

Distr.  
RESTRINGIDA

LC/R.1275  
15 de Junio de 1993

ORIGINAL: ESPAÑOL

---

CEPAL

Comisión Económica para América Latina y el Caribe

**EMPRESAS LIDERES EN DESARROLLO, APLICACION Y DIFUSION DE TECNOLOGIAS  
AMBIENTALMENTE RACIONALES EN AMERICA LATINA: EL CASO DE  
ALUAR ALUMINIO ARGENTINO SAIC**

Este documento es una versión resumida del trabajo solicitado por la Unidad Conjunta CEPAL/ONUDI de Desarrollo Industrial y Tecnológico de la División de Desarrollo Productivo y Empresarial, a través de la oficina de la CEPAL en Buenos Aires, a la empresa ALUAR, Aluminio Argentino SAIC. Los autores de este trabajo son los señores Jorge Ares, Alfredo Calandra y Osvaldo Cobo, Gerencia de Investigación y Desarrollo, ALUAR. El presente documento no ha sido sometido a revisión editorial y las opiniones expresadas en él son de exclusiva responsabilidad de los autores mencionados y pueden no coincidir con las de la CEPAL.

93-6-721

## Indice

### Página

I. PRESENTACION DEL CASO .....	1
II. LA HISTORIA DE LOS DESARROLLOS TECNOLOGICOS DE LA EMPRESA .....	2
1.    Sustentabilidad ambiental en la industria de aluminio .....	2
2.    Las características del proyecto Aluminio Argentino SAIC y la política empresarial de medio ambiente y de desarrollo sustentable .....	4
3.    Adopción y desarrollo de nuevas tecnologías de proceso y de gestión ambientalmente racionales en la empresa .....	8
4.    Aspectos estratégicos y económicos de la política empresarial de sustentabilidad .....	15
5.    Conclusiones .....	18

## I. PRESENTACION DEL CASO<sup>1</sup>

Aluminio Argentino SAIC, -ALUAR-, es una industria de aluminio primario instalada en Puerto Madryn, en la costa de Bahía Nueva de la Patagonia Argentina, a 1 350 km de distancia de la ciudad de Buenos Aires. La planta industrial que inició su producción en 1974 tiene actualmente una capacidad de 170 000 toneladas por año en términos aproximados. En el proyecto de la planta se partió del supuesto que la industria mundial de aluminio se vería pronto enfrentada a una serie de innovaciones orientadas a aumentar la productividad y el rendimiento de las instalaciones, a bajar los consumos específicos de energía y a reducir la contaminación ambiental. En consecuencia, en el proyecto de ALUAR se consideró expresamente la posibilidad de incorporar a la planta industrial y a las operaciones los adelantos tecnológicos, a medida que éstos aparecieran en la industria mundial de aluminio. Esta visión se tradujo entre otras medidas, en la adopción de un diseño sencillo para las cubas electrolíticas, que constituyen el equipo central del proceso, de modo de facilitar al máximo la incorporación de nuevas tecnologías. Además, la dirección de la empresa decidió invertir fuertemente en recursos humanos con el objeto de crear condiciones propicias a la absorción de tecnología y a su ulterior adaptación y desarrollo.

La industria mundial de aluminio mantiene un intenso intercambio de información técnica y de experiencias operacionales entre sus empresas, lo que naturalmente va en beneficio de la difusión del progreso técnico. Es probablemente debido a esta circunstancia que ALUAR adoptó desde un principio una política de protección del medio ambiente. La expresión concreta de esta política es un ciclo administrativo de gestión ambiental que involucra prácticamente al conjunto de las unidades operativas y de servicios de la empresa. Además se creó dentro de la Gerencia de Investigación y Desarrollo, un departamento de investigación ambiental con la doble misión de evaluar las emisiones y los impactos ambientales de las diversas actividades industriales y de conducir auditorías ambientales internas. Por último, esta política se concretó en una serie de inversiones sustanciales en instalaciones de tratamiento y equipos de control de las emisiones.

La constante modernización de los procesos productivos implicó también una efectiva reducción de las emisiones en la planta de Puerto Madryn. En particular se realizaron importantes inversiones para recuperar y reciclar los polvos de fluoruro y de alúmina que emanan del proceso. Estas inversiones resultaron en general económicamente rentables debido al valor intrínseco de estas sustancias como materias primas. La modernización productiva ha resultado también en una significativa reducción del consumo específico de energía eléctrica. Dado el elevado consumo de energía eléctrica que caracteriza a una planta de aluminio, el ahorro energético total de la planta de ALUAR fue bastante importante. Por último, cabe destacar que la política ambiental de ALUAR tiene un marcado carácter pro-activo, pues trata de anticiparse a futuras normas legales. Asimismo se ha visto la conveniencia de asimilar ciertas normas ambientales de los principales países importadores de aluminio con el objeto de asegurar el acceso de las exportaciones de ALUAR a estos mercados. El sistema administrativo de gestión ambiental que la empresa ha adoptado en forma similar a lo prescrito en la norma ISO serie 9000, relativa al aseguramiento de la calidad, se visualiza también bajo la perspectiva de un fortalecimiento de la competitividad internacional de la empresa.

---

<sup>1</sup>Nota introductoria de la Unidad Conjunta CEPAL/ONUDI de Desarrollo Industrial de la División de Desarrollo Productivo y Empresarial de la CEPAL.

## II. LA HISTORIA DE LOS DESARROLLOS TECNOLOGICOS DE LA EMPRESA<sup>2</sup>

La innovación en Aluminio Argentino SAIC (ALUAR) no es el resultado del esfuerzo aislado de un área de la empresa sino consecuencia de una planificación cuidadosa y de acciones orientadas a introducir cambios en los planos tecnológico, estructural, gerencial y de infraestructura, entre otros. Este proceso tiene la finalidad de aumentar la eficiencia de las operaciones, asegurar la rentabilidad de las inversiones, fortalecer la capacidad de crecimiento y competitividad internacional de la empresa y también proteger al medio ambiente. Uno de los objetivos fundamentales de la empresa consiste en mantener su capacidad de exportación y en defender su posición en el mercado interno frente a la competencia externa.

En ALUAR, la protección ambiental forma parte de las actividades de investigación y desarrollo tecnológico. Por una parte, la adopción de criterios y estándares desarrollados en otros países debe ser guiada por el conocimiento básico de la ecología local y de sus elementos singulares. Por otra, es necesario incorporar entre los nuevos adelantos mundiales aquellos que la percepción propia de los problemas ambientales indica como relevantes. Como se puede comprobar más adelante, estas consideraciones fueron los principales criterios que orientaron el desarrollo de las innovaciones de ALUAR.

### 1. Sustentabilidad ambiental en la industria de aluminio

#### a) El proceso Hall-Heroult

El proceso de producción de aluminio primario ha experimentado desde su descubrimiento y registro de patente hace ya 106 años, una sucesión casi continua de innovaciones, pero en ningún caso éstas han sido revolucionarias. Así, las innovaciones se han centrado en el aumento del tamaño de las celdas electrolíticas, en la automatización del control del proceso y en la captación y recuperación de los efluentes. Puesto que el número de unidades de producción (reactores electroquímicos, celdas ó cubas de electrólisis) en esta industria es muy grande, una pequeña contribución al mejoramiento del proceso en una celda puede conducir a obtener considerables ganancias económicas a nivel de la planta en su conjunto.

