



## Guías Tecnológicas

**Directiva 96/61 relativa a la prevención  
y control integrados de la contaminación**

# Epígrafe 2.5

## Metalurgia del aluminio



**Fundación Entorno**  
Empresa y Medio Ambiente

Ministerio de Industria  
y Energía





## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Objeto del documento

La presente Guía resume el estudio de prospección tecnológica del sector de la metalurgia del aluminio con objeto de recoger los aspectos más relevantes del Informe Tecnológico de manera que las personas interesadas puedan disponer de un documento de consulta más manejable.

En caso de estar interesado en consultar el documento completo puede solicitarlo dirigiéndose por escrito a:

Fundación Entorno, Empresa y Medio Ambiente  
C/Padilla 17, ático. 28006 - Madrid  
Telf. 91-575 63 94; Fax. 91-575 77 13  
e-mail: administrador@fundacion-entorno.org

### 1.2 Metodología de trabajo

En colaboración con las diferentes asociaciones empresariales y demás entidades con competencias en cada sector, se diseñó la siguiente metodología de trabajo para la elaboración de estos estudios:

**Fase I: Informe Preliminar.** Se realizó un primer informe con el objetivo de definir el ámbito de estudio e identificar las actividades incluidas en cada epígrafe. Ello permitió llevar a cabo para cada sector, un informe previo sobre la situación tecnológico-ambiental que serviría de base para el trabajo a realizar directamente con las empresas en una fase posterior. Estos documentos quedaron recogidos en un CD-Rom y fueron distribuidos a las partes interesadas.

**Fase II: Mesas de trabajo.** Con objeto de poder contar con la opinión directa de las empresas, se convocaron distintas reuniones sectoriales de trabajo con el objetivo principal de discutir el contenido del Informe elaborado en la fase anterior. Además, en estas sesiones pudimos proporcionar a las empresas información sobre el desarrollo de los trabajos realizados para la definición de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD's) del sector.

**Fase III: Trabajo de campo.** Las jornadas de trabajo y el compromiso adquirido por las organizaciones empresariales, nos ayudaron a contactar con empresas representativas de cada sector para la realización de visitas en las que, con la ayuda de un cuestionario, se recopilaron una serie de datos que pudieron ser comprobados in situ por nuestros asesores. La amplitud y relevancia del estudio requirió que la muestra de empresas a visitar pudiera ser extrapolable a la globalidad del sector, por lo que se diseñaron los siguientes criterios de selección:

	EPÍGRAFE 2.5.a (1)		EPÍGRAFE 2.5.b (2)
Nº CENTROS	M.Primaria	M.Secundaria	
VISITADOS	1	5	-
AFFECTADOS	3	7	9

(1)2.5.a Instalaciones para la producción de metales en bruto no ferrosos a partir de minerales,concentrados o materias primas secundarias mediante procedimientos metalúrgicos,químicos o electrolíticos.

(2) 2.5.b Instalaciones para la fusión de metales no ferrosos,inclusive la aleación,incluidos los productos de recuperación (refinado,moldeado en fundición) con una capacidad de fusión de más de 4 T/día para el plomo y el cadmio y 20 T/día para todos los demás metales.

**Fase IV: Informes Tecnológicos.** La información recopilada en las fases anteriores fue analizada y evaluada para la confección del Informe Tecnológico objeto del programa. Para que este documento constituyera una potente herramienta en las negociaciones para la determinación de las MTD's, los informes se diseñaron siguiendo un esquema similar a los documentos de referencia que se elaborarán en el Institute for Prospective Technological Studies (JRC-IPTS). Estos documentos están a disposición del público en formato CD-Rom.

**Fase V: Difusión.** Uno de los objetivos que dan sentido a este proyecto es contar con la opinión directa de los industriales, ya que son pocas las veces en que la negociación precede a la norma. Por ello, además de la edición y distribución gratuita tanto de los Informes Preliminares como de los Finales, se ha participado en diferentes foros profesionales para difundir los resultados del estudio.

**Fase VI: Guías Tecnológicas.** Para que las partes interesadas puedan disponer de una información más manejable y de documentos de discusión para los distintos foros, se han confeccionado las Guías Tecnológicas que resumen los aspectos más significativos del estudio.

### 1.3 Estructura de la Guía

1. **Introducción.** Presentación, objetivos, metodología, estructura del documento.
2. **La Industria del sector en España.** Visión general del estado de la industria en España, actividades e instalaciones afectadas por la Directiva.
3. **Descripción general del proceso productivo.** Diagrama de flujo y descripción de los problemas medioambientales.
4. **Características especiales del proceso productivo.** Descripción detallada de las etapas críticas desde el punto de vista medioambiental.
5. **Criterios de selección de las MTD's.** Aspectos a tener en cuenta para la selección de las MTD's, tomando como referencia la capacidad productiva marcada y los anexos III y IV de la Directiva.
6. **Técnicas disponibles.** Resumen de las técnicas productivas con relevancia a la hora de definir las MTD's y evaluación general de las mismas.
7. **Técnicas disponibles para el control de emisiones.** Resumen de las técnicas correctivas y evaluación general de las mismas.
8. **Mejores Técnicas Disponibles.** Resumen de la información agrupando las diferentes técnicas estudiadas.
9. **Técnicas emergentes.** Resumen de las técnicas en desarrollo para un nivel de control de la contaminación igual o superior al actualmente en uso.
10. **Conclusiones y recomendaciones.** Consecuencias de la aplicación de las MTD's en cada una de las actividades y recomendaciones para facilitar el cambio tecnológico.

### 1.4 Entidades participantes

Las entidades que han colaborado en la realización de este estudio han sido la Confederación Española de Organizaciones Empresariales del Metal (CONFEMETAL), la Asociación Española de Refinadores de Aluminio (ASERAL) y empresas del sector.



## 2. LA INDUSTRIA DE LA METALURGIA DEL ALUMINIO EN ESPAÑA

### 2.1 Panorama general del sector

Este sector no siguió la tendencia expansiva iniciada en el año 95. En 1996 la demanda mundial de aluminio primario creció por debajo (0,3%) del incremento obtenido en el año 1995. La producción, sin embargo, experimentó un aumento significativo (6%) frente al año anterior.

En el ámbito internacional, dos factores han ejercido una influencia decisiva sobre el crecimiento de la producción. Por una parte, la finalización de la vigencia del acuerdo intergubernamental de reducción voluntaria de capacidades de producción, conocido como "Memorandum of understanding" (MOU) adoptado en 1994; y por otra, el inicio de una cierta tendencia expansionista en cuanto a la creación de nuevas capacidades de producción.

