

146
2el.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

ESTUDIO DE UN PROCESO PARA REUTILIZAR
DESECHOS QUE CONTIENEN PLOMO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
RICARDO CRISTIAN SANCHEZ BRAVO



MEXICO, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente:	Prof.	BELLO GARCÉS SILVIA
Vocal:	Prof.	GUTIÉRREZ RUIZ MARGARITA
Secretario	Prof.	ALARCÓN DIAZ ALBERTO
1er. Suplente:	Prof.	MEDINA OROPEZA JAIME
2do. Suplente:	Prof.	LUNA PABELLO VICTOR MANUEL

Sitio donde se desarrolló el tema:

Instituto de Geografía, Laboratorio de Análisis Físicos y
Químicos del Ambiente.

Universidad Nacional Autónoma de México

Asesor del tema:



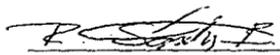
M. en C. Margarita E. Gutiérrez Ruiz

Supervisor técnico:



Ing. José Enrique Santos Jallath

Sustentante:



Ricardo Cristián Sánchez Bravo

DEDICATORIA

**A Dios
A mis padres
A mis Hermanos
A Violeta
A mis amigos**

AGRADECIMIENTOS

A la M. en C. Margarita E. Gutiérrez Ruiz por darme la oportunidad de trabajar con ella, además de su valiosa asesoría en la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Bertram Nagel por el apoyo otorgado como amigo y maestro.

Al Ing. José E. Santos Jallath por su amistad y ayuda incondicional.

Al Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente del IGG: Irene, Silke, Estela, Patricia, Elena, Alma, Pilar, Gloria, Hilda, Oscar, Jorge, Gustavo M., Arcadio, Carlos, Antonio.

INTRODUCCIÓN.....	1
1. ANTECEDENTES.....	5
1.1 USOS DEL PLOMO.....	5
1.2 ALTERNATIVAS PARA RECUPERACIÓN DE PLOMO A PARTIR DE ACUMULADORES.....	7
1.3 EFECTOS DEL PLOMO EN EL AMBIENTE.....	9
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	14
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DEL PLOMO.....	14
2.1.1 MATERIAS PRIMAS.....	15
2.1.2 INSUAIOS.....	18
2.1.3 PRODUCTOS FINALES E INTERMEDIOS.....	19
2.1.4 RESIDUOS GENERADOS.....	19
2.2.1 PREPARACIÓN DE MATERIALES.....	22
2.2.2 REDUCCIÓN DE PLOMO EN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.....	23
2.2.3 REFINACIÓN DE PLOMO.....	27
3. CONTROL AMBIENTAL DEL PROCESO.....	34
3.1 PUNTOS DE AFECTACIÓN.....	34
3.1.1 AIRE.....	34
3.1.2 AGUA.....	35
3.1.3 SUELO.....	36
3.1.4 CONTROL DE LOS MATERIALES.....	36
3.1.5 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE.....	37
3.1.6 SEGURIDAD LABORAL.....	37
3.2 SISTEMAS DE CONTROL.....	38
3.2.1 AIRE.....	38
3.2.2 AGUA.....	48
3.2.3 SUELO.....	49
3.2.4 CONTROL DE LOS MATERIALES.....	50
3.2.5 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES.....	51
3.2.6 SEGURIDAD LABORAL.....	51
3.3 NORMATIVIDAD APLICABLE AL PROCESO.....	56
3.3.1 AIRE.....	56
3.3.2 AGUA.....	57
3.3.3 DESHECHOS SÓLIDOS.....	57
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	61

GLOSARIO

Acumulador: Celda electroquímica que convierte cierta cantidad de energía asociada a una reacción química espontánea en energía eléctrica la cual puede ser utilizada con algún fin específico.

Afinado: Proceso por el cual se remueven las impurezas de un metal refinado.

Batch: Es aquel tipo de proceso que no es continuo y se lleva a cabo por lotes; y por tanto no existe rapidez de acumulación.

Casa de bolsas: Sistema de control atmosférico que contiene una serie de sacos o bolsas de nylon por donde se hace pasar una corriente de gases de proceso y poder eliminar las partículas sólidas. Este equipo tiene un 99 % de eficiencia en remoción de partículas con tamaño mayor a 0.5 μm .

Cámara de sedimentación: Bóveda situada a un costado del horno por donde salen los gases calientes, debido a su gran volumen el gas pierde velocidad y por efecto de la gravedad se depositan las partículas de polvo de mayor tamaño

Desechos: Son materiales u objetos que el generador o poseedor descarta por limitaciones técnicas, económicas o de cualquier otra índole considerando que puede adquirir nuevamente valor cuando las condiciones originales cambian.

Dross: Aleación formada por dos o más metales que flota en la superficie de un metal fundido durante el proceso de refinación.

Escorias: Producto inerte que se genera en un proceso metalúrgico de fundición, el cual contiene la mayor parte de las impurezas de la materia prima.

Elemento Trazador: Nombre que se le asignó a aquellos elementos que por su concentración y características de toxicidad pueden representar un peligro al ambiente; para con ello determinar la fase en que cada uno de ellos se concentra (metal, escoria o polvo).

Fundentes: Compuestos que se agregan al horno eléctrico con el propósito de bajar el punto de fusión de las materias primas y mejorar la viscosidad de la escoria.

Fundición: Proceso pirometalúrgico en el que se lleva a cabo la reducción química de los elementos metálicos.

Horno de Arco Eléctrico (HAE): Horno de fundición de metales, cuyo principio es la generación de corriente eléctrica, por medio de electrodos, que se transmite a través de la escoria produciendo calor.

Impurezas: Son aquellos elementos que forman parte de la materia prima, pero que no son deseables, ya sea por su naturaleza o por no tener valor económico.

Mata de plomo: Es un compuesto sólido formado por la mezcla de sulfuros de plomo con plomo fundido, que se forma durante el proceso de fundición debido a la falta de movimiento de la carga.

Materias primas: Se denomina de esta forma, tanto a los minerales como a los desechos que entran al proceso.

Metal crudo: Término empleado en el sector metalúrgico para denominar el plomo sucio salido del horno eléctrico y que no ha sido refinado.

Metales preciosos: Se refiere básicamente al oro y la plata.

Nata: Óxido que se forma en la superficie de un metal fundido por la oxidación del aire o de los insumos en las distintas etapas de la refinación.

Olla centrífuga: Olla de fundición de metales en el proceso de refinación, que emplea la agitación para separar las impurezas.

Pellet: Material aglomerado en forma de esfera con un diámetro aproximado de 1.5 cm, este término corresponde al de pastillado

Piquera: Orificio que está situado en la parte inferior del horno eléctrico por donde se vacía el metal fundido, este orificio se tapa con un material refractario cuando el horno está en funcionamiento.

Proceso pirometalúrgico: Proceso para la extracción de metales, que se lleva a cabo a altas temperaturas.

Productos finales: Aquellos productos que se obtienen en el proceso, que salen al mercado o tienen una aplicación inmediata dentro de la planta.

Productos intermedios: Aquellos generados durante el proceso y que, por su contenido metálico, son recirculados a alguna etapa del mismo.

Refinación: Proceso por el cual se eliminan las impurezas contenidas en el producto metálico de la fundición.

Sangrado: Nombre que se le da la operación que consiste en sacar el metal fundido del horno o cualquier otro producto incandescente.

Scrubber: Equipo de control atmosférico que sirve para depurar los gases de salida de algún proceso antes de ser vertidos a la atmósfera.

Serpentín: Equipo de control atmosférico situado a la salida de la cámara de combustión cuyo propósito es enfriar los gases de salida del proceso para evitar el riesgo de incendio en los sacos de la casa de bolsas

Skip: Contenedores metálicos que tienen forma de vagón en donde se vierten las materias primas e insumos para vaciarlas posteriormente a los hornos eléctricos.

Speiss: Aleación formada por el arsénico y fierro con otros metales, que flota en la superficie del metal líquido en el proceso de refinación.

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

- Cuadro 1. Producción, exportación e importación de plomo en México**
- Cuadro 2. Productos que consumen plomo para su fabricación**
- Cuadro 3. Distribución de la composición de los desperdicios de acumuladores**
- Cuadro 4. Distribución por tipo de material**
- Cuadro 5. Análisis químico típico de la parte fina de los desperdicios de acumuladores**
- Cuadro 6. Productos finales y aplicaciones de la recuperación de plomo de acumuladores en el proceso HAE**
- Cuadro 7. Productos intermedios obtenidos en el proceso de HAE**
- Cuadro 8. Análisis químico típico de una escoria de descarte del proceso HAE**
- Cuadro 9. Resumen de los sistemas de control atmosférico propuestos**
- Cuadro 10. Relación de acciones para el control atmosférico**
- Cuadro 11. Información ambiental básica sobre los elementos trazadores del proceso de HAE**
- Cuadro 12. Consideraciones para la realización de un balance de materia en el horno eléctrico**
- Cuadro 13. Propuestas para el control de la contaminación del suelo**
- Cuadro 14. Propuestas para el control del almacenaje y movimiento de materiales**
- Cuadro 15. Propuestas para aumentar la seguridad laboral**
- Cuadro 16. Normas Oficiales Mexicanas aplicables al proceso**
- Cuadro 17. Análisis CRETIB de la escoria de descarte de un proceso de HAE comparado con los límites establecidos por la NOM 052-ECOL/1993**

Figura 1. Diagrama de flujo general del proceso de la obtención plomo

Figura 2. Horno de arco eléctrico

Figura 3. Diagrama de flujo de la reducción de plomo

Figura 4. Diagrama de flujo de la refinación de plomo

Figura 5. Sistema de control de emisiones a la atmósfera

INTRODUCCIÓN

México es uno de los principales productores de plomo en el mundo. Este metal se produce a partir de la explotación y beneficio de minerales y del reciclado de materiales y/o residuos de diversa índole.

En México, el plomo se extrae de yacimientos localizados en diferentes entidades federativas destacando por su alta producción (aproximadamente 77% del total de la República Mexicana) los estados de Chihuahua y Zacatecas (INE, 1996)

El cuadro 1 muestra la producción, exportación e importación de plomo en México en el periodo de 1990 - 1995 en miles de toneladas (Fuente: Consejo de Recursos Minerales, 1995).

Cuadro 1. Producción, exportación e importación de plomo en México

ACCIÓN	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Producción	174 137	158 831	173 014	179 675	163 836	179 741
Exportación	113 852	101 553	106 467	102 624	31 826	37 092
Importación	2 762	1 566	1 853	48 431	6 436	796

Casi dos terceras partes de la producción de plomo en el mundo se destinan a la fabricación de acumuladores de plomo-ácido (OECD, 1995) y México no es la excepción, aunque el plomo se aplica para otros sectores de la industria como son la fabricación de óxidos de plomo y otras industrias como las del acero, papel, textil, cerámica, militar y soldaduras.

Como se mencionó, la producción de acumuladores es una industria que consume grandes cantidades de plomo para elaborar productos y por tanto todo lo relacionado al manejo de los acumuladores beneficia a una larga cadena económica que está formada por los consumidores, distribuidores, fabricantes de piezas menores, fundidores, productores y últimamente la industria recicladora.

En México, entre 1995-1996 se alcanzó una producción aproximada de 8.06 millones de acumuladores para cubrir la demanda de automóviles, camiones,

vehículos pesados, motocicletas y de otros tipos como son las celdas de baterías estacionarias e industriales (INE DGRA DEA, 1996). Además si se toma en cuenta que un automóvil durante un periodo de 10 años de uso consume alrededor de 2 a 4 acumuladores (OECD, *op.cit.*) y que un acumulador para automóvil contiene aproximadamente 8.2 Kg de plomo se observa que la generación de estos materiales es potencialmente un problema muy grave de contaminación ambiental por residuos sólidos.

El problema anterior sumado a la limitada capacidad de reciclamiento para este metal en México¹ y la necesidad de las empresas de sobrevivir la actual situación económica, ha provocado que diversas empresas hayan enfocado su atención precisamente al reciclaje de metales a partir de este tipo de desechos y traten de cambiar su giro de empresas fundidoras a recicladoras de metales no ferrosos.

Un claro ejemplo de la problemática que enfrenta la industria metalúrgica mexicana, es el de una empresa que se ha dedicado por más de 50 años a la fundición de concentrados minerales y materiales secundarios que contienen metales no ferrosos, la cual para enfrentar la competencia actual, en condiciones no favorables, ha tenido que recurrir a otras alternativas de desarrollo como es el reciclaje de residuos con contenidos aprovechables de plomo, entre los que destacan los desperdicios sólidos de acumuladores gastados.

Dada la oferta interna y externa de desperdicios sólidos de acumulador y su caracterización como un material secundario factible de recuperar, la empresa ha logrado adecuar su tecnología para que la obtención de plomo a partir de estos materiales resulte una alternativa atractiva. Para ello, se lleva a cabo un proceso pirometalúrgico que incluye diferentes operaciones: la preparación de los materiales (peletizado y secado), fundición en horno de arco eléctrico y, finalmente, la refinación del plomo crudo.

Por otro lado, el reciclado de metales conforma una de las principales alternativas para aprovechar racionalmente los recursos naturales y reducir el impacto que produce la fundición primaria del plomo al ambiente.

Otro de los problemas de esta actividad radica en que las plantas que procesan residuos en lugar de minerales son vistas con desconfianza por la población ya que la asocian con problemas de salud, contaminación ambiental y además, no existe en México una normatividad suficiente y adecuada a los requerimientos

¹ Solo existen dos compañías en México que reúnan los acumuladores, sin considerar que puede haber compañías clandestinas no autorizadas. Estas se encuentran ubicadas en Monterrey y otra en Reynosa (PUMA, 1996).

propios de cada proceso, lo que provoca que este tipo de juicios sean un tanto precipitados.

Los problemas a los que se enfrenta la industria del reciclaje ha creado una situación de incertidumbre de la empresa con respecto a sus compromisos ambientales y la disponibilidad de la materia prima que se requiere. Como consecuencia, su desarrollo se ha visto frenado, ya que las decisiones de inversión tienen un horizonte de planeación a largo plazo y requieren de un entorno legal previsible. Por esta razón, si no se proponen proyectos de mejoramiento ambiental al alcance de este tipo de empresas, se entorpecerá el desarrollo de una creciente rama de la industria con mucho futuro en nuestro país.

La empresa en cuestión, como parte de un compromiso con autoridades ambientales y con la comunidad para lograr un sano desarrollo, solicitó un estudio ambiental integral², del cual forma parte esta tesis.

Los objetivos principales de este estudio son:

- Describir el proceso que se utiliza para la obtención de plomo a partir de acumuladores usados en horno de arco eléctrico.
- Establecer los fundamentos del proceso con base en una investigación documental, análisis del proceso y criterio químico, para determinar el comportamiento de los metales presentes en los materiales utilizados como materias primas.
- Identificar los puntos potenciales de afectación al ambiente y establecer los controles necesarios para reducir el impacto.

Este estudio conyugará a la instrumentación de un programa de medidas acordes a las políticas de crecimiento y situación económica de la empresa, que sea aplicable dentro de plazos y condiciones razonables, logrando un equilibrio entre su crecimiento y el cuidado del medio ambiente, desde un punto de vista social.

² Esta tesis forma parte de un proyecto realizado entre el Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del ambiente (LAFQA) del Instituto de Geografía, el Instituto Nacional de Ecología (INE) y una empresa de metales no ferrosos.

Además, se apoya el desarrollo de una tecnología que permita el reciclaje de plomo, con todos los beneficios que ésta acarrea, tan necesario en el control y disminución de la contaminación.