El proceso de obtención de aluminio consiste en la electrólisis de una solución fundida de alúmina en criolita, a la cual se le agregan aditivos, especialmente  $\text{AlF}_3$  y  $\text{CaF}_2$ , para lograr un descenso del punto de fusión de la mezcla. Se emplean como ánodos, electrodos de carbón que se consumen durante el proceso por lo que deben cumplir requisitos muy estrictos de pureza. El cátodo lo constituye el aluminio líquido, más denso que el electrolito fundido, que yace en el fondo de la cuba. El fondo y las paredes de la cuba están formados por bloques de carbono convenientemente dispuestos y ligados entre sí por medio de una pasta de carbono de manera de configurar un recipiente hermético. El conjunto está contenido en una fuerte estructura metálica que se encuentra aislada térmica y eléctricamente de los bloques de carbono. La electrólisis que se realiza a temperaturas cercanas a los 960 °C genera dióxido de carbono en el ánodo y aluminio líquido en el cátodo. La corriente eléctrica no solo produce las transformaciones químicas en las interfases anódica y catódica,

---

<sup>2</sup> Resumen del informe preparado por los señores Jorge Ares, Alfredo Calandra y Osvaldo Cobo, Gerencia de Investigación y Desarrollo, ALUAR Aluminio Argentino SAIC

sino también el calor necesario para mantener fundido el sistema. El balance térmico es mantenido mediante la regulación de la distancia existente entre el ánodo y el cátodo.

La alúmina es agregada a la cuba en forma discontinua. La cantidad de alúmina agregada al baño en cada operación y la frecuencia de las cargas dependen de los métodos adoptados para ejecutar la tarea. La alúmina ingresa al baño electrolítico y se disuelve en el mismo ayudada por la agitación producida por el desprendimiento gaseoso en los ánodos y por el movimiento de los fluidos impulsados por la interacción de elevados amperajes e intensos campos magnéticos. Si la alúmina que se consume en forma continua en la reacción electroquímica no es repuesta en el momento oportuno, el voltaje de la cuba evoluciona (la corriente de la serie permanece esencialmente constante) hasta permitir la descomposición del electrólito. Se produce así el llamado "efecto anódico", porque la descarga de productos fluorados en el ánodo produce una especie de pasivación que lleva al voltaje a crecer en un orden de magnitud, consumiendo una gran cantidad de energía. El mecanismo de comienzo del efecto anódico y sus características prácticas fueron extensamente estudiados en la empresa. Los resultados de estos trabajos se han dado a conocer en diversas publicaciones. El efecto anódico es extinguido con el agregado de alúmina fresca y una conexión transitoria en cortocircuito de la cuba. Normalmente se producen dos efectos anódicos por día en cada cuba si el agregado de alúmina es masivo. En estas circunstancias, la alúmina no se disuelve totalmente. Como el efecto anódico reduce la acumulación de alúmina no disuelta, es usado corrientemente en la industria a pesar de su elevado costo energético.

b) Orígenes de la protección ambiental en la industria de aluminio.

Las primeras plantas de aluminio producían pequeñas cantidades del metal en cubas de baja eficiencia. En la década de los años treinta, las plantas de aluminio todavía funcionaban comúnmente con capacidades anuales de unos pocos miles de toneladas. A partir del año 1935, las mejoras introducidas en los diseños de los reactores y el extraordinario interés que adquiere el aluminio por su capacidad de reemplazo de numerosos otros materiales, posibilitan un aumento del tamaño medio de los establecimientos hasta alcanzar capacidades del orden de las 50 000 toneladas por año. En la misma época se observó en Europa y Estados Unidos, que los humos desprendidos del proceso de electrólisis podían dañar la vegetación circundante. Sin embargo, nunca se detectaron casos en los cuales estuviera comprometida la salud de la comunidad local o de las personas ocupadas en el proceso.

Como consecuencia de la detección temprana de estos inconvenientes, se hizo habitual en la industria el análisis de los efectos externos de sus efluentes. Al mismo tiempo, comenzaron a desarrollarse sistemas de tratamiento de humos para reducir la cantidad de compuestos fluorados presentes en los mismos. Las primeras tentativas se centraron alrededor del uso de nieblas de agua para interceptar la corriente de humos y abatir parte de los componentes sólidos y gaseosos de los mismos. La eficiencia de estos sistemas es baja. Además se generan residuos líquidos de difícil disposición. Su toxicidad impide que sean descargados a cursos de agua de utilización múltiple, especialmente cuando éstos son usados como fuente de agua de consumo.

La solución definitiva a las emisiones de materiales fluorados incorporó la posibilidad de recuperar los mismos y reutilizarlos como materia prima en el proceso de electrólisis. El diseño de este proceso consiste en un reactor donde la corriente de humos se pone en contacto con un lecho fluidificado de alúmina "fresca", de modo tal que los gases fluorados se absorben sobre sitios activos de la misma y de sus impurezas de sodio. Los componentes particulados de los humos son retenidos

por medio de filtros de mangas convencionales. Durante los años sesenta se desarrollaron algunas variantes de ingeniería para este proceso, lo que provocó en la década siguiente una rápida difusión de los sistemas de control "secos" de los humos de electrólisis. La tendencia se extendió luego al resto del mundo, existiendo en la actualidad muy pocas y solo pequeñas plantas que aún no cuentan con éstos sistemas. Solo en lugares del mundo que son poco poblados, con explotaciones agrícolas de baja intensidad en la vecindad de las plantas industriales y donde prevalecen condiciones meteorológicas favorables a una dispersión de las emisiones, situaciones que se dan por ejemplo en Europa de Este, existen todavía plantas industriales que no cuentan con sistemas de abatimiento de humos. Sin embargo, estas plantas industriales tendrán que adoptar sistemas de control en un futuro cercano en consideración a la necesidad de conservar el clima global.

## 2. Las características del proyecto Aluminio Argentino SAIC y la política empresarial de medio ambiente y de desarrollo sustentable

### a) La implantación del proyecto

El proyecto de ALUAR se concibió durante los primeros años de la década de los setenta, cuando la tecnología de los sistemas secos estaba en desarrollo, y ya existía consenso acerca de las limitaciones de los sistemas de retención húmedos. Al mismo tiempo, ya existían indicios de que otros desarrollos de ingeniería destinados a mejorar el control del proceso de electrólisis y aumentar la eficiencia del uso de energía en las cubas electrolíticas, iban a determinar la necesidad de modificar la estructura hasta entonces relativamente simple de las cubas, para lograr todos estos propósitos simultáneamente. En la planta de ALUAR la alúmina era descargada originalmente en el costado lateral de las cubas sobre la costra de baño endurecida por medio de vehículos con recipientes de almacenaje. Desde allí ingresaba al baño con ayuda de otro vehículo provisto de un pistón neumático que rompía la costra (alimentación lateral). Esta tarea se repetía en todas las cubas cada dos horas produciendo alteraciones cíclicas importantes de los parámetros de marcha del proceso.

Las cubas en ALUAR operan con una corriente de 163 000 amperios y están distribuidas en cuatro salas de electrólisis, que sumadas tienen una longitud de dos kilómetros y medio. Esto da una idea de la magnitud del movimiento de materia prima que hay que realizar ya que en cada cuba se produce diariamente 1 200 kg de aluminio y se consumen 2 100 kg de alúmina y unos 500 kg de carbón de los ánodos. De acuerdo a estas condiciones, el proyecto de ALUAR se concibió desde sus comienzos con miras a efectuar una transferencia ordenada de tecnología en los años a venideros. Las instalaciones de la planta debían tener la flexibilidad suficiente como para poder incorporar los nuevos métodos de control de proceso a medida que éstos iban a ser probados por la experiencia de otros productores de aluminio primario. Con el doble propósito de incorporar tecnología en forma sistemática y de desarrollar componentes tecnológicos intermedios que pudiesen ser realizados localmente se creó una importante capacidad profesional y técnica. Así se formó la Gerencia de Investigación y Desarrollo y se contrataron cerca de 50 profesionales experimentados. Estos fueron reclutados de centros de investigación de excelencia, tanto en el país como en el exterior.