	Producción de aluminio 1992-1996 (Toneladas)				
	1992	1993	1994	1995	1996
Primera fusión	359.021	364.256	338.106	361.882	361.828
Segunda fusión	95.500	99.700	103.508	106.975	153.837

Fuente: Informe sobre la Industria Española 1997. MINER.

#### Aluminio electrolítico

La producción de aluminio electrolítico durante 1996 se mantuvo prácticamente estable frente al año anterior, reflejando la consolidación de la situación de normalidad iniciada durante el año 1995 con la mitigación de los efectos del acuerdo de reducción de capacidades. La demanda interna experimentó una evolución a la baja alcanzando las 425.040 T, y la producción de alúmina en 1996 experimentó un crecimiento del 0,5% respecto al año anterior.

#### Transformados de aluminio

La producción de transformados de aluminio se situó en 370.000 T. En cuanto a la demanda de estos productos, experimentó una evolución muy débil compensada por una ligera aceleración a finales de 1996. Al final de año se produjo una leve recuperación del consumo, que determinó la reducción de existencias.

#### Aluminio de segunda fusión

La evolución del aluminio de segunda fusión, en el periodo considerado, ha experimentado las mismas vicisitudes (debilidad de la demanda y caída de los precios) que el de primera fusión. La ralentización del crecimiento económico durante 1996, agravó los dos problemas con los que viene enfrentándose el sector español en los últimos años: el exceso de capacidad de producción frente al consumo, y las dificultades en el abastecimiento de la materia prima (chatarras de aluminio).

## 2.2 Actividades e instalaciones afectadas por la Directiva 96/61

Bajo la definición del epígrafe 2.5.a están afectadas las actividades de metalurgia primaria entendida como la producción de aluminio a partir de minerales o concentrados de minerales, y la metalurgia secundaria consistente en la producción de aluminio a partir de materias primas secundarias como chatarras o residuos de otros procesos metalúrgicos.

Por otro lado, la definición del epígrafe 2.5.b hace referencia al sector de transformación del aluminio, estando afectados por este epígrafe los semitransformadores cuya capacidad de fusión sea superior a 20 T/día.

En términos del CNAE-93, este sector agrupa las siguientes categorías:

- 2742: Producción y primera transformación del aluminio.
- 2753: Fundición de metales ligeros.
- 2840: Forja, estampación y embutición de metales, metalurgia de polvos.

El número total de centros productivos afectados es 18, de los cuales la mitad corresponden al epígrafe 2.5.a y el resto al 2.5.b. Las Comunidades Autónomas que concentran un mayor número de centros afectados por la Directiva son Cataluña y el Principado de Asturias.

### Epígrafe 2.5.a

Con respecto al epígrafe 2.5.a, hay que distinguir entre la producción de aluminio primario y secundario. En el primer caso, el mercado español está monopolizado por un gran grupo empresarial, cuyos centros productivos se encuentran en San Ciprián (Lugo), La Coruña y Avilés (Principado de Asturias).

Destacar que San Ciprián es la única instalación en España de producción de aluminio a partir de bauxita, con una producción de 1.100.000 T/año. Esta planta abastece a las instalaciones de Avilés y La Coruña donde se produce por elektólisis aluminio primario.

En el caso de la producción secundaria de aluminio, existen 6 centros productivos afectados distribuidos en las siguientes Comunidades Autónomas: Galicia, Cataluña, Principado de Asturias, Aragón, Castilla y León, Madrid y País Vasco.

### Epígrafe 2.5.b

Con respecto al epígrafe 2.5.b, existen nueve centros afectados dedicados a la transformación del aluminio mediante fusión. Estas instalaciones se encuentran distribuidas en las siguientes Comunidades Autónomas: Cataluña, Madrid, Navarra y el Principado de Asturias.

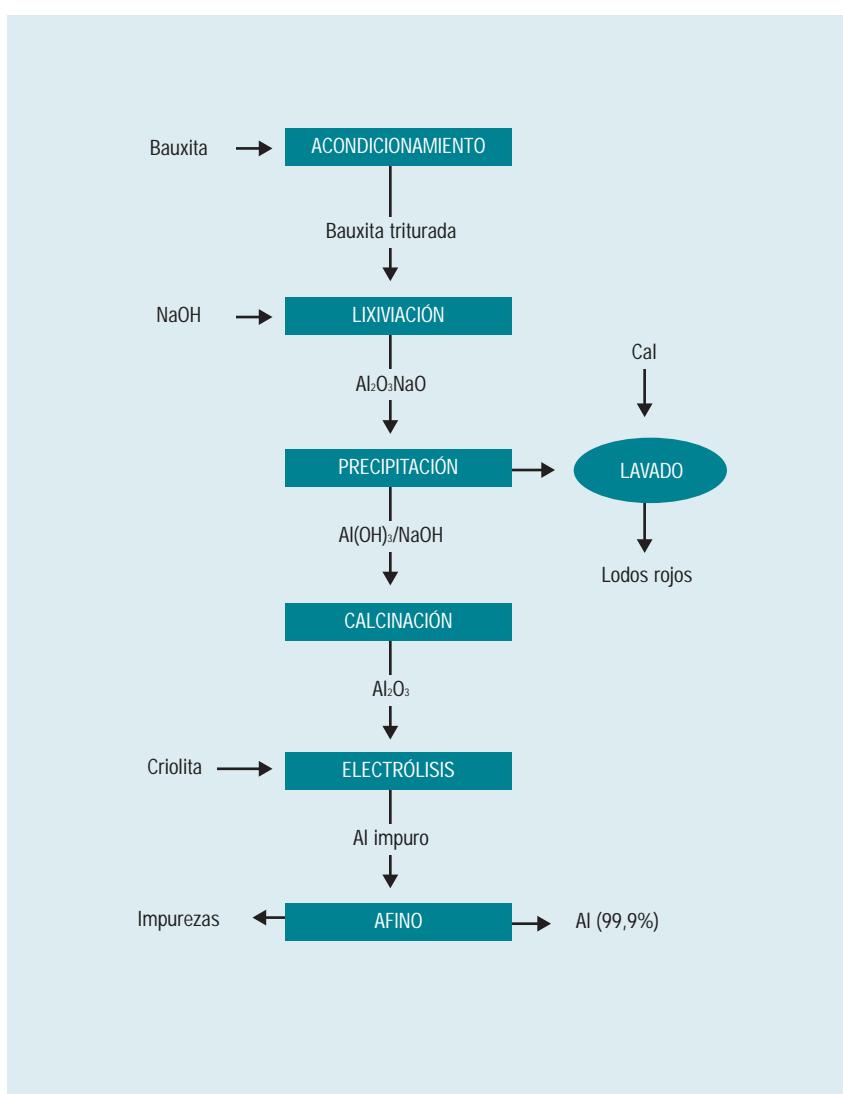
## ★ 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO PRODUCTIVO

### 3.1 Diagrama de proceso

#### Aluminio primario

El aluminio metálico se obtiene por reducción electrolítica de la alúmina pura en un baño de criolita fundida. El hidrato de alúmina se precipita del filtrado por adición de gas carbónico y, después de filtrar y lavar, el hidrato se calcina para convertirlo en alúmina.