La información y criterios presentados podrán ayudar a las autoridades al establecimiento de políticas que apoyen el crecimiento del reciclaje en esta rama industrial; ya que México, por ejemplo, es un gran productor primario de minerales de plomo y parte de los desperdicios de este sector industrial no son tratados, confinados o recuperados. Asimismo, este estudio ayuda a ejemplificar el beneficio que el reciclaje de desperdicios o residuos con contenidos metálicos puede otorgar al desarrollo de la industria metalúrgica.

1. ANTECEDENTES

1.1 USOS DEL PLOMO

El plomo es un elemento que existe en forma de minerales en la corteza terrestre de la cual ha sido extraído por el hombre desde épocas muy remotas para aprovechar sus variadas características como es su punto de fusión y potencial de reducción bajos, maleabilidad, ductilidad y alta densidad para la fabricación de múltiples objetos de uso cotidiano.

Actualmente, el mayor crecimiento en el consumo de plomo corresponde al sector de los acumuladores de plomo-ácido. Por otro lado, la reducción más significativa en el uso del plomo está relacionada con su eliminación como antidetonante en las gasolinas.

El cuadro 2 muestra los principales usos del plomo en los países miembros de la OECD, así como la factibilidad para ser reciclado (Wilson, 1990)

Cuadro 2. Productos que consumen plomo para su fabricación

USO	TONELADAS	% del TOTAL	RECICLABLE
Acumuladores	2 310 000	60.4	Si
Recubrimientos para cable	194 000	5.1	Si
Productos de extrusión	287 000	7.5	Si
Municiones	88 000	2.3	Si
Soldaduras y aleaciones	148 000	3.9	Si
Compuestos y pigmentos	521 000	13.6	No
Aditivos para gasolina	110 000	2.9	No
Misceláneos	165 000	4.3	Si/No

Por tanto, como se observa en el cuadro el uso más importante que tiene el plomo es la producción de acumuladores (60 % del total) y baterías

estacionarias para uso industrial³ además, como se observa aproximadamente el 80 % del total del plomo que se utiliza en la industria se puede reciclar .

El plomo, debido a su excelente resistencia a la corrosión y a las soluciones de sal común, tiene una gran demanda en la fabricación de tubería para agua de mar, para revestir salas refrigeradoras y acuarios. Además tiene un uso extenso en la industria de la construcción por su resistencia al ataque de ácidos (LIA, 1980), debido a que se forma una capa protectora de óxido de plomo que cubre al metal. Esta misma propiedad es aprovechada también para la protección catódica de estructuras metálicas. De esta forma, la estructura sirve como cátodo y el plomo como el ánodo. Estas protecciones son muy comunes para cubrir otras estructuras grandes como son los barcos, pipas y puentes.

El plomo también resulta un material muy conveniente para la protección contra los rayos X y ha aumentado su uso en aplicaciones referentes al manejo de material radioactivo debido a su alta densidad (11.3 g/m³), ya que es el elemento común que presenta el valor más alto de esta propiedad antes mencionada. Además, esta característica le permite un máximo poder de golpe con un mínimo de resistencia al aire, por tanto, este metal se utiliza ampliamente para la fabricación de municiones.

Debido a que el plomo es un material relativamente blando, se aprovecha como plomo de impresión para reproducir placas de medio tono y tipos con los cuales se realizan posteriormente los estereotipos. Las láminas de plomo son ampliamente utilizadas como material para pisos en las plantas de galvanoplastia y de fabricación de productos químicos o para recubrir mesas para laboratorios.

Las cubiertas de plomo para teléfonos y televisores continúan siendo un sector donde se utiliza mucho el plomo, la gran ductilidad y capacidad de extrusión que tiene este metal lo hace particularmente bueno para este tipo de aplicación. El plomo usado como cubierta generalmente se alea con pequeñas cantidades de arsénico y bismuto.

El plomo se utiliza en la refinación del petróleo, en la cual el tratamiento con ácido sulfúrico es seguido de un lavado con sosa cáustica y, finalmente, también es útil en la fabricación de ácido fosfórico.

Aleaciones con plomo

Las aleaciones de plomo con otros metales sirven para fabricar productos con muy diferentes propiedades mecánicas y químicas comparadas con el plomo

³ Estas baterías consisten en un plato negativo de plomo poroso, un plato positivo de peróxido de plomo y una solución electrolítica de ácido sulfúrico.

puro. Así, por ejemplo, el plomo es usado en los componentes eléctricos como cubiertas de cable para protegerlos de la humedad. Esta aleación contiene 0.15% de arsénico, 0.15 de estaño, 0.1% de bismuto y el resto de plomo (Hofmann, 1970).

El plomo antimonial tiene una gran demanda en la fabricación de partes importantes para la producción de los acumuladores. Esta aleación está conformada de 13% de antimonio, 1% de estaño, 0.5 % de arsénico, 0.1 % de cobre y el resto de plomo (ASTM, 1986). En forma general, se puede decir que el plomo antimonial se usa en lugar del plomo ordinario cuando se requiere de una aleación que sea adecuada contra la corrosión de una solución o se desee mayor resistencia. Para baterías estacionarias se recomienda el uso de plomo aleado con un 0.03 % de calcio. (Meposa, 1996).

Las aleaciones que contienen de 2.5 a 12 % de estaño y de 2.5 a 25 % de antimonio se utilizan para moldear piezas en matrices metálicas que posteriormente se utilizan como cojinetes en extinguidores contra incendios, etc (Barry, 1983).

Finalmente, otro uso importante del plomo es la fabricación de diversos tipos de soldadura, ya que éstas tienen diferentes cantidades de estaño según las características que se requieran, así por ejemplo en la aleación llamada "Terne" se utiliza una composición nominal de 10 -25 % de estaño con el resto de plomo (Barry, *op.cit.*) y se aplica satisfactoriamente a las láminas de hierro en forma de revestimientos para producir envases, cabe destacar que esta práctica está desapareciendo por la peligrosidad que se le ha atribuido al plomo.

1.2 ALTERNATIVAS PARA RECUPERACIÓN DE PLOMO A PARTIR DE ACUMULADORES

Existen actualmente varias alternativas para el reciclaje de acumuladores agotados que se llevan a cabo en distintos países del mundo. Esto se debe a que la recuperación de plomo se ha convertido en una industria con alto crecimiento. El aprovechamiento del plomo contenido en los acumuladores parece un problema cuya solución es sencilla ya que una gran parte del plomo se encuentra en forma metálica y, por tanto, se puede pensar que se obtiene directamente; pero si se analiza bien el proceso se observa que esta actividad conlleva cierto riesgo para el ambiente. A continuación se presentan los procesos de reciclaje utilizados.

*** Proceso en horno de cuba o reverbero (Medina, 1985)**

Los desperdicios de acumulador constituyen la materia prima, la cual se funde tal y como se recibe (incluyendo la parte plástica), en un horno de cuba o reverbero. Los hornos usados para este proceso, generalmente, son de sección

rectangular con las toberas instaladas a un costado de los lados más grandes del horno. Los productos que se obtienen son: una aleación de plomo que contiene 2-6 % de antimonio, una mezcla de plomo fundido con sulfuros de plomo (mata), *speiss* (compuestos de arsénico, plomo y hierro) y escoria.

Aunque sencillo y directo este método tiene algunas desventajas ya que por ejemplo se necesita una temperatura alta (aprox. 1200 °C) para fundir adecuadamente la mezcla de mata y escoria que resulta de la fusión de los desperdicios de acumulador, lo que a su vez da lugar a una elevada generación de humos, polvos y gases de combustión. Otra desventaja es el azufre que viene en la carga que produce una cantidad considerable de mata y esto se traduce en elevadas pérdidas de plomo y antimonio. También el plomo así producido no puede emplearse para fabricar una nueva placa sino que hay que agregar antimonio con el inconveniente de realizar una nueva fusión u otra etapa como la refinación. Existe un excesivo consumo de combustible en este tipo de hornos.

Finalmente, el uso de combustibles fósiles para calentar la carga aumenta la cantidad de gases de combustión y azufre en los gases de salida. También en este tipo de hornos aumenta el arrastre de polvos y humos.

En México este tipo de horno es el más utilizado para fundir plomo (Torres,1984) y actualmente existe una planta recicladora de desperdicios de acumulador que lo utiliza.

* Proceso Engitec (Reynolds,1990)

En este proceso se hace un tratamiento previo a los desperdicios de acumulador antes de ser mandado al horno de fundición, el tratamiento consiste en triturar en molinos los acumuladores. Las partes que contienen hierro se retiran antes de que entren a la primera etapa.

Posteriormente, toda la carga se manda directamente a un separador hidrodinámico donde es mezclada con agua para poder separar la parte metálica y polvos finos de la pedacería de plástico, la cual transcurrido un tiempo flota en la superficie del reactor. Una vez separado la mayoría del plástico presente, el sedimento que se deposita se manda a un mezclador en donde se le agrega hidróxido de calcio y ácido sulfúrico recolectado de los desperdicios líquidos de las baterías, este último paso tiene el propósito de eliminar cierta cantidad de azufre. También existe la alternativa de agregar carbonato de sodio para realizar la misma operación. El tiempo de residencia para que se lleve a cabo esta etapa dura aproximadamente una hora.

Una vez terminada la operación anterior, la pasta obtenida se filtra y se lleva a un horno en donde es calentada a una temperatura entre 120 y 200°C en donde

el material es secado. Finalmente, en otro mezclador se le agrega el carbón e insumos necesarios y de aquí se lleva a un horno donde se funde el material a una temperatura elevada y se obtiene el plomo como producto.

Esta alternativa tiene el gran inconveniente de que el equipo es muy costoso y demasiado grande.

Proceso en horno rotatorio (Ávila, 1979)

Las materias de alimentación en este tipo de horno son los óxidos y sulfatos de plomo así como la pedacería de plomo metálico. Este proceso es de tipo "batch" o no continuo y la carga se calienta por medio de un quemador que produce una flama que cruza el horno horizontalmente. Los materiales de entrada son mezclados con el coque y los fundentes adecuados y se funden en el horno a una temperatura que varía entre los 950 y los 1000 °C.

El plomo crudo que aquí se obtiene contiene alrededor de 1.5 % de antimonio con algo de azufre y otros componentes metálicos. En este tipo de horno debido a su acción rotatoria se produce movimiento continuo de la carga lo que impide la formación de la mata de plomo. La mayoría del azufre contenido en las materia primas sale en los gases en forma de dióxido de azufre.

El plomo obtenido se pasa posteriormente a un crisol para eliminarle el azufre y las otras impurezas con diferentes insumos para la refinación. Este método es efectivo y se obtienen altas recuperaciones de plomo, pero tiene el inconveniente de utilizar combustibles fósiles los que producen altas cantidades de gases de combustión, además se debe de contar con aparatos muy efectivos de control atmosférico para la depuración de los gases y la captación de partículas.

*** Otros**

Cabe mencionar que actualmente existe un proceso inglés de electrobeneficio para obtener el plomo puro con la ventaja que se ocupan las placas de acumulador tal y como llegan, pero la información sobre el mismo es muy limitada.

1.3 EFECTOS DEL PLOMO EN EL AMBIENTE

El plomo es un elemento altamente tóxico. Algunos de sus efectos nocivos en el hombre han sido reconocidos por lo menos hace más de 200 años.

Las concentraciones de plomo en el ambiente se han elevado conforme ha aumentado su uso, especialmente a partir de la Segunda Guerra Mundial debido a la introducción de compuestos orgánicos de plomo como son los

aditivos de gasolinas, e inorgánicos como los utilizados en diferentes tipos de pintura (Albert, 1985).

Efectos en el ser humano

El plomo está presente en la comida, agua, aire, polvo, pinturas y muchas otras sustancias con las cuales la población en general tiene un contacto cotidiano.

Existen dos tipos principales de intoxicación por plomo: La intoxicación aguda la cual se presenta acompañada de alteraciones digestivas, dolores epigástricos y abdominales, vómito, alteraciones renales y hepáticas, convulsión y coma (Johnstone, 1964). En tanto que la intoxicación crónica puede involucrar neuropatías, debilidad y dolor muscular, fatiga, alteraciones del comportamiento, irritabilidad, temblor, aducimaciones con pérdida de memoria y cólicos (EPA, 1977, NAS, 1972).

En el ser humano, la intoxicación depende del tipo de compuesto de plomo. La intoxicación crónica se presenta, generalmente, por la absorción de óxidos, carbonatos y otros compuestos solubles en agua a través del tracto digestivo. La intoxicación aguda es menos frecuente y suele resultar de la inhalación de partículas de óxido de plomo. De la misma manera, la intoxicación por plomo orgánico se debe a la inhalación de tetraetilo de plomo.

Existen variados desórdenes metabólicos, neurológicos y psiconeurológicos resultado de las exposiciones agudas y crónicas a este metal. En el caso de los efectos negativos producidos al sistema neurológico se debe principalmente a su interferencia en el metabolismo del calcio (Goldstein, 1990). Otros efectos dañinos a la salud son poco conocidos pero se cree que el plomo se incorpora a los grupos carboxilo en los aminoácidos afectando a éstos últimos (Goyer R.A., 1986).

Los síntomas clásicos neurológicos debidos a una alta exposición al plomo son la encefalopatía en niños y neurotoxicidad en adultos, esta última se caracteriza por la pérdida del control muscular en las extremidades. En estas patologías se han encontrado niveles de plomo en la sangre que rebasan o alcanzan los 50 - 70 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Goyer, *op.cit.*).

En personas con niveles de plomo que alcanzan 60 - 80 $\mu\text{g}/\text{dL}$ en la sangre, se ha visto que interfiere con la producción de hemoglobina ya que compete y sustituye al hierro, por lo que si la exposición es crónica causa anemia (WHO, 1983). También puede causar daño en los riñones de los niños produciendo una gradual reducción de la eficiencia en la excreción de ácido úrico. Altos niveles de este metal en la sangre de la madre durante la gestación se asocian a una serie de problemas como son el nacimiento prematuro y la pérdida del feto y además, el transporte de este metal por vía de la placenta

puede dañar el sistema nervioso central del feto. (WHO, *op.cit.*). Altos niveles de plomo en la sangre del padre son relacionados a malformaciones congénitas en los niños (Sallmen,1992). Existen pocas evidencias que relacionen al plomo con efectos cancerígenos en el hombre (Goyer, *op.cit.*).

No obstante todo lo anterior, la intoxicación con plomo se puede prevenir con controles ambientales adecuados.

Contaminación atmosférica

Las fuentes naturales de contaminación ambiental por plomo como son la erosión del suelo, el desgaste de los depósitos de minerales de plomo y la actividad volcánica contribuyen de manera poco significativa a la contaminación del aire. De esta manera, las concentraciones naturales de este metal se han estimado alrededor de $0.0005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de aire (Patterson, 1965), y el resultado del plomo presente en el polvo suspendido en el aire se ha estimado en un promedio de 10 - 15 ppm de plomo (Chow,1962).

En las zonas urbanas se distingue como principal contribución de la contaminación del aire la emisión de fuentes fijas como las fundidoras o recicladoras de plomo y diversos metales no ferrosos. Aunque, cabe resaltar que la eliminación del tetraetilo de plomo las gasolinas ha disminuido significativamente los niveles de plomo en el aire.

En virtud de que la respuesta fisiológica de los seres humanos a la exposición al plomo se produce en semanas, los estándares de calidad del aire fijados en la Comunidad Europea corresponden a concentraciones anuales promedio de $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en Estados Unidos y México esta concentración corresponde al promedio aritmético de tres meses, y este resultado debe de ser menor a $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Semarnap-Camimex,1996).

Finalmente, cabe mencionar que la contaminación por plomo en aire contribuye a la contaminación del agua y del suelo al depositarse las partículas de plomo suspendidas en estos puntos.

Contaminación del agua

Estimaciones realizadas en 1983 a nivel mundial, señalan que alrededor de 97 a 180 mil toneladas de plomo se vierten a los ecosistemas acuáticos provenientes de las actividades de la industria metalúrgica y minera (Semarnap-Camimex, *op.cit.*). Cabe señalar, que las partículas de plomo en aire que se depositan contribuyen con la mitad de esta cifra.