La planta de ALUAR, entre sus diversas instalaciones, cuenta con 400 cubas electrolíticas ubicadas en cuatro salas. Además se dispone de laboratorios de investigación y desarrollo y de control de calidad. La primera colada de metal se realizó en 1974. En 1978 se

produjo la entrada en servicio de la central hidroeléctrica de Futaleufú y, al año siguiente, la planta de ALUAR alcanzó a producir a plena capacidad. Como consecuencia de la incorporación de tecnología en el control y operación de las cubas y en otras áreas del proceso, la producción aumentó en los años subsiguientes en 22% aproximadamente. De este modo la planta alcanza actualmente una capacidad de 170 000 toneladas de aluminio por año. Dado que en la Argentina no existía una industria de alúmina primaria, fue necesario prever la importación económica de la misma a través de un puerto de aguas profundas, de bajo costo operativo. Estas consideraciones determinaron la selección de la costa patagónica norte para tal fin y la construcción del muelle Almirante Storni en el interior del Golfo nuevo, junto a la ciudad de Puerto Madryn, a 1350 km al sur de la ciudad de Buenos Aires. Esta localización fue compatible con la utilización de energía hidroeléctrica proveniente de la central de Futaleufú, ubicada en la región cordillerana al sur de la provincia de Chubut. Debe recordarse que ya en aquel momento se habían producido las primeras crisis de abastecimiento de minerales energéticos fósiles, lo que hacía prever que la producción de aluminio no iba a ser posible en el futuro sin el concurso de energía hidroeléctrica.

b) Principios y procedimientos de gestión ambiental en la empresa

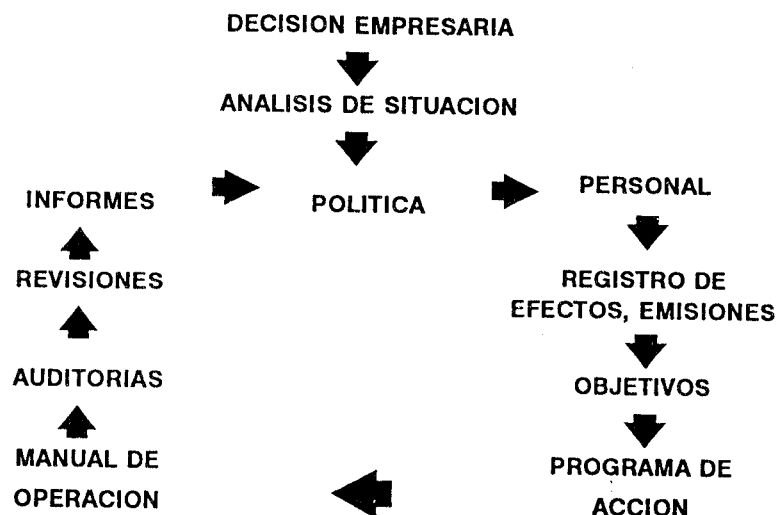
La dirección de la compañía adoptó desde un principio, una clara definición respecto a la protección del medio ambiente. Consecuentemente se implantó un sistema de gestión ambiental en la empresa y se otorgó una alta prioridad a las inversiones destinadas a proteger en forma efectiva al medio ambiente. Además se formuló una política que involucra a todos los niveles de la fábrica desde la gerencia de planta de Puerto Madryn hasta el último nivel operacional. En el documento correspondiente se indica textualmente: "La protección ambiental, por su importancia, deberá ser considerada en todas las actividades que la empresa realice. En este sentido, se tomarán las acciones necesarias que permitan cumplir o preceder a las disposiciones o leyes ambientales. Además, se cooperará con las autoridades responsables del medio ambiente para desarrollar leyes y estándares ambientales efectivos y adecuados a cada necesidad. Es responsabilidad de todos los empleados de ALUAR comprender, promover y asistir a la implementación de esta política."

Esta definición incorpora varios conceptos imprescindibles para una operación industrial ambientalmente sostenible. En primer lugar se reconoce que todas las actividades de la empresa son potencialmente importantes desde el punto de vista ambiental. Esto hace posible establecer normas administrativas para actividades en principio no relacionadas con la ingeniería clásica de saneamiento. Por ejemplo, es fundamental que el área de mantenimiento de la planta desarrolle mecanismos de respuesta rápida para la atención prioritaria de determinadas áreas de operación, tales como las instalaciones de control de efluentes o las de transporte de materias primas desde el muelle hasta el recinto de fábrica. Otro sector del cual depende en alto grado el desempeño ambiental de las operaciones es el de suministros, ya que es a través de esta gerencia que se toman las decisiones relativas al transporte de materias primas y de productos secundarios. Una serie de otras áreas tales como las de proyectos, métodos, control de calidad e ingeniería de procesos, también son muy relevantes para la protección del medio ambiente.

El gráfico 1 muestra el ciclo administrativo mediante el cual se adoptan en ALUAR las decisiones relativas a la gestión ambiental.

Gráfico 1

## EL SISTEMA DE GESTION AMBIENTAL DE ALUAR



Fuente: ALUAR

En segundo lugar, la política ambiental de ALUAR establece que las medidas correctivas deben tender a anticiparse a la ley escrita. Este principio está orientado a un cambio de las condiciones operacionales que ya han sido reconocidas como inaceptables en otros países a la luz de los avances científicos y tecnológicos. Como la legislación ambiental en la Argentina acusa un rezago respecto a las normativas ambientales de países con mayor experiencia industrial, la compañía ha tenido que incorporar, en forma de normas internas, criterios y límites de emisión que aún no están consagrados en la legislación nacional. Es por este motivo que en ALUAR el control ambiental se concibió como una actividad de investigación y desarrollo, lo que ha permitido incorporar rápidamente los adelantos que surgieron de la creciente percepción científica de efectos ambientales hasta hace poco inadvertidos.

En tercer lugar, la política ambiental de ALUAR establece que todos los empleados de la empresa deben asumir una actividad cooperativa hacia las autoridades responsables del medio ambiente. Esta definición implica reconocer que la autoridad de aplicación en el área ambiental actúa en función de los intereses comunes (salud, calidad de vida), que coinciden con los intereses individuales de las personas que trabajan en la compañía. En un mundo que es cada vez más conciente de sus límites ambientales, no es posible lograr un clima laboral de excelencia si las personas que trabajan en una empresa perciben que este tipo de valores están comprometidos. Es en este punto donde el control ambiental se convierte en un elemento más de la gestión de calidad total. Si la industria coopera con otras entidades en la elaboración de la normativa ambiental, se puede



aprovechar su profundo conocimiento de los procesos y su experiencia en otras materias, lo cual conduce finalmente a normas claras y efectivas.

En el marco de esta política en 1974 se creó el Departamento de Investigación Ambiental dentro de la Gerencia de Investigación y Desarrollo. Su función es incorporar a la gestión y operación de la empresa los adelantos que en materia de criterios de evaluación del impacto ambiental se van produciendo como consecuencia de una percepción e interpretación cada vez mejor del efecto que causan las actividades industriales sobre el medio ambiente. Como las interacciones con el ambiente están fuertemente modeladas por las condiciones ecológicas locales, es necesario efectuar prospecciones y estudios locales a fin de que esta incorporación sea racionalmente justificada y trascienda la adopción meramente rutinaria de criterios o estándares desarrollados para otras regiones o circunstancias.