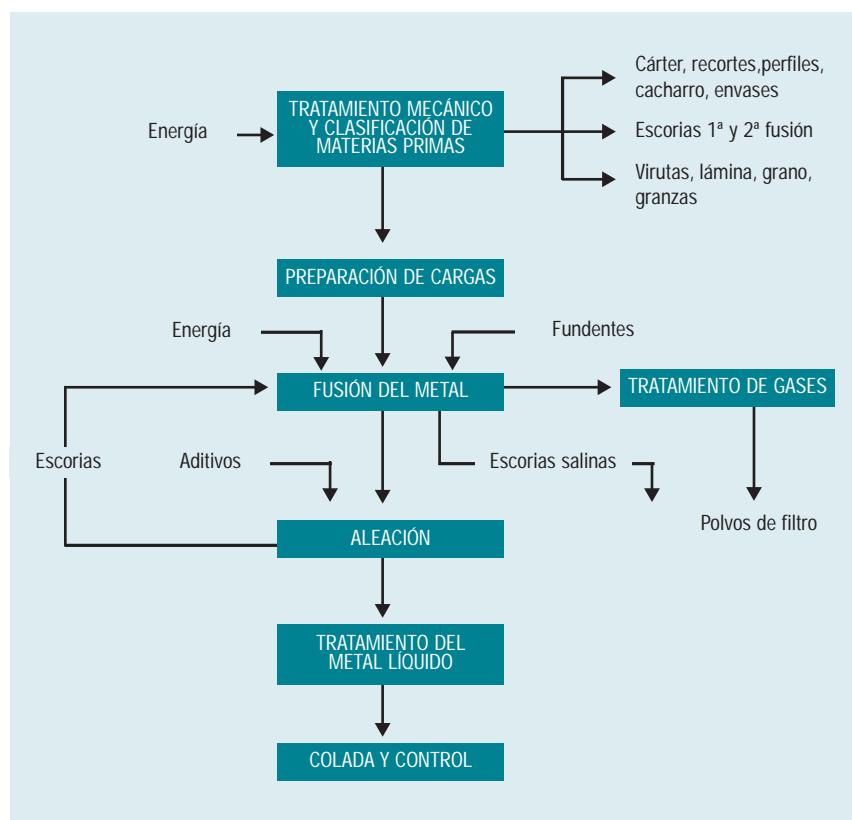
El esquema general de la producción de aluminio primario se resume en el siguiente diagrama de proceso:



### Aluminio secundario

Dentro de la producción secundaria de aluminio hay que destacar dos procesos diferenciados claramente por el tipo de horno empleado (rotativos y otros). La diferencia entre ambos radica en el empleo o no de sales fundentes para la fusión de las chatarras. Mediante el empleo de sales se obtiene un mayor grado de recuperación del aluminio, ya que éstas disminuyen el grado de oxidación del metal durante la fusión (las sales forman una capa fundida sobre el aluminio y ayudan a prevenir la oxidación), con el consecuente aumento de la producción de escorias salinas, principal problema medioambiental.

El esquema general de la producción de aluminio secundario se resume en el siguiente diagrama de proceso:



### 3.2 Problemática medioambiental

La producción de metales no férreos y en particular la de aluminio, es una fuente potencial de contaminación atmosférica. Los minerales, concentrados y otros materiales metalíferos contienen elementos que constituyen un riesgo para el medio ambiente debido a su naturaleza.

En este apartado se expone de forma esquemática para cada etapa de proceso, la problemática medioambiental, destacando en verde aquellas que hacen necesaria la implantación de MTD's.

#### Aluminio primario

ETAPA	PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL	AFECCIÓN
ACONDICIONAMIENTO DE LA BAUXITA	C. ATMOSFÉRICA	Polvo
	C.RESIDUOS	Contiene Si,Fe,Ti,Ca y óxidos
	C.RUIDO	Molesta
LIXIVIACIÓN	C.HÍDRICA	Sólidos en suspensión
	C.RESIDUOS	"Lodo rojo" (óxidos metálicos y silicato aluminoso)
PRECIPITACIÓN Y LAVADO	C.HÍDRICA	Aguas residuales básicas
	C.RESIDUOS	Lodos con compuestos metálicos
CALCINACIÓN	C. ATMOSFÉRICA	Gases de combustión,vapor de agua y partículas
	C.RESIDUOS	Escorias y filtros usados
ELECTRÓLISIS	C. ATMOSFÉRICA	Gases con fluoruros,CO <sub>x</sub> ,NO <sub>x</sub> ,HAP, ect.
	C.HÍDRICA	Aguas ácidas
	C.RESIDUOS	Ánodos de carbono,filtros y refractarios gastados
AFINO	C. ATMOSFÉRICA	Polvo y gases (cloruros)
	C.HÍDRICA	Aguas con Fe, Si,alúmina y carbones

#### Aluminio secundario

ETAPA	PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL	AFECCIÓN
TRATAMIENTO MECÁNICO Y SEPARACIÓN DE MATERIALES	C. ATMOSFÉRICA	Partículas y polvo
	C.RESIDUOS	Residuos pintura,caucho,plásticos y aceites
	C.RUIDO	Molesta
PREPARACIÓN DE CARGAS	C. ATMOSFÉRICA	Partículas
	C.RESIDUOS	Restos materias primas
	C.RUIDO	Molesta (dependiendo del método)
FUSIÓN	C. ATMOSFÉRICA	Gases de combustión (CO <sub>x</sub> ,NO <sub>x</sub> ) y partículas
	C.RESIDUOS	Escorias de aluminio y escorias salinas
ALEACIÓN	C.RESIDUOS	Escorias de aluminio



## 4. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL PROCESO PRODUCTIVO

### 4.1 Aluminio primario

En este apartado se recogen las características más relevantes de las etapas de proceso que han sido analizadas en el estudio con especial dedicación, dado su impacto medioambiental y para cuya reducción se recomienda la aplicación de una MTD.

