</sup>
- El mantenimiento de condiciones operativas adecuadas, como por ejemplo temperaturas suficientemente altas de incineración y gas de combustión para impedir la formación de dioxinas y furanos
- Garantizar que los niveles de emisiones cumplan los valores de referencia indicados en el Cuadro 2

### **Aguas residuales**

#### *Aguas residuales de procesos industriales*

Las aguas residuales de proceso originadas en las unidades de la planta pueden contener hidrocarburos, monómeros y otras sustancias químicas, polímeros y otros sólidos (ya sea en suspensión o emulsificados), tensioactivos y emulsificadores, compuestos oxigenados, ácidos, sales inorgánicas y metales pesados.

Entre las estrategias recomendadas para la gestión de las aguas residuales se encuentran:

- Siempre que sea posible, se reciclarán las aguas residuales que contengan monómeros volátiles (por ejemplo, MVC, estireno, acrilonitrilo, ésteres acrílicos, acetato de vinilo, caprolactama) y/o los disolventes de polimerización (por ejemplo, condensado procedente del decapado con vapor de las suspensiones o el látex, condensado procedente de la eliminación de disolventes o

<sup>9</sup> Por ejemplo, la Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, fechada el 4 de diciembre de 2000, sobre los residuos de incineración.

aguas residuales generadas durante el mantenimiento de los equipos) en el proceso, o bien se tratarán mediante la destilación instantánea o la separación equivalente para extraer los COV antes de su transporte hasta el sistema de tratamiento de aguas residuales de las instalaciones.

- Las sustancias orgánicas se separarán y reciclarán en el proceso siempre que sea posible o bien se incinerarán.
  - Se incinerarán catalítica o térmicamente las corrientes contaminadas no reciclables, como por ejemplo las aguas residuales originadas durante la fabricación de poliéster o polímeros endurecibles.
  - Las ayudas para la polimerización de emulsión y suspensión se seleccionarán teniendo en cuenta su biodegradabilidad al acceder a la corriente de aguas residuales durante la recuperación de polímeros.
  - En caso de utilizarse ayudas para la polimerización menos biodegradable o no biodegradable, se instalará una unidad específicamente diseñada para el tratamiento previo del agua antes de su descarga en el sistema de tratamiento de aguas residuales en las instalaciones.
  - Las aguas residuales originadas durante la recuperación de polímeros después de la polimerización iónica y que contengan iones de metal procedentes de los catalizadores de polimerización (por ejemplo, Li, Ni, Co, V, etc.) se tratarán previamente cuando sea necesario antes de descargarse en el sistema de tratamiento de aguas residuales en las instalaciones.
  - Se enviarán las soluciones usadas de reactivos a una unidad especializada de tratamiento para su descarga.
  - Los efluentes ácidos y cáusticos procedentes de la preparación del agua desmineralizada se tratarán mediante la neutralización antes de su descarga en el sistema de tratamiento de aguas residuales en las instalaciones.
- El agua contaminada procedente de las actividades periódicas de limpieza durante la puesta en orden de las instalaciones se someterá a pruebas y se tratará en el sistema de tratamiento de aguas residuales en las instalaciones.
  - Los efluentes oleosos, como por ejemplo las fugas de proceso, se recogerán en drenajes cerrados, decantándose y descargándose en el sistema de tratamiento de aguas residuales en las instalaciones.
  - Las instalaciones elaborarán e implementarán un programa de manejo de materiales peligrosos, incluyendo planes específicos de prevención y control de vertidos, de acuerdo con las recomendaciones proporcionadas por las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.
  - Se dispondrá de suficiente capacidad para la dilución de fluidos de proceso y así evitar la descarga de líquidos de proceso en el sistema de drenaje de aguas oleosas y maximizar la recuperación en el proceso.

#### *Tratamiento de aguas residuales de procesos*

Las técnicas empleadas para tratar las aguas residuales de proceso en este sector incluyen la clasificación por origen y el pretratamiento de corrientes de aguas residuales concentradas. Las fases en el tratamiento de aguas residuales suelen incluir: filtros de grasas, equipos colectores de flotación, flotación por presurización-despresurización o separadores de agua/aceite para separar los aceites de los sólidos flotantes; filtración por separación de sólidos filtrables; ecualización de flujo y carga; sedimentación para la reducción de sólidos en suspensión utilizando clarificadores; tratamiento biológico, normalmente aeróbico, para reducir las sustancias orgánicas solubles (DOB); cloración de los efluentes siempre que se requiera la desinfección; drenaje y eliminación de residuos en vertederos designados para residuos peligrosos.

Es posible que se requieran controles de ingeniería adicionales para i) el confinamiento y el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles extraídos en las operaciones de diversas unidades en el sistema de tratamiento de agua residuales; ii) la eliminación avanzada de metales empleando filtros de membrana y otras técnicas de tratamiento físico/químico, iii) eliminación de compuestos orgánicos recalcitrantes y DQO no biodegradable empleando carbón activo u oxidación química avanzada; iv) la reducción de la toxicidad en los efluentes empleando la tecnología adecuada (como por ejemplo ósmosis inversa, intercambio de iones, carbón activo, etc.) y v) el confinamiento y la neutralización de olores molestos.

En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se explica la gestión de aguas residuales industriales y se ofrecen ejemplos de enfoques para su tratamiento. Mediante el uso de estas tecnologías y técnicas recomendadas para la gestión de aguas residuales, los establecimientos deberían cumplir con los valores para la descarga de aguas residuales que se indican en el cuadro correspondiente de la Sección 2 del presente documento para la industria gráfica.

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

En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se dan orientaciones sobre el manejo de aguas residuales no contaminadas procedentes de operaciones de servicios públicos, aguas pluviales no contaminadas y aguas de alcantarillado. Las corrientes contaminadas deberían desviarse hacia el sistema de tratamiento de aguas residuales de procesos industriales. La recolección y tratamiento de aguas pluviales puede implicar la recolección de escorrentía procedente de áreas pavimentadas y el tratamiento mediante una fosa de desespumador para recuperar las resinas vertidas. Las recomendaciones para reducir el consumo de agua,

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

### **Materiales peligrosos**

Las instalaciones de procesamiento del carbón generan cantidades considerables de materiales peligrosos, incluidos los productos intermedios/finales y los subproductos. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** describen las prácticas recomendadas para el manejo de materiales peligrosos, incluyendo la manipulación, el almacenamiento y el transporte, así como cuestiones asociadas con las sustancias destructoras de ozono (ODS).

### **Residuos**

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**. Los residuos peligrosos específicos del sector incluyen disolventes residuales y catalizadores de aceite usados, lechos de filtración saturados y residuos sólidos de polímeros procedentes de las plantas de polimerización.<sup>10</sup>

### *Catalizadores usados*

Los catalizadores usados proceden de la sustitución de lechos de catalizador durante las puestas en marcha programadas para los reactores de purificación de monómeros (por ejemplo la hidrogenación de impurezas en las olefinas menores) o, con menos frecuencia, durante la catálisis de polimerización heterogénea. Los catalizadores usados pueden contener níquel, platino, paladio y cobre dependiendo del proceso. Entre las

<sup>10</sup> Ver la sección sobre dioxinas y furanos para las guías relacionadas con las emisiones aplicables a la incineración de los residuos orgánicos clorados.

estrategias recomendadas para el manejo de catalizadores usados se encuentran:

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

### *Lechos de filtración saturados*

Los lechos de filtración saturados se originan en los procesos de polimerización en solución, como por ejemplo la extracción de los catalizadores usados en la polimerización en solución de polímeros o en distintas operaciones de desodorización o clarificación. Las estrategias recomendadas para el manejo de lechos de filtración saturados incluyen la minimización de los agentes de purificación mediante la regeneración en línea y la prolongación de la vida útil, la adecuada contención durante el almacenamiento temporal y el transporte y la gestión fuera del emplazamiento por parte de empresas especializadas.