El Departamento de Investigación Ambiental cuenta actualmente con un staff de cuatro personas y un presupuesto anual de 200 000 dólares en términos aproximados. Los primeros análisis ambientales se refirieron al estudio de diversos compartimientos ambientales a través de muestreos del aire, suelos, vegetales, aguas costeras y sedimentos. Los trabajos se orientaron a conocer las concentraciones habituales de elementos que ocurren naturalmente y que a la vez son componentes de las materias primas o de los efluentes característicos de la industria, tales como el aluminio y sus óxidos, los compuestos inorgánicos fluorados y las sustancias orgánicas semivolátiles.

Como parte de su misión de cooperar en la minimización de los impactos secundarios de la planta de ALUAR, o sea aquéllos generados en Puerto Madryn por otras actividades iniciadas a raíz de la instalación de la planta de ALUAR, la empresa ha tomado recientemente contacto, en el nivel técnico, con los organismos nacionales de investigación ecológica que trabajan en Puerto Madryn, diversas agrupaciones conservacionistas de la región y las autoridades de fiscalización ambiental del territorio de Chubut. Estos contactos han sido tomados teniendo en vista la formación de un foro técnico mixto que pueda desarrollar criterios adicionales para la estimación del impacto ambiental de diversas actividades existentes en el área local. La conservación del paisaje, la planificación de la construcción urbana, el uso ordenado de las áreas costeras, la conservación de la vegetación y de la fauna son algunos temas de una futura agenda de cooperación.

Hasta ahora se han publicado en la literatura abierta internacional, una veintena de trabajos científicos sobre distintos aspectos atinentes al impacto ambiental de la producción de aluminio en Puerto Madryn. La finalidad de estos trabajos es fomentar el intercambio de experiencias técnicas y el desarrollo de criterios para una política ambiental pro-activa dentro de la industria. ALUAR conjuntamente con otras empresas líderes en el ámbito internacional, forman el Comité Ambiental del Instituto Internacional del Aluminio Primario (IPAI), que tiene su sede en Londres. El Comité Ambiental del IPAI, que mantiene una activa relación con diversos organismos internacionales para la protección del medio ambiente y desarrollo sostenible, ha contribuido a la formulación de los distintos criterios que el PNUMA adoptó en 1982 y la ONUDI, en 1992 sobre estas materias.

### 3. Adopción y desarrollo de nuevas tecnologías de proceso y de gestión ambientalmente racionales en la empresa

#### a) Innovaciones en procesos: el sector de electrólisis

En el transcurso de los años se introdujeron una serie de innovaciones en el sector de electrólisis que constituye el proceso medular de elaboración de aluminio. Algunas de las innovaciones importantes fueron aplicaciones de modelación matemática, alimentación puntual de cubas, control automático, así como cerramientos de cubas y tratamiento de humos.

##### i) Aplicaciones de modelación matemática

Estudios que se realizaron sobre la estabilidad magnetohidrodinámica de los fluidos dentro de la cuba indicaron que era posible mejorar su funcionamiento. En efecto, los campos magnéticos creados por la corriente eléctrica que circula por los conductores interactúan con la corriente que atraviesa el baño electrolítico y el cátodo de aluminio fundido, generando fuerzas que ponen en movimiento los líquidos contenidos en la cuba. Este movimiento origina una pérdida de la eficiencia de corriente y en consecuencia de la productividad.

Desde los primeros años de funcionamiento de la planta de ALUAR se trabajó en modelos de simulación que representan las complejas interacciones existentes dentro de la cuba entre los componentes eléctricos, magnéticos, fluidodinámicos, térmicos y de transporte de masa. En buena parte, los resultados fueron publicados en la literatura técnica. En la práctica se ejecutaron dos proyectos basados en el uso de los modelos eléctrico y magneto-fluidodinámico. En ambos casos, los resultados fueron muy satisfactorios. Por un lado se corrigieron algunas distorsiones magnéticas que formaban parte del diseño original de la cuba. Ello se logró incorporando un circuito eléctrico adicional de compensación magnética, independiente del de la serie electrolítica. Este nuevo circuito rodea las cubas y sus características fueron definidas por el modelo. De esta manera se obtuvo una mayor estabilidad de marcha, lo que aumentó la eficiencia de corriente en un 2%, reduciendo el consumo de energía eléctrica en 1 000 Kwh por tonelada de aluminio aproximadamente. Como consecuencia de esta modificación en el consumo de energía y a los efectos de mantener el balance entre el calor entregado a la cuba y el disipado por la periferia de la misma, fue necesario remodelar la aislación térmica. Esto produjo una relocalización de las isotermas en el interior del fondo catódico que redujo las posibilidades de daño del mismo e incrementó la vida útil media de las cubas.

El segundo proyecto consistió en completar la segunda serie electrolítica que solo contaba con 184 cubas, estando el edificio en condiciones de albergar 200 como en el caso de la primera serie. Se planteó la idea de lograr la misma situación magneto- hidrodinámica que en el resto de la sala pero sin requerir circuitos adicionales de compensación sino definiendo una configuración apropiada de los conductores. Por sucesivas aproximaciones se pudo diseñar y construir las denominadas "cubas autocompensadas". Estas presentaron un mejor aprovechamiento de los materiales y energía y en una prueba que duró más de 4 años, mostraron estar en condiciones de funcionar con similar rendimiento que el resto de las cubas.

##### ii) Alimentación puntual

La disponibilidad de cubas con un adecuado grado de estabilidad magnética sirvió de base para incorporar un método de alimentación de alúmina que revestía las siguientes características:

- fácilmente automatizable (elimina operaciones manuales y/o con vehículos;

- dosificable en pequeñas cantidades (evita las perturbaciones y reduce la frecuencia de aparición de los efectos anódicos);
- ejecutable por la zona central de la cuba (permite aplicar cerramientos de alta eficiencia de captación) en cuatro puntos (alimentación puntual);
- requiere recipientes fijos instalados en cada cuba para servir de depósitos de alúmina que puedan ser recargados diariamente.

Los primeros equipos de rotura y alimentación puntual se construyeron en 1984. Estos prototipos fueron luego perfeccionados hasta llegar al modelo final. La clave de la innovación fue compatibilizar el espacio limitado disponible con los requerimientos exigidos al equipo por el proceso y por la capacidad del sistema de provisión de alúmina desde los silos. La estructura portante de los equipos que está apoyada en las columnas ubicadas entre las cubas sirve para captar los humos emitidos por la cuba y enviarlos al sistema de extracción de gases. Sobre ella se apoyan dos tolvas de alúmina de una capacidad de dos toneladas cada una y una más pequeña para los aditivos del baño electrolítico. Cada tolva de alúmina está provista de dos pistones rompecostras y dos válvulas dosificadoras de alúmina, todos accionados neumáticamente.

La tolva de aditivos posee dos dosificadores similares a los de la alúmina. Un detalle novedoso que caracteriza al diseño mecánico de los equipos de alimentación puntual, lo constituyen los dosificadores. Cada cuba ALUAR utiliza seis de estos sistemas, cuatro para la alúmina y dos para los aditivos. Los dosificadores, cuando reciben la señal del sistema de control automático, deben descargar cantidades precisas de mineral en los puntos de alimentación. Para este efecto ALUAR desarrolló un nuevo concepto de dosificador que está basado en el principio de fluidificación del mineral. Esta operación tiene lugar dentro de un recipiente de forma adecuada para alimentar con precisión aún mayor que los dosificadores convencionales. Como es sencillo, el nuevo equipo no está sujeto a desgaste y tampoco requiere mantenimiento. Si se considera que en la planta hay 2 400 dosificadores en operación simultánea, se comprende fácilmente la ventaja del nuevo sistema.