#### Etapa: Acondicionamiento

CONSUMOS	CARACTERIZACIÓN	CANTIDAD	OBSERVACIONES
Materias primas	Bauxita	2 T/T de alúmina	-
Energía	E.Eléctrica	1% del total de proceso	En trituradoras, transportadores y pesada

EFFECTO M.A	ASPECTO M.A	CARACT.	CANTIDAD	TRATAMIENTO ACTUAL	OBSERVACIÓN
Residuos	Con contenido en metales	RP	N.D	Recuperación de materiales	Los materiales recuperados vuelven al proceso o almacenamiento
C.Atmosférica	Polvo y partículas	Naturaleza mineral	N.D	Tolvas cerradas y extracción de polvo	No se considera un problema relevante
Ruido	Trituradoras	Molesto	N.D	Aislamiento y protección acústica	Importante desde el punto de vista de la seguridad laboral

#### Etapa: Lixiviación

CONSUMOS	CARACTERIZACIÓN	CANTIDAD	OBSERVACIONES
Materias primas	Bauxita Triturada	46-60% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	El resto son impurezas metálicas
Materias secundarias	Sosa	33-160 Kg/T de alúmina	-
	Agua	1.000-6.000 Kg/T de alúmina (1)	
Energía	E.Eléctrica	Baja	Para obtener la temperatura de trabajo

(1) Total del proceso

EFFECTO M.A	ASPECTO M.A	CARACT.	CANTIDAD	TRATAMIENTO ACTUAL	OBSERVACIÓN
Residuos	Lodo rojo	RP	N.D	Gestor autorizado	Producto insoluble de la digestión alcalina compuesto por óxidos metálicos, silicato aluminoso y sosa (3-2 Kg NaOH/T de alúmina)
C.Hídrica	Aguas residuales	Sólidos en suspensión		Depuración	-

#### Etapa: Precipitación y lavado

CONSUMOS	CARACTERIZACIÓN	CANTIDAD	OBSERVACIONES
Materias primas	Solución de aluminato sódico	N.D.	-
Materias secundarias	Agua	1.000-6.000 Kg/T de alúmina (1)	-
	Cal	N.D.	
Energía	E.Eléctrica	21% del total de proceso	Referido a proceso Bayer

(1) Total del proceso

EFFECTO M.A	ASPECTO M.A	CARACT.	CANTIDAD	TRATAMIENTO ACTUAL	OBSERVACIÓN
Residuos	Lodos	RP	N.D	Gestor autorizado	Con componentes metálicos
C.Hídrica	Aguas residuales	Carácter básico	N.D	Depuración	-

### Etapa: Calcinación

CONSUMOS	CARACTERIZACIÓN	CANTIDAD	OBSERVACIONES
Materias primas	Compuesto rico en alúmina	N.D	El consumo depende del tipo de producto, pureza de la caliza y grado de calcinación
Energía	Combustibles fósiles	N.D	Se alcanzan temperaturas > 1.000 °C

EFFECTO M.A	ASPECTO M.A	CARACT.	CANTIDAD	TRATAMIENTO ACTUAL	OBSERVACIÓN
Residuos	Escorias y filtros usados	No peligroso	N.D	Control operacional para minimización de escorias	-
C.Atmosférica	Vapor de agua	-	N.D	Filtro de mangas	-
	SO <sub>2</sub>			Cambio de combustible y filtro de mangas	La producción depende del combustible utilizado
	CO		100-150 Kg/T de Al	Filtro de mangas	-
	Partículas		N.D	Ciclones y filtro de manga	Ciclones poco eficaces para partículas pequeñas
C.Térmica	Gases calientes	-	T°>1.000 °C	-	Efecto irrelevante

### Etapa: Electrólisis

CONSUMOS	CARACTERIZACIÓN	CANTIDAD	OBSERVACIONES
Materias primas	Alúmina	1.900-1.940 Kg/T de Al	-
Materias secundarias	Criolita (AlF <sub>3</sub> )	15-25 Kg/T de Al	En estado fundido a 1.000 °C
	Ánodos de carbono	400-440 Kg/T de Al	-
Energía	E.Electrónica	13-18 KWh/Kg de Al	Consumo el 68% del total de proceso

EFFECTO M.A	ASPECTO M.A	CARACT.	CANTIDAD	TRATAMIENTO ACTUAL	OBSERVACIÓN
Residuos	Ánodos de carbono y filtros gastados	RP	20-30 Kg/T de Al	Dependiendo de cada caso se destinan a reutilización o recuperación	-
	Refractarios	RI			
C.Atmosférica	Fluoruros		0,4-4 Kg/T de Al	Filtro de mangas	Afecta a la vegetación de forma directa y los herbívoros de forma indirecta
	SO <sub>2</sub>	-	8-30 Kg/T de Al		Debida a la presencia de azufre en los ánodos
	CO <sub>2</sub>	Contribuyen al efecto invernadero	1.400-1.700 Kg/T de Al		Se forma en la superficie del ánodo y por oxidación de las partes calientes del mismo en contacto con el aire
	CF <sub>4</sub> y C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>		>0,02-0,1 Kg/T de Al		
	HAP (1)	Constituyentes de los ánodos	N.D.		La cantidad depende del diseño del ánodo, la calidad de la pasta y de las prácticas operacionales
	Polvo	-	0,6-10 Kg/T de Al	Filtro de mangas Precipitaciones electroestáticas	-
C.Hídrica	Aquas residuales	Carácter ácido	N.D.	Depuración y reutilización	-

(1) HAP:Hidrocarburos aromáticos policíclicos

## 4.2.Aluminio secundario

En este caso, tan solo describiremos la etapa de fusión como relevante a la hora de definir las MTD's.