### *Residuos sólidos de polímeros*

Los residuos de polímero se producen durante la operación normal de la planta (por ejemplo, la filtración y el cribado de látex, el tamizado de polvo y la trituración de gránulos); los

cambios de campaña; la puesta en marcha; y las paradas de mantenimiento y emergencia de los equipos de procesamiento de polímeros.

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

- Reciclar o reutilizar las corrientes de residuos siempre que sea posible en lugar de optar por la descarga. Las posibles opciones de reciclaje incluyen la venta de parafinas a la industria de la cera.
- El tratamiento necesario para extraer y recuperar por separado los COV (por ejemplo mediante el decapado con vapor)
- La segregación y el almacenamiento en un lugar seguro. Algunos residuos de polímero (por ejemplo los polímeros sometidos a calor o esfuerzo de cizalla producidos durante las operaciones de puesta en marcha o parada de los equipos de secado y acabado, los polímeros oxidados recuperados durante el mantenimiento de los secadores, las costras de la planta de proceso sin antioxidantes y los residuos de polímeros envejecidos) pueden ser inestables y proclives al calentamiento y la ignición espontáneos. Estos residuos se almacenarán de forma segura y se eliminarán (por ejemplo, se incinerarán) tan pronto como sea posible.

### **Ruido**

Las fuentes significativas de ruido en las instalaciones de fabricación de polímeros incluyen actividades relacionadas con el procesamiento físico de los polímeros (por ejemplo, el cribado, la trituración, el transporte neumático), así como las grandes máquinas giratorias, como por ejemplo las extrusionadoras, los compresores y las turbinas, bombas, motores eléctricos, ventiladores y refrigeradores de aire. 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 **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen recomendaciones para manejar el ruido.

## 1.2 Higiene y seguridad en el trabajo

Las consecuencias que la construcción, la operación y el desmantelamiento de las instalaciones de fabricación de polímeros 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**. Los riesgos más notables para la higiene y la seguridad en el trabajo se producen durante la fase operativa de las instalaciones de procesamiento de polímeros, incluyendo principalmente:

- Seguridad en los procesos
- Incendios y explosiones
- Otros riesgos de origen químico
- Espacios reducidos

## Seguridad en los procesos

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

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

Las recomendaciones sobre seguridad de proceso aplicables a los procesos específicos de fabricación se describen a continuación.

### *Fabricación de polietileno*

En la fabricación de polietileno, un riesgo específico de proceso está relacionado con la posible descarga de grandes cantidades de etileno caliente en la atmósfera y la subsiguiente explosión de nubes. Los eventos accidentales están relacionados principalmente con las fugas procedentes de las juntas o durante las operaciones de mantenimiento. Para las unidades de producción de PEBD en concreto, los eventos accidentales pueden incluir la apertura del disco de seguridad del reactor y la explosión en el separador de alta presión. Las medidas específicas de manejo de seguridad incluyen:

- El etileno ventilado debido a la apertura de los discos de seguridad del reactor a alta presión no puede transportarse hasta la antorcha sino a la atmósfera mediante una chimenea corta después de diluirse con vapor y enfriarse con agua para minimizar los riesgos de nubes explosivas.
- Se evitará la descomposición de producto en reactores tubulares mediante la transferencia de calor, control del perfil de temperatura, flujo de elevada velocidad y un adecuado control de la presión.
- Se impedirá la explosión de separadores a alta presión mediante medidas de diseño de los reactores de depósitos, la cuidadosa dosificación de peróxidos, el control de la temperatura de polimerización, la pronta detección de reacciones exotérmicas no controladas, el rápido aislamiento / despresurización y el mantenimiento adecuado de reactores y separadores.

Durante el proceso de solución de polietileno de alta densidad (PEAD) y de polietileno lineal de baja densidad (PELBD), los riesgos de incendio proceden de las condiciones de altas presiones y temperaturas en el reactor de polimerización y en el desolventizador que opera a temperaturas próximas a la ignición espontánea del disolvente, junto con las elevadas tasas de flujo de disolvente de hidrocarburo. En el proceso de lodos de PEAD y en el proceso a granel de iPP, los vertidos procedentes del reactor pueden resultar en nubes explosivas debido a la evaporación instantánea del isobutano y el propileno. La prevención de vertidos y nubes explosivas se basará en la aplicación de normas de ingeniería reconocidas internacionalmente para el diseño de equipos y tuberías, el mantenimiento, la distribución de la planta y la ubicación / frecuencia de válvulas de cierre de emergencia.

### *Fabricación de PVC*

El venteo accidental de MVC a la atmósfera con la subsiguiente formación de nubes explosivas y tóxicas puede ser el resultado

de la apertura de las válvulas de seguridad de presión (PSV) de un reactor debido a la polimerización incontrolada. Las acciones de manejo incluyen la desgasificación y la purga de vapor del reactor antes de su apertura.

Los MVC pueden oxidarse fácilmente con aire para transformarse en poliperóxidos durante las operaciones de recuperación tras la polimerización. Después de la recuperación, los MVC se retienen en un tanque de retención a presión o se refrigeran. A veces se añade un inhibidor químico, como por ejemplo un fenol impedido, para prevenir la formación de poliperóxido. Normalmente, el poliperóxido formado se mantiene disuelto en MVC, donde reacciona de forma lenta y segura para formar PVC. Sin embargo, al evaporarse los MVC que contienen poliperóxidos, estos últimos pueden precipitarse y descomponerse exotérmicamente, lo que entraña un riesgo de explosión y la consiguiente nube tóxica.<sup>11</sup>

### *Proceso de polimerización por lotes*

La polimerización por lotes puede generar un riesgo de polimerización incontrolada y la explosión de reactores en presencia de una dosificación inadecuada de reactivos o un fallo en la agitación o en los sistemas de recuperación de calor. Las prácticas recomendadas para el manejo de la seguridad en el proceso incluye limitar la práctica de la polimerización por lotes y la aplicación de controles de proceso, como por ejemplo la provisión de electricidad, incluida la provisión de reservas de electricidad de emergencia, refrigeración, sistemas de adición de inhibidores y tanques de despresurización.

### *Procesos de preparación de compuestos, acabado y envasado*

Las operaciones de preparación de compuestos, acabado y envasado plantean riesgos de incendio en mezcladores y extrusionadores (en caso de sobrecalentarse los polímeros) y

<sup>11</sup> EIPPCB BREF (2006)

en los equipos donde se den mezclas de polvos de polímero y aire, como son los secadores, transportadores neumáticos y equipos de trituración. Se recomienda el uso de normas de instalación eléctrica internacionalmente reconocidas, incluida la puesta a tierra de todos los equipos, y la instalación de sistemas específicos contra incendios.

## Incendios y explosiones

### *Monómeros de cloruro de vinilo (MVC)*

Los MVC se clasifican como tóxicos y carcinógenos (grupo 1 de IARC)<sup>12</sup>. En condiciones normales (punto de ebullición = -13,9°C) se trata de un gas que puede ser explosivo en contacto con el aire. Los MVC se almacenan como líquido en tanques presurizados o refrigerados. El transporte de MVC, incluido el transporte por conductos, se realizará según las buenas prácticas internacionales para el transporte de materiales peligrosos. Las evaluaciones dirigidas a la ubicación de las nuevas plantas de PVC tendrán en cuenta la proximidad de las plantas de monómeros para minimizar los tiempos de almacenamiento y reducir los posibles riesgos durante el transporte de los monómeros<sup>13</sup>.

### *Estireno*

El estireno se polimeriza de forma inmediata y debe almacenarse a temperaturas frías con niveles adecuados de 4-tert-butilcatecol (TBC), que se emplea como inhibidor, en tanques diseñados y construidos de acuerdo con las normas internacionales vigentes.

### *Ácido y ésteres acrílicos*<sup>14, 15</sup>

<sup>12</sup> Monografías de la IARC sobre la evaluación de los riesgos carcinogénicos para el ser humano, volumen 19 <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol19/volume19.pdf>

<sup>13</sup> El costo del transporte puede ser un factor considerable a tener en cuenta en la ubicación de nuevas instalaciones próximas a las fuentes de MVC.

<sup>14</sup> Acrylic acid - A summary of safety and handling, 3ª edición, 2002; Intercompany Committee for the Safety and Handling of Acrylic Monomers, ICSSHAM

El ácido acrílico es un líquido que se congela a 13 °C y que resulta extremadamente reactivo cuando no está inhibido durante la polimerización incontrolada. Los accidentes originados durante el almacenamiento de ácido acrílico son relativamente frecuentes.

Se vende inhibido con éter monometílico de hidroquinona, que se activa en presencia de aire. Es fácilmente inflamable al sobrecalentarse y se almacenará en tanques de acero inoxidable. Se evitará el sobrecalentamiento o la congelación dado que la descongelación del ácido acrílico congelado es una operación que conlleva riesgos de polimerización incontrolada. Los ésteres acrílicos se comportan de forma similar, aunque no presentan riesgos relacionados con la congelación.

### *Fenol*

El fenol se derrite a 40,7°C y suele recibirse, almacenarse y manejarse en estado fundido. Los tanques se equiparán con un sistema de recuperación de vapor y serpentines de recalentamiento; se recomienda asimismo la protección con nitrógeno. Se detectará y purgará el nitrógeno en líneas y conexiones antes y después de transferir el producto.

### *Formaldehído*

El formaldehído se utiliza como solución acuosa a concentraciones del 37 – 50 por ciento, estabilizándose normalmente con pequeñas cantidades de metanol (<1 por ciento). Se ha confirmado el efecto carcinógeno del formaldehído para los humanos (Grupo 1 de IARC)<sup>16</sup>. El formaldehído libera vapores inflamables en la atmósfera, por lo que deberá guardarse bajo una manta de gas inerte durante el almacenamiento.

<sup>15</sup> Acrylate esters – A summary of Safety and Handling, 3ª edición, 2002; Intercompany Committee for the Safety and Handling of Acrylic Monomers, ICSSHAM

<sup>16</sup> Monografías de la IARC sobre la evaluación de los riesgos carcinogénicos para el ser humano, volumen 88 <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol19/volume19.pdf>

### Alquilos metálicos (Al, Li, Zn, Na, K, etc.)

Los alquilos metálicos de uso más frecuente son los alquilos de aluminio y magnesio en la polimerización Z-N de las olefinas y los alquilos de litio en la polimerización aniónica del estireno y los dienos. Las prácticas recomendadas para gestionar estas situaciones incluyen:

- Elaborar un plan específico de prevención y control de incendios para abordar los riesgos de incendio entre otros asociados con los alquilos metálicos<sup>17</sup>
- Respetar las distancias de seguridad dentro y fuera de las instalaciones<sup>18</sup>
- Transportar en vagones cisterna, remolques cisterna, tanques portátiles o tanques ISO según las normas internacionalmente reconocidas<sup>19</sup>
- La transferencia se llevará a cabo hasta las instalaciones de almacenamiento en tanques mediante válvulas, conexiones y bombas especialmente diseñadas.
- Mantener los tanques de almacenamiento bajo protección con nitrógeno y conectados a la atmósfera por uno o más sellos de aceite hidráulicos. Supervisar los niveles y flujos de producto con instrumentos y alarmas de elevada fiabilidad
- Equipar las instalaciones de almacenamiento de alquilos metálicos con muros de contención, mientras que el área de contención se construirá en pendiente para facilitar el drenaje hasta una fosa de quema de emergencia.

<sup>17</sup> Podrá utilizarse la niebla de pulverización para desactivar los alquilos pirofónicos. No se utilizarán normalmente grandes cantidades de agua o espuma como agentes en la extinción de incendios debido a su violenta reactividad a los alquilos de aluminio. El agua podrá emplearse para enfriar los objetos adyacentes directamente o como pantalla de agua para proteger cualquier objeto de la radiación de calor. Serán necesarias grandes cantidades de agentes como el CO<sub>2</sub> y otros polvos químicos para controlar los incendios y prevenir la reignición.

<sup>18</sup> E. J. Major, H. G. Wissink, J. J. de Groot, (Akzo Nobel), Aluminum Alkyl Fires

<sup>19</sup> Recomendaciones de la ONU sobre el transporte de mercancías peligrosas. Reglamentación modelo. 13ª edición revisada (2003).

### Peróxidos

Los peróxidos orgánicos e inorgánicos, así como los compuestos de diazo, se utilizan frecuentemente como iniciadores de la polimerización a radical libre. Los peróxidos inorgánicos como el peróxido de hidrógeno y los peroxodisulfatos son capaces de reaccionar de forma violenta a los sustratos orgánicos. Los peróxidos inorgánicos se clasifican como oxidantes. Los riesgos asociados con los oxidantes incluyen el aumento en la tasa de quema de los materiales combustibles; la ignición espontánea de los materiales combustibles; la descomposición rápida y autosostenida, que puede resultar en explosiones; la generación de gases peligrosos; y los riesgos de explosión al mezclarse con compuestos incompatibles o al exponerse al fuego. Las prácticas recomendadas para gestionar estas situaciones incluyen:

- Las formulaciones de peróxido se transportarán y manejarán de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y las normas internacionales aplicables<sup>20,21,22</sup>.
- El almacenamiento se realizará en instalaciones segregadas diseñadas y construidas según las normas internacionalmente aceptadas (por ejemplo Códigos NFPA<sup>23,24</sup>). Los peróxidos orgánicos se almacenarán en edificios dedicados refrigerados o con aire acondicionado a prueba de explosiones<sup>25</sup>.

<sup>20</sup> Recomendaciones de la ONU sobre el transporte de mercancías peligrosas. Reglamentación modelo. 13ª edición revisada (2003).

<sup>21</sup> Safety and handling of organic peroxides: A Guide Prepared by the Organic peroxide producers safety division of the Society of the plastics industry, Inc. Publication # AS-109

<sup>22</sup> NFPA 432, Code for the Storage of Organic Peroxide Formulations (Código para el almacenamiento de formulaciones de Peróxidos), edición de 2002.

<sup>23</sup> NFPA 430, Code for the Storage of Liquid and Solid Oxidizers (Código para el almacenamiento oxidantes sólidos y líquidos), edición de 2004.

<sup>24</sup> NFPA 432, Code for the Storage of Organic Peroxide Formulations (Código para el almacenamiento de formulaciones de Peróxidos), edición de 2002.

<sup>25</sup> Los peróxidos de Clase 3 pueden requerir normas de almacenamiento menos estrictas.

- La elaboración de un plan específico de prevención y control de incendios que tenga en consideración las peculiaridades de los oxidantes inorgánicos fuertes<sup>26</sup>.

### Polímeros

Los incendios en los depósitos de almacenamiento de polímeros pueden ser difíciles de controlar debido al calor de combustión extremadamente elevada de la mayoría de los polímeros. La combustión de polímeros durante los incendios también produce nubes tóxicas. Las prácticas recomendadas para gestionar estas situaciones incluyen:

- Diseñar los edificios de almacenamiento de acuerdo con normas internacionalmente aceptadas incluyendo, por ejemplo, la ventilación adecuada, el control de temperatura del aire y la protección frente a la luz directa del sol.
- Adoptar sistemas de prevención y control de incendios, incluyendo entre otros detectores de humo, detectores de focos de rayos infrarrojos (IR) y pulverizadores distribuidos de agua diseñados para hacer frente a la extremadamente alta carga térmica de los incendios de polímeros; dado que la mayoría de los polímeros están sometidos a un lento envejecimiento oxidativo por calor o luz, deberán conservarse en envases cerrados.
- Adoptar el procedimiento de gestión de “primero en entrar, primero en salir” (FIFO) para los productos junto con inspecciones frecuentes y unas adecuadas operaciones de servicio. Se rastrearán los materiales envejecidos, se evaluarán para su seguridad y se separarán para su eliminación.

### Sustancias químicas

La posible exposición a la inhalación y el contacto dérmico con sustancias químicas durante las operaciones rutinarias en

planta se gestionarán en base a los resultados obtenidos a partir de los análisis de seguridad en el trabajo y la encuesta sobre higiene industrial, de conformidad con las orientaciones sobre higiene y seguridad en el trabajo descritas en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**. Las medidas de protección incluyen la formación de los trabajadores, los sistemas de permisos de trabajo, el uso de equipos de protección personal (EPP) y sistemas de alarma de detección de gas tóxico.

### Espacios cerrados

Los riesgos asociados con los espacios cerrados, al igual que en otros sectores industriales, pueden ocasionar la muerte en caso de no manejarse adecuadamente las peores situaciones posibles. La entrada en espacios cerrados por parte de los trabajadores y las probabilidades de que se produzcan accidentes pueden variar de unas instalaciones a otras en función del diseño, los equipos en el emplazamiento y la infraestructura. Los espacios cerrados en las instalaciones de fabricación de polímeros pueden incluir reactores a los que debe accederse durante las actividades de mantenimiento. En estas instalaciones se deben formular y aplicar procedimientos para el ingreso a espacios cerrados descritos en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

### 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**. Los riesgos más significativos para la higiene y la salud de la comunidad en lo que atañe a las plantas de fabricación de polímeros se producen durante la fase de operación e incluyen accidentes de gran magnitud ocasionados por incendios y

<sup>26</sup> Por ejemplo, el agente extintor de incendios más adecuado para los peróxidos orgánicos es el nitrógeno líquido que se aplica con equipos contraincendios operados con control remoto.

explosiones o vertidos accidentales de productos acabados durante su transporte desde la planta de procesamiento. Las recomendaciones para el manejo de estas cuestiones se presentan en las secciones anteriores sobre higiene y seguridad ambiental y ocupacional del presente documento. Los riesgos mayores se gestionarán de acuerdo con las regulaciones y mejores prácticas internacionales (por ejemplo, Recomendaciones de la OCDE,<sup>27</sup> la Directiva de la UE Seveso II,<sup>28</sup> y la Norma de Programa de Gestión de Riesgos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)<sup>29</sup>.

A continuación se describen las orientaciones encaminadas a la gestión de este tipo de incidentes, también presentes en las **Guías Generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**, incluyendo: Manejo de Materiales Peligrosos (incluidos Riesgos Mayores), Seguridad del Tráfico, Transporte de Materiales Peligrosos y Preparación y Respuesta de Emergencia. Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para el Transporte, los Ferrocarriles, los Puertos, y Terminales de Crudo y Productos derivados del Petróleo proporcionan orientaciones adicionales aplicables al transporte por mar y por tren e instalaciones en tierra.

## 2.0 Indicadores y seguimiento del desempeño

### 2.1 Medio ambiente

#### Guías sobre emisiones y efluentes

En los Cuadros 1 y 2 se presentan las guías sobre emisiones y efluentes para este sector. Las cantidades correspondientes a las emisiones y efluentes de los procesos industriales en este sector son indicativas de las prácticas internacionales

recomendadas para la industria, reflejadas en las normas correspondientes de los países que cuentan con marcos normativos reconocidos. Dichas cantidades pueden alcanzarse en condiciones normales de funcionamiento de instalaciones adecuadamente diseñadas y utilizadas mediante la aplicación de las técnicas de prevención y control de la contaminación que se han analizado en las secciones anteriores de este documento.

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

Las guías sobre efluentes se aplican a los vertidos directos de efluentes tratados a aguas superficiales de uso general. Los niveles de vertido específicos del emplazamiento pueden establecerse basándose en la disponibilidad y condiciones de los sistemas de tratamiento y recolección de aguas de alcantarillado público o, si se vierten directamente a las aguas superficiales, basándose en la clasificación del uso del agua receptora que se describe en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**. Estos niveles se deben lograr, sin dilución, al menos el 95% del tiempo que opera la planta o unidad, calculado como proporción de las horas de operación anuales. El incumplimiento de estos niveles debido a

<sup>27</sup> OCDE, Principios guía para la prevención de accidentes químicos, preparación y respuesta, segunda edición, 2003.

<sup>28</sup> Directiva del Consejo 96/82/CE de la UE, Directiva Seveso II, ampliada por la Directiva 2003/105/CE.

<sup>29</sup> EPA, 40 CFR Parte 68, 1996 — Chemical accident prevention provisions

las condiciones de determinados proyectos locales se debe justificar en la evaluación ambiental correspondiente.

**Cuadro 1. Guías sobre emisiones a la atmósfera**

Contaminante	Unidad	Valor indicativo
Material particulado (MP)	mg/Nm <sup>3</sup>	20
Óxidos de nitrógeno	mg/Nm <sup>3</sup>	300
Cloruro de hidrógeno	mg/Nm <sup>3</sup>	10
Óxidos de azufre	mg/Nm <sup>3</sup>	500
Cloruro de vinilo (MVC)	g/t s-PVC g/t e-PVC	80 500
Acrilonitrilo	mg/Nm <sup>3</sup>	5 (15 procedentes de secadores)
Amoníaco	mg/Nm <sup>3</sup>	15
COV	mg/Nm <sup>3</sup>	20
Metales pesados (total)	mg/Nm <sup>3</sup>	1,5
Hg	mg/Nm <sup>3</sup>	0,2
Formaldehído	mg/m <sup>3</sup>	0,15
Dioxinas / Furanos	ng TEQ/Nm <sup>3</sup>	0,1

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

El Cuadro 3 (a continuación) proporciona ejemplos de indicadores de consumo de recursos para la energía y el agua, así como indicadores relevantes sobre emisiones y residuos. Los valores de referencia de la industria se consignan únicamente con fines comparativos, y cada proyecto debería tener como objetivo lograr mejoras continuas en estas áreas.