### iii) Control automático

La automatización de ciertas operaciones en la cuba electrolítica se realiza por medio de un conjunto de microcomputadoras y mecanismos desarrollados específicamente para reemplazar el control que usualmente se hace en forma manual y con el apoyo de vehículos y/o puentes grúa. Junto con el cerramiento de las cubas, este sistema permite captar los humos para enviarlos a la planta de tratamiento.

El sistema de control automático de las cubas está estructurado en forma distribuida y jerárquica con dos niveles de control. El diseño del mismo fue realizado en forma conjunta por FATE Electrónica y ALUAR. Los programas de control instalados en la memoria de los microprocesadores tienen por objetivo el mantener la concentración de alúmina disuelta dentro de un estrecho rango de valores al tiempo que se mantiene bajo control la distancia entre el ánodo y el cátodo de la cuba. El algoritmo también toma a su cargo el mantenimiento de la composición del baño, estableciendo la frecuencia de agregado de aditivos desde la tolva correspondiente a base de los análisis de laboratorio y los consumos históricos de cada cuba.

Los resultados obtenidos muestran una disminución de las variaciones de temperatura que en el pasado estuvieron asociados a cambios en el contenido de alúmina y en la composición del baño. El número actual de efectos anódicos es de uno a razón de cuatro días y se aprecia una disminución de la

tensión de marcha de unos 50 mv. Todo ello ha permitido mejorar el rendimiento de corriente en casi 2% y el consumo de energía ha bajado en 500 Kwh por tonelada de aluminio.

A base de la experiencia ganada con el control automático de cubas de rotura lateral se plantearon las estrategias de control que serían deseables en el marco de la nueva tecnología. El uso sistemático de simuladores de proceso facilitó enormemente los desarrollos en esta área. Estos equipos generan, por una parte, señales equivalentes a las de una cuba de electrólisis (simulación de cuba) al tiempo que, por otra, emplean dichas señales como alimentación de un sistema de control. Este sistema debe ser capaz de tomar acciones de control (cambiar la alimentación de  $Al_2O_3$ , modificar la distancia ánodo-cátodo) en respuesta a la interpretación de las señales ingresadas. El sistema de simulación de cuba, a su vez, es capaz de modificar las salidas que genera en respuesta a las acciones de control tomadas, con lo cual se cierra el lazo de control. Dependiendo si el sistema de control empleado es análogo al usado para una cuba de la línea (en cuyo caso la conexión entre el simulador de cuba y el controlador se efectúa a través de una interfase de conversión digital-analógica) o si el controlador es a su vez una simulación digital, se cuenta con dos clases de simuladores: los de proceso y los de control de proceso. En el primer caso se trabaja en tiempo real, en tanto que en el segundo el incremento temporal es ficticio y fijado por la simulación. El primero encuentra amplia aplicación en la evaluación y control del software y del hardware de control, mientras que el segundo ha probado su eficacia para establecer criterios en la estrategia de control.

iv) Cerramiento de cubas y planta de tratamiento de humos

El cerramiento de cubas y aspiración de humos completan el proyecto. Estas soluciones producen un significativo cambio en el ambiente de trabajo y permiten recuperar los productos emitidos durante la marcha de las cubas. El cerramiento de cubas se compone de un conjunto de tapas removibles de aluminio. Como éstas descansan en el bastidor de soporte de los equipos de alimentación puntual, poseen una aislación eléctrica en la parte inferior del apoyo sobre la cuba. Las tapas son paneles livianos que pueden retirarse fácilmente para poder acceder a la cuba, realizar las tareas de rutina y volver a colocarlas.

Los gases son aspirados a través de una tubería que desciende por debajo del piso de la sala y se desplaza lateralmente para alcanzar el colector general. La planta de tratamiento emplea el denominado proceso seco (dry scrubbing) usando como agente de retención la misma alúmina que es luego electrolizada en las cubas. La tecnología fue provista externamente. La planta está compuesta de cuatro módulos independientes, cada una con una capacidad para tratar los gases para 100 cubas. La ubicación de los módulos es tal que minimiza el tamaño de los colectores de gases y la pérdida de carga a lo largo de los mismos.

b) La adopción de técnicas de gestión: la prospección y auditoría ambiental

La gestión ambiental de ALUAR se apoya en una serie de antecedentes que son elaborados regularmente por el Departamento de Investigación Ambiental. Para ello se llevan registros de datos, se preparan estadísticas ambientales y, por último, se evalúa el conjunto de estas informaciones aplicando las normas de los países que han liderado la producción de aluminio primario en América del Norte y la Comunidad Europea. Con la misma finalidad se analizan los riesgos ambientales inherentes a determinadas operaciones. Además se preparan periódicamente estudios ambientales con el objeto de conocer los mecanismos de circulación de materiales en los ecosistemas locales, evaluar la efectividad del control ambiental en las distintas áreas operacionales y proporcionar elementos para una comunicación efectiva dentro de la compañía y entre ella y la comunidad local. En cuanto a este

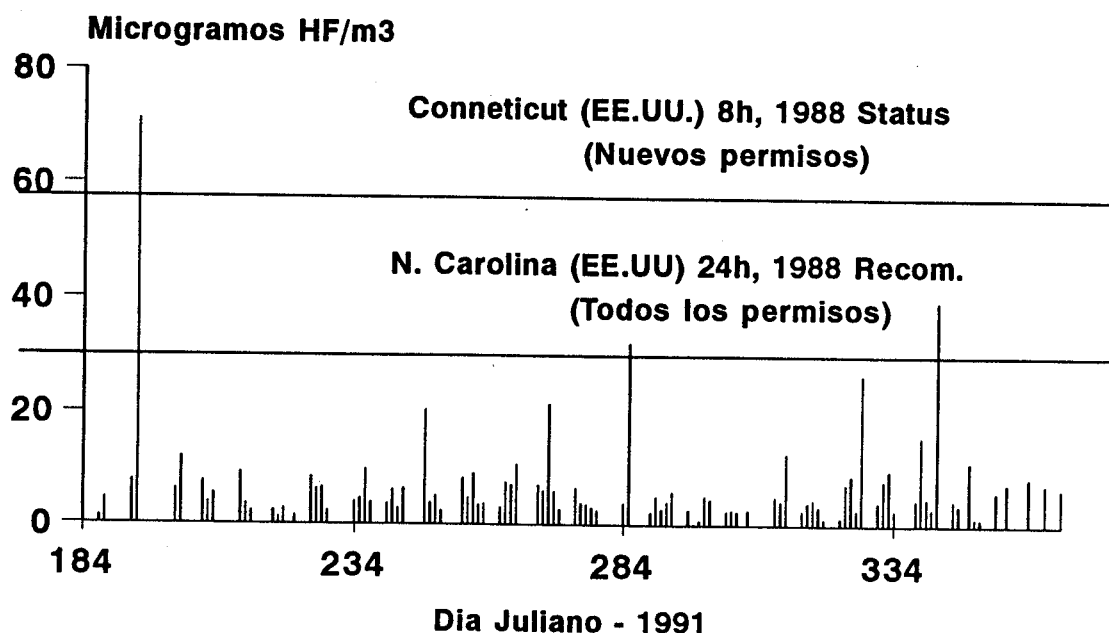
último aspecto se pretende entregar información sobre algunos cambios ambientales observados en el entorno de Puerto Madryn como consecuencia directa o indirecta del funcionamiento de la planta de aluminio.