### Etapa: Fusión

CONSUMOS	CARACTERIZACIÓN	CANTIDAD	OBSERVACIONES
Materias primas	Chatarra,escorias y virutas de aluminio	18.000-50.000 T/año	-
Materias secundarias	Sales fundentes (NaCl,KCl y CaF <sub>2</sub> )	30% de la carga total	Solo utilizadas en hornos rotativos para un mayor grado de recuperación de aluminio
Energía	Combustible fósil	N.D.	Los consumos dependen del horno y del tamaño de carga

EFFECTO M.A	ASPECTO M.A	CARACT.	CANTIDAD	TRATAMIENTO ACTUAL	OBSERVACIÓN
Residuos	Escorias salinas	RP	>500 Kg/T de Al	Minimización y tratamiento físico-químico	-
	Escorias de aluminio		<10.000 T/año	Recuperación de Al	Serán tratadas cuando la fracción recuperable sea >4-6 %
	Finos de filtro de horno		>35 Kg/T Al	Depuración y reutilización en la industria del acero	Se almacenan y envasan en big-bags antes de su depuración
C.Atmosférica	Partículas	Procedentes de combustión	15-25 mg/Nm <sup>3</sup>	Enfriamiento y filtro de mangas	-
	COx		4 mg/Nm <sup>3</sup>		
	NOx		35-50 mg/Nm <sup>3</sup>		
	HCl		30-40 mg/Nm <sup>3</sup>		
	COVs		50-57 mg/Nm <sup>3</sup>		



## 5. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MTD'S

El primer criterio ha sido la limitación de la aplicación de la Directiva al sector de semitransformadores en cuanto al tamaño de las instalaciones afectadas, cuya capacidad en hornos debe ser superior a 20 T/día.

El segundo criterio, el cual está reflejado en el Anexo III de la Directiva, es una lista indicativa de las principales sustancias contaminantes en la producción de aluminio tanto primaria como secundaria, que se tomarán en cuenta obligatoriamente, y si es pertinente se fijarán valores límites de emisión. Son las siguientes:

1. Óxidos de azufre y otros compuestos de azufre.
2. Óxidos de nitrógeno y otros compuestos de nitrógeno.
3. Monóxido de carbono.
4. Compuestos orgánicos volátiles (COV's).
5. Metales y sus compuestos.
6. Polvos y partículas.
7. Flúor y sus compuestos.
8. Policlorodibenzodioxinas y Policlorodibenzofuranos.
9. Materias en suspensión vertidas al agua.
10. Metales y sus compuestos vertidos al agua.

Asimismo se han considerado algunos criterios recogidos en el Anexo IV de la Directiva, como:

- Uso de técnicas que minimicen la generación de residuos.
- Uso de sustancias menos peligrosas a las empleadas en la actualidad.
- Desarrollo de técnicas de recuperación y reciclado de sustancias generadas y utilizadas en el proceso y de los residuos cuando proceda.
- Procesos, instalaciones o métodos de funcionamiento comparables que hayan dado pruebas positivas a escala industrial.
- Avances técnicos y evolución de los conocimientos científicos.
- Carácter, efectos y volumen de las emisiones de que se trate.
- Fechas de entrada en funcionamiento de las instalaciones nuevas o existentes.
- Plazo que requiere la instauración de una mejor técnica disponible.
- Consumo y naturaleza de las materias primas (incluida el agua) utilizada en procedimientos de eficacia energética.
- Necesidad de prevenir o reducir al mínimo el impacto global de las emisiones y de los riesgos en el medio ambiente.
- Necesidad de prevenir cualquier riesgo de accidente o de reducir las consecuencias para el medio ambiente.
- Información publicada por la Comisión en virtud del apartado 2 del artículo 16 o por organizaciones internacionales.

Por último, se tendrá en cuenta el impacto sobre la economía sectorial y general del ámbito geográfico determinado que supone la implantación de una MTD.



## 6. TÉCNICAS DISPONIBLES

### 6.1 Aluminio primario

En este apartado se resumen de forma comparativa (en caso de existir más de una técnica) las diferentes técnicas productivas utilizadas para las etapas relevantes a la hora de definir las MTD's.

Como ya se ha dicho anteriormente, dentro de la industria del aluminio primario, el aluminio metálico se obtiene por reducción electrolítica de la alúmina pura en un baño de criolita fundida, siendo el proceso Bayer el más usual para refinar la bauxita y el único empleado en España.

#### **Etapa: Acondicionamiento, lixiviación, precipitación y calcinación.**

Aunque se han propuesto otros métodos, como el proceso Pedersen ( fusión de la bauxita, mena de hierro, cal y coque en un horno eléctrico para producir hierro y una escoria de aluminato de calcio), nos centraremos en el proceso Bayer (el único utilizado en España) que a continuación describimos:

- Acondicionamiento: secado y trituración de la bauxita cruda hasta un tamaño de 100 mallas.
- Lixiviación: disolución de la alúmina (aluminato sódico) de manera selectiva con NaOH (para no disolver el hierro). La carga se trata en autoclaves de acero durante un periodo que oscila entre 2-8 horas a una temperatura de 150-160°C y a presiones entre 3,5-4,90 Kg/cm<sup>2</sup>. Una vez completado el proceso, la solución de aluminato sódico resultante se separa de los lodos en suspensión. Se obtiene un residuo muy problemático denominado "lodo rojo", el cual lleva gran proporción de óxido de hierro.
- Precipitación: la solución de aluminato sódico es conducida a grandes tanques de precipitación, donde se añade como cebo trihidrato de aluminio que procede de operaciones anteriores y se deja enfriar lentamente. Para la precipitación de la alúmina ( $\text{Al(OH)}_3$ ), la disolución fértil se pasa primero a alta temperatura y se concentra a valores más bajos (65-40°C y 100-150 g/l de  $\text{Na}_2\text{O}$ ).
- Calcinación: la alúmina obtenida se pasa por espesadores y filtros y luego se procede a su calcinación en un horno, con el fin de extraer el agua libre y combinada. Es preciso efectuar la calcinación a temperatura bastante alta (>1.000°C), para obtener –alúmina no higroscópica.

#### **Etapa: Electrólisis**

La alúmina calcinada obtenida en el proceso Bayer, se reduce disolviéndola en criolita fundida a 1.000°C y, por electrólisis de esta disolución, se deposita aluminio metálico sin descomposición apreciable del electrolito. Este proceso es conocido como Hall-Héroult dentro del cual pueden incluirse las siguientes técnicas disponibles de acuerdo con la información publicada dentro del tratado Oslo-París (OSPARCOM):

- Celdas de ánodos precocidos, en las cuales los ánodos de carbono son reemplazados según se van consumiendo.
  - Side Worked Hooded Prebaked (SWPBh)
  - Centre Worked Prebake (CWPB)
- Celdas Soerdeberg, caracterizadas por la producción de ánodos en continuo, es decir, los ánodos son cocidos in situ.