Un estudio aproximado muestra que el promedio mundial de nivel de plomo en aguas superficiales es de $0.5 \mu\text{g}/\text{L}$ o 0.5ppb (Snyder,1973). Aunque, cabe mencionar, que esta cantidad es muy inferior al límite establecido por la

Organización Mundial de la Salud (OMS). Este nivel natural de plomo también varía según el área. Por esta razón, en las zonas de aguas blandas con pH ligeramente ácido, puede llegar a disolverse el plomo de las tuberías. En estas circunstancias, el contenido de plomo en el agua puede llegar hasta 3000 $\mu\text{g/L}$, lo que puede causar intoxicación por plomo (Albert, *op.cit.*).

En México, para el agua de consumo humano el Reglamento de la Ley General de Salud establece concentraciones límite de plomo de 0.05 $\mu\text{g/L}$, por otra parte en los Criterios Ecológicos se establecen concentraciones límite para agua marina de 0.006 mg/L (Semarnap-Camimex, *op.cit.*).

Contaminación del suelo

Las estimaciones de la contribución de las actividades humanas a la contaminación del suelo por plomo, señalan que éstas equivalen a un total entre 479 mil y 1.113 millones de toneladas anuales (Semarnap-Camimex, *op.cit.*). Una vez que el plomo ha llegado al suelo permanece ahí indefinidamente y sólo una pequeña parte es transportada por la lluvia. Por ello, se debe considerar al suelo como uno de los principales depósitos de este contaminante.

En suelos, las concentraciones de este elemento varían de 2 - 200 $\mu\text{g/g}$ (Swaine, 1960), mientras que en suelos urbanos, la concentración del plomo llega a ser extremadamente elevada. Así, por ejemplo, el contenido promedio de plomo en las calles de algunas zonas residenciales y comerciales de 77 ciudades monitoreadas fue de entre 1636 $\mu\text{g/g}$ y 2413 $\mu\text{g/g}$ (Hunt, 1971). Esto representa un serio problema para la salud en especial para los niños.

Por otro lado, la concentración anual de plomo proveniente de la atmósfera que se deposita en el suelo, es de 0.8 mg/m² para el hemisferio norte y de 0.4 mg/m² para el hemisferio sur (Albert, *op.cit.*). En este caso, destacan como fuentes principales de concentración de partículas suspendidas de plomo en el aire la disposición de productos comerciales, cenizas de plantas termoeléctricas, las emisiones automotrices y los desechos urbanos. A ello se suma la contribución de la minería e industria metalúrgica no ferrosa.

Finalmente, para la biota el plomo es un elemento no esencial y potencialmente nocivo. El plomo orgánico e inorgánico son menos tóxicos para las plantas que el mercurio y el cobre (Moore, 1984), cuando este metal alcanza niveles tóxicos provoca disminución de la fotosíntesis vegetal, además de reducción en su crecimiento, biomasa, transportación e inhibición de la división celular o interferencia con enzimas ligadas al metabolismo del nitrógeno.

En cuanto a la fauna, las intoxicaciones agudas de plomo se han observado en invertebrados acuáticos a niveles de plomo que alcanzan 0.1 - 10 mg/L

(Moore, *op.cit.*) y en animales maníferos los niveles tóxicos de plomo pueden producir el desarrollo de anemia.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DEL PLOMO

El proceso comienza con la recepción de los desperdicios sólidos de acumuladores, los cuales llegan a las instalaciones por vía terrestre y se depositan en una bodega donde son almacenados antes de entrar al proceso.

Preparación de materiales

En esta área de la empresa se preparan los materiales, es decir, se modifican sus características físicas y químicas para un mejor desarrollo del proceso.

Los polvos o parte fina llegan, generalmente, húmedos y se envían a un horno rotatorio cuya función es secar el material. Ocasionalmente, el material es aglomerado en forma de pelets¹ para facilitar su posterior manejo además de agregarle el agente reductor necesario para la reducción.

Reducción en HAE

Una vez aglomerados, los materiales se cargan mecánicamente a un horno de arco eléctrico. Aquí se lleva a cabo la reducción del metal a una temperatura que varía entre los 1100 y 1200 °C (Joffré, 1982). Los productos que se obtienen del proceso son cuatro: plomo metálico crudo, mata de plomo, polvos y escorias.

El plomo crudo se envía al departamento de refinación para afinarlo y producir diferentes aleaciones. La escoria, los polvos y humos que se obtienen en los procesos se captan en los respectivos sistemas de captación de polvos y se recirculan al horno eléctrico con el propósito de recuperar lo más posible el plomo presente.

En cuanto a la mata de plomo que se genera por la falta de movimiento de la carga dentro del horno eléctrico también se recircula al horno eléctrico.

Refinación

El plomo crudo obtenido del horno pasa directamente a un proceso de refinación prometalúrgica. Este proceso se lleva a cabo en ollas con agitación mecánica (ollas centrífugas). Mediante diferentes etapas de agitación se logran separar varios componentes indeseables como hierro, sílice, cobre, arsénico, antimonio, estaño, bismuto y plata principalmente (Hancock, 1970). El producto final obtenido, que es el plomo afinado, se vacía en lingotes y se vende para su aplicación en la industria.

¹ Material Aglomerado en forma de esfera con un diámetro aproximado de 1.5 cm

Las natas de refinación que se obtienen se recirculan al horno eléctrico o se utilizan para fundirlas con plomo y crear distintas aleaciones con otros elementos como estaño y antimonio.

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo general del proceso de obtención de plomo (Fernández, 1996).

2.1.1 MATERIAS PRIMAS

Desperdicios sólidos de acumuladores

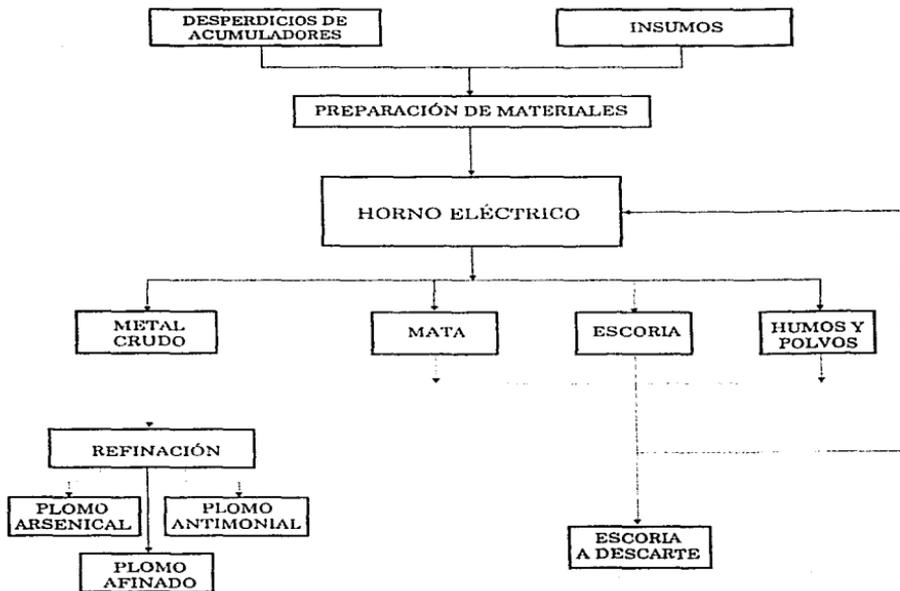
Los desperdicios sólidos obtenidos después de la trituración de los acumuladores gastados, constituyen la principal materia prima que se procesa para la obtención de plomo metálico. Estos ocasionalmente se mezclan con productos intermedios que se obtienen de las distintas etapas del proceso metalúrgico que se lleva a cabo (polvos, humos, escorias, etc.).

Los desperdicios de acumulador se adquieren de proveedores o de comercializadoras; por esta razón, su composición y comportamiento son bien conocidos. No obstante, se hacen pruebas de toxicidad en muestras seleccionadas a estos materiales como rutina para evitar comprar materiales con elementos diferentes (NOM-053-ECOL-1993).

Las pruebas son obligatorias cuando se ofrecen materiales de proveedores potenciales, con el fin de abrir nuevas fuentes de abastecimiento y poder asegurar sus materias primas. Esta actividad siempre viene acompañada de un reconocimiento previo del tipo de proceso del cual provienen, así como de su composición química. Lo anterior se realiza con el propósito de conocer con más detalle, el tipo de material que se procesará y tomar las medidas de prevención necesarias.

Los desperdicios vienen en forma sólida y se componen de una mezcla de polvos finos, trozos de plomo metálico y partes pequeñas de pedacería de plástico. La pedacería de plástico se retira manualmente antes de que el material entre al proceso como medida de seguridad. En lo que respecta a su composición química, están constituidos principalmente por tres sustancias: óxido de plomo II (PbO), sulfato de plomo II (PbSO₄) y trozos de plomo metálico. Contienen

FIGURA 1 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL DEL PROCESO DE LA OBTENCIÓN DE PLOMO



además, una serie de componentes metálicos como son el antimonio, estaño y el arsénico. Una composición química típica se muestra en el cuadro 3.

CUADRO 3. Distribución de la composición de los desperdicios de acumuladores

COMPOSICIÓN	DISTRIBUCIÓN ²	DISTRIBUCIÓN ³
Óxido de plomo	74 % w	75 % w
Sulfato de plomo	20 % w	
Plomo metálico	6 % w	25 % w

En los cuadros 4 y 5 se muestra un análisis típico, realizado en los laboratorios de la empresa de los desperdicios que llegan a las instalaciones (año 1996). Este análisis no incluye la parte de material plástico que, como se explicó, se retira y constituye un 3 % en peso del material original.

CUADRO 4. Distribución por tipo de material

MATERIAL	DISTRIBUCIÓN
Polvos (parte fina)	94 %
Plomo metálico	6 %

CUADRO 5. Análisis químico típico de la parte fina de los desperdicios de acumuladores

ELEMENTO	(% w/w)	ELEMENTO	(% w/w)
Pb	72.940	SiO ₂	1.855
Bi	0.011	Al ₂ O ₃	0.474
Sb	0.480	CnO	0.659
Cu	0.047	Sn	0.275
Fe	0.827	As	0.031
Zn	0.064	S	5.290
Cd	0.009	Ag	0.003

² Datos proporcionados por los laboratorios internos de la empresa de los desperdicios de acumulador que reciben.

³ (OECD, *op.cit.*), el número 75% en la distribución comprende la combinación de óxidos y sulfatos de plomo.

Antes de que los desperdicios de plomo entren al proceso se realiza otra separación entre la parte fina y los trozos de plomo metálico, éstos últimos se recolectan y se almacenan para ser enviados a otra etapa posterior del proceso.

Otra materia importante, la constituyen los polvos y humos recolectados en las distintas operaciones de la planta. Estos materiales se reciclan de diferentes etapas del proceso. Los polvos se reciclan por su alto contenido de plomo (60%), y en su mayoría están constituidos por óxidos de plomo.

Finalmente, otro producto de recirculación es la mata de plomo cuyo contenido de plomo es de aproximadamente 70%.

2.1.2 INSUMOS

Junto con las materias primas se agregan otro tipo de insumos que son necesarios para lograr la recuperación del plomo. Éstos se dividen en dos tipos: los necesarios para la reducción del material y los que se utilizan en la refinación

Reducción

- A) Carbón. Es el agente reductor de los óxidos y sulfatos de plomo en el horno eléctrico. Se presenta como polvo fino y debe tener la menor cantidad posible de impurezas de azufre y cenizas.
- B) Fundentes. Son principalmente fluorita y cal. Se introducen con el propósito de bajar el punto de fusión de los metales. Además, proporcionan fluidez a la escoria y debido a su carácter alcalino, neutraliza la sílice presente.
- C) Escoria. La escoria se introduce al horno con el propósito de ser el medio de resistencia para crear el arco eléctrico entre los electrodos de grafito.
- D) Carbonato de sodio. El agregar carbonato de sodio tiene el propósito de disminuir las emisiones de óxidos no metálicos al ambiente. Además, proporciona fluidez a la escoria que se forma en los hornos.

Refinación

- A) Aserrín. Se agrega para tener una mejor separación entre la interfase del metal líquido y el dross, evitando pérdidas debido al arrastre del plomo.
- B) Azufre. Se agrega en estado nativo y se combina con elementos afines como cobre y níquel.
- C) Agentes oxidantes: Son una mezcla de sosa (NaOH) y nitrato de sodio (NaNO₃). Se utilizan como agentes oxidantes de impurezas metálicas.

2.1.3 PRODUCTOS FINALES E INTERMEDIOS

A lo largo del proceso se obtienen dos principales productos, los que se denominan finales y los intermedios. Los productos finales son aquellos que se comercializan en el mercado, es decir, los que tienen un valor comercial alto como son el plomo metálico afinado, aleaciones de Pb - Sn para fabricación de soldadura, etc.

Los productos intermedios son aquellos subproductos de las diferentes operaciones metalúrgicas que por su elevado contenido de plomo pueden ser recirculados a alguna etapa del proceso para su recuperación. Por ejemplo, los humos y polvos producto del horno eléctrico, las natas generadas durante la refinación del plomo, etc.

Los productos finales que se obtienen en la planta, así como sus aplicaciones se muestran en el cuadro 6.

CUADRO 6 Productos finales y aplicaciones de la recuperación de plomo de acumuladores, en el proceso de HAE.

PRODUCTOS FINALES	APLICACIÓN
Plomo afinado	Tiene diversas aplicaciones industriales, como fabricación de acumuladores, cubiertas para cables, y para fabricación de soldadura con estaño.
Plomo arsenical	Fabricación de postes para las baterías de automóvil.
Plomo antimonial	Dependiendo de la cantidad de antimonio se utiliza para la fabricación de baterías eléctricas y transformadores.

A continuación en el cuadro 7 se describen los productos intermedios obtenidos, los cuales por su elevado contenido de plomo se recirculan al horno eléctrico.

2.1.4 RESIDUOS GENERADOS

Los residuos de proceso son todas aquellas sustancias producto de las operaciones metalúrgicas que ya no tienen valor explotable.

CUADRO 7. Productos intermedios obtenidos en el proceso de HAE

SUBPRODUCTOS	DESCRIPCIÓN
Escorias del horno eléctrico	En ella quedan atrapadas muchas de las impurezas del metal (Si, Fe, Al, etc.) así como el plomo que no se alcanza a reducir. Por tanto debido a su contenido de plomo (4-7%) se recicla al horno eléctrico.
Polvos y humos	Son generados en casi todas las operaciones del proceso y se reciclan. Su contenido de plomo es elevado (58 - 69 %).
Mata de plomo	La mata de plomo es una mezcla de sulfuros de plomo que se generan por la falta de movimiento de la carga dentro del horno eléctrico. Este subproducto tiene una composición aproximada de 73 % de plomo y un 10 % de azufre. La mata se recicla al horno eléctrico.
"Drosses" de refinación	Son compuestos metálicos formados durante el proceso de refinación que tienen un contenido importante de metales de interés para la empresa y pueden ser recuperados. Por tanto, se reciclan al horno eléctrico. También se usan, como se mencionó, en la elaboración de distintas aleaciones con plomo.

1) Escorias de descarte

Es una masa sólida inerte de consistencia vítrea lo cual la hace poco lixiviable; que se genera durante el proceso y en ella quedan atrapadas la mayor parte de las impurezas metálicas y no metálicas contenidas en las materias primas originales. A este residuo se le ha encontrado aplicación en la industria de la construcción, por ejemplo, se está usando para reducir la cantidad de cemento Portland en la fabricación del concreto, debido a que es más barata que la arena y aporta la misma dureza que el concreto normal y presenta mayor resistencia al ataque de agentes químicos externos.