i) Monitoreo del aire

Se utilizan cinco estaciones con instrumentos para un muestreo continuo. Tres de ellas están dentro del área de planta y los restantes, en las poblaciones más cercanas. Las estaciones están equipadas con muestreadores de alto y mediano volumen. Los datos que son analizados en forma diaria permiten conocer la concentración de fluoruros inorgánicos totales, partículas y compuestos orgánicos volátiles. En este caso, la rutina no tiene fines de auditoría interna sino de comunicación externa, orientada a informar sobre la reducción de los niveles de inmisión, alcanzada mediante el control de las emisiones. Los valores observados en el pasado satisfacen las normas ambientales y criterios técnicos vigentes en países con una legislación ambiental avanzada y, por lo tanto, ellos no constituyen riesgo alguno para la comunidad. En el gráfico 2 se muestran los niveles observados en la estación externa más cercana al recinto de la planta durante el segundo semestre de 1991. A título comparativo se indican también los niveles correspondientes a las normas establecidas en la legislación de dos estados de los Estados Unidos. Ni las leyes federales de la Argentina, ni las de la provincia de Chubut, fijan valores máximos permisibles para este tipo de emisiones. Además, las concentraciones de contaminantes medidas a solo 650 m del lugar de la estación de muestreo en referencia alcanzan solo una décima parte de los valores indicados en el gráfico.

**Gráfico 2**

**CONCENTRACION ATMOSFERICA DE FLUORUROS GASEOSOS:  
MEDIDAS REGISTRADAS a/ EN EL ENTORNO DE LA PLANTA ALUAR Y  
NIVELES DE REFERENCIA DE NORMAS APLICADAS EN ESTADOS UNIDOS**



Fuente: ALUAR

a/ Promedio de 24 horas

Otra emisión que es constantemente sometida a observación es la de hidrocarburos aromáticos policíclicos. La fuente de esta emisión es la planta de cocción de ánodos. En este caso se mide la emisión a través de varios compuestos marcadores, entre ellos el benzo-a-pireno. Las concentraciones atmosféricas, estimadas para distintos lugares en la planta y su entorno mediante mediciones puntuales y modelos de dispersión, son muy inferiores a las que la legislación de algunos países europeos, tales como Alemania, indica como adecuadas (10 ng/m<sup>3</sup>). En Estados Unidos no se ha adoptado aún un valor límite para este tipo de emisiones. Tampoco en la legislación argentina se encuentran antecedentes respecto de límites aceptables para este grupo de sustancias.

ii) Control de efluentes líquidos

El volumen de los efluentes líquidos de la planta no es muy importante. Además éstos no provienen del proceso de producción de aluminio sino de los servicios sanitarios de la planta y de algunas operaciones de lavado. Los efluentes líquidos alcanzan en total un caudal de 18 m<sup>3</sup>/hora. Las aguas sanitarias son tratadas en una planta de tres etapas y las de lavado son sometidas a un proceso de eliminación de grasas en una planta especial. Durante la estación cálida, las aguas sanitarias se utilizan en su totalidad para regar dentro del perímetro de la planta.

Mediante el monitoreo de los sedimentos y aguas del ambiente marino costero, se verifica que no se están produciendo modificaciones en el balance químico de estos sistemas en un grado que justifique advertir un riesgo ecológico. En invierno, las aguas servidas se descargan al área costera previo tratamiento de acuerdo a las normas en vigencia en la provincia de Chubut. Estas normas fijan límites para la acidez, sólidos en suspensión, contenido bacteriano y demanda de cloro. Estos parámetros de las descargas son controlados periódicamente al igual que varios otros.

iii) Control de emisiones por opacidad.

En la planta existen 62 lugares que han sido definidos como emisores potenciales de polvos o humos tomando en cuenta que los respectivos sistemas de control ambiental pueden sufrir una avería. Entre las fuentes potenciales de emisión figuran las chimeneas, torres de transferencia, cintas de transporte, tolvas y estibas semitemporarias. En estos lugares se realiza una inspección diaria de opacidad, basada en la escala Benarie. Las observaciones se comunican en forma computarizada al sector de operación responsable y al área de mantenimiento. Además, el promedio de los valores registrados durante el período anterior son enviados mensualmente a las distintas gerencias. Estas actividades equivalen a una auditoría interna del control de las emisiones ambientales. Además, durante la última década, han proporcionado criterios para la toma de decisiones en materia de inversiones en control ambiental.

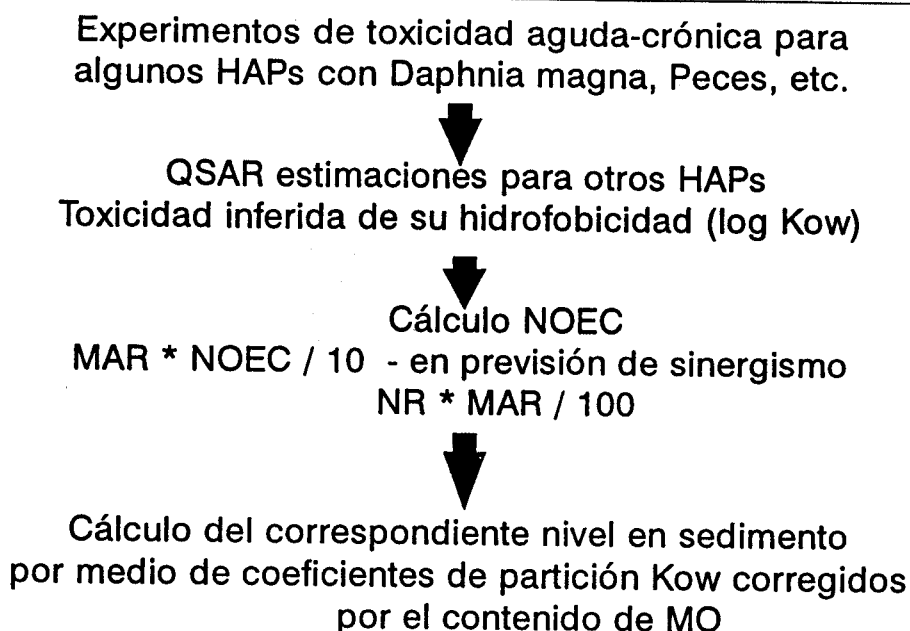
iv) Mediciones de polvo en suspensión

Debido al carácter árido y ventoso del clima y al crecimiento de la ciudad de Puerto Madryn se origina polvo en suspensión en la zona. Como el material básico para la producción de aluminio es la alúmina, que también es pulverulenta, se mantiene, por medio de una red de trampas estáticas direccionales, un control de las cantidades de polvo suspendido en la atmósfera. Estas son recorridas y analizadas cada 15 días. El muestreo se hace con fines de comunicación y también para evaluar las variaciones que presenta la circulación de materiales en la región.

v) Controles de emisión

La fábrica posee cinco chimeneas principales que corresponden a las cuatro plantas de electrólisis y a la de cocción de ánodos. Hay además otras chimeneas más pequeñas que corresponden a instalaciones auxiliares. Con una periodicidad de 40 días, estas chimeneas son muestreadas con

**Gráfico 3**  
**FUNDAMENTOS DE LA ESTIMACION DE RIESGO ECOLOGICO**  
**DE HIDROCARBUROS AROMATICOS POLICICLICOS (HAPs)**



Fuente: ALUAR

Notas explicativas

**QSAR-Qualitative Structure Activity Relationship:** Este término designa a un conjunto de modelos matemáticos que relacionan la estructura química de una sustancia con su actividad toxicológica. Estos modelos permiten estimar el comportamiento de una cierta sustancia en el ambiente.

**KOW-Coeficiente de Partición Octanol-Agua:** este coeficiente que es una característica de las distintas sustancias riesgosas, permite estimar la repartición de su concentración en un medio acuático y los sedimentos asociados a él.