### Etapa: Afino

Una vez obtenido el aluminio metálico se procede a la eliminación de las impurezas metálicas y no metálicas. Una de las técnicas utilizadas es el afino por medio de cloro, con un consumo del mismo de 30 kg por 1% de magnesio.

La dificultad para la eliminación de otros elementos metálicos, hace imprescindible el afino en un horno de mantenimiento donde se realizan las correcciones necesarias para conseguir la composición deseada.

Las impurezas no metálicas a eliminar más importantes son el hidrógeno y los óxidos. Los procesos de eliminación de éstos se basan en tres métodos: disminución de la presión, removido del baño y escorificación. A veces se emplea solo uno de los tres métodos o combinación de los tres. Es muy frecuente la utilización de fundentes adecuados para escorificar mediante agitación el baño.

## 6.2 Aluminio secundario

En este apartado se presenta una tabla resumen comparativa de las diferentes técnicas utilizadas para la etapa más relevante a la hora de determinar las MTD's.

### Etapa: Fusión

		TIPO DE HORNO		
ASUNTO A EVALUAR		ROTATIVO	DE REBERBERO	DE INDUCCIÓN
Consumo de materiales	Materias primas	Productos finos	Alto rango	Libres de hierro
	Fundentes	30%	-	-
Consumo de Energía	MJ/T de Al	4.000-12.000	3.300-8.000	2.000-8.000
Emisiones	A la atmósfera	Media-Baja	Alta	
Generación de residuos	Sólidos	Escorias salinas (>500 Kg/T Al)	Media	
Influencia en la calidad del producto final	Aluminio	Alta		Muy alta
Experiencias anteriores	Años de mercado	>10	>20	-
	Nº aplicaciones en España	5	3	-



## 7. TÉCNICAS DISPONIBLES PARA EL CONTROL DE EMISIONES

En este capítulo se presenta la evaluación técnico-económica de las técnicas disponibles para controlar y minimizar la contaminación generada por las empresas del sector metalúrgico del aluminio.

Las medidas primarias (consumo de materias primas, cambio de combustible, etc.) son siempre prioritarias a la hora de intentar minimizar la contaminación en la fuente, aunque, con su aplicación, no siempre se alcanzan los valores límites exigidos por la legislación actual.

Es este caso, la disminución en origen debe combinarse con técnicas secundarias correctivas, principalmente en las etapas de acondicionamiento, lixiviación, precipitación, calcinación, electrólisis y afino en la producción de aluminio primario y la etapa de fusión en la de aluminio secundario.

### Tipo de contaminación: emisiones gaseosas

TÉCNICA	ETAPA	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS (1)	COSTE		OBSERVACIONES
			INV.(MPt\$)	OPER.(Pt\$/t)	
Filtro de mangas	Calcinación, electrólisis, afino (2) Fusión (3)	Rendimiento: 99% Alto consumo energético (4) Límites alcanzables: -SO <sub>2</sub> : < 50 mg/m <sup>3</sup> -HF: 0,02-0,2 Kg/T de Al -Polvo: 1-5 mg/m <sup>3</sup> (5)	Bajos	Medio (6)	La más extendida pero es necesario un enfriamiento previo de los gases de entrada.
Precipitadores electroestáticos	Calcinación, electrólisis	Rendimiento: 95% Consumo E. Eléctrica Límites alcanzables: -SO <sub>2</sub> : < 50 mg/m <sup>3</sup> (7) -HF: 0,02-0,2 Kg/T de Al -Polvo: < 20 mg/m <sup>3</sup>	Alta (8)		Puede operar a altas temperaturas, con elevados volúmenes de gases y emisiones con partículas sólidas y líquidas.  Problema de erosión de los equipos.
Ciclones	Calcinación	Rendimiento: medio Consumo E. Eléctrica Límites alcanzables: -Polvo: < 20 mg/m <sup>3</sup>	Bajo		Poco eficaz para partículas de pequeño diámetro (2-3 μ).  Uso extendido como tratamiento previo a otras operaciones de depuración.
Lavadores húmedos	Fusión (3)	Rendimiento: alto Alto consumo energético Límites alcanzables: -SO <sub>2</sub> : < 5-40 mg/m <sup>3</sup> -HCl: < 5 mg/m <sup>3</sup>	N.D.		Para gases solubles.  Alto rendimiento para la eliminación de partículas.

(1) El HF y HCl se forman cuando el F<sub>2</sub> y Cl<sub>2</sub>, utilizados en la etapa de afino y electrólisis, entran en contacto con el aire.

(2) Para metalurgia primaria.

(3) Para metalurgia secundaria.

(4) Debido a las pérdidas de carga.

(5) La presencia de metales dependerá de la composición de las partículas.

(6) El cambio periódico de mangas incrementa de forma importante los costes de mantenimiento.

(7) También reduce el contenido de SO<sub>2</sub> del efluente gaseoso.

(8) Requiere continuas tareas de mantenimiento ya que deberá controlarse la corriente eléctrica para adecuarla a las necesidades de operación.

### Tipo de contaminación: Escorias salinas

La generación de escorias salinas es un problema de gran relevancia en la fusión secundaria. A continuación se proponen dos técnicas para su tratamiento viables siempre y cuando se hayan implantado previamente medidas para su minimización.

TÉCNICA	ETAPA	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	COSTE(1)		OBSERVACIONES
			INV.(MPt\$)	OPER.(Pt\$/t)	
Tratamiento físico-químico		Límites alcanzables: -Partículas: 15-40 mg/m <sup>3</sup>	Alto	N.D.	No existe unanimidad en el sector para considerarla viable
Trituración, molienda y tamizado	Fusión	-Amonio: 30-40 mg/m <sup>3</sup> -Fósforo: 0,1-0,5 mg/m <sup>3</sup>	90-110	N.D.	Recuperación de aluminio siempre que su contenido en dicho metal supere el 4-5% Consumo de energía: 300-800 mJ/T

(1) Para producción media



## 8. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

Es objeto del presente apartado definir para las etapas más relevantes del proceso de producción de aluminio, las mejores técnicas disponibles desde la óptica medioambiental.