### 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.

**Cuadro 2. Guías sobre efluentes**

Contaminante	Unidad	Valor indicativo
pH	S.U.	6 – 9
Aumento de temperatura	°C	=3
DBO <sub>5</sub>	Mg/L	25
DQO	Mg/L	150
Nitrógeno total	Mg/L	10
Fósforo total	Mg/L	2
Sulfuro	Mg/L	1
Aceite y grasa	Mg/L	10
SST	Mg/L	30
Cadmio	Mg/L	0,1
Cromo (total)	Mg/L	0,5
Cromo (hexavalente)	Mg/L	0,1
Cobre	Mg/L	0,5
Cinc	Mg/L	2
Plomo	Mg/L	0,5
Níquel	Mg/L	0,5
Mercurio	Mg/L	0,01
Fenol	Mg/L	0,5
Benceno	Mg/L	0,05
Cloruro de vinilo	Mg/L	0,05
Halógenos orgánicos adsorbibles	Mg/L	0,3
Toxicidad	A determinar en cada caso	

**Cuadro 3. Indicadores de consumo de recursos y energía, emisiones y residuos**

Parámetro	Unidad	Indicador del sector (UE, 1999, Mejor promedio 50%)					
		PEBD <sup>20</sup>	PEAD <sup>14</sup>	PELBD	GPPS	HIPS	EPS
<b>Producto</b>							
Consumo directo de energía <sup>12</sup>	kWh/t	720	570	580	300 <sup>2</sup>	410 <sup>2</sup>	500 <sup>2</sup>
Consumo primario de energía <sup>13</sup>	kWh/t	2,070	1.180	810	--	--	--
Consumo de agua <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /t	1,7	1,9	1,1	0,8	0,8	5,0
Emisión de polvo	g/t	17	56	11	2	2	30
Emisión de COV <sup>10</sup>	g/t	700 – 1.100	650	180 – 500 <sup>1</sup>	85	85	450 - 700 <sup>4</sup>
Emisión de DQO	g/t	19	17	39	30	--	--
Residuos inertes	kg/t	0,5	0,5	1,1	2,0	3,0	6,0
Residuos peligrosos	kg/t	1,8	3,1	0,8	0,5	0,5	3,0
<b>Producto</b>		<b>S-PVC</b>	<b>E-PVC</b>	<b>PET<sup>15, 19</sup></b>	<b>PA 6<sup>15,17</sup></b>		<b>PA 66<sup>15,16</sup></b>
Consumo directo de energía	kWh/t	750-1.100	2.000-3.000	850 – 1.500	1.800 – 2.000		1.600 – 2.100
Consumo primario de energía	kWh/t	1.100-1.600	2.800-4.300	--	--		--
Agua a residuos	M <sup>3</sup> /t	4,0 <sup>9</sup>	--	0,6 - 25	1 - 3		1,5 – 3,0
Emisión de polvo	g/t	40 <sup>6,9</sup>	200 <sup>6,9</sup>	--	--		--
Emisión de monómeros a la atmósfera <sup>5, 9,10</sup>	g/t	18 - 43	245-813	--	6 – 10		--
Emisiones de COV <sup>10</sup>	g/t	--	--	5 <sup>18</sup>	--		10 – 30
Emisión de monómeros al agua <sup>7,9</sup>	g/t	3,5	10	--	--		--
Emisión de DQO	g/t	480 <sup>8,9</sup>	340 <sup>8,9</sup>	2.000 – 16.000	4.300 – 5.700 <sup>16</sup>		4.500 – 6.000 <sup>16</sup>
Residuos inertes	kg/t	--	--	0,8 – 18	3,0 – 3,5		3,0 – 3,5
Residuos peligrosos <sup>17</sup>	kg/t	55 <sup>9</sup>	74 <sup>9</sup>	< 0,45	0,2 – 0,5		0,2 – 0,5
<b>Producto</b>		<b>UPES</b>					
Consumo directo de energía	kWh/t	< 1,000					
Consumo primario de energía	kWh/t	--					
Agua a residuos	m <sup>3</sup> /t	1 – 5					
Emisión de polvo	g/t	5 – 30					
Emisión de monómeros a la atmósfera	g/t	--					
Emisiones de COV <sup>10</sup>	g/t	40 – 100					
Emisión de monómeros al agua	g/t	--					
Emisión de DQO	g/t	--					
Residuos inertes	kg/t	--					
Residuos peligrosos	kg/t	< 7					

Fuente: IPPC BREF de la UE (2006)

Notas: 1) Según el tipo de comonomero (C4 o C8); 2) Promedio europeo; 3) No incluyendo la purga de agua de refrigeración; 4) El 60% es pentano; no incluyendo el almacenamiento; 5) Mejor promedio 25%; 6) Polvo de PVC; 7) Después del agotamiento, antes del WWT; 8) Después del WWT final; 9) Mediana; 10) Incluyendo emisiones difusas; 11) La energía directa es el consumo total de energía suministrada; 12) La energía primaria es la energía calculada en términos de combustibles fósiles. Para calcular la energía primaria, se emplearon las siguientes eficiencias: electricidad: 40 % y vapor : 90 %; 13) Valores de buenas prácticas de la industria; 14) Los valores de iPP pueden considerarse más o menos equivalentes; 15) Antes del WWT; 16) Proceso continuo; 17) Residuos sólidos que contengan > 1.000 ppm MVC; 18) Empleando la oxidación catalítica (sólo fuentes puntuales); 19) El proceso más la condensación continua posterior; 20) Basado en un reactor tubular

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

### Guía 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>30</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>31</sup>, los límites permisibles de exposición publicados por la Administración de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos (OSHA)<sup>32</sup>, los valores límite indicativos de exposición profesional publicados por los Estados miembros de la Unión Europea<sup>33</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 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>34</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>35</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.acgih.org/TLV/> y <http://www.acgih.org/store/>.

<sup>31</sup> Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>.

<sup>32</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>33</sup> Disponibles en: [http://europe.osha.eu.int/good\\_practice/risks/ds/oell](http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oell).

<sup>34</sup> Disponibles en: <http://www.bls.gov/iif/> y <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.

<sup>35</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 y fuentes adicionales

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 2000. 40 CFR Part 63 National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Amino/Phenolic Resins Production. Washington, DC

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 1996. 40 CFR Parts 9 and 63 National Emission Standards for Hazardous Air Pollutant Emissions: Group IV Polymers and Resins. Washington, DC

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 63 — National emission standards for hazardous air pollutants, Subpart F— National Emission Standard for Vinyl Chloride. Washington, DC

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 40 CFR Part 60 — Standards of performance for new stationary sources, Subpart DDD — Standards of Performance for Volatile Organic Compound (VOC) Emissions from the Polymer Manufacturing Industry. Washington, DC

Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA) de Estados Unidos. Standard 430, Code for the Storage of Liquid and Solid Oxidizers. 2004 Edition. Quincy, MA.

Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA) de Estados Unidos. Standard 432, Code for the Storage of Organic Peroxide Formulations. 2002 Edition. Quincy, MA.

Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA) de Estados Unidos. Standard 654: Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids

Comisiones de Oslo y París (OSPAR). 2006. Recommendation 2000/3 for Emission and Discharge Limit Values for E-PVC, as amended by OSPAR Recommendation 2006/1. Oslo, Noruega, y París, Francia.

Comisiones de Oslo y París (OSPAR). 1999. Recommendation 99/1 on BAT for the Manufacture of Emulsion PVC (e-PVC). Oslo, Noruega, y París, Francia.

Comisiones de Oslo y París (OSPAR). 1998. Decision 98/5 for Emission and Discharge Limit Values for the Vinyl Chloride Sector, Applying to the Manufacture of Suspension PVC (S-PVC) from Vinyl Chloride Monomer (MVC). Oslo, Noruega, y París, Francia.

Directiva 2000/76/EC del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos.

Comisión Europea. 2006. Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC), Documento de referencia de mejores técnicas disponibles para los polímeros. Octubre de 2006. Sevilla, España

Consejo Europeo de Fabricantes de Vinilo (ECVM). 1994. Carta del sector industrial sobre la producción de CVM y PVC en suspensión. Bruselas, Bélgica

Consejo Europeo de Fabricantes de Vinilo (ECVM). 1998. Carta del sector industrial sobre la producción de PVC en emulsión. Bruselas, Bélgica

EU Council Directive 96/82/EC, so-called Seveso II Directive, extended by the Directive 2003/105/EC

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

Ministerio Federal para el Medio Ambiente, la Conservación de la Naturaleza y la Seguridad Nuclear. 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.

Intercompany Committee for the Safety and Handling of Acrylic Monomers, ICSHAM. 2002. Acrylate Esters – A Summary of Safety and Handling, 3rd Edition, 2002

Intercompany Committee for the Safety and Handling of Acrylic Monomers, ICSHAM. 2002. Acrylic acid - A summary of safety and handling, 3ª edición, 2002

IARC. Monografías sobre la evaluación de los riesgos carcinogénicos para el ser humano.

Kirk-Othmer, R.E. 2006. Encyclopedia of Chemical Technology. 5th Edition. John Wiley and Sons Ltd., New York, NY.

Organic Peroxide Producers Safety Division of the Society of the Plastics Industry. 1999. Safety and Handling of Organic Peroxides. Publication # AS-109. Washington, DC

OCDE, Principios guía para la prevención de accidentes químicos, preparación y respuesta, segunda edición, 2003

Organización de las Naciones Unidas. Recomendaciones sobre el transporte de mercancías peligrosas. Reglamentación modelo. Decimotercera edición revisada, 2003.

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

### Polímeros

Por lo general, los polímeros pueden clasificarse según sus propiedades físicas a temperatura de servicio, incluyendo:

- Resinas: rígidas, con un elevado módulo de Young<sup>36</sup> y un reducido alargamiento a la rotura<sup>37</sup>
- Cauchos (o 'elastómeros'), con un reducido módulo de Young y un elevado alargamiento a la rotura

También se clasifican según el tipo de tecnologías de fabricación empleadas, incluyendo:

- **Termoplásticos:** se ablandan y funden de forma inversa al calentarse (endureciéndose al enfriarse). Se fabrican mediante el moldeado o la extrusión, o bien mediante esparcido o inmersión, diluyéndose en soluciones o emulsiones, como sucede con recubrimientos y adhesivos; pueden reciclarse fácilmente, aunque esto acarrea una degradación general de sus propiedades.
- **Plásticos termoestables:** después de curarse, se endurecen de forma permanente y se descomponen al calentarse a elevadas temperaturas. Una vez usados, no pueden reciclarse. Los plásticos termoestables son más duros, más estables dimensionalmente y más quebradizos que los termoplásticos.

### Fases en la fabricación de polímeros

#### *Purificación de monómeros y disolventes*

Las reacciones de polimerización requieren materias primas y sustancias químicas de elevada pureza, dado que las

impurezas pueden afectar al catalizador o tener una influencia negativa en las propiedades del producto, incluidos cambios en la estructura y la reducción en la longitud de la cadena.

#### *Procesos de polimerización*

Los procesos de polimerización varían en función de las propiedades de los monómeros y polímeros y sus mecanismos de polimerización. Los reactores de polimerización pueden ser continuos o discontinuos (por lotes). Por lo general, se opta por la polimerización por lotes cuando la capacidad de producción es reducida y/o el rango de producto es amplio, lo que conduce a cambios frecuentes de campaña. La polimerización continua se utiliza para la producción a gran escala de un reducido número de clases de polímeros.

Los reactores por lotes suelen ser de tipo STR (reactor de mezcla agitada), equipados para recuperar calor (bobinas internas, envoltura y condensadores de reflujo) según las necesidades de proceso; la agitación se optimiza en función de las necesidades de proceso. Los reactores continuos se diseñan sobre la base de los requisitos de proceso y pueden ser de clases muy distintas. En función de los elementos de polimerización, los procesos pueden clasificarse como sigue:

- Polimerización en solución: Aplicada a monómeros y polímeros solubles en disolventes orgánicos o en agua; se utiliza para fabricar PEAD, PELBD, varios polímeros acrílicos para los mercados de revestimiento y adhesivos, las polimerizaciones por crecimiento en etapas, etc.
- Polimerización en suspensión: Aplicada a monómeros y polímeros insolubles y a iniciadores o catalizadores; empleada para fabricar PVC y EPS. El monómero se suspende en el disolvente en pequeñas gotas (gracias a la

<sup>36</sup> Medida de la rigidez de un material dado. Definida como el coeficiente, para las cadenas pequeñas, de la velocidad de cambio en la tensión dentro de la cadena

<sup>37</sup> Una medida de la ductilidad de los materiales, es la cantidad de cadena que puede alargarse antes de la rotura durante los ensayos de tracción.

agitación y a la adición de un coloide), mientras que el iniciador o catalizador se disuelve en el monómero.

- Polimerización en emulsión: los monómeros no solubles o apenas solubles en agua se emulsifican con jabón y otros surfactantes en gotículas y se disuelven parcialmente en micelas con el exceso de jabón. Un iniciador hidrosoluble comienza el proceso de polimerización en las micelas, que crecen como partículas de polímero. Los monómeros y otros reactivos, así como radicales nuevos, se suministran a las partículas de polímero mediante la difusión a través del agua. El producto final del reactor es una dispersión estable de polímero en agua (látex). La polimerización en emulsión inversa (agua en aceite) se utiliza para los monómeros hidrosolubles. Los productos que suelen obtenerse mediante la polimerización en emulsión son ABS, PVC en emulsión, acetato de polivinilo y látex acrílicos.
- Polimerización en masa: el monómero se polimeriza directamente después de la adición de un iniciador o catalizador por efecto del calor o la luz. Los productos que suelen obtenerse mediante la polimerización en masa son PEBD, GPPS y HIPS, iPP, placas de PMMA, nylons y PET.
- Polimerización por suspensión: el polímero no es soluble en el elemento de reacción, normalmente debido a sus propiedades cristalinas. El polímero se precipita a partir de la solución de monómero en disolvente o en el propio monómero y se mantiene en suspensión por agitación o turbulencia de flujo. La recuperación de polímeros se lleva a cabo por decantación (decantador o centrifugadora de decantación). La solución de monómero activo puede volver a circular directamente hasta el reactor. Tanto la polimerización por lote como la continua son factibles. Los productos que suelen obtenerse a partir de la

polimerización por suspensión son las poliolefinas (PEAD, iPP).

- Polimerización en fase gaseosa: la polimerización en fase gaseosa se opera en un reactor de lecho fluidizado donde se añade el catalizador en forma de polvo fino, llevándose a cabo la polimerización en partículas de polímero de tamaño creciente fluidizadas en el flujo ascendente del monómero. Los reactores agitados también se utilizan para este fin. Los productos que suelen obtenerse a partir de la polimerización en fase gaseosa son las poliolefinas (PEAD, iPP).

### *Recuperación de polímeros*

Después de la polimerización, los catalizadores o iniciadores deben destruirse y los polímeros se separan de los monómeros residuales y del elemento de polimerización. Estas operaciones se integran a menudo con las operaciones de acabado. La evaporación instantánea, el agotamiento con vapor y el agotamiento con nitrógeno húmedo son las operaciones unitarias más habituales para recuperar los monómeros sin reaccionar y los disolventes.

### *Acabado*

El acabado de los polímeros puede incluir la adición de aditivos, el secado, la extrusión, la peletización y el envasado. Los aditivos de producto más habituales son antioxidantes, absorbedores de rayos UVA, aceites de extensión, lubricantes y varias clases de estabilizantes y pigmentos.

Los polímeros suelen producirse para la venta en forma de polvo (por ejemplo PVC), gránulos ([por ejemplo PEAD, EPS), pelets (por ejemplo poliolefinas, poliestireno, PET, poliamidas, PMMA), en placas (por ejemplo PMMA) o en emulsiones o soluciones líquidas.

## Procesos y productos específicos

### Termoplásticos

#### Polietileno

Se producen tres clases principales de polietileno: PEBD, PEAD y PELBD.

El polietileno de baja densidad (PEBD) se produce en un proceso continuo a alta presión: el etileno se comprime hasta 3.000 bar (reactor tubular) o 2.000 bar (reactor de tanque) y se suministra al reactor, donde el oxígeno o el peróxido orgánico se inyectan para iniciar la polimerización radical a 140 – 180 °C. La temperatura de reacción es elevada, alcanzando un máximo de más de 300 °C. La mezcla de etileno – polímero se descarga de forma continua en un separador a alta presión (250 bar), donde el polímero se precipita y la mayor parte del etileno sin reaccionar se recupera, vuelve a comprimirse y se recicla en el reactor. El polímero se suministra entonces en un separador a baja presión donde se lleva a término la desgasificación. El polietileno fundido se acaba a continuación mediante la extrusión y la peletización.

El polietileno de alta densidad (PEAD) y el polietileno lineal de baja densidad (PELBD, copolímeros lineales con 1-buteno, 1-hexeno o 1-octileno) se producen con un catalizador Ziegler-Natta o, en los últimos tiempos, por medio de la catálisis de metaloceno, utilizando en su mayoría los mismos procesos y en muchos casos las mismas plantas. Los procesos empleados incluyen:

- Polimerización en fase gaseosa: Se utilizan grandes reactores de lecho fluidizado (> 500 m<sup>3</sup>) que se operan a presiones relativamente altas (20 – 30 bar), reciclándose el etileno en un refrigerador de gas para extraer el calor de la polimerización. Pueden emplearse uno o dos reactores en serie.

- Proceso en suspensión: los PEAD pueden producirse en reactores continuos de lecho suspendido (suspensión), uno o más reactores en serie, en ciertos casos (BORSTAR) acoplados a reactores en fase gaseosa, empleando como diluyente isobutano en reactores tubulares de circuito cerrado y hexano o heptano en reactores CSTR.
- Proceso en solución: En el reactor de solución, el polímero se disuelve en un sistema de disolvente/comonómero. Por lo general, el contenido en polímeros en un reactor de solución se controla entre el 10 y el 30 wt-%. La presión del reactor se ajusta entre 30 y 200 bar, mientras que la temperatura del reactor suele mantenerse entre los 150 y 250 °C. Como disolvente suele emplearse un hidrocarburo en el rango de C6 a C9
- Proceso por alta presión: los PELBD, VPEBD y UPEBD derivados de la copolimerización de buteno-1 pueden producirse industrialmente con catalizadores Z-N mediante el proceso a alta presión en reactores tanto tubulares como de tanque.

#### Polipropileno

Se aplican dos tipos de procesos en la producción de propileno:

El proceso en fase gaseosa a 70 – 90°C, 20 – 40 bar. Se utilizan reactores de lecho fluidizado y reactores de tanque agitado, tanto verticales como horizontales.

- El proceso en suspensión en monómeros líquidos a 60 – 80°C, 20 – 50 bar, también conocido como proceso en “masa” o en fase “líquida”. Se utiliza un reactor tubular de circuito cerrado.

Se emplean uno o más reactores en serie para producir una amplia gama de polímeros, incluido el polipropileno isotáctico

(iPP)<sup>38</sup>, endurecido que contiene copolímeros con etileno. Pueden combinarse dos tipos de reactores para aumentar la optimización del proceso (por ejemplo el proceso Spheripol®).

### **Cloruro de polivinilo (PVC)**

El cloruro de polivinilo (PVC) se obtiene mediante la polimerización del monómero de cloruro de vinilo (MVC). Se emplean tres procesos distintos para fabricar PVC:

- El proceso en suspensión
- El proceso en emulsión
- El proceso en masa

El cloruro de vinilo en suspensión (S-PVC) se produce en un proceso discontinuo en un STR. El monómero se dispersa en agua desmineralizada mediante la combinación del agitado mecánico, coloides y tensioactivos. La polimerización tiene lugar en las gotículas de MVC bajo la influencia de iniciadores solubles de MVC. El PVC en suspensión se desgasifica a continuación para eliminar la masa de MVC sin convertir y se suministra a una torre de agotamiento por vapor, extrayéndose las trazas de MVC sin convertir. El producto se envía a continuación a un sistema centrifugador/aclarado para eliminar las impurezas y para deshidratarlo, acabando por fin en un secador. El polímero seco puede cribarse y triturarse cuando sea necesario. El último paso consiste en el envasado o almacenamiento en silos para su transporte a granel.

En los procesos de emulsión se produce látex de PVC. El E-PVC se fabrica en tres procesos de polimerización: emulsión por lotes, emulsión continua y microsuspensión. El MVC se dispersa empleando un emulsificador, normalmente un alquil de sodio o aril sulfonato o un alquil de sulfato. La polimerización

tiene lugar en la interfaz de agua de MVC empleando iniciadores, como por ejemplo un peroxidisulfato de metal alcali. Los MVC residuales se extraen mediante el agotamiento del látex. El látex suele secarse en un secador por pulverización y los gases de escape resultantes son cruciales para las emisiones de MVC a la atmósfera.

### **Poliestireno**

Se producen tres clases distintas de polietileno: un polímero transparente y quebradizo llamado poliestireno de uso general (GPPS), un poliestireno de caucho modificado blanco, opaco a la vez que relativamente duro, llamado poliestireno de alto impacto (HIPS) y el poliestireno expandido (EPS).

Los poliestirenos GPPS y HIPS se producen por polimerización continua en masa, donde el monómero se polimeriza mediante la polimerización radical, iniciada por calor, con o sin un peróxido orgánico. La principal diferencia es que durante la fabricación de HIPS, se añade polibutadieno de alto-cis o medio cis disuelto en estireno para aumentar la dureza del polímero.

El proceso puede incluir la adición de un disolvente, iniciador (opcional) y agentes de transferencia de cadena en los reactores en condiciones bien definidas. El propio estireno sirve de disolvente de reacción, pudiendo añadirse benceno de etilo de hasta el 10 % para garantizar un mayor control de la reacción.

Para eliminar los monómeros sin convertir y los disolventes, el producto en crudo se calienta a alrededor de 220 - 260 °C y se conducen por un alto vacío. Esta operación se denomina desgasificación. La inyección de agua (agotamiento con vapor) puede añadirse para mejorar la extracción del monómero. El estireno y el benceno de etilo sin reaccionar se condensan y reciclan en la línea de suministro. El polímero fundido se

<sup>38</sup> Los polímeros isotácticos son aquellos polímeros por monómeros ramificados que tienen como característica tener todos los grupos en el mismo lado de la cadena polimérica.

peletiza a continuación (en seco o sumergido en agua).y se seca antes de almacenarse y envasarse.

Las perlas de poliestireno expandido se producen mediante la polimerización en suspensión de estireno iniciada por peróxidos orgánicos con la adición de pentano como agente soplante. Las perlas se separan por centrifugación, se lavan y luego se secan para su envasado.

### **Acrilatos**

Los polímeros acrílicos son una clase amplia de polímeros producidos mediante la polimerización radical de monómeros acrílicos (ácido acrílico y sus derivados) y su copolimerización con otros monómeros de vinilo (por ejemplo acetato de vinilo o estireno). Los principales monómeros acrílicos son el propio ácido acrílico, acrilamida y una amplia gama de ésteres acrílicos, desde el acrilato de metilo hasta los ésteres etílicos grasos. Los monómeros hidrosolubles, como por ejemplo el ácido acrílico y el acrilamida, suelen polimerizarse mediante la polimerización en solución de agua o en emulsión inversa. Los polímeros y copolímeros de ésteres acrílicos se producen en emulsión o solución, dependiendo de su uso final.

La polimerización en emulsión es la tecnología más difundida. Los disolventes empleados en la polimerización en solución son alcoholes, ésteres, hidrocarburos clorados, aromáticos, dependiendo de las propiedades de solubilidad del polímero. Los iniciadores son peróxidos orgánicos o inorgánicos. La polimerización suele realizarse por lotes, en reactores de tanque agitado, equipados con sistemas de recuperación de calor con vapor/agua.

### **Tereftalato de polietileno (PET)**

El PET se produce mediante la policondensación de ácido tereftálico o su éster de dimetilo (tereftalato de dimetilo, DMT) con etilenglicol (EG). La reacción se lleva a cabo en dos fases,

en la primera se obtiene un conduce a un prepolímero de peso molecular relativamente bajo (polímero bruto), en la segunda se obtiene el polímero final de elevado peso molecular. El proceso de DMT se ha sustituido en gran medida por el de ácido tereftálico (TPA) como método industrial de preferencia para la producción de poliéster.

La polimerización en fase sólida puede operarse en flujo continuo, con reactores de distintos diseños, y nitrógeno caliente para la recuperación de calor y la extracción de producto de reacción volátil, o por lotes en un mezclador/secador de sólidos en vacío.

### **Poliámidas (alifáticas)**

Las poliámidas tienen una estructura macromolecular con el grupo de amidas (-NH-CO-) como unidad funcional recurrente que aporta propiedades químicas específicas a los productos finales. Las poliámidas lineales, generalmente conocidas como 'Nylons', a partir de la marca registrada original DuPont, son la categoría más frecuente de la familia. La familia de las poliámidas es amplia, oscilando el número de átomos de carbono en los monómeros entre 4 y 12.

Por ejemplo, el monómero de poliámida 6 es  $\epsilon$ -caprolactam, y se polimeriza mediante la polimerización de crecimiento en etapas. La principal materia prima en la producción de poliámida 66 es una solución acuosa de sal orgánica (llamada sal AH, sal 66 o sal de nylon) obtenida a partir de la reacción de la 1,6-diamina de hexametileno y el 1,6-ácido hexamo dicarboxílico (ácido adípico).

Las poliámidas pueden producirse mediante la polimerización por lotes o continua. Después de la polimerización, el polímero fundido se extrude y se corta, generando escamas. Una fase de extracción con agua caliente elimina los oligómeros y monómeros residuales, seguida de una fase de secado. Se

requiere entonces una fase de procesamiento de los residuos extraídos para reutilizar oligómeros y monómeros.

### *Plásticos termoestables*

Los procesos de fabricación de polímeros termoendurecibles incluyen la reticulación química de su estructura molecular, obteniéndose un material que no se funde sino que se descompone al calentarse. La sustancia reactiva intermedia sólida o líquida se transforma en producto final en el emplazamiento del cliente mediante su curación con endurecedores o catalizadores.

### **Resinas fenólicas**

Las resinas fenólicas son una familia de polímeros y oligómeros derivadas de los productos de reacción de los fenoles al formaldehído. Otras materias primas son las aminas (hexametilenotetramina [HEXA]). Las resinas fenólicas pueden dividirse en:

- Novolacas (polímeros sólidos obtenidos mediante catalizadores ácidos)
- Novolacas de alto orto (polímeros de tratamiento rápido obtenidos mediante catalizadores neutros)
- Resoles (elevado coeficiente molar de formaldehído a fenol, líquidos o sólidos, obtenidos mediante catálisis alcalina).

Las resinas fenólicas se producen en procesos por lotes en reactores STR.

### **Poliésteres insaturados**

El poliéster insaturado (UPE) es el nombre genérico de una variedad de productos termoestables, elaborados principalmente mediante la policondensación de un anhídrido o un diácido (por ejemplo, anhídrido maleico, ácido fumárico, anhídrido ftálico, ácido ortoftálico, ácido isoftálico y ácido

tereftálico) con un diol (por ejemplo, glicol de etileno, glicol de dietileno, glicol de propileno, butanodiol, hexanodiol, glicol de dipropileno, glicol de neopentilo y dicitlopentadieno). Estos productos de condensación se disuelven en un monómero reactivo, normalmente estireno, aunque también pueden emplearse el metacrilato de metilo, acetato de t-butilo o ftalato de diadilo. Una vez el cliente haya curado esta mezcla, se forma una red tridimensional. En el proceso de fabricación se utilizan varios endurecedores, aceleradores, inhibidores, aditivos y cargas.

El núcleo de una planta de resinas consiste normalmente en un número de reactores por lotes, dotados de tanques de almacenamiento, dosificación y mezclado de materias primas para el acabado de productos y equipados con sistemas de recuperación de calor y columnas de destilación, nitrógeno y vacío.

### **Resinas alquídicas**

Los recubrimientos alquídicos son una clase de recubrimiento de poliéster obtenidos a partir de la reacción de un alcohol y un ácido o anhídrido ácido, siendo la resina o "aglutinante" predominante en la mayoría de los recubrimientos "oleosos". Los recubrimientos alquídicos suelen fabricarse a partir de anhídridos ácidos (por ejemplo, anhídrido ftálico o anhídrido maleico) y polioles (por ejemplo, glicerina o pentaeritritol). Se modifican con ácidos grasos insaturados (procedentes de aceites de planta y vegetales) para proporcionarles propiedades de secado al aire. La velocidad de secado de los recubrimientos depende de la cantidad y el tipo de aceite de secado empleado y del uso de sales metálicas orgánicas o "secadores" que catalizan la reticulación. En función de su contenido en aceite de secado, las resinas alquídicas pueden ser de "aceite largo", "aceite medio" o "aceite corto".

Los recubrimientos alquídicos se producen mediante dos procesos: el proceso de ácidos grasos y la alcoholísis o el proceso de glicérido. En ambos casos, el producto resultante es una resina de poliéster a la que se adhieren grupos de aceite de secado. Al término de ambos procesos, la resina se purifica y se diluye en disolvente.

### **Poliuretanos**

La industria petroquímica produce las principales materias primas de poliuretano (PU); la polimerización está integrada en el proceso de fabricación de los artículos finales. Las empresas dedicadas al mezclado y la preparación de compuestos, llamadas “empresas de sistemas”, preparan y venden sistemas a medida para los usuarios finales.

La principal reacción para producir poliuretano se da entre un diisocianato (ya sea aromático o alifático) y un polioliol (por ejemplo, glicol de polietileno o polioliol de poliéster) en presencia de catalizadores, pigmentos, cargas y materiales para controlar la estructura celular, y agentes espumantes y tensioactivos en el caso de las espumas.