**NOEC-No Observable Effect Concentration:** Concentración de una determinada sustancia tóxica a la cual no se observa un efecto sobre animales en experimentos de laboratorio.

**MAR-Máximo Riesgo Aceptable:** Es un nivel de riesgo que se considera aceptable, basado en la suposición de que el ser humano puede ser hasta diez veces más sensible que la especie sometida a experimentación;

**NR-Riesgo Insignificante:** Es un nivel de riesgo que resulta de la aplicación de un factor de incertidumbre más alto con el objeto de tomar en cuenta otras circunstancias, tales como protección de los miembros más sensibles de una población y sustancias carcinogénicas.

**MO-Materiales oxidables:** es una medida de contaminación basado en la demanda química de oxígeno (COD) y la demanda bioquímica de oxígeno (BOD<sub>5</sub>) según la fórmula:

$$MO = \frac{COD + 2BOD_5}{3}$$

equipos instrumentales, según criterios técnicos internacionalmente aceptados. Los datos se utilizan con fines de comunicación externa o auditoría interna de control ambiental, según corresponda.

vi) Control meteorológico computarizado

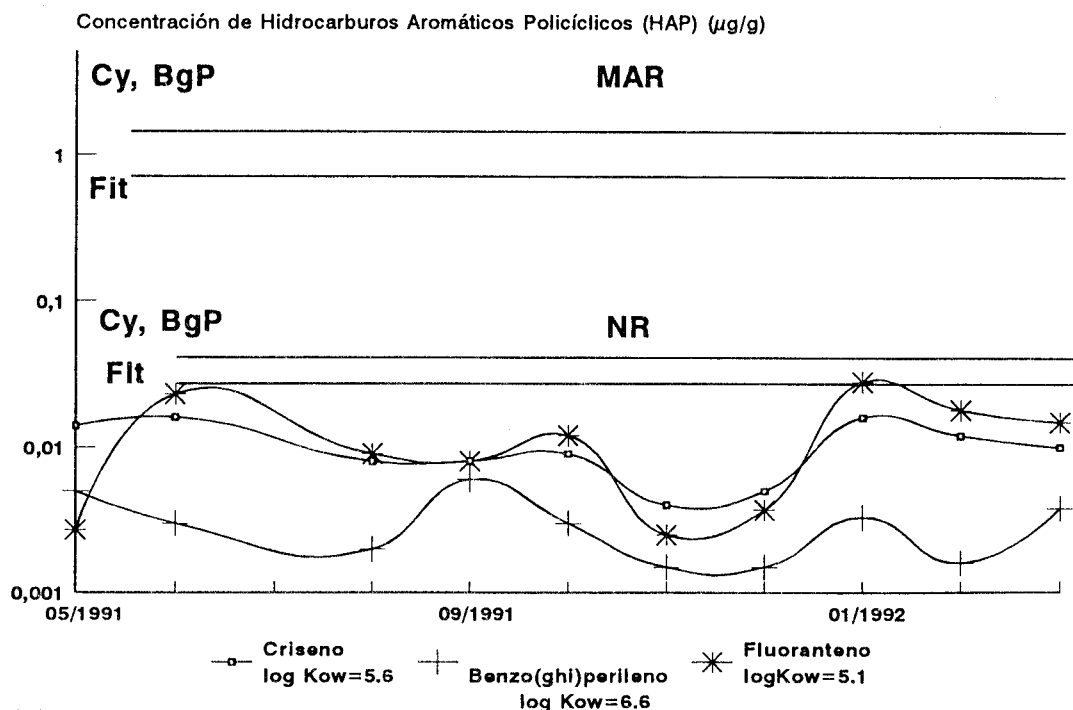
Los datos obtenidos por monitoreo ambiental son utilizados para validar modelos de dispersión del tipo normalizado en la legislación de la Environmental Protection Agency (USA). Para ello, se mantiene dentro de la planta una estación climatológica computarizada, con sensores de velocidad y dirección de viento, temperatura y humedad del aire, y radiación global.

vii) Monitoreo del ambiente marino

Si bien no hay indicios locales, ni antecedentes de otras plantas de aluminio de que las operaciones puedan afectar el medio marino vecino, recientemente se ha indicado que los impactos secundarios de una planta de aluminio, derivados del cambio en el medio urbano, sí podrían hacerlo. A fin de establecer una comunicación adecuada con la comunidad sobre este tema se mantiene en funcionamiento un programa de muestreo mensual del ambiente marino. El muestreo se realiza por medio de trampas de agua y sedimento suspendido. Este programa que se mantuvo durante el período 1976 a 1980 fue reactivado en enero de 1991. Muchos de los aspectos relacionados con el impacto de emisiones en el ambiente marino aún no están legislados ni siquiera en los países más avanzados. Recientemente se han desarrollado algunos criterios de riesgo sobre la base de información de tipo

**Gráfico 4**

**CONCENTRACION DE HIDROCARBUROS AROMATICOS POLICICLICOS  
EN SEDIMENTOS EN BAHIA NUEVA**



Fuente: Zadelhoff et al 1991

Notas: MAR - Nivel de máximo riesgo aceptable

NR- Nivel de riesgo insignificante



Qualitative Structure-Activity Relationship (QSAR)<sup>3</sup> en relación con la protección de las costas del Mar del Norte (véase el gráfico 3). La aplicación de estos criterios al análisis de los datos recogidos en las prospecciones del medio marino frente a la planta de ALUAR indican que los niveles observables no implican riesgos ecológicos que puedan atribuirse a la actividad de la planta (gráfico 4).

#### 4. Aspectos estratégicos y económicos de la política empresarial de sustentabilidad

Cuando se hace un análisis económico de inversiones destinadas a la protección ambiental, se suele examinar en primera instancia si la reducción de emisiones, alcanzada o por lograr, cumplen con la legislación vigente en la materia. En la Argentina, la legislación ambiental no fija los niveles de emisión tolerables para la operación de la industria del aluminio primario. En este contexto, sólo cabe basar la decisión empresarial en una bien fundada ética ambiental o en el valor económico que representan los materiales que se pueden recuperar. Además, el criterio de anticipación a la legislación se torna importante como elemento de la política empresarial de sustentabilidad.

En el caso de emisiones de materiales que tienen un valor económico, sea en el mercado o como materias primas reciclables al propio proceso, es sencillo calcular la rentabilidad de las inversiones. Para ello es necesario conocer las pérdidas que ocurren habitualmente en la instalación respectiva y para este efecto se realizan prospecciones en las fuentes de emisión. En estas prospecciones se miden los caudales de flujos junto con algunas otras variables. En otros casos, la rentabilidad determinada por estos métodos relativamente convencionales resulta insuficiente para justificar una inversión en equipos de control ambiental. Dentro del campo de la economía clásica, este asunto aún no está completamente resuelto. En el fondo, el problema consiste en definir los equivalentes monetarios de valores tales como la preservación de la biodiversidad, la calidad del paisaje y la disminución del riesgo ambiental por debajo de niveles mínimos aceptables. En algunos países se ha procurado desarrollar este tipo de análisis en el marco de la metodología de cálculo costo-beneficio.

El cuadro 1 muestra las inversiones efectuadas por ALUAR en el control de emisiones, reciclaje de residuos y transporte ambientalmente seguro de materias primas. Las cifras corresponden a valores actualizados de las inversiones realizadas desde el comienzo de operación de la planta. Como puede observarse, la mayor parte de la inversión corresponde al conjunto de las plantas de tratamiento de los humos de electrólisis y la planta piloto.

---

<sup>3</sup> El término QSAR designa a un conjunto de modelos matemáticos que permiten anticipar aproximadamente el efecto que produce una sustancia química determinada en el medio ambiente. Estos modelos están basados en las relaciones existentes entre la estructura química de las sustancias y su actividad toxicológica (nota del editor).

Cuadro 1

## INVERSIONES EN INSTALACIONES DE PROTECCION AMBIENTAL DE ALUAR

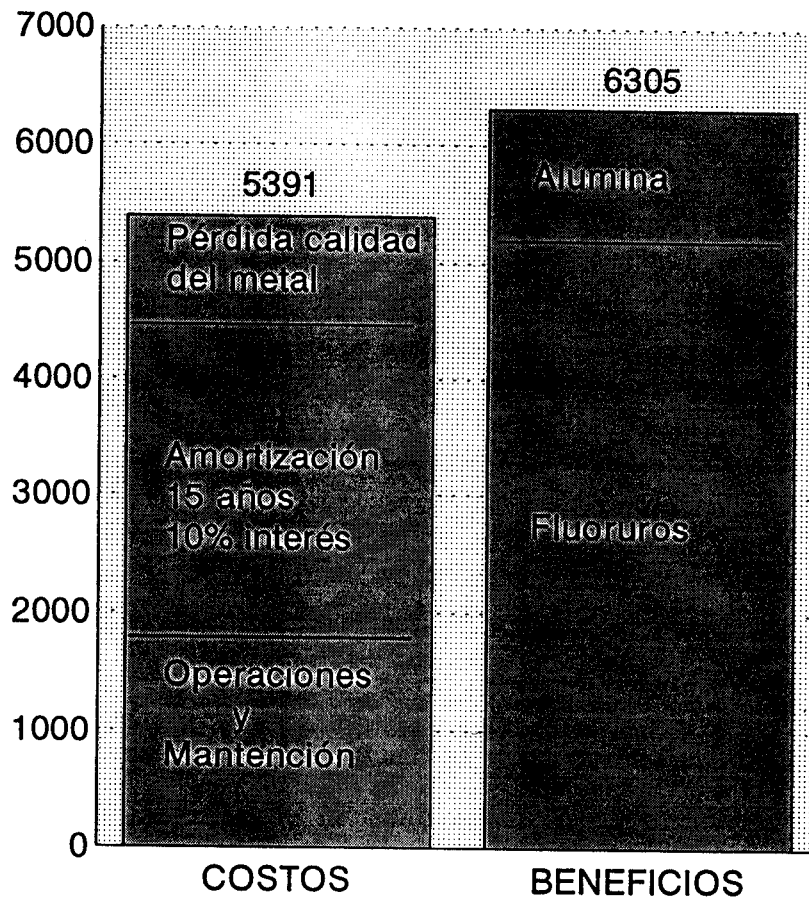
Instalación	Valor de Inversión miles de dólares
Plantas (4) de tratamiento de humos de electrólisis y planta piloto	42 600
Sistema neumático de transporte de alúmina	10 000
Planta de reciclaje del baño electrolítico	1 400
Planta de reciclaje de ánodos	2 500
Filtros	2 900
Control emisiones en molienda de brea	200
Plantas (2) de efluentes líquidos	400
Departamento de Investigación ambiental	250
<b>Total</b>	<b>60 250</b>

Como puede observarse, la mayor inversión corresponde a las cuatro plantas de tratamiento de humos de electrólisis y a la correspondiente planta piloto. Las cuatro plantas, que dan servicio al conjunto de las cubas electrolíticas, funcionan de acuerdo con el principio de tratamiento seco por adsorción en lecho de alúmina fluidificada. La tecnología básica, que era de FLÄKT, fue adaptada a las condiciones de la planta de ALUAR. Para este efecto se desarrollaron una serie de cubas prototipo y un módulo piloto de 16 cubas. Estas instalaciones que funcionaron en forma experimental durante el período 1979-1981, suministraron gran parte de la información requerida para efectuar el cerramiento y captación de humos en las salas de electrólisis sin necesidad de detener o reducir la producción.

Como se ha mencionado anteriormente, los humos de electrólisis suelen tratarse actualmente mediante sistemas de absorción seca en la industria de aluminio. Los correspondientes análisis de costos y de rentabilidad son habitualmente enfocados desde el ángulo de la recuperación de los materiales fluorados. El gráfico 5 muestra las estimaciones que se han hecho para el caso de ALUAR.

Gráfico 5

RECUPERACION DE INVERSIONES EN PLANTAS  
DE TRATAMIENTO DE HUMOS DE ELECTROLISIS EN ALUAR  
(Miles de dólares/año)



Fuente: ALUAR

En el futuro, el análisis económico debería incluir una serie de otras materias que tienen relación con la preservación ambiental. A título de ejemplo puede mencionarse la tendencia que se observa cada vez más claramente en la política comercial de los países importadores de aluminio, de requerir que los exportadores satisfagan la certificación ISO serie 9000. Desde el año 1991, la International Standard Organization (ISO), conjuntamente con el Strategic Advisory Group Environment (SAGE), trabajan en la elaboración de una norma internacional referente a la gestión ambiental en el marco de la serie 9000. El proyecto de esta norma propone la adopción de sistemas administrativos para la toma de decisiones empresariales (véase nuevamente el gráfico 1), la formulación de planes de acción, la adopción de procedimientos de monitoreo y auditoría así como la documentación de los procedimientos en forma de manuales de operación y otras guías.

La adopción del sistema ISO de gestión ambiental constituiría, sin duda, una medida para penetrar en mercados de países donde los sistemas de protección ambiental se han desarrollado con mayor velocidad que en la Argentina. Aún si la legislación argentina continuara manteniendo un retardo relativo en materia ambiental en comparación con las legislaciones de los países más industrializados, un buen sistema de gestión ambiental podría ser, a través del mecanismo de calificación ISO, la llave de acceso a estos mercados en un futuro no muy lejano. Esta posibilidad debería tomarse en cuenta en los análisis económicos de proyectos e inversiones relacionadas con la protección ambiental, aunque no esté muy claro aún cómo podría formalizarse una metodología.

## 5. Conclusiones

El permanente esfuerzo que ALUAR ha hecho desde la puesta en servicio de la planta de Puerto Madryn en el campo de la adaptación de nuevas tecnologías en el área de electrólisis ha aumentado en forma significativa la productividad y de la eficiencia productiva. Al mismo tiempo se ha logrado eliminar la contaminación atmosférica y la de los ambientes de trabajo que originaban los humos de electrólisis.

Además se ha presentado una reseña de las tendencias que caracterizan la política ambiental y de desarrollo sostenible de ALUAR. Esta política adopta, como marco de referencia, la evolución de las normas internacionales correspondientes a la producción de aluminio primario así como los adelantos alcanzados por industrias similares en otras partes del mundo. El funcionamiento de la planta de ALUAR conforme a los principios del desarrollo sostenible descansa en un ciclo administrativo que tiene como componentes esenciales, la decisión gerencial de priorizar la protección del medio ambiente, la formulación de planes de acción basados en la adquisición de datos y prospección del ambiente circundante, así como el ejercicio de la auditoría ambiental interna como un elemento indispensable de la gestión ambiental. Las inversiones realizadas en sistemas de protección ambiental pueden considerarse recuperables en el escenario de mercados de capital con tasas de interés estables, debido al valor que representan las sustancias recuperadas como materias primas. Además, estas inversiones generan beneficios adicionales que consisten en un fortalecimiento de la competitividad internacional de la empresa ante la perspectiva de evolución de la normativa ambiental y a la luz de los compromisos gubernamentales suscritos a nivel internacional para la preservación del medio ambiente global.