### 8.1 Aluminio primario

#### Emisiones gaseosas

En las operaciones de almacén y acondicionamiento de materias primas, deben tenerse en cuenta una serie de buenas prácticas viables desde el punto de vista económico y técnico que minimizan considerablemente las emisiones de partículas y polvos:

- Almacenamientos en contenedores cerrados.
- Recepción de materias primas humedecidas y/o en vehículos cerrados.
- La maquinaria y equipos utilizados en el tratamiento de las materias primas (trituración, molienda clasificación...) deben de estar aislados y debidamente cerrados.
- Siempre que se pueda, y especialmente en los puntos de descarga o transferencia, debe contemplarse la instalación de sistemas de captación de polvo y partículas y posteriormente deben ser adecuadamente tratados.
- La manipulación debe realizarse en instalaciones con equipos de ventilación y desempolvado (puntos de recepción, transferencia, descarga de materiales, cargadoras de palas, bocas de elementos de carga, etc.).

Las emisiones gaseosas en las etapas de fusión y conversión deben disminuirse preferiblemente mediante medidas primaria y cuando éstas sean insuficientes recurrir al uso de técnicas de depuración, cuya elección dependerá de las características especiales de cada instalación y del tipo de contaminante (ver capítulo 7).

#### Efluentes líquidos

Como recomendaciones básicas a la hora de definir una técnica o proceso como posible MTD deben de tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Las aguas de refrigeración, siempre que no estén contaminadas, no deben tratarse con el resto de aguas residuales y procurar siempre su recirculación permitiendo sólo el consumo para reponer las perdidas por evaporación.
- En la mayoría de los casos las fugas son previsibles y por tanto evitables mediante el uso de técnicas adecuadas y la toma de medidas preventivas y un correcto mantenimiento. Deben considerarse las zonas de una planta con posibilidades de fugas en los diseños iniciales así como cuando se plantean modificaciones de las instalaciones, de forma que se contemplen sistemas de contención para mantener y controlar los vertidos en zonas inmediatas al foco.

Además, de estas medidas preventivas, existen técnicas viables desde el punto de vista económico, que contemplan los procedimientos electrolíticos para el tratamiento de los efluentes. Su eficacia es variable en función del proceso y por regla general, estas técnicas permiten una alta recuperación de los metales además de conseguir unos niveles aceptables en cuanto a la contaminación residual de los efluentes vertidos.

#### Residuos

Se debe de incentivar el desarrollo de técnicas y procesos que permitan en lo posible la disminución de la generación de residuos y procurar, siempre que sea posible, el reciclado en la propia planta.

## 8.2 Aluminio secundario

Dentro de la producción de aluminio secundario, la etapa más relevante desde el punto de vista medioambiental es la fusión, de la cual las mejores técnicas disponibles son las siguientes:

- Celdas equipadas con sistemas para la captación de gases.
- Alimentación en continuo en los distintos puntos situados a lo largo de la línea central de la celda junto con un buen control operacional.
- Depuración de los gases y recirculación de la alúmina a las celdas.
- Seguimiento de las emisiones mediante muestras frecuentes.

Por otro lado, en instalaciones con hornos rotativos y debido a la adición de fundentes, se obtiene un gran porcentaje de escorias salinas, siendo este un residuo peligroso, para cuyo tratamiento se dispone de dos técnicas:

- Trituración, machaqueo, molienda y tamizado.
- Procedimiento físico-químico.

La consideración o no como mejores técnicas disponibles por parte del sector, para solucionar el problema de las escorias salinas procedentes de la fusión en hornos rotativos, depende de otras consideraciones independientes a las puramente técnicas y económicas. Teniendo en cuenta esto, podría considerarse como MTD la primera de ellas que, aunque la solución es parcial, evidentemente supone una mejora y permite el reciclaje de parte del aluminio siempre y cuando el porcentaje de aluminio sea del orden del 4-5% o del 6% en función de las condiciones de mercado.

En cuanto al tratamiento físico-químico, si bien en la actualidad está aprobado, no puede considerarse como una MTD para todo tipo de plantas, ya que la inversión es muy elevada. Aunque implantada en algunos países, las instalaciones existentes no son numerosas y habría de evaluar en cada caso su viabilidad. De hecho, este tipo de tratamiento suele hacerse fuera de las plantas de producción.



## 9. TÉCNICAS EMERGENTES

Se recogen a continuación los procesos, técnicas, tecnologías y alternativas que bien por su poca implantación, bien por estar en fase piloto o a escala laboratorio, deben considerarse como técnicas emergentes dentro del sector de la metalurgia del aluminio.

### 9.1. Aluminio primario

#### Sustitución de procesos pirometalúrgicos por hidrometalúrgicos

No sólo hay que considerar las mejoras que sobre los procesos convencionales se introducen para incrementar su rendimiento y su grado de protección ambiental. Existe una tendencia al desarrollo de procesos alternativos, como por ejemplo, la aplicación en la etapa de fusión de procesos hidrometalúrgicos.

Las principales ventajas que ofrecen los procesos hidrometalúrgicos frente a los pirometalúrgicos, además de la prácticamente eliminación de los efluentes o emisiones gaseosas, es la alta pureza que puede llegar a obtenerse en los productos. Es cierto que se originan mayor cantidad de efluentes líquidos pero éstos pueden tener, según se diseñen los procesos una carga contaminante muy pequeña.

### 9.2. Aluminio secundario

#### Tratamiento de escorias salinas

En la mayoría de los casos, no siempre es posible evitar la generación en origen de los residuos. En los procesos metalúrgicos secundarios de aluminio se genera un volumen elevado de escorias y además con difícil solución en cuanto a su recuperación.

En este sentido, conviene recordar que en el capítulo 8 se han incluido como MTD, para este caso en concreto, dos posibilidades, pero que no evitan la generación de las mismas. La primera intenta, previa trituración y molienda, el aprovechamiento de parte del aluminio contenido en la escoria. La otra posibilidad supone un tratamiento más agresivo por medios físico-químicos a partir del cual puede obtenerse el aluminio contenido en la escoria.

En EE.UU., donde históricamente las escorias salinas se han llevado y se continúan llevando a vertedero de seguridad, existe la inquietud de desarrollar nuevas tecnologías que permitan recuperar la mayor parte posible.

El Laboratorio Argonne National junto al Dpto de Energía de EE.UU. y la asociación de recicladores de aluminio, ha estudiado y desarrollado en fase experimental cuatro procesos para el tratamiento de este residuo que posibilitarían obtener aluminio, sales y residuos de óxido de aluminio:

- Proceso base: disolución de la escoria con agua a 25°C y posterior evaporación con cristalización de las sales.
- Proceso a alta temperatura: disolución a 250°C con cristalización rápida de las sales.
- Proceso solvente/antisolvente: disolución en agua a 25°C, concentración por evaporación y reacción con acetona para precipitar las sales.
- Proceso por electrodialisis: Disolución en agua a 25°C y concentración por evaporación de las sales por electrodialisis.