El cuadro 8 muestra un análisis típico, hecho en los laboratorios internos de la empresa que muestra la composición de la escoria de descarte.

CUADRO 8 Análisis químico típico de una escoria de desecho del proceso de HAE

MATERIAL	(% w/w)
SiO ₂	25 - 32
Al ₂ O ₃	10 - 18
CaO	16 - 23
FeO	19 - 26
Pb	< 0.1
S	< 1

2) Material de embalaje y mantenimiento

Este tipo de residuos lo constituyen, principalmente, bolsas de plástico en donde vienen los insumos necesarios en el proceso. Estas bolsas se venden o en algunos casos se guardan para uso posterior y la parte plástica de los desperdicios de acumulador² se envía a su disposición en el basurero municipal.

3) Lubricantes gastados

Estos aceites son producto del mantenimiento de los diversos equipos auxiliares que se usan durante el proceso. Algunos ejemplos son los montacargas, "skips", compresores, bombas, etc. Estos aceites se recolectan y se juntan con los residuos de otras líneas de producción y son retirados por una empresa autorizada.

4) Aceites de transformadores

Al igual que los aceites lubricantes se recolectan de los transformadores de los hornos eléctricos. Se guardan en recipientes metálicos y son retirados por la empresa que da mantenimiento a los transformadores.

¹ Este tipo de plástico podría revalorizarse en las diferentes regiones.

² Contenedores que tienen forma de vagón en donde se vacía el material para poder vaciarlo a los hornos.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES

Para conocer el comportamiento del plomo y las impurezas metálicas presentes a lo largo del proceso, se realizó una investigación documental respaldada por visitas a las instalaciones de la empresa. Cada una de las operaciones se analizó por separado, estableciéndose las reacciones químicas, funcionamiento de los equipos existentes y los parámetros de operación.

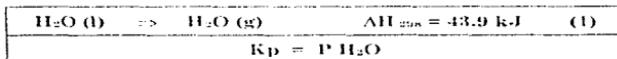
2.2.1 PREPARACIÓN DE MATERIALES.

Como se mencionó, los materiales se preparan antes de cargarse al horno. Dicha preparación se realiza con el propósito de facilitar las condiciones de operación.

Los materiales en polvo, dependiendo de su tamaño y contenido de humedad, pueden pelletizarse y/o secarse. La aglomeración en forma de pellets se lleva a cabo en materiales con un tamaño de partícula muy fino y para agregar el agente reductor. De esta forma se facilita su manejo durante la carga al horno y, además, se disminuye la generación de polvo durante la operación. Para esta operación se usan discos pelletizadores de 2 metros de diámetro. Cada disco tiene una capacidad de 100 kg/h. El material se carga de manera continua por un operador. Una vez formado el pellet, el material se retira y se almacena para mandarlo al horno de arco eléctrico. Cada disco cuenta con un sistema de extracción de polvos que consta de una campana de captación y un colector de polvos (casa de bolsas).

El secado se practica a los materiales con alto contenido de humedad y poca cantidad de sulfatos de plomo. Esta operación tiene como propósito disminuir la humedad de los materiales por debajo del 2 %.

Los valores de entalpia de la reacción de acuerdo con Rosenqvist (1983) son:



Se debe tomar en cuenta que la atmósfera del horno tiene su humedad expresada como $P^{\text{H}_2\text{O}}$. Para que el secado se lleve a cabo es necesario que la presión parcial del agua $P^{\text{H}_2\text{O}}$ sea mayor que la presión del agua en la atmósfera del horno, es decir $P^{\text{H}_2\text{O}} > P^{\text{H}_2\text{O}}$ (Rosenqvist, *op.cit.*).

El secado se realiza en un horno rotatorio corto donde una flama caliente directamente los materiales. La temperatura que se alcanza varía de 300 a

-400 °C. Una temperatura mayor puede ocasionar la reducción de algunos óxidos de plomo.

El horno no tiene un control de temperatura y sólo se controla la temperatura de los gases a la salida del horno para no causar problemas en los equipos de captación de polvos. Debido al movimiento giratorio del horno, ocasionalmente, se utiliza para peletizar el material.

2.2.2 REDUCCIÓN DE PLOMO EN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.

El equipo utilizado para reducir el plomo es un horno de arco eléctrico (HAE). Este horno tiene una capacidad máxima de 12 toneladas. Debido a las características del horno el proceso se lleva a cabo en forma no continua o por lotes.

Una de las principales ventajas en el uso del HAE son que se reducen considerablemente las emisiones de azufre y gases de combustión (Eby,1990). Esto se debe a que no se utiliza ningún combustible fósil como el diesel o combustóleo para calentar la carga. Además, el horno proporciona una alta eficiencia en el suministro de energía. Otra ventaja importante es la disminución de la cantidad de polvos producidos en comparación con un horno a fuego directo (Rosenqvist, op.cit.)

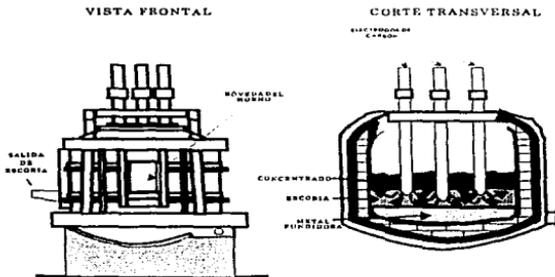
Descripción de la operación.

El horno cuenta con una rampa para cargar mecánicamente el material, utilizando un cargador frontal (skip). La carga del material se realiza por una tolva que se encuentra en la parte superior del horno. Una campana de extracción capta las emisiones de polvo y gases durante la carga del material y a lo largo del proceso. Antes de cargar el material se agrega escoria o, en su caso, se deja cierta cantidad del proceso anterior.

La energía eléctrica se suministra a través de electrodos de carbón. Los electrodos se sumergen en la escoria para producir el arco eléctrico, ya que este material es el principal medio de resistencia (Biswas,1993). Al principio de la operación se consume bastante energía, debido a que se debe fundir la escoria. Si se quiere provocar un aumento de conductividad eléctrica se debe disminuir la viscosidad. El principal mecanismo de transferencia de calor en la escoria es la convección.

Un esquema del horno y la posición de los electrodos se muestra en la figura 2 (Matyas *et al*).

FIGURA 2 HORNO DE ARCO ELÉCTRICO



La temperatura del horno se controla por medio de la corriente suministrada o diferencia de potencial entre los electrodos. La potencia típica que se proporciona al horno varía entre 550 y 750 kw tratando de que sea uniforme y constante. Estas precauciones tienen como objetivo alargar la vida de los electrodos.

El horno se controla por medio de una computadora que registra los datos de la potencia suministrada contra tiempo de operación. El tiempo de operación se calcula por medio de la información proporcionada por la computadora tomando en cuenta la cantidad de plomo y la potencia suministrada al horno.

Cuando se ha reducido el plomo se lleva a cabo "el sangrado", para lo cual se tiene que eliminar el tapón de "la piquera"¹ por medio de una lanza de hierro que inyecta oxígeno. Cuando se rompe el tapón, el metal líquido fluye por un canal y se recolecta en una olla lingotera de, aproximadamente, cinco toneladas. Después de vaciar el metal empieza a salir la mata de plomo junto con escoria, por tanto se debe tapar de nuevo la piquera para no contaminar el metal.

Para eliminar la mata y parte de la escoria del horno, se sigue un procedimiento similar al del sangrado del metal. La diferencia se observa en

¹ Nombre que se le da a la operación que consiste en sacar el metal fundido del horno

² La piquera es un orificio que tiene el horno en la parte inferior. El tapón de la piquera es de material refractario

que la salida de estos productos se realiza por otro orificio que se sitúa a 35 cm arriba de la piqueta de metal. La masa caliente escurre por un canal y se coloca en una cama de arena para dejar que se enfríe. Aunque generalmente la escoria se deja en el horno para poder empezar la siguiente operación.

Para la captación de los polvos y humos el horno cuenta con dos sistemas de extracción. La casa de bolsas tiene un sistema de sacudido mecánico. La casa de bolsa se limpia después de 3 ó 4 operaciones del horno. El material se recolecta y se recircula al proceso. En la figura 3 se muestra un diagrama de flujo del proceso de reducción (Fernández, *op.cit.*).

Reacciones químicas en el horno eléctrico.

La reducción del plomo en el horno eléctrico se realiza utilizando carbón. Los materiales que entran al proceso, además de plomo, contienen otros metales como impurezas (< 1%), entre ellos están: antimonio, bismuto, cobre, sílice y vestigios de otros elementos como estaño, arsénico y plata, los cuales contaminan el plomo fundido.

La reacción principal que se lleva a cabo para obtener el agente reductor es la llamada reacción de Boudouvar (Floyd, 1980) que se lleva a cabo entre el carbón y el dióxido de carbono:

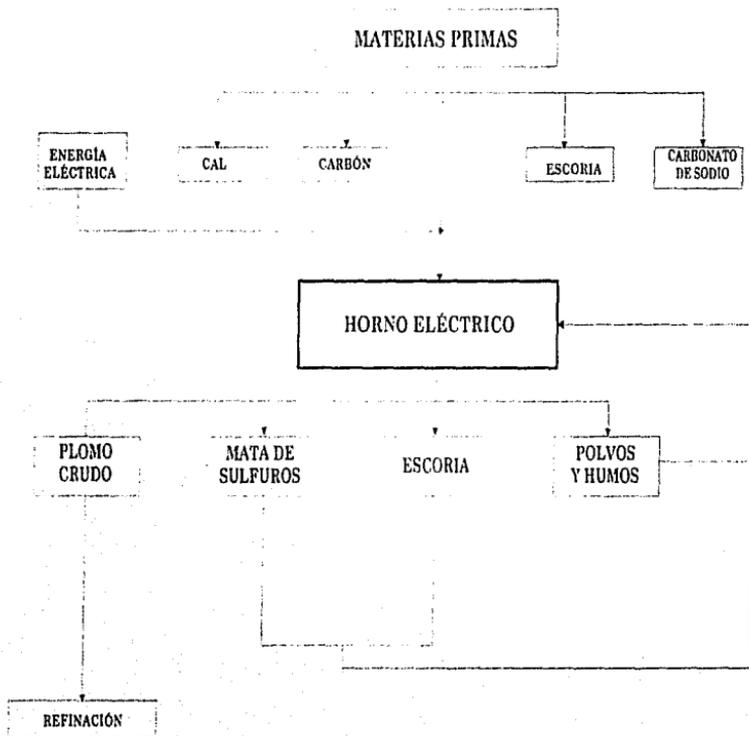


El plomo es un metal con un potencial de reducción muy bajo ($\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}$ $\epsilon = 0.126$ volts). Las principales reacciones del plomo que se llevan a cabo en el HAE son (Forrest, 1990):

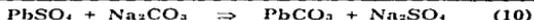
$\text{PbO} + \text{C} \Rightarrow \text{Pb} + \text{CO}$	(5)
$\text{PbO} + \text{CO} \Rightarrow \text{Pb} + \text{CO}_2$	(6)
$\text{PbSO}_4 + 4\text{CO} \Rightarrow \text{PbS} + 4\text{CO}_2$	(7)
$2\text{PbO} + \text{PbS} \Rightarrow 3\text{Pb} + \text{SO}_2$	(8)
$\text{PbS} + \text{PbSO}_4 \Rightarrow 2\text{Pb} + 2\text{SO}_2$	(9)

Como en el horno eléctrico no hay agitación de los materiales durante la reducción, el sulfuro de plomo, que es poco soluble en el plomo fundido, no se difunde. Por tanto, las reacciones (8) y (9) se llevan a cabo de manera muy lenta y esto provoca que los compuestos sulfurados formen la mata de plomo.

FIGURA 3 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA REDUCCIÓN DE PLOMO



El carbonato de sodio se agrega con el propósito de disminuir las emisiones de bióxido de azufre. Este compuesto reacciona mediante la siguiente reacción (Pickles, 1991):



El sulfato de sodio producido bajo esta condiciones de reacción se va a la escoria y ahí se retiene. El carbonato de plomo se descompone en su respectivo óxido y se reduce:



La mayoría de las impurezas que contienen los desperdicios de batería están en forma oxidada, y cuando se reducen se disuelven en el plomo fundido.

Las principales reacciones que se llevan a cabo en la reducción son las siguientes (INE-LAFQA-MEPOSA, 1996):

$\text{Bi}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \Rightarrow 2\text{Bi} + 3\text{CO}_2$	(12)
$\text{Sb}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \Rightarrow 2\text{Sb} + 3\text{CO}_2$	(13)
$\text{As}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \Rightarrow 2\text{As} + 3\text{CO}_2$	(14)
$\text{SnO}_2 + 2\text{CO} \Rightarrow \text{Sn} + \text{CO}_2$	(15)
$\text{Cu}_2\text{O} + \text{CO} \Rightarrow 2\text{Cu} + \text{CO}_2$	(16)
$\text{ZnO} + \text{CO} \Rightarrow \text{Zn (g)} + \text{CO}_2$	(17)
$\text{FeO} + \text{CO} \Rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$	(18)

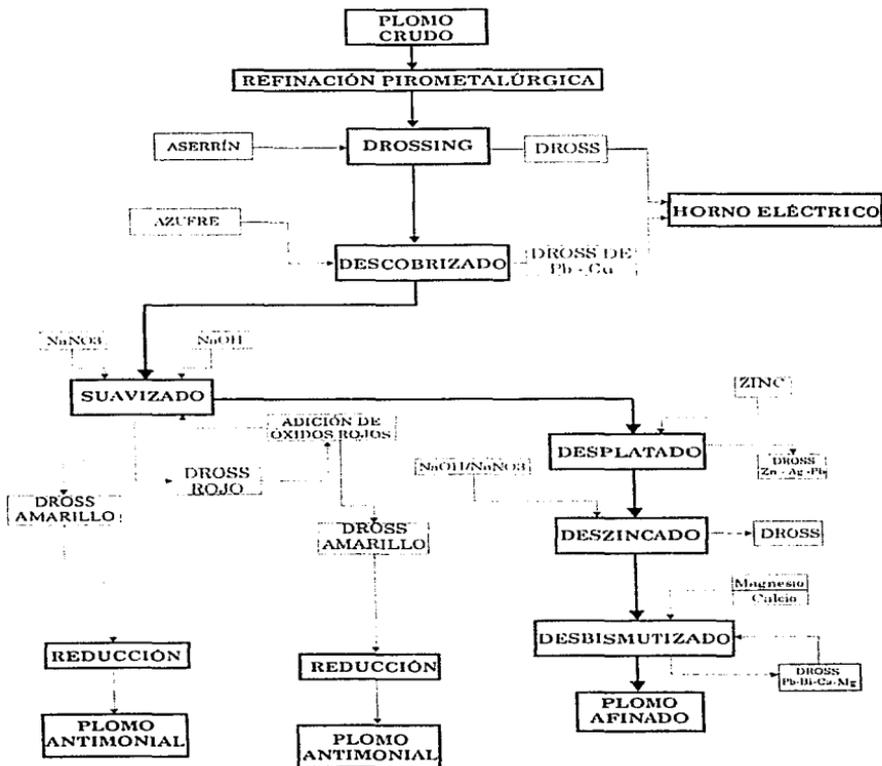
Silice.

La sílice (SiO_2) presente en la alimentación no se reduce por las temperaturas en las que se trabaja y por tanto pasa a formar parte de la escoria.

2.2.3 REFINACIÓN DE PLOMO

La refinación del plomo crudo, que se realiza en la empresa es el proceso pirometalúrgico tradicional conocido como "Harris" (EST, 1992). El plomo crudo producto del horno eléctrico se calienta para fundirlo y poder realizar la refinación. La figura 4 muestra el diagrama de flujo de la refinación de plomo (Fernández, *op cit.*).

FIGURA 4 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA REFINACIÓN DE PLOMO



También en este departamento los trozos de plomo metálico que se separan de la parte fina de los desperdicios de batería se funden y refinan para obtener plomo afinado.

Descripción del proceso y reacciones químicas de la refinación.

El primer paso consiste en la separación de las "cenizas iniciales" (Suganuma, 1970). Para ello, la carga se funde en unas ollas o pailas que tienen una capacidad de cinco toneladas. El plomo fundido se agita para homogeneizar la carga y se agrega aserrín con el propósito de lograr una mejor separación entre la fase metálica y la nata o dross que se forma al dejarse enfriar el plomo, la cual arrastra hierro, estaño y antimonio. Esta nata inicial se retira con ayuda de unos cucharones perforados y se manda a recircular para recuperar el plomo.

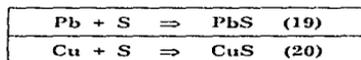
Después de retirar estas cenizas empieza propiamente la refinación que dependiendo de las impurezas consta de las siguientes etapas (Delgado, 1996):

- 1) Descubrizado: remoción de cobre y níquel.
- 2) Suavizado: remoción de estaño, antimonio y arsénico.
- 3) Desplataado: remoción de plata.
- 4) Deszincado: remoción de zinc remanente.
- 5) Desbismutizado: remoción de bismuto.

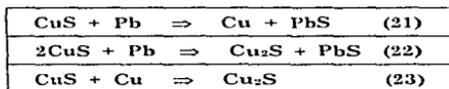
1) Descubrizado.

El descubrizado es la operación por medio de la cual se extrae el cobre, níquel y parte del estaño agregando azufre elemental al baño metálico (Emicke *et al*). El azufre al entrar en contacto con el plomo forma el sulfuro de plomo (PbS) y se disuelve en el metal fundido. Debido a la mayor afinidad del cobre por el azufre, el PbS se descompone y reacciona con el cobre para formar sulfuro cúprico. Este compuesto tiene un punto de fusión más alto que la temperatura de operación y tiende a flotar en la superficie del metal formando una nata o "dross". Para realizar la operación es necesario mantener una agitación constante y por espacio de 20 a 30 minutos antes de retirar la nata formada.

Al principio de la operación el azufre elemental se combina con el plomo y el cobre disolviéndose en el plomo fundido, de la siguiente forma (Davey, 1980):

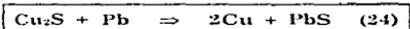


La reacción (19) en presencia de estaño y plata se vuelve muy lenta, además estos elementos aceleran la reacción de oxidación del cobre (20). Las principales reacciones del sulfuro cúprico formado son (Davey, *op cit.*):



La reacción (23) es mucho más rápida que la (21) y (22).

El sulfuro cuproso formado puede volver a reaccionar con el plomo fundido como sigue (Davey, *op. cit.*):



Si ocurre esta reacción el cobre se redissuelve en el plomo fundido. Esta reacción (24) sólo se produce si la agitación se prolonga por mucho tiempo o si la temperatura se eleva por arriba de la recomendada para la operación.

Al término de la agitación, se procede a retirar la nata formada de la superficie del metal. Al final de esta etapa la concentración de cobre presente en el metal baja a niveles entre 0.001 - 0.002 % (Meposa-2, 1982).

2) Suavizado.

Una vez que se ha retirado el cobre, la etapa que sigue es el suavizado del plomo. El suavizado consiste en la remoción del estaño, antimonio y arsénico (Chaussin, 1975).

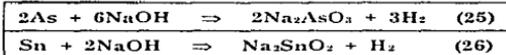
La etapa inicial del proceso consiste en agregar al plomo fundido, sosa cáustica y un agente oxidante, en este caso el nitrato de sodio. La sosa tiene como finalidad aglutinar o colectar a las impurezas en una matriz, mientras que el nitrato de sodio oxida al estaño, arsénico y bismuto formando arseniatos, estanatos y antimoniatos de sodio. Estos compuestos forman una nata que se retira cuando la oxidación de las impurezas se ha completado.

Posteriormente, se le agrega al metal fundido una nata roja obtenida de esta misma etapa pero de un lote anterior. Conforme pasa el tiempo se forma una

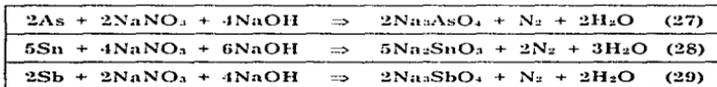
nata que contiene plomo y antimonio principalmente, que se utiliza para la fabricación de plomo antimonial.

Posteriormente, se agrega sosa para formar la siguiente nata, la cual es una mezcla de sosa con plomo y pequeñas cantidades de Sn y Sb. Una vez formada se retira y se almacena para utilizarla en la refinación del siguiente lote.

Las reacciones que ocurren son (Davey, *op.cit*):



Posteriormente, se agrega el nitrato de sodio y se forma la nata amarilla. Las reacciones completas son (Emicke, *op.cit*):



Al término de la operación de suavizado las concentraciones de las impurezas deben ser menores a 0.003 % de Arsénico, 0.001 - 0.002 de estaño y 0.002 - 0.003 de antimonio (Meposa-2, *op.cit.*).

3) Desplatao-

El desplatao es la operación que consiste en la remoción de metales preciosos como son la plata y el oro (Hancock et al). Estas impurezas junto con el bismuto no pueden ser removidas del plomo por reacciones con azufre, cloro, oxígeno, etc. Esta operación sólo se aplica cuando la plata se presenta en concentraciones mayores a 0.003 %.

La plata se remueve por precipitación, aprovechando la propiedad que tiene el zinc para formar aleaciones y/o cristales con plata y oro, generando compuestos metálicos según la reacción (Davey, *op.cit*):



Un ejemplo es (Pehlke, 1982):



Es difícil establecer las condiciones termodinámicas para el diagrama de fases de la reacción, ya que la relación del compuesto metálico (x) varía con la composición de la solución y la temperatura (Davey, *op.cit.*). Estos compuestos al enfriarse se segregan formando una masa flotante de cristales pequeños impregnados por el plomo.

Para llevar a cabo el proceso, la temperatura del plomo fundido se debe elevar arriba de 400° C, al llegar a la temperatura de operación se le agrega el zinc. Posteriormente, se deja que el zinc se caliente hasta que alcance la temperatura de equilibrio térmico y luego se agita para no provocar su oxidación.

Una vez terminados los pasos anteriores, se deja enfriar la paila hasta una temperatura de 380° C y se retiran los cristales formados. Al terminar la operación, la concentración de plata deberá ser igual o menor a 0.002 % (Meposa-2, *op.cit.*).

4) Deszincado.

El deszincado es la operación donde se elimina el zinc residual del plomo desplutado.

Para llevar a cabo esta etapa, se agrega sosa al plomo fundido arriba de 400 °C. El zinc se oxida fácilmente a estas condiciones, reduciendo al hidrógeno del oxihidrido, mediante la siguiente reacción (Davey, *op.cit.*):



Para que ocurra la reacción, se debe dejar que la sosa se funda en el baño metálico y, posteriormente, se debe agitar vigorosamente hasta obtener una nata de color verdoso que se retira con una pala perforada. Para verificar que no haya zinc en el plomo fundido se vuelve a agregar sosa.

Al término de esta etapa la concentración de zinc debe ser menor al 0.005% (Meposa-2, *op.cit.*).

5) Desbismutizado.

Esta etapa se realiza cuando el bismuto está presente en concentraciones mayores a 0.03 %. El desbismutizado consiste en agregar calcio y magnesio al plomo fundido para formar compuestos con el bismuto (Gilchrist, 1980), los cuales flotan sobre la superficie del plomo en forma de cristales. Esta operación se debe a que el bismuto es un elemento que se reduce más fácilmente que el plomo, por lo que no puede ser removido con sulfuros, oxígeno o algún haluro.

Para llevar a cabo esta etapa, el baño se comienza a agitar y se le agrega el magnesio a una temperatura menor a los 500 °C. Posteriormente, se agita durante otro lapso y después se le agrega calcio. Una vez mezclados los elementos se deja enfriar y se remueve la nata formada. La reacción que ocurre en la eliminación del bismuto es la siguiente (Emicke, *op.cit.*):



Otros compuestos que comúnmente se pueden formar son Bi_3Ca , Bi_2Ca_3 y Bi_2Mg_3 , que no son solubles en el plomo fundido y tienen un alto punto de fusión.

Finalmente, para retirar las huellas de calcio y magnesio presentes, se le agrega sosa y se agita por espacio de una hora, formándose una nata roja que se retira con una pala perforada.

Una vez finalizada la etapa de refinación, se obtiene el producto final que es el plomo afinado, el cual, tiene una pureza del 99.7%. El plomo se vende en forma de lingotes de diferentes pesos. Las natas con alto contenido de bismuto se funden para fabricar el plomo antimonial y las natas con alto contenido de arsénico se almacenan con el propósito de fabricar el plomo arsenical.

3. CONTROL AMBIENTAL DEL PROCESO

3.1 PUNTOS DE AFECTACIÓN

En los capítulos anteriores se presentó una descripción de todas las etapas del proceso de obtención de plomo en horno de arco eléctrico, donde se incluyó la caracterización de las materias primas, productos finales e intermedios, la explicación de cada una de las operaciones que lo conforman y las principales reacciones químicas que ocurren durante la operación.

Esta información ayuda a identificar los puntos de afectación al ambiente y los riesgos que el proceso implica para con esto realizar medidas preventivas y correctivas acordes a las necesidades del proceso, así como la descripción de los sistemas de control ambiental que deberá tener para minimizar al máximo las afectaciones al ambiente.

3.1.1 AIRE

Como todas las industrias de fundición metalúrgica, el mayor problema ambiental que se puede presentar es la contaminación del aire, ya que se trata de procesos pirometalúrgicos que se realizan a muy altas temperaturas (desde 300 a 1300 °C), lo que provoca reacciones que implican la formación de productos gaseosos y arrastre de partículas sólidas.

Por esta razón, se hace un resumen de las afectaciones potenciales a la atmósfera de cada uno de los equipos de los diferentes procesos que se utilizan para este proceso.

Preparación de materiales

Peletizadora. En esta operación se pueden generar emisiones de humos y polvos que se esparcen en el ambiente de trabajo debido principalmente al manejo de los materiales finos en el momento de realizar la carga y descarga de éstos, así como durante la operación del equipo ya que el movimiento giratorio del equipo provoca emisión de polvos.

Horno de secado. En esta operación debido a las temperaturas que se deben alcanzar se utilizan mezclas de combustibles, por tanto se pueden producir gases de combustión (CO, CO₂, SO_x, etc.) además de arrastre de material particulado.

Como la carga del material es manual y continua; y debido a las características del funcionamiento del horno se pueden escapar emisiones por la tolva de alimentación durante el transcurso de la operación que se esparcen al

ambiente de trabajo. También se pueden escapar gases y polvos por donde está el quemador que produce la flama para calentar los materiales.

Reducción

Horno eléctrico. Esta operación es donde se genera la mayor cantidad de gases (CO , CO_2 y SO_2) aunque, cabe mencionar, que debido al uso de energía eléctrica y a la ausencia de combustibles sólidos los gases que se emiten se limitan a los que produce la operación. Además, se pueden producir emisiones de material particulado (polvos y humos).

Durante la operación pueden existir emisiones de polvo y humos provenientes de la tolva de alimentación cuando se carga el material. Otro punto de escape de emisiones puede ser por la parte superior del horno en donde se sujetan los electrodos y, finalmente, puede haber desprendimiento de humos y vapores al momento de vaciar el metal, la mata de plomo y la escoria del horno.

Los principales eventos que pueden ocasionar emisiones no controladas de gases y partículas sólidas son las siguientes:

- carga de material muy fino y que no esté peletizado
- caída de la carga sólida fría sobre el material fundido
- obstrucción de los conductos de salida de gases del sistema de captación de polvos
- rotura de alguna pared del horno

Refinación

Ollas de refinación. En esta operación se pueden producir gases de combustión debido a que se utilizan combustibles fósiles para calentar y fundir el plomo metálico crudo.

Durante la operación, cuando se agita el plomo fundido se agregan los insumos y se forman las natas, las cuales debido a las altas temperaturas de operación producen humos y vapores que pueden irse al ambiente laboral; de la misma forma cuando se retiran los "drosses" formados, se desprenden humo y vapores mientras se enfrían.

3.1.2 AGUA

El agua utilizada es tanto para uso doméstico como para el proceso por tanto se debe contar con cisternas para almacenar ya sea el agua potable o agua para las distintas operaciones. El agua para uso doméstico se ocupa en oficinas, comedores sanitarios, regaderas, etc. El agua en el proceso se utiliza, principalmente, para el enfriamiento de algunos de los equipos, fragmentación

de la escoria de descarte y, ocasionalmente, lavado de materiales cuando presentan altos contenidos de cloro.

El agua que se usa en el enfriamiento y fragmentación de la escoria de descarte se inyecta a presión cuando se está sacando la escoria del horno. Durante esta operación el agua se puede contaminar con diversas sales de metales pesados, algunos de ellos peligrosos como plomo, antimonio y arsénico. Esta agua posteriormente se recupera mediante un sistema drenaje de recirculación, si no se tiene capacidad de almacenamiento el agua se tiene que descargar al drenaje. Aunque, cabe destacar que antes de desechar el agua, ésta es tratada con cal con el fin de depositar y recolectar las sales presentes para recircularlas al horno eléctrico.

Debido a la recirculación del agua, llega a punto en que el agua se satura de sales metálicas y, por tanto, éstas se empiezan a depositar o incrustar en las tuberías y esto puede provocar fugas de agua por los alcantarillados.

3.1.3 SUELO

El impacto al suelo radica en la disposición en el suelo o a cielo abierto de los materiales e insumos necesarios para las operaciones así como de los residuos (escoria) y producto obtenidos de las distintas operaciones. Los residuos de los procesos generalmente son escorias que, como se comentó, tienen una consistencia vítrea y por tanto son poco lixiviables.

Los transformadores de los hornos eléctricos así como los aceites lubricantes de los equipos si se derraman pueden afectar directamente al suelo, como también es el caso de los tanques de almacenamiento de combustibles, por lo que es necesario entrenar personal para un control adecuado de los hidrocarburos.

Finalmente, la pedacería de plástico que viene junto con la parte fina es separada y enviada a confinar en el basurero municipal, aunque sería conveniente que el municipio contara con un sistema de pirólisis para manejar los plásticos de todo tipo.

3.1.4 CONTROL DE LOS MATERIALES

Almacenamiento

Ya que los desperdicios de acumulador son en su mayoría una mezcla de polvos finos se deben almacenar en lugares adecuados, pues de otra forma pueden existir emisiones de polvos y humos al ambiente de trabajo. Además, puede causar lixiviados en lugares a cielo abierto si no se tiene la infraestructura necesaria para captarlos.

La organización en el almacenamiento de insumos y productos es necesaria para evitar confusiones y dar flexibilidad al proceso y no resulten estorbosas para las actividades del personal y el movimiento de los montacargas. El que exista un adecuado almacenamiento de los productos intermedios depende en gran medida de su inmediata recirculación, ya que la falta de espacio y las características de estos materiales no van a permitir tenerlos almacenados por mucho tiempo.

Finalmente, el almacenamiento de los residuos últimos del proceso es otro punto de afectación importante ya que si quedan expuestos al aire, agua u otros fenómenos atmosféricos se pueden liberar elementos y compuestos potencialmente tóxicos.

3.1.5 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE

El diesel y el combustóleo son los únicos combustibles utilizados en el proceso para calentar la carga en los distintos equipos a fuego directo. Se almacenan en tanques de acero para su distribución. Los tanques están colocados a un costado de los equipos y están rodeados por diques de contención contra derrames.

Los aceites y lubricantes que se utilizan para los equipos auxiliares y transformadores una vez usados se guardan en tambos de acero que son recogidos por una empresa que se encarga de ellos. Estos tambos deben estar bien identificados para evitar riesgos.

3.1.6 SEGURIDAD LABORAL

Debido a la posible emisión de polvos y humos producto de los equipos se debe poner mucho énfasis en la protección de las vías respiratorias del individuo ya que es la principal fuente de entrada de metales tóxicos al cuerpo. Además, como se trata de un proceso de obtención de plomo y debido a la alta toxicidad asociada a este elemento se tiene el riesgo de tener altos niveles del mismo en la sangre. Para cuidar la integridad del trabajador se cuenta con un servicio médico que atiende cualquier tipo de eventualidad que ocurra al obrero durante el turno de trabajo.

Al momento de sangrar¹¹ al horno eléctrico se pueden generar gases calientes, humos y polvos además de desprendimientos violentos de material fundido que se esparcen por todo el lugar e incluso pueden alcanzar a la persona encargada de esta operación.

¹¹ Término metalúrgico para designar el momento de retirar el plomo fundido y otros productos del horno eléctrico

En este tipo de procesos se trabaja con equipos que alcanzan temperaturas muy altas, por tanto, las acciones a tomar en caso de incendio o derrame de material fundido deben ser del dominio común. En este aspecto influye mucho la educación ambiental y la seguridad personal que se le dé al trabajador.

3.2 SISTEMAS DE CONTROL

3.2.1 AIRE

Para el control de las emisiones al aire, los equipos deben contar con un sistema de captación de polvos y en su caso de depuración de gases que sea adecuado a las necesidades que se tengan.

En el caso de los hornos utilizados en el proceso, este sistema consta de una campana de extracción que remueve los gases y polvos que se producen durante la operación y los lleva a una cámara de sedimentación ubicada a un costado del equipo, en el cual el aire caliente junto con los gases de combustión y el polvo arrastrado que provienen del seno del horno al entrar en la cámara sufren una expansión de volumen que ocasiona que pierda velocidad, de esta manera las partículas de mayor tamaño caen por efecto de la gravedad de donde posteriormente se recolectan para recircularlos al proceso. Luego, el aire pasa a un serpentín en donde se enfrían para no ocasionar problemas en la casa de bolsas. En este equipo también se recuperan partículas que caen por gravedad al chocar con las paredes del equipo.

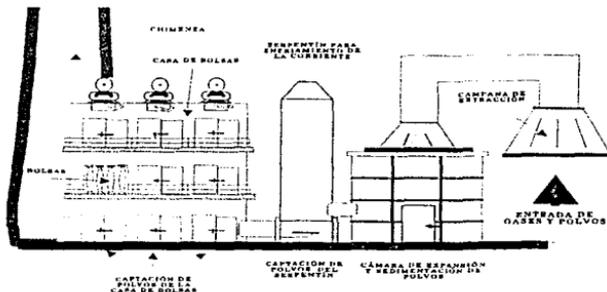
Una vez fríos, los gases deben pasar por una casa de bolsas donde quedan atrapados los polvos y humos de tamaño de partícula más fino mediante unas bolsas o sacos de nylon, este equipo tiene una alta eficiencia para la retención de estas partículas (Gill, 1989). Finalmente, una chimenea expulsa los gases ya depurados de humos y polvos a la atmósfera, esta chimenea debe contar con puertos de muestreo de acuerdo a las normas que posteriormente se explicarán. La figura 5 muestra el esquema de un sistema de captación de polvos (Aguilera, 1996).

A continuación se presenta un análisis de cada uno de los sistemas de control con los que debe contar cada equipo del proceso para tener el máximo control de emisiones ya sea a la atmósfera o al ambiente laboral.

Preparación de materiales

Peletizadora. Para la captación de los polvos y humos que se puedan producir en este equipo se debe contar con una campana de extracción que cubra toda la parte superior del equipo y se mantenga funcionando durante toda la operación. Esta campana debe estar conectada a una casa de bolsas para captar y recuperar los polvos.

FIGURA 6 SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA



Horno de secado. Para el control de las posibles emisiones en este equipo se debe instalar el sistema de captación de polvos antes mencionado, y en su caso adaptar un "scrubber" para eliminar lo mas posible la emisión de bióxido de azufre. También se debe colocar una campana de extracción que capte todas las emisiones que puedan producirse debido a la alimentación de la carga.

Reducción

Horno eléctrico. El horno eléctrico debe ubicarse dentro de una nave que esté cerrada por completo y que tenga en la parte superior un extractor que se utilice en caso de haber una emisión de polvos y gases no controlada y que finalmente vaya a conectarse a un sistema de captación de polvos.

En el horno eléctrico, para la recuperación de polvos, se debe tener el sistema de captación de polvos completo anteriormente descrito. Además, se debe contar con una campana de extracción que cubra la zona donde se encuentra la piqueta del horno para captar las emisiones que se puedan producir de la descarga de los materiales fundidos y otro extractor en la parte superior para captar los polvos y humos producto de la carga del material y posibles emisiones que escapen por donde se encuentran los electrodos. Además, esta operación puede provocar productos gaseosos tóxicos como es el bióxido de azufre por lo que se requiere la instalación de un "Scrubber", para la depuración de los gases de salida antes de vertirse por la chimenea a la atmósfera.

Refinación

Ollas de refinación. Las ollas de refinación se calientan por medio de quemadores que utilizan diesel y se encuentran en la parte inferior de las mismas. Por tanto, es posible que los gases de combustión salgan directo al ambiente de trabajo. Para evitar este tipo de emisiones se necesita una campana de extracción que cubra toda la olla y ayude a controlar los desprendimientos de vapores de las natas de refinación.

De la misma forma se debe contar con unas bodegas especiales y ventiladas donde poner las natas fundidas para su enfriamiento y captación de los vapores que se puedan producir.

En el cuadro 9 se muestra el resumen de los aparatos de captación de polvos y depuración de gases propuestos para lograr controlar las emisiones que producen cada uno de los equipos del proceso.

Cuadro 9. Resumen de los sistemas de control atmosférico propuestos.

EQUIPO	SISTEMA DE CONTROL	COMENTARIO
Peletizadora	Campana de extracción	Por las características del proceso solo se necesita la campana para captar los gases y polvos. La campana deberá estar conectada a una casa de bolsas.
Horno de secado	Sistema de captación y depuración de gases completo	Para un mejor control se debe tener el sistema de control atmosférico completo.
Horno eléctrico	Sistema de captación y depuración de gases completo	El horno eléctrico es el equipo que puede producir las mayores afectaciones por tanto su control debe ser estricto.
Ollas de refinación	Campana de extracción	La campana debe cubrir toda la olla durante el tiempo que dure el proceso y debe estar conectada a una casa de bolsas.

Acciones para el control atmosférico

Las acciones que se deben tomar para el control y minimización de la contaminación del aire de este proceso así como el análisis de los equipos de captación de polvos y depuración de gases, implican una serie de planes que incluyan la evaluación experimental y monitoreo frecuente del impacto

producido por estos equipos. Con la aplicación de estas evaluaciones en fuentes fijas se puede saber qué tan efectivos son los aparatos de captación de polvos que se usan y en caso de tener deficiencias realizar las correspondientes acciones preventivas y correctivas. Por tanto, para obtener información confiable que permita evaluar el funcionamiento de los equipos, se deben contemplar las siguientes acciones:

- 1) elección de metales trazadores.
- 2) balance de materia en los equipos de proceso.
- 3) evaluación de emisiones en fuentes fijas.

El cuadro 10 muestra una relación de las acciones que se deben tomar en cada uno de los equipo para estudiar su posible afectación al aire.

Cuadro 10. Relación de acciones para el control atmosférico propuestos.

EQUIPO	ACCIÓN	COMENTARIO
Peletizadora	evaluación de emisiones	Los monitoreos a fuentes fijas son necesarios para saber la cantidad de partículas sólidas emitidas, el balance de materia no es necesario por las características de la operación.
Horno de secado	evaluación de emisiones	Los monitoreos se deben enfocar a la cantidad de gases de combustión y partículas sólidas emitidas, debido al uso de combustibles fósiles.
Horno eléctrico	evaluación de emisiones y balance de materia	Los monitoreos se deben enfocar a la cantidad de gases de combustión, en especial de SO ₂ y partículas sólidas emitidas. El balance de materia es necesario para estudiar que cantidad de metales trazadores se está emitiendo al ambiente, además ayuda a evaluar la eficiencia del proceso.
Ollas de refinación	evaluación de emisiones	Los monitoreos son necesario para saber la cantidad de partículas emitidas al ambiente laboral.

Elección de metales potencialmente tóxicos (trazadores)

Uno de los propósitos del análisis de las reacciones químicas realizado anteriormente es el de seleccionar los elementos que por su concentración y características de toxicidad pueden representar un riesgo al ambiente y a la

población y con ello poder determinar la fase en la que cada uno de ellos se concentra (metal, escoria o polvo). De esta forma, se pueden tomar las medidas de control apropiadas para disminuir la afectación que estos contaminantes pueden causar. A estos elementos elegidos se les denominó "metales trazadores". Así, de acuerdo a las operaciones metalúrgica utilizadas, se deben escoger los elementos que puedan producir mayor afectación.

En el caso del horno eléctrico el seguimiento de los metales trazadores también ayuda en la propuesta del balance de materia que se verá posteriormente. El cuadro 11 muestra los elementos trazadores que producen mayor afectación debido a la cantidad en que se encuentran en las materia primas y se anexan algunos comentarios ambientales básicos.

Una vez identificados los elementos trazadores se debe realizar un balance de materia al horno de arco eléctrico que junto con los respectivos monitores a fuentes fijas nos van a permitir conocer experimentalmente el comportamiento de estos metales trazadores.

Balace de Materia

La importancia de instrumentar un balance de materia en el horno de arco eléctrico radica en la veracidad de los datos que se obtienen que nos permiten conocer la capacidad de producción de la planta, obtener la eficiencia del horno y los sistemas de control atmosférico. Además permite conocer la cantidad y composición de las partículas metálicas y productos gaseosos que se arrojan a la atmósfera.

Como se mencionó el horno de arco eléctrico es el equipo más adecuado para realizar el balance de materia ya que es donde se trabaja a mas altas temperaturas, mayor cantidad de materias primas y por tanto la emisión de gases y material particulado es considerable.

De esta forma, el balance de materia se debe llevar tomando en cuenta los pasos que se observan en el cuadro 12.

Evaluación de emisiones de fuentes fijas.

En lo que respecta a control de la contaminación de aire, se debe instrumentar un plan de evaluación de emisiones por fuentes fijas, el cual incluirá un estudio isocinético y de material particulado para conocer qué tipo de partículas se están escapando a la atmósfera y en qué cantidad. Estos monitoreos conviene se hagan cada determinado tiempo y por ningún motivo se dejen de realizar.

Estos monitoreos en fuentes fijas tienen como objetivos los siguientes tópicos:

1. Apoyar el balance de materia anteriormente descrito.
2. Evaluar experimentalmente las emisiones de gases, polvos y humos que se vierten a la atmósfera producto de los distintos equipos de proceso.

Para realizar la evaluación de emisiones de fuentes fijas se debe tener un parámetro de comparación y seguir los procedimientos establecidos en la normatividad mexicana vigente, la cual comprende las siguientes Normas Oficiales Mexicanas:

NOM-AA-09-1993. *"Determinación del flujo de gases en un conducto por medio del tubo pitot"*. Esta norma establece el método para determinar el flujo de gases en un conducto por medio del tubo pitot. El método es aplicable para velocidades de gases superiores a 3 m/s y conductos con diámetros iguales o mayores a 10 cm. En esta norma se establecen los fundamentos básicos referentes a los cálculos matemáticos para obtener el flujo de gas, campo de aplicación, recomendaciones y restricciones del equipo utilizado así como el procedimiento que se debe aplicar en la medición.

NOM-AA-10-1980. *"Determinación de partículas sólidas en los gases que se descargan por un conducto"*. Esta norma establece el método para determinar por captación la emisión de partículas sólidas contenidas en los gases que fluyen por un conducto. En ella se da una descripción de los aparatos y equipos que se deben utilizar, el procedimiento que se debe llevar a cabo el cual incluye el tiempo total de muestreo y una explicación del montaje del tren de muestreo, la ejecución de la muestra, recomendaciones para la recolección de muestras y finalmente los cálculos matemáticos para determinar el peso total de las partículas.

NOM-AA-35-1976. *"Determinación del bióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O₂) en los gases de combustión"*. Esta norma establece el método para determinar por absorción las proporciones de CO₂, CO y O₂ contenidos en los gases de combustión utilizando una solución de hidróxido de potasio para el CO₂, una solución de ácido pirogálico para el O₂ y una solución de cloruro cuproso para el CO, así como los procedimientos que se pueden utilizar para su cuantificación.

Cuadro 11 Información ambiental básica sobre los elementos trazadores del proceso de HAE.

ELEMENTOS TRAZADORES	INFORMACIÓN AMBIENTAL BÁSICA
1) Plomo (Pb)	<p>Es el elemento que se encuentra en mayor concentración en las materias primas. Debido al bajo punto de fusión, es un elemento volátil y sumamente tóxico. Las exposiciones de plomo ocurren frecuentemente por respiración de polvos o aire en el trabajo. El plomo está asociado al daño del sistema nervioso, el sistema inmunológico y riñones. Además, en personas adultas el plomo puede causar anemia o desórdenes peligrosos en la sangre (ATSDR /A, 1993). La NOM-10-STPS-1994 establece un máximo permisible de 0.15 mg/m³ de plomo como polvo inorgánico, humos y polvos con tiempo de exposición de 8 horas. Además, si un trabajador tiene niveles de plomo en la sangre de 40µg/dL la OSHA¹² recomienda que el trabajador sea removido del lugar de trabajo ya sea por algún tiempo o exista una rotación de actividades para que el trabajador no se exponga durante mucho tiempo a niveles altos de metales tóxicos.</p>
2) Arsénico (As)	<p>Es un elemento que se presenta como impureza en los desperdicios de batería. El arsénico es muy volátil y la mayor parte se capta en la casa de bolsa o escapa a la atmósfera por medio de las chimeneas. El arsénico inorgánico es más tóxico que el orgánico. Los trabajadores de fundiciones así como la gente que vive a los alrededores de plantas están expuestos a niveles altos de arsénico. La inhalación de polvos y humos de arsénico inorgánico produce la aparición de manchas en la piel y su ingestión está asociada al incremento de cáncer en el cuerpo, especialmente en riñones y pulmones (ATSDR /B, 1989). La NOM-10-STPS-1994 establece un máximo permisible de 0.2 mg/m³ de arsénico como arsénico soluble con tiempo de exposición de 8 horas. La OSHA ha establecido un máximo permisible de exposición en el aire de 0.010 mg/m³ de arsénico inorgánico en lugares donde se trabaje con arsénico.</p>

¹² OSHA siglas de "The Occupational Safety and Health Administration"

Continuación cuadro 11.

ELEMENTOS TRAZADORES	INFORMACIÓN AMBIENTAL BÁSICA
3) Antimonio (Sb)	<p>Es un elemento que se presenta junto con los desperdicios de batería y es uno de los principales subproductos. Se escogió este elemento debido a que se presenta en cantidad considerable. La mayoría del antimonio se disuelve en el plomo fundido, pero otra parte se volatiliza junto con el plomo y arsénico. En el aire, el antimonio es asociado a pequeñas partículas que pueden quedarse en el aire por muchos días producto de las emanaciones en la industria. Respirar grandes cantidades de antimonio por mucho tiempo puede causar irritación en los ojos, puede causar problemas en pulmones, corazón y estómago (ATSDR /C. 1995). La NOM-10-STPS-1994 establece un máximo permisible de 0.5 mg/m³ como antimonio y compuestos, con tiempo de exposición de 8 horas. La OSHA recomienda un límite de exposición de 0.5 mg/m³ de antimonio para un día de trabajo de 8 horas.</p>
4) Azufre (S)	<p>Es un elemento que se presenta químicamente combinado con el plomo (PbSO₄), la mayoría del azufre sale a la atmósfera en forma de gases de bióxido de azufre (SO₂). Se escogió este elemento debido a que es uno de los principales contaminantes gaseosos del aire. Algunas veces se puede formar SO₃ que al reaccionar con el agua produce ácido sulfúrico el cual corroe los equipos. Los óxidos de azufre pueden inhibir el crecimiento de las plantas e incluso ser letales a alguna de ellas. Exposiciones prolongadas a bióxido de azufre producen irritación de la garganta, ojos y tos. Se desconoce actualmente qué efectos ocasionan a largo plazo las concentraciones bajas de este gas en los seres humanos (Mahahan, 1991). La NOM-10-STPS-1994 establece un máximo permisible de 5 mg/m³ de bióxido de azufre con un tiempo de exposición de 8 horas.</p>

Cuadro 12. Consideraciones para la realización de un balance de materia en el proceso de HAE.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
1.- Acondicionar los equipo a los que se les realizará el balance de materia.	Se debe verificar que el equipo en cuestión se encuentre vacío antes de empezar a realizar la carga del material, el hecho de que haya material dentro del equipo puede quitar veracidad al balance de materia. Si debido a las características del proceso no es posible mantener al equipo vacío, se deben tener en cuenta las consideraciones necesarias para llevar a cabo en forma correcta la operación. Asimismo, los sistemas de captación de polvos y humos también deben estar totalmente vacíos.
2.- Elegir un lote de desperdicios de batería.	El lote no debe contener trozos de plomo metálico o pedacería de plástico. Para facilitar el balance, el lote puede contener todas las materias primas que reciban en un determinado día o mes.
3.- Pesar todas las materias primas e insumos rigurosamente antes de ser cargados al equipo.	Se deberá pesar el material, separando el peso de las materias primas y cada uno de los insumos agregados (evitar en lo posible los pesos aproximados). Esta información puede ayudar posteriormente a conocer la cantidad óptima de materiales e insumos con el fin de lograr un ahorro de recursos y volver más eficiente el proceso.
4.- Realizar un análisis a detalle de la composición del material de entrada.	Tiene por objeto el conocer de manera exacta los diferentes elementos que se alimentan así como la cantidad en que se encuentran. Por tanto, el muestreo del material deberá ser altamente representativo y en caso de juntarse con otros lotes tomar las consideraciones estadísticas necesarias para lograr una muestra totalmente representativa.

Continuación cuadro 12.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
5.- Realizar un estudio isocinético y de material particulado a fuentes fijas	Estos monitoreos son importantes para realizar el balance de materia ya que se puede saber qué cantidad de material se escapa de los aparatos de control atmosférico y de qué elementos se trata principalmente. También se pueden obtener datos que ayuden a evaluar la eficiencia de los equipos de control atmosférico.
6.- Pesar y analizar la composición de todos los productos finales e intermedios obtenidos.	Se deberán pesar por separado todos los productos que se obtengan (plomo crudo, mata de sulfuros, escorias y polvos y humos). Además de mandarlos a analizar al laboratorio para conocer su composición.
7.- Llevar un registro computarizado del peso tanto del material de carga como de los productos obtenidos.	El registro debe estar guardado en una computadora para conservar los datos y evitar las confusiones que se presentan cuando se lleva una bitácora a mano (letra poco legible, pérdida de hojas, etc.) y de esta forma facilitar los cálculos matemáticos del balance de materia.
8.- Llevar un seguimiento o control estricto de los elementos traza escogidos.	Cada operación tiene elementos trazadores que fueron escogidos debido a la características propias de cada proceso. Por tanto se deben considerar de manera especial los análisis de laboratorio que impliquen estos metales.
9.- Realizar los cálculos matemáticos respectivos para obtener datos e interpretarlos con las consideraciones necesarias.	El paso más importante es la interpretación de todos los datos obtenidos, por medio de cálculos matemáticos y consideraciones observadas a lo largo del proceso.

NOM-AA-54-1978. *"Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto"*. Esta norma establece el método gravimétrico para determinar la humedad contenida en los gases que fluyen por un conducto. Se basa en el pesado del agua obtenida por la condensación y adsorción del vapor de agua contenido en la corriente gaseosa para ello se pueden utilizar dos sustancias adsorbentes: cloruro de calcio anhidro o gel de sílice, como sustancias refrigerantes se puede utilizar agua, hielo ó amoníaco. Finalmente se explica el procedimiento de muestreo y el método de cálculo para obtener los resultados.

NOM-AA-55-1979. *"Determinación de bióxido de azufre (SO₂) en los gases que fluyen por un conducto"*. Esta norma establece el procedimiento para la determinación de la concentración y de la emisión de bióxido de azufre en gases que fluyen a través de un conducto. Para la determinación se extrae una muestra proporcional de los gases y se absorbe el SO₂ en una disolución de peróxido de hidrógeno, separando previamente las neblinas de ácido sulfúrico y trióxido de azufre. El SO₂ se cuantifica por titulación con perclorato o cloruro de bario y con el volumen de muestra se determina su concentración, este dato junto con el gasto volumétrico proporciona la cantidad de emisión de SO₂.

Estas evaluaciones se aplicarán a los equipos según las normas **NOM 043 ECOL-1993** y **NOM 085 ECOL-1994** que actualmente rigen a este tipo de equipos. Sin embargo, debido a la carencia de normatividad actual en esta área se recomienda apoyar esta evaluación en metodologías y técnicas de otros países con mas experiencia en el área.

3.2.2 AGUA

Para el control del agua tanto de proceso como de uso doméstico se debe contar con varias cisternas de almacenamiento, además de tanques elevados. La capacidad de almacenamiento total de agua potable debe ser la suficiente para lo que requiera la planta. Es decir, se debe considerar el agua utilizada para fragmentación de la escoria, agua para lavado de material en general la de proceso y el agua de uso doméstico (sanitario, oficinas, etc.).

Se debe implementar un registro separado del agua que se utiliza para el servicio doméstico y la que se usa en el proceso para con eso, realizar las medidas de prevención adecuadas.

En el caso del agua de proceso se deben tener filtros prensa para recuperar muchas de las sales que se arrastran en ella. Posteriormente, el agua se neutralizará con cal para precipitar las sales metálicas que aún se encuentren en solución. Todas las sales precipitadas se pueden volver a recircular al horno. Una vez depuradas las aguas se pueden mandar a una cisterna especial de almacenamiento para después ser regresadas al proceso por medio de un

sistema de drenaje de recirculación y con esto evitar lo mas posible las descargas al drenaje municipal. Esta acción también ayuda a evitar la incrustación y depositación de sales en el alcantarillado evitando que las tuberías se tapen y provoquen fugas de agua.

Finalmente, se deben tener contadores de agua en los puntos críticos a lo largo del sistema de drenaje para poder evaluar las pérdidas de agua por evaporación y fugas. Además, permite el control y racionalización del agua para evitar gastos innecesarios de ésta.

Para la recolección de agua se debe contar con dos sistemas de drenaje y alcantarillado: el de aguas negras y el de agua pluvial. La red de drenaje de aguas negras está distribuida para captar el agua de las diferentes áreas de la empresa y llevarlas a un colector común. Las áreas más importantes son: las de oficinas generales, sanitarias y de procesos. Para captar los escurrimientos debido a la lluvia se tiene el drenaje de agua pluvial así como los lixiviados que produzcan los materiales que estén dispuestos en el suelo.

3.2.3 SUELO

Como se comentó anteriormente, la contaminación del suelo no representa un problema serio, por esto se puede lograr un control óptimo mediante la aplicación de las propuestas que se presentan en el cuadro 13.

Cuadro 13. Propuestas para el control de la contaminación del suelo.

PROPUESTA	COMENTARIO
Construcción pisos y patios.	Asegura que los distintos materiales queden en zonas adecuadas según sus características y evite que se encuentren a la intemperie. Por tanto, reduce en gran medida el riesgo de contaminación del suelo dentro de las instalaciones ya que evita la percolación de sales de metales y se elimina el arrastre de polvos por fenómenos atmosféricos.
Construcción de una Bodega	Se pueden aislar todos los productos de las operaciones sin que algún fenómeno meteorológico provoque algún accidente. Se reduce el impacto negativo al suelo.
Realización de un estudio general del suelo	Se conoce experimentalmente el impacto producido por las actividades de la empresa al suelo. Ayuda en la instrumentación de un plan de acondicionamiento de zonas afectadas.

La construcción de una bodega especial para el almacenamiento de los materiales y productos de las operaciones metalúrgicas es necesaria. En esta obra se tendrá la infraestructura necesaria para captar lixiviados producto del agua, así como las respectivas señalizaciones y separación adecuadas de todos los materiales de acuerdo a sus características físicas. La bodega debe estar cerrada para evitar que el viento provoque el arrastre de polvos de humo y se debe contar con un extractor que permita la circulación de aire fresco dentro de la instalación.

El residuo final debe ser guardado en patios con piso con la infraestructura adecuada para su disposición durante el tiempo que sea necesario, ya que existen compañías que aprovechan este residuo para elaborar sus productos.

3.2.4 CONTROL DE LOS MATERIALES

Almacenamiento

Para el almacenamiento de las materias primas se debe usar la nave que encierra al horno eléctrico y en este lugar realizar la separación de la pedacería de plástico. Los otros materiales e insumos pueden ser almacenados en un área junto a los desperdicios de acumulador.

Los productos intermedios se deben almacenar en lugares fijos y determinados hasta que se decida volver a recircularlos al proceso. El almacenamiento adecuado de productos intermedios depende en gran medida de su inmediata recirculación, ya que si no hay el espacio suficiente en las diferentes áreas del proceso no se puede tenerlos almacenados por mucho tiempo

Registro y movimiento de materiales

El control y registro de materiales y productos está a cargo de cada departamento. A cada uno de ellos llegan materias primas o productos intermedios, los cuales son registrados como entradas; asimismo se registran la cantidad de productos que se obtienen y el destino de los mismos, de esta forma se lleva un inventario de las existencias.

Cada departamento debe elaborar un balance mensual aproximado de las entradas y salidas de los materiales. Estos reportes se pasan a la gerencia para elaborar el balance general de materiales. Estos informes deben presentar la cantidad de material, el contenido de plomo y los análisis químicos respectivos.

La instrumentación de medidas de control ayuda a superar problemas que se pueden presentar como la falta de espacio y la seguridad. Además se puede

generar información respecto a la capacidad de reciclaje de la planta, ya que se tienen datos del consumo de materias primas, productos, residuos, consumibles, etc. Finalmente, las acciones para obtener el control total de este rubro comprende las siguientes medidas que se muestran en el cuadro 14.

3.2.5 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES

Los tanques de combustible deben estar rodeados por un dique de contención contra derrames. Esta barda protegerá en caso de cualquier eventualidad como rotura y derrame de combustible evitando que se esparzan en el suelo.

La colocación de contadores de combustible en cada uno de los tanques es necesaria para poder llevar un registro de la cantidad de combustible que se está utilizando, de esta forma se facilita el control y racionalización del consumo de éste lo que puede llevar a un ahorro del consumo de energía.

El combustible debe contener lo menos posible de azufre, para evitar la generación de bióxido de azufre, por tanto se debe exigir al distribuidor que la calidad del combustible sea la indicada.

3.2.6 SEGURIDAD LABORAL

El control que se tiene para la seguridad laboral debe abarcar ciertos puntos importantes que son mencionados en el siguiente cuadro 15.

Cuadro 14. Propuestas para el control del almacenaje y movimiento de materiales.

ÁREA	PROPUESTA	COMENTARIO
Almacenamiento	Organizar el almacenaje de productos finales, intermedios y residuos sistematizando su colecta. Colocar los materiales en cajones o bodegas diseñadas para ello.	Aumenta la velocidad en el manejo de los materiales, control de los mismos, seguridad y da una imagen positiva a la empresa. Reduce los puntos de afectación.
	Señalizar y delimitar las áreas de almacenamiento.	Agiliza su transporte y almacenamiento. Se tiene un control más adecuado del proceso.
	Evitar almacenar productos finales e intermedios por periodos muy largos.	Evita que se acumulen a granel y se vuelvan estorbosos para los trabajadores. Reduce los puntos de afectación. La operación de manejo de los materiales se vuelve más rápida y segura.
	Organizar el área de almacenaje de materias primas e insumos.	Agiliza su movimiento. Permite el control sobre destino y uso de los mismos. Mejora el aspecto de las instalaciones.
	Identificar contenedores metálicos o de cualquier material con etiquetas sobre su contenido además de mantenerlos cerrados.	Facilita la identificación de residuos o materiales. Disminuye riesgos en la empresa y aumenta el control ambiental

Continuación cuadro 14.

ÁREA	PROPUESTA	COMENTARIO
Movimiento	Establecer un sistema de captura y manejo de información: bitácoras, registros y bases de datos computarizados.	Facilita el movimiento de materiales y se puede controlar las entradas y salidas de productos. Ayuda a tener una mejor comunicación y un mismo formato de entregas entre los diferentes departamentos. Facilita la evaluación de consumo de materias primas, insumos, consumibles, cantidad de residuos esperados, etc. Ayuda a la creación de un balance de materia.
	Realizar un sistema de pesaje de materiales más confiable.	Se controla mejor la cantidad de productos y residuos obtenidos. Permite obtener datos seguros para realizar un balance de materia.
	Capacitar individuos a fin de capturar los datos de manera clara y ordenada.	Facilita el registro de los datos de producción. Evita confusiones en la realización de un balance de materia.

Cuadro 15. Propuestas para aumentar la seguridad laboral

RUBRO	PROPUESTA	COMENTARIO
Instalaciones	Eliminar los materiales y objetos en desuso, ubicando los objetos de limpieza en sitios especiales.	Aumenta la seguridad y disminuye el nivel de riesgo.
	Pintar con colores específicos las tuberías de combustible, aire, agua y electricidad.	Facilita el mantenimiento y propicia un mejor uso.
	Instalar tomas de agua para sistemas contra incendio	Disminuye riesgos y proporciona protección en caso de cualquier eventualidad. Mejora el aspecto de la empresa.
	Señalizar las rutas de escape, posición de los extinguidores, baños, comedores, etc.	Aumenta la seguridad del trabajador y el aspecto de la empresa.
	Construir un murete de protección en la zona de descarga de los hornos de fundición.	Disminuye el riesgo para los obreros, vehículos, etc.
Laboral	Realizar un estudio sonométrico.	Se evalúa el nivel de ruido y protege al trabajador por lesiones auditivas en el momento o mentales a largo plazo. Aumenta la seguridad.

Continuación cuadro 15.

RUBRO	PROPUESTA	COMENTARIO
Laboral (continuación)	Vigilar el uso de equipos de protección personal como son cascos, guantes, botas, peto y mascarillas antipolvo	Mejora el nivel de seguridad y disminuye accidentes.
	Tener disponible equipo de seguridad para visitantes.	Reduce la responsabilidad de la empresa en caso de accidentes y mejora su imagen.
	Prohibir cascos de vidrio u objetos diversos en las zonas de trabajo.	Representan un riesgo para el personal y visitantes y da un mal aspecto a las instalaciones de la empresa.
	Crear una serie de bitácoras de registro médico con el propósito de tener el historial médico de cada trabajador y poder realizar una rotación de los obreros para evitar altas exposiciones de plomo.	Ayuda a llevar estadísticas que permitan realizar estudios con el fin de prevenir intoxicaciones del personal.
Educación ambiental	Establecer un programa de capacitación y educación ambiental para todos los niveles.	Con la participación y colaboración de todos los integrantes de la empresa. Con esto se puede lograr una concientización en el cuidado del ambiente; del equipo de trabajo e instalaciones.
	Concientizar al trabajador en aspectos referentes a la higiene personal y limpieza de lugares comunes.	Reduce riesgos en cuanto a enfermedades. Crea hábitos de higiene personal en el individuo como por ejemplo: el lavado periódico de prendas de protección y la ducha al final de cada turno.

3.3 NORMATIVIDAD APLICABLE AL PROCESO

En materia de protección al ambiente, se deben tomar medidas para tener un control adecuado, por lo cual se practican análisis CRETIB¹³ a las materias primas que compra y residuos que genera; al mismo tiempo se han adoptado monitores anuales en algunas fuentes fijas y se han buscado usos alternativos a los residuos que generan.

En México, se tienen ciertas normas que deben cumplir este tipo de industrias aunque muchas veces existan dudas en su aplicación a los distintos equipos. De esta forma, se han elegido las normas que se adapten mejor a las características de las emisiones de los equipos.

3.3.1 AIRE

Para el control de las emisiones de los equipos al aire el Instituto Nacional de Ecología requiere que se cumpla con ciertas normas de acuerdo a las operaciones que se realizan. Las dos Normas Oficiales Mexicanas aplicadas son:

NOM 043-ECOL-1993. Esta norma establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.

NOM 085-ECOL-1994. Se aplica a fuentes fijas que utilizan combustibles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Además, los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión. Así como los niveles máximos permisibles de emisión de dióxido de azufre de los equipos de calentamiento directo por combustión.

El cuadro 16 muestra una relación de los equipos que se tienen y la Norma Oficial Mexicana que contempla su buen funcionamiento (Aguilera, *op.cit.*).

¹³ Análisis CRETIB: Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Biológico Infeccioso.

Estas normas son las más recomendables para la prevención de la contaminación atmosférica.

Cuadro 16 Normas Oficiales Mexicanas aplicables al proceso

EQUIPO	NORMA	CONTAMINANTE
Peletizadora	NOM-043-ECOL/1993	Partículas
Horno de secado	NOM 085-ECOL/1994 para el resto del país	CO, CO ₂ , SO ₂ , PST ¹⁴ y % de exceso de aire
Horno eléctrico	NOM 085-ECOL/1994 para el resto del país	CO, CO ₂ , SO ₂ , PST y % de exceso de aire
Ollas de refinación	NOM 085-ECOL/1994 para el resto del país	CO, CO ₂ , SO ₂ , PST y % de exceso de aire

3.3.2 AGUA

Para el agua de proceso no se aplica ninguna norma, ya que se cuenta con un sistema de drenaje cerrado y las descargas al drenaje municipal son esporádicas. Como se explicó, las cantidades de agua utilizadas en el proceso son mínimas y se quedan en el drenaje de recirculación. Aún así, en caso de enviar agua al drenaje municipal se tienen los tratamiento de agua ya mencionados para su depuración.

Finalmente, cualquier descarga realizada al drenaje municipal debe cumplir con las normas correspondientes. En este caso se aplica la siguiente norma:

NOM-001-ECOL-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en agua y bienes nacionales.

3.3.3 DESECHOS SÓLIDOS

El residuo final del proceso es la escoria de descarte. A este residuo se le practica un análisis CRETIB de acuerdo a la NOM-053-ECOL-1993, la cual establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso.

¹⁴ PST: Partículas sólidas totales.

En el cuadro 17 se muestra el análisis CRETIB de la escoria de descarte que como se explicó la cantidad producida en la operación es mínima.

Cuadro 17. Análisis CRETIB de la escoria de descarte de un proceso de HAE comparado con los límites establecidos por la NOM-052-ECOL-1993.

ELEMENTO	RESULTADO (mg/L) ¹⁵	LÍMITE (mg/L)
As	< 0.02	5.0
Ba	0.3	100.0
Cd	< 0.004	1.0
Cromo hexavalente	< 0.007	5.0
Hg	< 0.0001	0.2
Ni	< 0.32	5.0
Ag	< 0.001	5.0
Pb	< 0.004	5.0
Se	< 0.05	1.0

Los límites de referencia son los establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM 052-ECOL-1993 que establece características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso. Como se puede observar en el cuadro 10, la escoria de descarte no excede los límites de referencia, por lo que se puede considerar como un residuo no tóxico.

¹⁵ Estos resultados son los análisis de la escoria de descarte y fueron proporcionados por los laboratorios de la empresa.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La tecnología de recuperación de plomo de los desperdicios de acumulador en horno de arco eléctrico resulta ser eficiente para la recuperación de este metal. Además, el equipo es altamente flexible para procesar cualquier otro tipo de residuos que contengan plomo e incluso residuos de otros metales no ferrosos.
- La operación del horno de arco eléctrico no es complicada y presenta la ventaja de ser la operación menos contaminante de la atmósfera, ya que debido a la ausencia de combustibles fósiles para calentar la carga, los gases de combustión se limitan a los que se forman producto de los materiales e insumos que se agregan al horno. Además, el horno eléctrico presenta la ventaja de tener la mayor eficiencia en el consumo de energía.
- El plomo se encuentra entre los metales no ferrosos que más se reciclan en el mundo. Su producción secundaria ha ido creciendo de manera continua e incluso ha sobrepasado a la que proviene de la producción minera, lo que refleja las condiciones económicas favorables asociadas con esta actividad. Por esto el reciclaje del plomo a partir de acumuladores debe adquirir importancia en nuestro país y con esto eliminar el problema ambiental que representa el confinamiento de estos materiales.
- La gran cantidad de acumuladores usados en países del primer mundo como es el caso de EUA y el Canadá aunado a las altas exigencias en materia de control ambiental han desestimulado esta práctica en estos países (Greenpeace, 1994). Sin embargo, la instalación de una planta recicladora en México bajo un estricto control ambiental puede ser factible si se cumplen todos los requisitos exigidos; para que de esta forma se apoye la creación de fuentes de trabajo, se elimine el problema de la disposición de los acumuladores y se impulse este sector industrial.
- El punto de mayor afectación es el aire debido a las características propias de la naturaleza de la operación ya que implica procesos que se llevan a cabo a muy altas temperaturas y por ende existe el riesgo de que se produzcan emisiones de polvo y gas que se vierten a la atmósfera a pesar de los sistemas de captación de polvos.

- Se recomienda que el equipo sea automatizado por completo incluyendo desde la mecanización del manejo de los materiales de plomo hasta el control de los parámetros de operación por medio de un cuarto de control. Evitando en lo posible el contacto del trabajador con los polvos de plomo.
- Se recomienda un mantenimiento constante de los sistemas de captación de polvos y la constante remoción de los polvos de las casas de bolsa. Además de la instalación de lavadores de tipo Venturi para la depuración casi total de los gases antes de ser enviados a una chimenea para su dispersión.
- Se recomienda la instrumentación de un balance de materia en cada uno de los equipos de proceso así como monitoreos constantes a fuentes fijas que tengan el propósito de proporcionar información que ayude a conocer la eficiencia de los sistemas de control ambiental. Además de permitir conocer la cantidad y composición de las partículas metálicas que escapan de los sistemas de control.
- Se recomienda mojar la parte fina de los desperdicios de acumulador durante su almacenamiento con el objeto de prevenir altos niveles de formación de polvos de plomo.

La información y criterios establecidos en esta tesis pueden ayudar a las autoridades al establecimiento de políticas acordes con el crecimiento de este tipo de industria. De esta forma, se pueden proponer soluciones factibles dentro de plazos y condiciones tangibles para que las empresas interesadas en este tipo de industria empiecen a tomar acciones de control en un entorno legal previsible y no se detenga su crecimiento. Así como la aplicación de la normatividad vigente a los equipos de proceso y minimizar al máximo las emisiones tóxicas de este tipo de industria.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera Ávalos Gamaliel. 1996. Comunicación personal. Gerencia de control de calidad y cumplimiento ambiental. Metales Potosí, S.A. de C.V.
- Albert Lilia A. 1985. Curso de toxicología ambiental. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (INIREB), Capítulo 10. Plomo.
- ASTM, American Society for Testing Materials. Non ferrous metal products, Vol. 02.04, 1986.
- ATSDR /A , Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 1993. Public Health Statement. "Lead". Servicio de Internet.
- ATSDR /B , Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 1989. Public Health Statement. "Arsenic". Servicio de Internet.
- ATSDR /C , Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 1995. Public Health Statement. "Antimony". Servicio de Internet. USA.
- Avila Cervera Jorge. 1979. Recuperación de plomo de placas de acumulador en horno rotatorio (tesis de licenciatura). Facultad de Química. UNAM.
- Barry B.T.K., Thwaites C.J. 1983. Tin and its alloys and compound. John Wiley and Sons.
- Biswas A.K., Davenport W.G. 1993. El cobre: Metalurgia extractiva. Limusa. México D.F.
- Chaussin C., Hilly G. 1975. Metalurgia Tomo II: Elaboración de los metales. Urmo S.A. de editores, España.
- Chow T.J. and C.C. Patterson. 1962. The occurrence and significance of lead isotopes in pelagic sediments, Geochim. cosmochim.
- Davey T.R.A./ A. 1980. " Advances in lead, zinc and tin technology - projection for the 1980's ". Lead - Zinc - Tin '80. TMS - AIME world symposium on metallurgy and environmental control. Las Vegas, Nevada. USA. Ed. Cigan John, Mackey Thomas, O'keefe Thomas.

Davey T.R.A./B. 1980. "The physical chemistry of lead refining". Lead - Zinc - Tin '80, TMS - AIME world symposium on metallurgy and environmental control. Las Vegas, Nevada, USA. Ed. Cigan John, Mackey Thomas, O'keefe Thomas.

Delgado Francisco. 1996. Comunicación personal. Encargado de la refinación de plomo. Metales Potosí, S.A. de C.V.

Eby Don., 1990. "Electric arc smelting at RSR corporation ". Lead - Zinc '90, Mackey Thomas S., R.D. Prengman editores. TMS publications.

Emicke K., Holzappel G., Kniprath E., 1970. "Lead refinery and auxiliary by - products recoveries at Norddeutsche Affinerie ". AIME world symposium of mining and metallurgy of lead and zinc, Vol II. Cotterill Carl, Cigan John editores.

EST, Encyclopedia of Science and Technology Mc Graw Hill. 1992. Vol. 9. "Lead Metallurgy". USA.

Fernández Gutierrez Everardo. 1996. Comunicación personal. Gerente de tecnología. Metales Potosí, S.A. de C.V.

Forrest H., Wilson J.D., 1990. "Lead recycling utilising short rotatory furnaces ". Lead - Zinc'90, Mackey Thomas S., Prengaman David, editores. TMS Publications.

Gilchrist J.D. 1980. Extractive metallurgy, Pergamon press. England.

Gill Burroughs. 1989. Metalurgia extractiva no ferrosa. Primera edición. LIMUSA.

Goldstein G.W., 1990. Lead poisoning and brain cell function. Environmental Health Perspectives 89: 91-94

Goyer R.A. 1986. "Toxic effects of metals". In Casarett and Doulls toxicology. The basic science of poisons. London.

Greenpeace Report. 1994. Lead Astray. The poisonous lead battery waste trade. Greenpeace Editors and Researchers. Greenpeace USA.

Hancock G.C., Hart D.H., Pelton L.A.H., 1970. "Lead smelting and refining and slag fuming at the broken hill associated smelters PTY.LTD. ". AIME world symposium of mining and metallurgy of lead and zinc, Vol II. Cotterill Carl H., Cigan john editores.

Hofmann W. 1970. Lead and lead alloys: Properties and technology. England.

Hunt W.F., C. Pinkerton, Mc Nulty O., Creason J.P. 1971. A study in trace elements pollution of air in seventy seven midwestern cities. pp. 56-68. University of Missouri: Press.

INE; Instituto Nacional de Ecología. 1996. Programa de gestión ambiental de sustancias tóxicas de atención prioritaria.

INE.DGRA.DEA. Documentos de trabajo 1995 y 1966.

INE-LAFQA-MEPOSA. 1996.

Joffré Juan. 1982. Manual de operaciones. Metales Potosí S.A. de C.V.

Johnstone R.T. 1964. "Clinical inorganic lead intoxication" Arch. Environ. Health. 8: 250-255.

LIA, Lead Industries Associatio. 1980. Modern uses of lead in the construction industry. USA.

Manahan S. 1991. Environmental chemistry. Lewis publishers. USA.

Matyas A.G., Mackey P.J. 1976. Journal Metallurgy. Vol. 28. No. 11

Medina Tristán Iván. 1985. Anteproyecto para la instalación de una planta fundidora de plomo de baterías (tesis de licenciatura). Facultad de Química. UNAM..

Meposa. 1996. Inédito. Documentos de trabajo de metales potosinos, San Luis Potosí, S.L.P. México.

Meposa-2. 1982. Inédito. Manuales de refinación de plomo, San Luis Potosí, S.L.P. México.

Moore J. and Ramamoorthy S. 1984. Heavy metals in natural waters springer-verlag, New York.

NAS, National Academy of Science. Lead airborne lead in perspective. Washington D.C., 1972.

OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development. 1995. International Workshop on Waste Minimisation. Waste stream case study. Lead-acid batteries. Washington, D.C.

Patterson C.C. 1965. "Contaminated and natural lead environmental of man " Arch. Environ. Health, 11: 344 - 365.

Pehlke Robert. 1982. Unit process of extractive metallurgy. Elsevier North holland publishing company. USA.

Pickles G.A., Toguri J.M., 1991. " An improved pyrometallurgical method for the recovery of lead from battery residue ". Residuos and effluents - processing and environmental considerations. TMM Publications.

PUMA, Programa Universitario del Medio Ambiente. 1996. Los residuos peligrosos en México. México D.F.

Reynolds R.M., Hudson E.K., Olper M. 1990. " Advances in lead - acid battery recycling: engiter's automated Cx breaker system ". Lead - Zinc '90. Mackey Thomas S., R.D. Prengman editores. TMS publications.

Sallmen M., Lindbohm M., Anttila A., Taskinen H. and Hemminkik. 1992. "Paternal occupational lead exposure and congenital malformations". Journal of Epidemiology and community health. 46:519-522.

Senarnap-Camimex, Secretaria del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca - Camara Minera Mexicana. 1996. Lo que usted debe saber sobre el plomo.

Snyder Robert. 1973. A study of environmental pollution by lead. National Technical Information Service (NTIS).

Suganuma T. Melenka R. 1970. "The Mitsubishi-Cominco lead smelter". Lead and zinc. Vol. II: Extractive metallurgy of lead and zinc. USA.

Swaine D.J. and R.L. Mitchell. 1960. "Trade elements distribution in soil profiles. J. Soil Sci. 11: 347 - 368.

Torres Reyes A., Szczygiel Jordanes Z. 1984. Metallurgia no ferrosa. Primera edición. LIMUSA.

Terkel Rosenqvist. 1993 Principles of extractive metallurgy. Second edition. Mac Graw Hill international editions.

Willis G.M., 1980. "The physical chemistry of lead extraction" . Lead - Zinc - Tin '80. TMS - AIME world symposium on metallurgy and environmental control ". Las Vegas, Nevada USA. Ed Cigan John, Mackey Thomas, O'keefe Thomas.

Wilson, D.N., 1990. "Recycling of lead". In recycling of Metalliferous Materials. Institute for Mining and Metallurgy, London.

World Health Organisation (WHO). 1983. Reports and Studies No. 22., Review of potentially harmful substance - cadmium, lead and tin, GESAMP, Geneva.