De los estudios económicos realizados, en líneas generales estos procesos no resultan económicamente viables. Entre las diferentes posibilidades contempladas parece que el limitar el reciclaje a recuperar solamente el aluminio y llevar a depósito de seguridad las sales y óxidos contaminados no recuperables, es la más cercana al saldo positivo, siempre y cuando los contenidos en aluminio de las sales sean superiores al 4-5%.

Las razones por las que los procesos estudiados no son económicamente viables son:

- La alta inversión requerida: desde 1.500 a 2.500 MPts para plantas que fuesen capaces de reciclar 30.000 T/año con una operatividad del 90% (330 días, 24 h/d).
- El bajo precio de venta de las sales recicladas que además, en algunos casos, no pueden ser utilizadas al 100% sino que han de ser mezcladas con cloruros no reciclados.
- La dificultad de encontrar utilidad para los óxidos de aluminio debido, entre otras razones, a su contenido en cloruros, los cuales no se consiguen eliminar en su totalidad.
- Para que el aluminio recuperado de las escorias pudiera llegar a venderse en lugar de llevarse a depósito de seguridad, sería necesario que tuviese una uniformidad en su pureza.



## 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 10.1 Problemática medioambiental y carencias tecnológicas

Desde el punto de vista medioambiental, las instalaciones industriales productoras de aluminio tanto primario como secundario, se enfrentan a problemas de contaminación atmosférica, del agua y generación de residuos.

De manera resumida se establecen, según el medio potencialmente afectado, los aspectos medioambientales significativos y algunas soluciones que pueden emplearse con el objeto de disminuir el impacto.

#### Contaminación atmosférica

Durante las distintas operaciones se emiten a la atmósfera gases (productos de combustión: óxidos de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre), sustancias químicas y partículas de distinta índole.

Se pueden emplear distintas técnicas de eliminación de partículas y contaminantes gaseosos. Generalmente, para la eliminación de partículas se emplean dispositivos clasificados de acuerdo al fenómeno físico (fuerza centrífuga, fuerza electrostática) o técnica (lavado, filtración) en los que se basan. Entre los dispositivos basados en la fuerza centrífuga se encuentran los ciclones, en el caso de los dispositivos basados en la fuerza electroestática aparecen los electrofiltros. Como técnica de lavado y filtración está la filtración mediante filtros de mangas.

Otro método de control de contaminación atmosférica es la altura de la chimenea, que tiene una gran influencia en la dispersión de los contaminantes. La altura de una chimenea condiciona el valor máximo de la concentración de contaminantes en la atmósfera próxima a una planta metalúrgica.

#### Contaminación del agua

Como consecuencia de las distintas operaciones del proceso productivo, se generan aguas residuales que deben ser tratadas antes de su vertido, ya que tendrán que cumplir la legislación específica.

Los contaminantes que pueden aparecer en las aguas residuales de una planta metalúrgica son: aluminio, arsénico, cadmio, cobre, flúor, plomo, manganeso, mercurio, azufre en forma de sulfato o sulfito, zinc, nitrógeno amoniacial y DBO, entre otros.

Para la purificación de las aguas residuales generadas se llevan a cabo distintos tratamientos como:

- Separación de sólidos.
- Vertido, reciclado o reutilización del agua tratada.
- Deshidratación y gestión del lodo obtenido.

## Residuos

Los residuos producidos en las plantas metalúrgicas se generan en distintas operaciones del proceso. Durante el tratamiento térmico de minerales y concentrados, los gases de calcinación arrastran impurezas que deben eliminarse antes de utilizar dichos gases en cualquier tipo de producción secundaria, o antes de emitirlos a la atmósfera. En el tratamiento de las aguas residuales se generan lodos, que presentan metales pesados y una cierta acidez o basicidad dependiendo del tratamiento que se ha realizado.

Las alternativas para el tratamiento de residuos metalúrgicos dependen de si el residuo es o no reciclable. Si el lo es, la mejor alternativa es reciclarlo en el mismo lugar donde se ha generado, pero si desde el punto de vista económico y técnico no es viable debe ser enviado a una planta de reciclado.

Si el residuo no es reciclable, debe procurarse una minimización de su impacto ambiental, con depósito definitivo en el lugar de producción o en un lugar lo más próximo posible al mismo.

El sector del aluminio secundario (concretamente aquellos que emplean hornos rotativos) se enfrenta con el problema de la generación de escorias salinas. No existen soluciones definitivas al tema. Desde el punto de vista económico hay que subrayar que los costes de inversión son muy elevados y normalmente no pueden ser asumidos por la empresa.

## 10.2 Recomendaciones y actuaciones previstas

Se demanda la elaboración de una legislación sectorial que contemple las particularidades de las instalaciones del sector. Los objetivos que deberían cumplirse con esta demanda es la actualización de la legislación que le afecta, que sirva de referencia para todo el territorio nacional y, en su caso, contar con las especificaciones de la futura transposición de la Directiva IPPC.

Asimismo, se considera imprescindible la coordinación entre todas las autoridades ambientales en lo que a la tramitación, actualización y revisión de permisos se refiere, de tal forma que en lo posible se dependa de una única autoridad que sea la que diseñe un único procedimiento administrativo para tales fines.

También se demanda la existencia de procedimientos de control e inspección con una mínima homogeneidad de criterios, que sean de obligado cumplimiento y aplicación en todo el territorio nacional para evitar los posibles favoritismos entre unas y otras regiones, lo cual perjudicaría seriamente al sector desde el punto de vista competitivo.

Se hace necesario dotar al sector de una normativa para la realización de ensayos que permita la caracterización de los residuos y su posible clasificación, si procede, como peligrosos e incorporar límites alcanzables y no utópicos, con la técnica disponible actualmente.

Los trabajos a nivel europeo para la determinación de las MTD's están muy avanzados ya que comenzaron en el año 1998. Junto a la metalurgia no ferrea (Grupos de Trabajo Técnicos número 6 y 7), se están desarrollando los trabajos del epígrafe 6.8 relativo a la fabricación de carbón y electrografito.



Colaboran:

ASERAL

 CONFEMETAL

Ejecución Técnica: