

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA ECONOMICA Y CIENCIAS SOCIALES**



**“CAMBIO TECNICO EN PROCESAMIENTO DE MINERALES Y  
METALURGIA EXTRACTIVA Y SUS IMPLICANCIAS PARA EL  
CONTROL AMBIENTAL EN PAISES EN DESARROLLO: LOS  
CASOS DEL COBRE, PLOMO Y ZINC”**

**INFORME DE INGENIERIA**

**PARA OPTAR EL TITULO DE:  
INGENIERO ECONOMISTA**

**ÁNGEL ALFREDO NÚÑEZ BARRIGA**

**Lima - Perú  
Diciembre 1998**

***A mis padres...***

## INDICE GENERAL

	Pag
<b>1. CURRICULUM VITAE</b>	<b>01</b>
I. Datos personales	02
II. Estudios superiores	02
II. Especialización profesional	02
VI. Experiencia profesional no docente	03
V. Principales talleres, conferencias y seminarios	10
VI. Experiencia profesional docente	11
VII Documentos de trabajo y publicaciones	11
VIII Idiomas	14
IX. Otras habilidades	14
X Asociaciones profesionales a las que pertenece	14
<b>2. INFORME DE INGENIERIA PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO ECONOMISTA</b>	<b>15</b>
Resumen	19
I. Objetivos y antecedentes	22
II. Producción de metales no ferrosos, cambio técnico y medio ambiente	22
A. El caso de la concentración de minerales por flotación	24
B. El caso de la Fundición Primaria	33
B1. Fundición de Cobre	33
B2. Fundición de Plomo y Fundición de Zinc	53
III. Conclusiones	68
Bibliografía	74
Apéndice	77

## **1. CURRICULUM VITAE**

# 1. CURRICULUM VITAE

## ÁNGEL ALFREDO NÚÑEZ BARRIGA

### I. DATOS PERSONALES

Fecha de Nacimiento	2 de Agosto de 1947
Nacionalidad	Peruano
Libreta Electoral	No. 07832207
Dirección	Recavarren 630, Miraflores, Lima 18.
Teléfono	(51-1)-4-453074
E-mail	nunezbaa@rcp.amauta.net.pe

### II. ESTUDIOS SUPERIORES

- **Master (MPhil) en Estudios del Desarrollo** en la **Universidad de Sussex** de Inglaterra. De Setiembre de 1973 a Junio de 1976. Las principales áreas de estudio cubiertas por este programa fueron: teoría del desarrollo económico, economía internacional, aspectos sociopolíticos relacionados con estas áreas.

- **Estudiante Investigador (Research Student)** en la **Division de Estudios de Desarrollo** de la **Universidad de Sussex**. A tiempo completo, de Octubre de 1976 a Setiembre de 1978. El trabajo se focalizó sobre el tema de **Grupos empresariales y el Estado** en el **Desarrollo tecnológico** con especial referencia al caso del sector **minero-metalúrgico peruano**.

- **Diploma de Especialización en Planificación de Recursos Humanos**. **Escuela de Administración Pública (ESAP)**. Lima, Perú. De Setiembre 1971 a Marzo 1972.

- **Bachiller en Ciencias en Ingeniería Económica**, **Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)**, Lima, Perú. De 1965 a Agosto 1971.

### III. ESPECIALIZACIÓN PROFESIONAL

**Desarrollo Económico, Medio Ambiente, y Cambio Tecnológico.**

**Experiencia académica específica sobre Medio Ambiente:**

- **Profesor de Valuación Económica Ambiental** del Programa de **Maestría en Gerencia Ambiental** de la **Facultad de Ingeniería Ambiental** de la **Universidad Nacional de Ingeniería**, desde Octubre de 1996 al presente.

- **Profesor Visitante** en la **Universidad Católica del Perú (PUCP)** para desarrollar investigación sobre **Gerencia Ambiental** en la industria minera peruana. De Mayo de 1992 a Marzo de 1994. (Detalle en punto IV.)

**Investigador Visitante (Visiting Fellow) en el Programa de Medio Ambiente del IDS de la Universidad de Sussex, Inglaterra. De Enero 1991 a Diciembre 1991. (Detalle en punto IV.)**

#### **IV. EXPERIENCIA PROFESIONAL NO DOCENTE**

**De Abril 1997 a la fecha (Octubre 1998)**

**Consultor contratado por empresa consultora brasilera PRODEC Consultoría para Decisao, para formar parte equipo profesional en los siguientes estudios:**

**Estudio de Factibilidad y de Impacto Ambiental de las carreteras Chanchamayo - Villa Rica y Tingo María - Pucallpa. Contrato suscrito por PRODEC con el Programa Especial de Rehabilitación de Transportes (PERT) del Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción (MTC), financiado con fondos del Banco Mundial. Iniciado en Julio de 1998 y en actual desarrollo.**

**Contratado como Jefe de Proyecto y por tanto responsable del estudio en su conjunto. El estudio, que se encuentra en actual desarrollo, involucra la determinación de alternativas de solución para la rehabilitación de las vías referidas, que sean técnica y económicamente factibles y ambientalmente sustentables. Las vías corresponden en su más amplia parte a la Carretera Marginal; sus respectivas zonas de influencia involucran áreas de la selva alta y de la selva baja con ecosistemas frágiles pero al mismo tiempo con potencialidad económica, por lo que los estudios de impacto ambiental revisten una particular importancia. El equipo que dirige es multidisciplinario, incluyendo especialistas de ingeniería (vg. topografía, geología, hidrología, diseño vial), tráfico, medio ambiente (vg. biólogo, historiador) y economía de transportes. Su tarea es la de asegurar que la interacción interdisciplinaria sea constructiva, conducente a establecer todos los beneficios y costos sociales asociados a las alternativas analizadas. El Estudio de Impacto Ambiental requiere el seguimiento de la normatividad ambiental vigente y de las guías ambientales del sector, mientras que el Estudio de Factibilidad involucra el uso del programa HDM desarrollado por el Banco.**

**Estudio de Factibilidad y de Impacto Ambiental de la carretera Ayacucho - Abancay. Contrato suscrito por PRODEC con el Programa Especial de Rehabilitación de Transportes (PERT) del Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción (MTC), financiado con fondos del Banco Interamericano de Desarrollo. Desarrollado entre Noviembre de 1997 y Marzo de 1998, en actual revisión del informe final.**

**El suscrito fue contratado como coordinador del Estudio de Factibilidad y corresponsable del Estudio de Impacto Ambiental.**

**El marco general es similar al del estudio anterior. En este caso la vía forma parte de la Carretera Longitudinal de la Sierra y el área de influencia directa**

comprende zonas de puna y profundos valles interandinos de los departamentos de Ayacucho y Apurímac.

**Estudio de Factibilidad y de Impacto Ambiental de las carreteras Juliaca-Azángaro y Caminaca - Putina - Ananea.** Contrato suscrito por PRODEC con el Programa Especial de Rehabilitación de Transportes (PERT) del Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción (MTC), financiado con fondos del Banco Interamericano de Desarrollo. Desarrollado entre Noviembre de 1997 y Marzo de 1998, en actual proceso de revisión del informe final.

El suscrito fue contratado como corresponsable del Estudio de Impacto Ambiental. Su labor consistió en coordinar la labor del equipo multidisciplinario y de desarrollar la dimensión del ambiente socio-económico, para arribar a la elaboración de un Plan de Manejo Ambiental, que incluía el establecimiento de los costos de mitigación ambiental para ser incluidos en el respectivo presupuesto de obra.

El área de estudio está localizada íntegramente en el Departamento de Puno, comprende zonas del altiplano y de puna, con proyecciones a la selva alta. Incluye áreas próximas a la Reserva Nacional del Lago Titicaca, lo que le otorga relevancia particular a la dimensión biológica del Estudio de Impacto Ambiental.

- **Estudio de Impacto Ambiental para la Rehabilitación de la Carretera Arequipa - Juliaca, tramo Arequipa - Yura.** Componente de los Estudios Definitivos para esta rehabilitación. Contrato suscrito por PRODEC con el Programa Especial de Rehabilitación de Transportes (PERT) del Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción (MTC), financiado con fondos del Banco Interamericano de Desarrollo. Desarrollado entre Abril y Agosto de 1997.

El suscrito fue contratado como corresponsable del Estudio de Impacto Ambiental. En este sentido coordinó el trabajo del equipo multidisciplinario para la determinación de la línea base ambiental y el establecimiento del respectivo Plan de Manejo Ambiental. En forma particular desarrolló la dimensión humana del EIA, incluyendo los aspectos socio-económicos del mismo.

Este estudio se diferencia de los otros EIA citados anteriormente en que involucra fundamentalmente a un área urbana importante como la de Arequipa. En realidad, de los poco más de 17 Km que recorre la vía del estudio, 10 Km corresponden al área que en la última década ha absorbido el mayor flujo migrante a la ciudad y que se prevé continúenlo haciendo por las próximas dos décadas. Por tanto, en este caso la ambientación urbana del proyecto en el contexto particular de la expresión arquitectónica de Arequipa, así como de las características socio-económicas de la población involucrada tuvieron un peso importante en el desarrollo del estudio.

**Junio 1997 - Julio 1997**

**Estudio de Caso de Transferencia de Tecnología y Difusión de Tecnología Limpia: La Tecnología BIOX en la Mina Tamboraque en el Perú.**

El suscrito fue contratado como consultor por la Universidad de Bath de Inglaterra, para el desarrollo del caso de estudio, como parte de la investigación que realiza la Red Internacional de Investigación de Minería y Medio Ambiente, a la cuál pertenece. Esta red es centralmente coordinada desde la Escuela de Negocios de dicha universidad.

El objetivo del estudio fue el de determinar cómo es que la tecnología BIOX, que consiste en la aplicación de lixiviación bacteriana a minerales marginales de oro, llega a una empresa relativamente pequeña en el Perú. La propietaria de la patente respectiva es la empresa sudafricana Gencor que participa con su tecnología en diversas partes del mundo.

La investigación requirió además de la necesaria revisión bibliográfica la realización de entrevistas detalladas con los responsables de las empresas implicadas. El resultado del trabajo relievra el rol importante jugado por la capacidad tecnológica doméstica en la búsqueda e identificación de la tecnología requerida en el mercado mundial. En el presente caso, la participación de las empresas públicas y de los programas de cooperación técnica internacional al nivel del Pacto Andino, fueron base importante en la formación de las capacidades domésticas mencionadas. Asimismo, se observa que la motivación primigenia para la transferencia de tecnología fue la de solucionar un problema de producción y no la preocupación por alcanzar un nivel superior en el control ambiental en la operación.

**Enero 1997 - Abril 1997**

**Contratado para desarrollar el Estudio de Impacto Ambiental para la Rehabilitación de los Caminos Rurales llave - Pharata - Sta. Rosa y Pomata - Huacullani, como parte del equipo profesional de consultoría dirigido por el Ing. Carlos Núñez, quién obtuvo la buena pro para realizar el Estudio de Factibilidad y de Impacto Ambiental de las vías referidas del Programa de Rehabilitación de Caminos Rurales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.**

Este programa está dirigido particularmente a contribuir a la disminución de los índices de pobreza en el país, a través de la mejor conectividad de áreas con altos niveles de estos índices, con sus mercados actuales ó potenciales. Asimismo, persigue la más amplia participación posible de las comunidades directamente beneficiarias en las tareas de rehabilitación y en las de mantenimiento de las vías de tal manera contribuir a la oferta de trabajo en el área. Con este mismo propósito en las tareas de rehabilitación se busca aplicar fundamentalmente soluciones técnicas que no precisen de personal altamente calificado ni que sean intensivas en capital. Además, estas soluciones deben ser ambientalmente sostenibles, ejemplos de las cuales son presentadas en el manual ambiental para caminos rurales publicado por el MTC,



**Abril 1994 a Noviembre 1995**

**Coordinador de Medio Ambiente del Proyecto EMTAL (Banco Mundial - Gobierno Peruano / Ministerio de Energía y Minas, MEM).**

El Proyecto EMTAL (Energy and Mining Technical Assistance Loan) financiado por el Banco Mundial, está dirigido al reforzamiento institucional del Sector Energía y Minas en el actual proceso de reformas estructurales. Consta de cuatro componentes que son Minería, Energía, Sistemas de Información y Medio Ambiente. El componente de Medio Ambiente, para cuya labor de coordinación fue contratado el suscrito, tiene como tareas centrales las siguientes: 1) desarrollar un marco regulatorio ambiental para las actividades minero-metalúrgicas y energéticas en el país; 2) elaborar y difundir guías ambientales de operación para cada sub sector (vg. minería, hidrocarburos, electricidad) como apoyo a las empresas para el cumplimiento de aquel marco regulatorio; 3) desarrollo de un conocimiento preciso del impacto de las actividades del sector en el medio ambiente que permita identificar y priorizar los problemas ambientales (vg. establecer un mapa ambiental del sector); 4) desarrollar una conciencia ambiental en el sector y áreas de influencia; 5) reestructurar la organización para el control ambiental del sector y reforzarla para que esté en capacidad de cumplir con los mandatos de la nueva normativa ambiental a través de la capacitación de los recursos humanos y equipamiento.

La labor de coordinación consistió fundamentalmente en: 1) trabajo conjunto con la Dirección General de Asuntos Ambientales (DGAA) para diseñar el programa de actividades del Proyecto dentro el marco del Plan Maestro Ambiental del sector, definir términos de referencia para la búsqueda y contratación de la capacidad consultora internacional y local requerida, así como realizar el seguimiento y control del desarrollo técnico de la actividad consultora; 2) tramitación de la documentación para obtener las No Objeciones del Banco Mundial a la contratación de consultores (vg. establecimiento de ternas de consultores, realización de concursos de empresas, etc.) y de los pagos correspondientes; 3) control presupuestario y del cronograma del Proyecto; y 4) participación en actividades relacionadas al planeamiento estratégico del sector en el ámbito de medio ambiente. Los avances del proyecto han sido presentados en forma detallada y periódica por la Coordinación a la Alta Dirección del MEM y al Banco mundial.

**Abril 1992 a Marzo de 1994**

**Desarrollo del Estudio de Caso Perú, dentro de la Red de Investigación sobre Minería y Medio Ambiente (Mining and Environment Research Network, MERN) coordinada centralmente por el Science Policy Research Unit (SPRU) de la Universidad de Sussex de Inglaterra".**

El suscrito fue contratado para desarrollar esta investigación por el SPRU, con el apoyo de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP, Lima), donde fue nombrado Profesor Visitante. Los recursos del proyecto fueron administrados por el Instituto de Salud Popular (INSAP, Lima). El título de la

investigación fue: "Gerencia Ambiental en una Industria Minera Heterogénea: El caso del Perú".

**Enero 1991 a Diciembre 1991 (Brighton, Inglaterra)**

**Investigador Visitante (Visiting Fellow) en el Programa de Medio Ambiente del Institute of Development Studies (IDS) de la Universidad de Sussex, Inglaterra**

Esta visita permitió al suscrito revisar información actualizada sobre el área de medio ambiente en general, y sobre medio ambiente y minería en particular, y participar activamente en seminarios tanto en el Institute of Development Studies como en los del Science Policy Research Unit que también está situado en el mismo campus universitario. También participó regularmente en los seminarios sobre cambio técnico organizados por el SPRU, dado su particular interés por la conexión entre éste y el Medio Ambiente.

Como resultado de su estadía como Investigador Visitante, el suscrito produjo los documentos de trabajo ("working papers") respectivos que son citados en el acápite VII.

**Octubre 1990 a Diciembre 1990**

**Trabajo Preliminar sobre Minería y Medio Ambiente en el Perú.**

Este trabajo tuvo por objeto el levantamiento de información fundamental sobre este tópico para la elaboración de una propuesta detallada de investigación dentro del marco de un Proyecto de Colaboración Internacional, coordinado centralmente por el Science Policy Research Unit de la Universidad de Sussex. La Junta del Acuerdo de Cartagena otorgó el apoyo institucional al suscrito para la realización de esta tarea y aceptó la invitación para integrarse a la red a través de su Programa Andino de Minería (PAM).

El desarrollo de esta labor involucró la visita a alrededor de veinte entidades, entre entidades públicas del sector minero-metalúrgico, entidades relacionadas con la política del medio ambiente y los recursos naturales, entidades académicas, y empresas productoras y consultoras mineras. La información obtenida sirvió de base para la elaboración de la correspondiente propuesta en la segunda etapa del proceso colaborativo, desarrollada por el suscrito como investigador visitante (Visiting Fellow) invitado por el Institute of Development Studies de la Universidad de Sussex en Inglaterra.

**Abril 1988 a Julio 1988**

Contratado como consultor por la Junta del Acuerdo de Cartagena para la elaboración de un "Inventario de Proyectos y Generación de una Base de Datos para el Sector Minero-Metalúrgico Andino". Este trabajo fue

desarrollado dentro del marco del Programa Minero-Metalúrgico Andino del Departamento de Tecnología de la JUNAC.

Este trabajo desarrolló un sistema de información compuesto por tres bases de datos: una de proyectos, otra de firmas, y una tercera de unidades productivas. Sin embargo, el énfasis fundamental fue otorgado al levantamiento de información de proyectos minero-metalúrgicos. Los principales bloques de información definidos por este trabajo fueron los siguientes: a) Información general del Proyecto (vg. localización, tamaño, propiedad, tipo de operación, productos mineros, etc.); b) recursos mineros y producción; c) información tecnológica (vg. procesos y métodos de producción), información económica y de financiamiento (vg. requerimientos de inversión, mano de obra, y estructura financiera), e información relacionada con los cronogramas y los eventuales problemas que estos pudieran estar enfrentando.

Para recoger la información correspondiente se diseñaron cuestionarios ad hoc. La información preliminar provino de un trabajo detallado en centros de información especializada, y la información definitiva la recogió el suscrito a través de un trabajo de campo en los cinco países de la sub-región. La segunda de estas etapas involucró visitas a más de sesenta instituciones y entrevistas con más de ochenta funcionarios relacionadas con el sector minero-metalúrgico en los Países Andinos.

#### Diciembre 1986 (La Paz, Bolivia)

Contratado como consultor por el International Development Research Centre (IDRC), de Canadá, para formar parte de un equipo de trabajo, en La Paz, integrado por profesionales bolivianos del Centro de Estudios Minería y Desarrollo (CEMYD), para elaborar una propuesta de investigación para determinar las fundamentales causas de la crisis de la Corporación Minera Boliviana (COMIBOL) sobre cuya base se recomendaría un plan de acción. En los dos años siguientes el suscrito fué invitado para participar en los seminarios de presentación de los avances de investigación en La Paz.

#### Febrero a Marzo de 1985

El suscrito, bajo los requerimientos de la Jefatura del Departamento de Tecnología de la JUNAC, produjo una propuesta para la estructuración del Programa Minero-Metalurgico Andino. El título de esta propuesta fué: "Algunas Sugerencias para el Desarrollo del Programa Minero Metalurgico Andino, JUNAC/GTZ 1985-1987" (Marzo 1985, 28pp.)

#### Durante los años 1984, 1985 y 1986

Con el apoyo institucional del Departamento de Tecnología de la Junta del Acuerdo de Cartagena, y particularmente del PMMA, el suscrito diseñó y aplicó dos diferentes sondeos ó levantamientos de información a través de encuestas

y entrevistas, para evaluar el cambio técnico en el sector minero-metalúrgico.

El primer sondeo estuvo dirigido a personas claves en el mundo empresarial y en la actividad académica relacionada con la actividad minero-metalúrgica, con el propósito de recoger opiniones sobre el proceso de cambio técnico y los principales agentes de este último. Esta labor fué llevada a cabo durante 1984. Bajo los requerimientos de la Jefatura del Departamento de Tecnología el suscrito adaptó los cuestionarios para que fueran aplicados en los otros Países Andinos. La JUNAC a través de consultores nacionales aplicó estas encuestas a Bolivia y Colombia.

El segundo tipo de sondeo consistió en la aplicación de tanto cuestionarios como entrevistas, y estuvo dirigido a una amplia muestra de unidades productivas de la gran minería, de la mediana minería, y algunas de las mas organizadas de la pequeña minería. El propósito fundamental fué recoger información in situ de la historia tecnológica de las unidades productivas y firmas, que permitieran explicar cómo se lograron desarrollar las presentes capacidades tecnológicas. Este sondeo fué aplicado entre Octubre de 1985 y Marzo de 1986, con el apoyo financiero de la JUNAC.

#### **Julio a Noviembre de 1983**

Contratado como consultor por la Junta del Acuerdo de Cartagena para integrar un grupo interdisciplinario para elaborar Informes Nacionales sobre los sectores **Minero-Metalúrgicos** de los Países Andinos. Estos estudios sirvieron de base para la elaboración de una propuesta de un programa de cooperación sub-regional en el sector, que finalmente se transformó en el Programa Minero-Metalúrgico Andino (PMMA). Estas actividades contaron con el apoyo de la GTZ de Alemania.

#### **Mayo 1979 a Octubre de 1980 (Brighton, Inglaterra)**

Contratado por el Science Policy Research Unit (SPRU), de la Universidad de Sussex en Inglaterra, para trabajar en el proyecto: "UNITAR Project on the Future". El desarrollo de este proyecto fue realizado por encargo de Naciones Unidas al SPRU. El objetivo general de este trabajo fué investigar las conexiones entre patrones de consumo, distribución del ingreso y elección tecnológica, usando un modelo basado en Matrices de Contabilidad Social para poder simular cambios en estas variables. Aunque la investigación dividía a la economía mundial en seis diferentes regiones de acuerdo al nivel de desarrollo, tipo de sistema económico y si era o no país petrolero importante, el estudio puso énfasis central en los países considerados por Naciones Unidas como "Los Menos Desarrollados" (The Least Developed Countries). Fue precisamente en esta área que el suscrito trabajó, examinando las alternativas tecnológicas para la producción de productos para la satisfacción de "necesidades básicas" (vg. alimentación, vestido y vivienda barata), trabajando para ello en base a "estudios de caso". El producto de este trabajo sirvió tanto de control sobre la información obtenida a un altísimo nivel de agregación,

como es el de las Matrices de Contabilidad Social, como para dar luces sobre la real disponibilidad de alternativas tecnológicas para los países en referencia, que sólo podrían ser observadas a un nivel micro.

El resultado de este trabajo esta expresado en dos Documentos de Trabajo (Working Papers) co-producidos por el suscrito y son referidos en la sección VII.

#### **Abril 1972 a Marzo 1973**

Participación como economista analista en el estudio sobre las "Necesidades y Demanda de Vivienda en el Area Afectada por el terremoto de 1970 en el Perú". Proyecto financiado por la Agencia Interamericana de Desarrollo, desarrollado por Manseriche S.A. y Administrado por la ex-CRYRZA. Lima, Perú.

#### **V. PRINCIPALES TALLERES, CONFERENCIAS Y SEMINARIOS EN QUE HA PARTICIPADO / ASISTIDO EN LOS DOS ÚLTIMOS AÑOS**

- Conference on Development, Environment and Mining: Enhancing the Contribution of the Mineral Industry to Sustainable Development, Washington, EUA, del 1 al 3 de Junio de 1994. Auspiciado por el BIRF, PNUMA, UNCTAD Y ICME.
- Seminario de Políticas y Procedimientos de Adquisiones en Proyectos del Banco Mundial, organizado por la Oficina Regional de Latinoamérica y del Caribe del Banco Mundial y el Ministerio de Economía y Finanzas en Lima, del 6 al 9 de Junio de 1994.
- International Conference on Resources, Risks, and Responsibility, Sonoma, California, EUA, del 4 al 7 de Marzo de 1995. Organizada por el Mining and Environment Información Centre y el Minerals Economic Department del Colorado School of Mines
- Fourth Workshop of the Mining and Environment Research Network (MERN), Sonoma, California, EUA, del 7 al 8 de Diciembre de 1994.
- Seminario Taller sobre Estudios de Impacto Ambiental y Programas de de Adecuación y Manejo Ambiental para el Sub Sector Hidrocarburos, en Lima del 27 al 29 de Abril de 1995. Organizado por el MEM/DGAA/EMTAL.
- Seminario Taller sobre Estudios de Impacto Ambiental y Programas de de Adecuación y Manejo Ambiental para Actividades Minero-Metalúrgicas, en Lima del 18 al 20 de Mayo de 1995. Organizado por el MEM/DGAA/EMTAL.

## **VI. EXPERIENCIA PROFESIONAL DOCENTE**

**Desde Octubre de 1996 a la fecha**

**Profesor de Valuación Económica Ambiental del Programa de Maestría en Gerencia Ambiental de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería.**

**Mayo 1992 a Marzo 1994**

**Profesor Visitante de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) adscrito a la Facultad de Ciencias e Ingeniería, para trabajar en el área de Minería y Medio Ambiente.**

**Mayo a Junio 1990**

**Contratado por el Banco Industrial del Perú para dictar un ciclo de conferencias, para su personal profesional sobre "El cambio tecnológico y el momento actual". Estas focalizaron su atención en la presente revolución tecnológica y sus implicancias para los procesos de desarrollo en los Países del Tercer Mundo.**

**Años 1988 a 1990**

**Durante este período el suscrito fué Profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería Económica y Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Durante este tiempo tuvo a su cargo el curso de Procesos y Desarrollo Tecnológico y el Taller de Tecnología e Industrialización.**

**Los tópicos cubiertos por estas responsabilidades docentes fueron los siguientes: teoría económica y cambio técnico, mercado de tecnología, propiedad intelectual, elección técnica, actividades tradicionales y nuevas tecnologías, bienes de capital y cambio técnico.**

## **VII. DOCUMENTOS DE TRABAJO Y PUBLICACIONES**

**- Estudio de Impacto Ambiental para la Rehabilitación de los Caminos Rurales Ilave - Pharata - Santa Rosa y Pomata - Huacullani**  
**Responsable del Estudio, el cual fue encargado al Consultor Carlos Núñez por el PERT, Ministerio de Transportes, Vivienda y Construcción. Enero - Abril 1997.**

**- Estudio de Factibilidad y de Impacto Ambiental de las carreteras Juliaca - Azángaro y Caminaca - Putina - Ananea**  
**Corresponsable del Estudio de Impacto Ambiental, el cual fue encargado a PRODEC Consultoría por el PERT Ministerio de Transportes, Vivienda y Construcción. Octubre 1997 - Marzo 1998.**

**Estudio de Factibilidad y de Impacto Ambiental de la carretera Ayacucho - Abancay**

Corresponsable del Estudio de Impacto Ambiental, el cual fue encargado a PRODEC Consultoría por el PERT Ministerio de Transportes, Vivienda y Construcción. Noviembre 1997 - Abril 1998.

**- Estudio de Impacto Ambiental de la Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Arequipa - Juliaca, tramo Arequipa - Yura**

Corresponsable del Estudio de Impacto Ambiental el cual fue encargado a PRODEC Consultoría por el PERT Ministerio de Transportes, Vivienda y Construcción. Abril - Agosto 1997.

**Estudio de Caso de Transferencia de Tecnología y Difusión de Tecnología Limpia: La tecnología BIOX en la Mina Tamboraque en el Perú**  
Contratado por la Universidad de Bath, Inglaterra como parte de la Investigación que realiza la Red Internacional de Investigación de Minería y Medio Ambiente a la cual pertenece el suscrito. Esta Red es centralmente coordinada desde la Escuela de Negocios de dicha universidad. Junio - Julio 1997.

**- Privatization, Mining Growth And Environmental Policy In Peru In The 1990's.**

Presentado al Fourth Workshop of the Mining and Environment Research Network at Sonoma, California, EUA en Diciembre de 1994. Publicado en el MERN Bulletin N°7, Winter 1994-95, pp.21-23, Universidad de Bath, Inglaterra.

**- Environmental Management in a Heterogeneous Mining Industry: The Case of Peru.**

Estudio elaborado dentro del marco del proyecto internacional de investigación colaborativa en Gerencia Ambiental en Minería y Procesamiento de Minerales, de la Mining and Environment Research Network (MERN, SPRU of the University of Sussex), INSAP y PUCP. Lima, Febrero de 1994.

**- Comentarios sobre la Revision del Plan de Estudios de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú.**

Documento producido como Profesor Visitante de la PUCP. Diciembre de 1993, (24 pp).

**- Technical Change in Mineral Processing and Extractive Metallurgy and its Implications for Environmental Control in Developing Countries: The Cases of Copper, Zinc and Lead**

Documento de Trabajo producido como Investigador Visitante en el Institute of Development Studies de la Universidad de Sussex, Inglaterra. Octubre de 1991.

**- Some Ideas for Setting up and Information and Communication Network for Research and a prospective Generation of a specialized Information System on Mining and Environment**

Documento de Trabajo producido como Investigador Visitante en el Institute of Development Studies, Universidad de Sussex, y presentado al Workshop on Environmental Degradation from Mining and Mineral Processing in Developing Countries: Challenges for Sustainable Development, organizado por el Science Policy Research Unit en Wiston House, Steyning, Sussex, Inglaterra, del 10 al 13 de Abril de 1992.

**- Heterogeneity of Mining and Domestic Technological Capabilities in Mining and related Productive and Service activities in Perú: Their relevance for an Environmental Strategy (A research Proposal)**

Documento de Trabajo producido como Investigador Visitante en el Institute of Development Studies, Universidad de Sussex, y presentado al Workshop on Environmental Degradation from Mining and Mineral Processing in Developing Countries: Challenges for Sustainable Development, organizado por el Science Policy Research Unit, en Wiston House, Steyning, Sussex, Inglaterra, del 10 al 13 de Abril de 1991.

**- Heterogeneity of Mining Production and Development of Domestic Capabilities: Their relevance for an Environmental Strategy in mineral producing Developing Countries**

Documento de Trabajo producido como Investigador Visitante en el Institute of Development Studies, Universidad de Sussex, Inglaterra.  
Marzo, 1991.

**- Inventario de Proyectos y Generación de una Base de Datos Minero-Metalúrgica Andina**

Programa Minero-Metalúrgico Andino, Departamento de Tecnología, Junta del Acuerdo de Cartagena, Lima, Marzo de 1989.

**- Algunas Sugerencias para el Desarrollo del Programa Minero-Metalúrgico Andino, JUNAC/GTZ 1985-1987**

Departamento de Tecnología, Junta del Acuerdo de Cartagena, Lima, Marzo de 1985.

**- El Sector Minero Metalúrgico en los Países Andinos: Informes Nacionales: Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela.**

Departamento de Tecnología, Junta del Acuerdo de Cartagena, Lima, Diciembre de 1983.

**-Basic Needs Technology: A starting Point for a Macro-economic evaluation**

(En co-autoría con Sam Cole). UNITAR Project on the Future. Working Paper. Science Policy Research Unit, University of Sussex, England, Marzo de 1981.



**-The choice of technique: Towards an Integrated Approach**

(En co-autoría con Howard Rush). UNITAR Project on the Future. Working Paper. Science Policy Research Unit, Universidad de Sussex, Inglaterra. Enero, 1980.

**-Los Recursos Humanos en el Sector Público Peruano**

Escuela Superior de Administración Pública (ESAP), Lima, Perú, 1973.

**VIII. IDIOMAS**

**Castellano:** Lee bien, habla bien, escribe bien.

**Inglés :** Lee bien, habla bien, escribe bien.

**Francés:** Lee bien, habla limitadamente.

**Portugués:** Lee bien

**IX. OTRAS HABILIDADES**

Manejo de microcomputadoras (DOS/Windows) para uso de Procesador de Textos, Hojas de Cálculo y Bases de Datos.

**X. ASOCIACIONES PROFESIONALES A LAS QUE PERTENECE**

Miembro e investigador de la Red Internacional de Investigación sobre Minería y Medio Ambiente (Mining and Environment Research Network, MERN), que es al presente centralmente coordinada desde el International Centre for the Environment, School of Management en la Universidad de Bath, Inglaterra. El suscrito participa activamente en los Workshops que anualmente organiza esta Red.

## **2. INFORME DE INGENIERÍA PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO ECONOMISTA**

**CAMBIO TECNICO EN PROCESAMIENTO DE MINERALES Y METALURGIA EXTRACTIVA Y  
SUS IMPLICANCIAS PARA EL CONTROL AMBIENTAL EN PAISES EN DESARROLLO: LOS  
CASOS DEL COBRE, PLOMO Y ZINC(\*)**

**Angel Alfredo Núñez Barriga (\*)**

(\*) El presente documento ha sido escrito dentro del marco de una beca como Investigador Visitante en el Instituto de Estudios de Desarrollo (IDS) de la Universidad de Sussex, Inglaterra, de su Programa de Investigación Colaborativa sobre Seguridad Alimentaria, Seguridad Ambiental y Seguridad Nacional en el Tercer Mundo. También está situado dentro de la perspectiva de un Proyecto de Investigación Internacional de Colaboración sobre Gerencia Ambiental en Minería y Procesamiento de Minerales, centralmente coordinado por el Science Policy Research Unit (SPRU, ver: Warhurst, Mayo 1991, y más particularmente, dentro de las líneas de investigación señaladas por un estudio de caso Peruano (Núñez, Abril 1991).

## INDICE

<b>Resumen</b>	<b>19</b>
<b>I. Objetivos y Antecedentes</b>	<b>22</b>
<b>II. Producción de Metales No Ferrosos, Cambio Técnico y Medio Ambiente</b>	<b>22</b>
<b>A. El Caso de la Concentración de Minerales por Flotación</b>	<b>24</b>
i. Descripción del Proceso de Flotación	25
ii. Cambio Técnico en el Proceso de Flotación	25
iii. Cambio Técnico en el Proceso de Flotación y Control Ambiental	28
a) Soluciones al Final de la Línea de Producción	29
b) Solucione en Planta	30
<b>B. El Caso de la Fundición Primaria</b>	<b>33</b>
<b>B.1 Fundición de Cobre</b>	<b>33</b>
i. Descripción del Proceso de Fundición de Cobre	33
ii. Cambio Técnico en la Fundición de Cobre	35
iii. Cambio Técnico en Fundición de Cobre y Control Ambiental	41
a) Soluciones Ambientales al Final de la Línea de Producción	47
b) Soluciones Ambientales en Planta	48
<b>B.2 Fundición de Plomo y Fundición de Zinc</b>	<b>53</b>
i. Descripción de los Procesos de Fundición de Plomo y de Zinc	53
a) Zinc	53
b) Plomo	54
ii. Cambio Técnico en la Fundición de Plomo y de Zinc	55
iii. Cambio Técnico en Fundición de Plomo y Zinc y Control Ambiental	60
a) El caso del Zinc	60
b) El caso del Plomo incluyendo el moderno Proceso de Fundición Directa	64
<b>III. Conclusiones</b>	<b>68</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>
<b>Apéndice: Gerencia Ambiental en Minería y Procesamiento de Minerales y sus desafíos para el Desarrollo Sostenible: Hipótesis para el Estudio de Caso Peruano.</b>	<b>77</b>

LISTADO DE CUADROS

CUADRO No. 1	Costos de fundición de cobre chileno
CUADRO No. 2	Comparación de costos entre fundición convencional y de oxígeno
CUADRO No. 3	Tecnología de fundición y emisiones asociadas
CUADRO No. 4	Características de corrientes de gas requeridas para el tratamiento óptimo en plantas de recuperación de azufre
CUADRO No. 5	Evaluación financiera de alternativas de fundición considerada por la modernización de Chino
CUADRO No. 6	Capacidad y materiales de carga de plantas QSL
CUADRO No. 7	Costos del control de la contaminación por los productores de zinc primario en EEUU
CUADRO No. 8	Costos de control ambiental para plantas modelos seleccionadas en la industria de plomo primario en EEUU

## Resumen

Este documento está dirigido al análisis de dos procesos centrales de producción de metales a saber, la concentración de minerales por flotación y la fundición primaria. Las tecnologías prevalecientes en Países en desarrollo para cada uno de estos procesos, y las alternativas tecnológicas para ellos son examinadas con referencia particular a sus respectivos impactos ambientales. Así mismo ha sido una preocupación central el presentar, hasta donde la información disponible lo ha hecho posible, algunos estimados económicos de control ambiental que corresponden a las tecnologías analizadas. Estos estimados han estado basados en fuentes secundarias.

Los principales desarrollos tecnológicos en el proceso de flotación en los últimos quince años están identificados por una definida tendencia hacia flujos de producción más simples, basados en el enorme crecimiento de las celdas de flotación convencionales, la introducción y rápida difusión de las gigantes columnas de flotación, el ingreso de la revolución micro-electrónica en la planta de flotación para lograr su automatización, y por último, el desarrollo de más eficientes y menos contaminantes reactivos.

Todas estas innovaciones, con la sola excepción de la última, son aplicables sólo al rango de la mediana a la gran minería, y han sido responsables de los principales incrementos de productividad en la industria minera. Sin embargo, en lo que se refiere a su impacto ambiental sólo se puede observar un limitado avance. Este avance ha tenido lugar de manera colateral, en la búsqueda de una más alta productividad, a través de una mayor tasa de recuperación de metales y un uso más eficiente de reactivos caros. De esta manera la calificación de los efluentes de flotación como ambientalmente riesgosos no cambia por la introducción de las innovaciones mencionadas, y por lo tanto las bien establecidas normas (vg. diseño apropiado de estabilización de canchas de relave, tratamiento adecuado de efluentes antes de su descarga al medio, etc.) para controlar los efluentes del proceso convencional de flotación, también se mantienen para los efluentes de la plantas innovadoras. La conclusión que se alcanza aquí es que las "soluciones al final de la línea de producción" son inevitables, pero el incremento en productividad derivado de la introducción de las mencionadas innovaciones mejorará la capacidad

económica de las firmas innovadoras para desarrollar las requeridas inversiones para el control ambiental.

En relación a la fundición de los tres metales aquí examinados, el principal riesgo ambiental identificado ha sido la emisión de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), en los gases de salida. En el caso de la fundición de cobre, el problema principal se presenta por las emisiones de SO<sub>2</sub> de los convencionales hornos de reverbero, ampliamente usados en países en desarrollo, que están demasiado diluidos para permitir su recuperación económica.

El principal desarrollo tecnológico en las últimas décadas, en lo que se refiere al incremento de la productividad, ahorro de energía y posibilidades reales de control ambiental, particularmente referente al SO<sub>2</sub>, ha sido la introducción de las tecnologías del oxígeno. La fundición en hornos con este tipo de tecnología se desarrolla con la emisión de gases con altos niveles de concentración de SO<sub>2</sub>, que garantiza la posibilidad para llevar a cabo su recuperación económica, más frecuentemente, a través de plantas de ácido sulfúrico. Sin embargo el real control ambiental requerirá, por supuesto, llevar a cabo la inversión en la planta de ácido. Esta es una inversión importante que se ha estimado representa casi una tercera parte del total de la inversión requerida por la planta de fundición. De esta manera, si el mercado de ácido sulfúrico no está disponible, como puede ser el caso en muchos países en desarrollo, ésta inversión tendrá que ser cargada a los costos de producción de cobre y debilitará la posición competitiva de la firmas involucradas. Sin embargo, la introducción de quemadores oxígeno-combustible y de procesos de fundición - conversión simultáneos en los hornos de reverbero convencionales, siguiendo el proceso de El Teniente, parecen ofrecer una solución apropiada a productores de países en desarrollo, porque produce emisiones de SO<sub>2</sub> adecuadas para el control ambiental, incrementa la capacidad de los hornos en una magnitud importante sin el requerimiento de cambios fundamentales en el horno, y requiere inversiones substancialmente más bajas.

Los casos de fundición de zinc y del plomo son analizados conjuntamente. En estos casos el control de las emisiones de SO<sub>2</sub> es importante, pero en la mayoría de casos puede ser recuperado económicamente para su conversión en ácido sulfúrico. El

impacto de tecnologías de oxígeno también son considerados importantes en este caso, para lograr substanciales incrementos en productividad y un más fácil control ambiental.

Pero también en este caso las "soluciones ambientales al final de la línea de producción", como en el ejemplo de la necesidad de la instalación de una planta de ácido sulfúrico, son inevitables.

De esta manera, para los casos de los metales aquí analizados, el material revisado indica que los sistemas de control ambiental implican importantes costos que, particularmente en el caso de productores de países en desarrollo, no podrán ser compensados por una productividad más alta (de productos y/o de subproductos comercializables). Más aún, los recursos de inversión importantes requeridos por la instalación de aquellos sistemas, en el contexto de fuertes restricciones financieras que enfrentan los productores nacionales en muchos países en desarrollo (como es el caso del Perú), deben ser plenamente reconocidos por el diseño de cualquier estrategia ambiental realista para el sector.



## I. Objetivos y Antecedentes

El presente documento tiene el propósito de identificar la naturaleza real de dos procesos señalados como principales responsables de la degradación ambiental originada por la producción primaria de metales no ferrosos, a saber, la flotación de minerales y la fundición de minerales y concentrados, así como discutir la relevancia de las alternativas tecnológicas existentes y de aquellas que están emergiendo para un adecuado control ambiental y un desarrollo competitivo más elevado de la industria minera en países en desarrollo. Una preocupación central aquí ha sido la de recoger las características técnico-económicas claves (vg. escala económica de producción, inversión, costos y composición de la producción, entre otras) de estas alternativas tecnológicas a nivel micro, que puedan proveer alguna racionalidad económica al comportamiento de las empresas mineras hacia el cambio técnico y el control ambiental.

Se debe señalar que los temas analizados en este documento, como son el cambio técnico y el control ambiental en la industria minera, han sido materia de preocupación para empresas, oficinas gubernamentales y agencias internacionales por lo menos un par de décadas. El impacto ambiental de la minería y la metalurgia e importantes prácticas adecuadas para controlar el impacto ambiental de las tecnologías convencionales actuales han sido también conocidas por largo tiempo. La mayoría de las "nuevas" opciones tecnológicas (referidas aquí particularmente a la fundición de no ferrosos) fueron desarrolladas en sus fundamentos hace más de 3 ó 4 décadas (ver por ejemplo, UN, 1976). Es probablemente el análisis económico, más específicamente el análisis detallado costo - beneficio, del cambio técnico en ésta área, lo que es de más reciente data, por lo menos en la forma de material publicado inmediatamente accesible. Este retraso quizá pueda ser explicado por el número muy limitado de casos en los cuales realmente estas nuevas tecnologías han sido aplicadas a nivel de operaciones industriales (ver UNIDO, 1987 a).

## II. Producción de metales no ferrosos, cambio técnico y medio ambiente

De acuerdo a un reconocido manual de la industria minera (AIMME, 1973), hay tres principales etapas de la producción primaria de metales, estas son : minado,

procesamiento de minerales y metalurgia extractiva. Métodos Pirometalúrgicos, Hidrometalúrgicos o Electrometalúrgicos, o como es el caso más frecuente una combinación de estos métodos, pueden ser usados a lo largo de la cadena de producción de la metalurgia extractiva.

Los traumáticos saltos en los precios de la energía en los años setenta, renovaron el interés por las alternativas hidrometalúrgicas que había estado centrado fundamentalmente en métodos piro y electrotérmicos. Al mismo tiempo los métodos hidrometalúrgicos fueron considerados mucho más flexibles en relación a la escala económica, y que requerían equipo poco sofisticado comparado con aquellos demandados por las rutas piro y electrotérmicas, y de esta manera se consideraron que eran particularmente relevante para su introducción y difusión en países en desarrollo. Un menor consenso, sin embargo, fue mostrado sin embargo en relación a la afirmación de que los primeros métodos representan realmente una alternativa tecnológica ambientalmente menos riesgosa que los últimos.

De cualquier manera la caída vertical de los precios de la energía en el año 1980 y los bajos niveles que estos han mostrado desde entonces, han eliminado lo que fue probablemente el principal incentivo para la investigación en hidrometalurgia, y el principal interés parece regresar a los métodos piro y electrotérmicos.

Algunos desarrollos en hidrometalurgia han sido realmente integrados en los flujos de producción de antiguas unidades productivas y constituido una principal consideración en el desarrollo de nuevos proyectos. Este es el caso de la lixiviación en botaderos en la producción de cobre. Sin embargo, esto "es fundamental un mecanismo para disminuir los costos medios de producción. Este no es un sustituto de la producción de cobre convencional por métodos pirometalúrgicos o por otros métodos de lixiviación" (OTA, 1988:141).

La lixiviación en minerales de baja ley ha sido aplicada económicamente sólo a la producción de tres metales a saber, uranio, cobre y oro. No ha sido aplicado por tanto a la producción de zinc ni plomo que, conjuntamente con el cobre, son el foco de atención del presente trabajo.

Además este método es aplicado principalmente a óxidos y sulfuros de baja ley en desmontes y material de desecho de mina (OTA, 1988:140). Si conjuntamente a esto se considera que el grueso de las reservas de cobre, y para el caso de minerales no ferrosos, en general son sulfuros se debe estar de acuerdo en que al presente los métodos hidrometalúrgicos no pueden ser vistos como desafiando el rol central que juega la ruta más tradicional seguida por las alternativas piro y electrotérmicas. En el caso de los metales no ferrosos estudiados aquí, esta ruta más tradicional incluye la concentración de minerales por flotación, la fundición y refinación piro y electrometalúrgica.<sup>1</sup>

Aunque la preocupación central aquí es la de analizar alternativas ambientales apropiadas a los principales problemas de la producción primaria de metales, este escrutinio tendrá permanentemente en mente el hecho que en última instancia serán las firmas las que tomen la decisión final en esta materia. En una economía de mercado, la búsqueda de las utilidades es lo que en general guiará su decisión. Por lo tanto, será necesario discutir aquí, conjuntamente con el desempeño ambiental de las eventuales alternativas tecnológicas, sus costos/beneficios netos para las firmas. Más aún será de particular interés analizar la medida en que aquellas alternativas ambientalmente adecuadas podrán converger con innovaciones más directamente dictadas por las presiones competitivas, como por ejemplo, aquéllas relacionadas con un insumo principal en minería y la producción metalúrgica como lo es la energía.

Como se explicó anteriormente la flotación y la fundición han sido señaladas como los principales riesgos ambientales en la producción de metales no ferrosos. Esto se discutirá inmediatamente después, indicando el impacto ambiental de los procesos convencionales, las opciones tecnológicas disponibles para su control ambiental "al final del proceso de la línea de producción", y las alternativas tecnológicas "en planta" disponible para aquéllos.

#### A. El caso de la concentración de minerales por flotación

El proceso de flotación fue introducido a principio de los años veinte revolucionando la industria minera, haciendo posible la explotación económica de depósitos con baja ley y eliminando la dependencia de las empresas mineras de la

disponibilidad cercana de instalaciones de fundición. Los concentrados de flotación pudieron entonces comercializarse nacional e internacionalmente. Esta innovación, como ha sido señalada por varios estudios históricos (Thorp and Bertram, 1977), ha sido en gran medida responsable por la emergencia de empresas pequeñas y medianas en la producción de no ferrosos en el Perú y probablemente en otros países mineros también.

(i) Descripción del proceso de flotación

Este proceso consiste básicamente en la aplicación de agua con los reactivos adecuados al flujo de mineral, que ha sido previamente chancado y molido, lo que resulta en la adhesión de los minerales escogidos para que floten en burbujas que son generadas en el fondo de una celda de flotación (una especie de tina), en la cual el proceso tiene lugar por un influjo de aire. La lechada flotante adherida a las burbujas es entonces recuperada por rebose, mientras que los minerales decantados lo son por una corriente **subálvea**.

Se debe añadir que el proceso se desarrolla bajo una permanente agitación del agua en la celda de flotación. Esto está asegurado por mecanismos alternativos conectados a un motor eléctrico. El proceso se desarrolla en un gran número de celdas de flotación ordenadas en series, y procediendo en varias etapas: una preliminar, una segunda de expulsión, y una tercera de limpieza, para obtener la requerida calidad del concentrado.

La función de los reactivos es convertir a uno de los minerales en hidrofóbico, es decir que evite ser mojado, de tal manera que se adhiera a las burbujas y flote. De esta manera la selectividad del proceso depende fuertemente de los reactivos usados y del diseño específico de las celdas de flotación.

(ii) Cambio técnico en el proceso de flotación

La principal tendencia en la tecnología de flotación convencional ha sido un permanente incremento en el tamaño de la celda de flotación, proceso que se acelera drásticamente durante la última década. De tamaños que estaban en el rango de 100

a 350 pies cúbicos hasta los años setenta, las celdas de flotación de límites superiores habían saltado a 1,250 pies cúbicos en 1987, y a más de 3,500 pies cúbicos a mediados de 1991. Entre las ventajas de las celdas grandes sus productores señalan que "...la selectividad [...] es frecuentemente mejor que en las celdas pequeñas, porque debido al grueso revestimiento, etc.; las posibilidades de control de la calidad del producto a través del ajuste de aire y/o del nivel de la pulpa son mejores con celdas más grandes, porque hay menor número de puntos de control" (Brewis 1991 383-386).

El otro desarrollo principal de flotación ha sido "flotación en columna" de minerales de cobre. Fue desarrollada en Canadá a principios de los años sesenta pero fue introducida a escala industrial hace sólo algunos años, a fines de los años ochenta. De acuerdo a los productores de este tipo de equipos, estas celdas permiten "un mejor rendimiento; reducción en los costos del capital de operación; [són] adecuados para controles automáticos simples; [y tienen la] habilidad para tratar eficientemente partículas muy finas de mineral" ( Hall, 1991 : 379 ).

Este proceso tiene lugar en un recipiente muy alto ( puede alcanzar 18 mts. de alto). La lechada previamente tratada con los reactivos adecuados es alimentada en el recipiente donde se encuentra con una corriente de burbujas que vienen del fondo de la columna, las partículas que se adhieren a las burbujas flotan muy por encima del nivel de entrada, donde ellas son contactadas por una corriente de "agua de lavado" que va hacia abajo y desplaza cualquier agua que ha entrado con la lechada de alimentación "y en una sola etapa de flotación, produce un producto esencialmente libre de contaminación". Las partículas que no flotan son pasadas a través del fondo del recipiente como colas ( Hall 1991 : 379 ).

Estos dos principales desarrollos han llegado a la industria minera peruana, y no sólo a la gran minería sino también a la minería mediana de la industria privada nacional. Así por ejemplo, alrededor de 1990 Southern Perú Copper Corporation, ya estaba usando la flotación en columna en sus operaciones de cobre en el sur del país, de similar forma lo estaba haciendo San Ignacio de Morococha, el principal productor de zinc controlado por el capital local.

A las innovaciones mencionadas arriba debe añadirse la introducción de *reactivos más eficientes*, y de particular relevancia aquí, con menores riesgos ambientales, como se explicará más adelante; así también, y de más recientemente, data la extensión del proceso de flotación aguas arriba en el proceso de producción, para introducirlo en el proceso de molienda ( Brewis 1990 : 383 ).

Se debe mencionar también que el desarrollo de nuevos procesos pirometalúrgicos, que tratan minerales complejos y que serán discutidos más adelante, han empujado el interés en mejorar la flotación no selectiva (bulk flotation). De hecho la flotación no selectiva permite tasas más altas de recuperación por que las pérdidas que derivan de los contenidos valiosos no controlados que pasan de uno a otro de los minerales sujetos a flotación selectiva no existen más. De esta manera también los circuitos de flotación se tornan más simples y por lo tanto más fáciles de controlar.

Por último, pero de ninguna manera menos importante, la introducción y difusión de sistemas de control automatizado para plantas de flotación así como para la mayor parte de la industria minera y metalúrgica, ha tenido un impacto importante en la eficiencia de sus operaciones. Estos desarrollos han tenido lugar desde principios de los años ochenta, en cierta forma más tardíamente que en otras industrias tradicionales obligadas a "rejuvenecerse" a través de la revolución microelectrónica. La importancia real de este proceso puede ser indicada por la introducción, en el último par de años, de una sección especial sobre "Software", al lado de las tradicionalmente asignadas para las principales etapas productivas de la industria minera (minería, procesamiento de minerales y metalurgia extractiva), en las principales revistas especializadas que siguen el pulso tecnológico de la industria (ver por ejemplo las publicaciones periódicas del Mining Journal).

Como se puede observar, el salto en el tamaño de la típica celda de flotación convencional, la introducción de la flotación en columna y el impulso hacia la flotación no selectiva, todas estas innovaciones trabajan en la dirección de producir circuitos de flotación más simples. Esta característica, apoyada por el rápido desarrollo en "software" y sensores de procesos que han permitido la automatización de las plantas de concentración, indica que el nivel de control de las plantas de flotación que

asimilan estas innovaciones debe haber incrementado significativamente. Esto significaría más altas tasas de recuperación, y menores consumos de reactivos caros por peso de contenido fino en los concentrados a través del control apropiado de dosificación y de reciclaje. Más aún, y de significado central aquí, en estas circunstancias el volumen de efluentes y el riesgo ambiental que ellos representan, están destinados consecuentemente a haber sido reducidos. Esto será tocado nuevamente en mayor detalle más adelante.

(iii) Cambio Técnico en el Proceso de Flotación y Control Ambiental

Los principales riesgos ambientales que presentan las plantas de flotación, de acuerdo a todas las fuentes con las que el autor se ha encontrado hasta ahora, son sus efluentes y el polvo. Estas fuentes también convergen en señalar a los efluentes, si no se controlan adecuadamente por amplio margen como el más importante riesgo para el medio ambiente, particularmente para los recursos de agua (ver por ejemplo UNIDO (1987b), Lajzerowics (1976 : 188-189)).

Refiriéndose a la producción de cobre en general, pero teniendo particular relevancia para la flotación, se anota que "impactos adversos en la calidad del agua son causados fundamentalmente por prácticas de disposición en tierra que fallan en contener materiales de desecho, a través de controles de escorrentía y de fluidos permanentes, que son inadecuados para evitar que aguas superficiales fluyan a través de canchas, o por la infiltración de agua subterránea en las canchas" ( OTA 1988 : 170 ).

El principal riesgo ambiental presentado por los efluentes de plantas de flotación, particularmente por aquellos de plantas que tratan minerales de zinc/plomo, es señalado por UNIDO (1987 : 34 ), que basado en información de la US-EPA, indica que "[..] debido al problema potencial de filtración de agua ácida la industria de zinc/plomo en EUA ha sido considerada como la segunda (superada sólo por la de uranio) en términos de jerarquía del riesgo tóxico para material de desecho depositado en tierra".

Las amenazas específicas para los recursos de agua de descargas directas, reboses o filtraciones de flujos, son los sólidos en suspensión, metales pesados, reactivos químicos tóxicos y su alto nivel de acidez o de alcalinidad. Estas características representan también un peligro ambiental para los recursos de suelos; mientras que la contaminación del aire puede también tener lugar en la evaporación de los relaves.

Las principales prescripciones para confrontar estos riesgos ambientales, como se anotó anteriormente, han estado bien establecidas hace ya buen tiempo. Más aún, como se explicó también anteriormente, el proceso de flotación no ha sido estremecido por un cambio técnico realmente radical, por tanto las soluciones de control ambiental, en una medida importante continúan cayendo en la categoría de *al final de la línea de producción*; sin embargo, el importante proceso acumulativo de innovaciones menores, apareada con el rápido desarrollo de sistemas de control automatizados, ha permitido la emergencia de equipo mucho más eficiente que muy posiblemente pueda mostrar diferencias no despreciables en su impacto ambiental. Estas innovaciones pueden entonces ser calificadas, limitadamente, como soluciones en planta de control ambiental. Ambas categorías de soluciones específicas son descritas a continuación.

a) Soluciones al final de la línea de producción

Las principales prescripciones aquí son las siguientes: el reciclaje del agua de planta o su tratamiento (es decir, la neutralización de sus contenidos contaminantes) para descarga al medio; y la estabilización de presas de relaves a través del apropiado diseño y construcción de estas (para prevenir perforación, filtración, reboses y procesos similares).

Debe anotarse, que ninguna de las innovaciones que están siendo introducidas en el proceso de flotación eliminaría o debilitaría fundamentalmente la necesidad de estos sistemas de control ambiental al final de la línea de producción. Así, esto significa que para cumplir medidas de control ambiental necesarias en lo que respecta a este proceso será necesario incurrir en costos adicionales, encima de los costos de producción bajo una situación no regulada, que por supuesto en ciertos casos podrían



ser reducidos o aún eliminados por beneficios eventuales (vg. tasas de recuperación más alta, menores costos por consumo de reactivos). De esta manera, como Atkins y Lowe (1979) lo anotan, los costos netos serían los costos del control ambiental.

Debe expresarse de paso que una afirmación en el sentido de que las firmas podrían, realmente en términos económicos, obtener utilidades por invertir en estos tipos de sistemas de control ambiental parece realmente difícil de sustentar, puesto que tendría que mostrarse primero que la amplia mayoría de firmas mineras en países en desarrollo (incluyendo subsidiarias de compañías transnacionales, y firmas locales altamente organizadas), que de hecho no llevan a cabo aquellos tipos de inversión, están ya sea mal informadas en lo que se refiere a su propio negocio, o que tienen un comportamiento económico irracional. La inclusión prominente de subsidiarias de compañías transnacionales y, en ciertos casos, de bastante bien organizadas firmas locales, arroja serias dudas sobre la primera afirmación. En relación a la segunda, el establecer que el comportamiento económico de aquellas firmas no es irracional no sólo implicaría el mostrar simplemente que ellas obtienen ciertas utilidades de aquellas inversiones, sino que la tasa de utilidad de estas inversiones es competitiva con aquellas otras de sus respectivos portafolios. Esto solo significaría reconocer que la clave para explicar las decisiones de inversión en una economía básicamente de mercado son los costos de oportunidad de las inversiones.

#### b) Soluciones en planta

Estas se refieren a las medidas de control ambiental que involucran "el uso de materias primas alternativas a ser procesadas con la maquinaria existente o el procesamiento de materiales existentes en nueva maquinaria, o una combinación de ambos". Esto puede significar aún la introducción de tecnologías totalmente nuevas (Atkins and Lowe, 1979:4).

Mantener la diferenciación de las medidas de control ambiental en planta, de acuerdo a su estructura de costos en términos de capital y gastos corrientes, es útil para discutir el rango de tiempo requerido por su real introducción en una planta determinada. La introducción de medidas de control que involucran fundamentalmente gastos corrientes (vg. cambios de materia prima) es muy posible, por supuesto, que

requieran mucho menos tiempo que aquellas medidas que requieran gastos en capital fijo importantes (vg. cambios importantes en el diseño de planta y en la maquinaria).

Parece lo más posible también que las medidas de control ambiental en planta que implican gastos de capital fijo importantes, requieran un tiempo mucho más largo para su introducción que aquellas medidas de control al final de la línea de producción. Esto en razón de que las medidas de control en planta involucrarán cambios principales en la planta misma, y por lo tanto, tienen gran posibilidad de ser mucho más perturbadoras del proceso de producción que las medidas de control al final de la línea de producción. Esto por supuesto tendrá un importante peso en las decisiones del inversionista.

Sin embargo, es posible de que por lo menos algunos de los modernos sistemas de control automatizado, ya mencionados anteriormente, sean susceptibles de ser adaptados a las plantas de flotación existentes sin requerir cambios importantes en la maquinaria de producción básica o en el diseño de planta. Esto podría implicar importantes gastos de capital pero muy probablemente más bajos que aquellos que serían requeridos por una reestructuración del proceso productivo mismo. Un resultado similar debería ser esperado en lo que se refiere a la importancia de la perturbación de la producción involucrada, respectivamente, por aquellos cambios alternativos.

La importancia del tiempo en las eventuales soluciones que la industria muy posiblemente provea, bajo las presiones de la regulación ambiental es señalada por Atkins y Lowe (1979:4) expresando que “[...] la amplitud de tiempo que se le ha dado a la industria para limpiar sus emisiones al medio ambiente determina la naturaleza de las medidas de control que la firma está en capacidad de llevar a cabo y la magnitud e impacto de sus costos”. Esto es particularmente relevante cuando se trata de un país en desarrollo y la regulación es dirigida a una actividad de producción que muestra 1) niveles importantes de contaminación, 2) una importante parte de sus operaciones que trabajan con instalaciones atrasadas y que por tanto tienen bajos niveles de productividad; y 3) la actividad es de una importancia principal para la economía nacional, pues una política de control ambiental que implique una substancial reducción en la producción total, lo más posible es que no sea una opción disponible.

Así parece que la política sectorial necesitará dirigirse simultáneamente a ambos objetivos, es decir a la competitividad y a la protección ambiental en una manera coherente.

Los conceptos que acaban de ser introducidos pueden ayudar ahora a una mejor diferenciación de las medidas de control ambiental *en planta*, incorporados o independientes de los principales desarrollos tecnológicos del proceso de flotación referido anteriormente.

En este sentido, la innovación más significativa para control ambiental en planta, que envuelve fundamentalmente gastos corrientes, ha sido probablemente el uso de reactivos químicos nuevos y menos tóxicos. De hecho según ha sido señalado por UNIDO (1987:22) "el principal problema ambiental de la flotación de mineral de [cobre] es la contaminación de agua causada por agentes de flotación [y que esto] ha sido parcialmente superado en años recientes a través del reemplazo de sales de cianuro altamente tóxicas con sulfuros, y agentes espumantes fenólicos, tóxicos del tipo cresol con agentes de tipo no fenólico". Sin embargo, este documento no provee ninguna información en lo que se refiere a la eficiencia productiva de esos agentes y sus costos, de tal manera que se pueda evaluar los costos reales de estas medidas de control ambiental.

La otra innovación principal en el proceso de flotación ha respondido fundamentalmente a presiones competitivas, antes que a presiones de regulación ambiental como ha sido probablemente el caso de los reactivos que acaban de mencionarse. De esta manera el salto a las grandes celdas de flotación, la introducción de la flotación en columna, el cambio a la flotación no selectiva y su mejoramiento, y los sistemas de control automatizado, todos tienen como propósito sólo el incrementar la productividad. Si fuera a haber mejoras en el desempeño ambiental estas serían solamente fruto de la casualidad y no del logro de un objetivo de las mismas innovaciones. De esta manera, las más altas tasas de recuperación de finos y la mayor eficiencia en el consumo de reactivos obtenidos por estas innovaciones tecnológicas significan que los efluentes serán posiblemente potencialmente menos contaminantes. Sin embargo, las señales son que aunque estas cifras son importantes económicamente no alteran el requerimiento de

tratamiento y/o reciclaje de los efluentes de flotación para neutralizar su potencial de impacto ambiental."

B.- El caso de la Fundición Primaria

B1.- Fundición de cobre

El proceso de fundición convencional, por lo menos para la metalurgia extractiva de los metales no ferrosos que son estudiados aquí, ha sido por los últimos cincuenta o sesenta años el horno de reverbero. Sin embargo, desde los años cuarenta han sido introducidos hornos eléctricos y hornos de "fundición instantánea más eficientes y ambientalmente más seguros que aquellos."

En países desarrollados que muestran sistemas regulatorios ambientales estrictos como es el caso de Estados Unidos, la "fundición instantánea prácticamente ha desplazado a las fundiciones con hornos de reverbero. Varios procesos han emergido con el objetivo de integrar dos o más etapas de la clásica ruta del horno de reverbero, de tal manera de reducir el consumo de energía y los gastos de capital por unidad de producto, y de particular importancia para la presente discusión de proveer alternativas tecnoeconómicas factibles, para el control ambiental.

(i) Descripción del proceso de fundición de cobre

Este proceso consiste en la aplicación de altas temperaturas a los minerales y/o concentrados de tal manera de permitir el desarrollo de reacciones químicas para producir una mata, esto es, un líquido de alto contenido de metal, que está acompañado por escorias y generación de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

El proceso general de fundición, en el caso de cobre involucra las siguientes etapas : tostación, fundición y conversión ( OTA 1988 : 134-5).

La tostación, prepara los minerales y concentrados para la fundición a través de la aplicación de calor, de tal manera de secarlos, reducir su contenido de azufre y remover contaminantes volátiles. Este proceso produce emisiones de SO<sub>2</sub>, que

representan un principal riesgo ambiental en la producción de cobre. De hecho la tostación "puede ser la etapa que individualmente representa la más alta desulfurización de todo el proceso de producción de cobre (de 50-70% de remoción)". La particular concentración de SO<sub>2</sub> en las mismas emisiones dependerá del tipo de horno usado. "La tostación en lecho fluidizado produce SO<sub>2</sub> en concentraciones suficientemente altas (hasta 14%) para permitir altas tasas de recuperación (hasta 99.5%) [...]. Sin embargo, en hornos de múltiples hogares el SO<sub>2</sub> contenido en los gases de salida es sólo 7.5%". (UNIDO1987 b:22).

El nivel de concentración de SO<sub>2</sub> en los gases de salida es clave para determinar la factibilidad económica de recuperación del azufre. Como será explicado más adelante se requiere por lo menos de un 4% de concentración de SO<sub>2</sub> para una recuperación económica, y en la medida que la concentración es más alta, el rango y alternativas tecnológicas económicamente factibles se torna más amplio.

La fundición, trata concentrados y/o calcinas producidas por tostación, a altas temperaturas de tal manera de fundir los metales que se tiene como objetivo recuperar, obteniendo una mata rica en metal, una escoria y emisiones de SO<sub>2</sub>.

En el caso del cobre, el ampliamente usado horno reverbero, que consiste de una gran cámara forrada de material refractario con quemadores de combustible, produce una mata con 30% a 45% de cobre, con emisiones de SO<sub>2</sub> demasiado diluidas para "su conversión económica en ácido sulfúrico o tratamiento con otros métodos de control de contaminación". (OTA 1988 : 136)<sup>III</sup>.

Por último, una vez que las escorias han sido separadas de la mata esta última está lista para proseguir el proceso de conversión. Este proceso consiste en la separación del cobre ampoloso (98.5% o más del cobre) y una escoria. El convertidor más usado es el Pierce-Smith que fue introducido a principios del presente siglo y con menores modificaciones incorporadas en los años treinta ("Convertidor Hoboken") ha mantenido su importancia hasta el presente. (UNIDO 1987 a : 64).

El proceso de conversión en el convertidor Pierce-Smith prosigue como sigue: "después que la mata fundida es vertida en el convertidor, aire es soplado en la mata

a través de mangueras llamadas toberas. Primero el hierro es oxidado para producir óxido de hierro y  $\text{SO}_2$ ; sílice es añadido y el óxido de hierro forma una escoria de silicato de hierro, que es vertida hacia fuera después de cada soplada. Esto deja sulfuro de cobre fundido (metal blanco o chalcocita,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ). El sulfuro restante en el metal blanco es entonces oxidado a  $\text{SO}_2$ , dejando cobre ampoloso" (OTA 1988:135).

(ii) Cambio Técnico en Fundición de cobre

Los saltos traumáticos de los precios de la energía en los años setenta y los controles ambientales más severos de las últimas dos décadas han estado definitivamente entre las principales fuerzas responsables del proceso de innovación en la industria minera en general, y particularmente en procesos como los de fundición de metales no ferrosos, que figuran en niveles altos entre las actividades productivas por intensidad en el uso de energía y por su impacto ambiental.

De esta manera, la búsqueda de integrar dos o las tres etapas de fundición en una sola operación, que había estado recibiendo ya considerable atención por la industria, fue adicionalmente reforzada. Un proceso integrado incrementa las posibilidades de un uso más eficiente de la energía.

Sin embargo, la principal atención ha sido dirigida al uso de reacciones químicas exotérmicas en fundición, a través de la simultánea inyección de oxígeno o aire enriquecido por oxígeno, y concentrados, en un horno caliente. La reacción de los concentrados con el oxígeno es extremadamente rápida con una alta liberación de calor que permite que el proceso de fundición proceda con relativamente poco o aún sin calor adicional suministrado externamente. Ese es el por qué este proceso es llamado Fundición Instantánea (Flash Smelting).

De hecho, el impacto del uso del oxígeno para reducir substancialmente el calor suministrado externamente para fundición, llegó a los mismos hornos de reverbero en los años sesenta a través del uso de los quemadores oxígeno-combustible (Oxy-fuel) (UNIDO 1987 B:63).

Los principales procesos nuevos de fundición que tienen por objetivo la fundición en un proceso continuo y usan calor autógeno para apoyar el proceso son los siguientes: Outokumpu, Inco, Noranda, Mitsubishi y El Teniente.

Es importante anotar aquí que la Fundición Instantánea provee alta flexibilidad en lo que se refiere a los tipos de concentrados que puede procesar, y permite controlar la ley de la mata puesto que el grado de oxidación en suspensión puede ser controlado cambiando la proporción de concentrado a oxígeno en el aire.

El proceso de Outokumpu, que fue el primero de los mencionados en ser desarrollado hace más de 40 años, fue también el primero en introducir el uso del principio "instantáneo". Este también es por mucho el más difundido, con cerca de 30 plantas en el mundo. Integra los procesos de tostación, fundición y parcialmente conversión y es plenamente autógeno. La mata producida<sup>IV</sup>, entonces, requiere adicional proceso de conversión, mientras que por otro lado, la concentración del SO<sub>2</sub> en los gases de salida están entre 10% y 30% que es plenamente adecuado para la recuperación económica de este compuesto.

Es importante notar aquí, en razón de su potencial importancia para productores de países en desarrollo que el proceso Outokumpu muestra una alta flexibilidad en relación a su escala económica, como se puede concluir del hecho que las escalas de operación varían de 10 t/h toneladas por hora a las 150 t/h de alimentación de concentrado.<sup>V</sup>

El proceso Inco es similar al Outokumpu, en lo que respecta al tipo de producto final, esto es, que es una mata que requiere aún mayor conversión. De esta manera este proceso integra la tostación, la fundición y una parcial conversión. Sin embargo, mientras que el proceso Outokumpu usa oxígeno o aire enriquecido con oxígeno precalentado, que requiere por lo menos 40% de oxígeno para trabajar en forma totalmente autógena, el proceso Inco usa oxígeno comercial y es totalmente autógeno. También la ley típica de la mata de Inco es significativamente menor que la del Outokumpu (OTA, 1988 : 136).<sup>VI</sup>

En lo que se refiere a la operación industrial debe señalarse que la Fundición Instantánea de Inco, es bastante limitada, puesto que en 1987 sólo se reportaron dos hornos que estaban realmente operando, uno en Sudbury en Canadá y el otro en Almalyk en la URSS. Estos han sido citados como proyectos exitosos y con amplio potencial de aplicación por UNIDO (1987 a:65). Sin embargo, en el material revisado no se ha encontrado referencia a la flexibilidad de escala del proceso Inco.

Como se explico anteriormente, el proceso de conversión final es más frecuentemente desarrollado en el convertidor Pierce-Smith/Hoboken. Sin embargo, Outokumpu y Kennekott han desarrollado recientemente en forma conjunta un convertidor instantáneo que sustancialmente reduce el costo de producir ácido para controlar el SO<sub>2</sub>.

No obstante, un desarrollo que parece particularmente relevante para países en desarrollo, donde los antiguos hornos de reverbero son el tipo estándar de hornos para fundición, es la posibilidad de readecuarlos con la incorporación de una pequeña columna de reacción especialmente diseñada. En esta columna los concentrados, el fundente y el oxígeno son quemados desarrollando una reacción exotérmica que puede reemplazar los requerimientos de los hornos de reverbero de calor proveído externamente.

Más aún tomando conjuntamente las dos innovaciones que se acaban de describir, esto es la conversión instantánea y el proceso de fundición instantánea en pequeña escala, da la posibilidad, según es argumentado, "de construir unidades de fundición/conversión instantánea de pequeña escala, ya sea por el uso alternado del mismo horno o por la instalación de dos columnas de reacción" (Wyllies, 1989).<sup>vii</sup>

Si estos desarrollos son eventualmente probados exitosamente a una escala industrial, deberán proveer alternativas tecnológicas relevantes para productores de países en desarrollo. Sin embargo, estos desarrollos están al presente a un nivel de prueba piloto.

Pasando ahora a examinar los casos de los procesos Noranda y Mitsubishi se debe señalar primero que nada, que su real operación industrial ha sido hasta ahora



muy limitada. Hacia 1987 el proceso Noranda estaba siendo operado solamente en la fundición de Utha Binham por la Kennekott, mientras que el proceso Mitsubishi estaba en operación sólo en Naoshima y en Kidd Creek en Canadá.

Estos procesos fueron diseñados como procesos de fundición continua, pero en la práctica ellos no operan realmente como tales. Así, en el caso de Noranda, el cobre ampolloso producido contiene más impurezas metálicas (vg. As, Sb, Bi) que el cobre producido en forma convencional ( vía fundición y conversión) que lo torna no comercial. Además, ambos procesos producen una escoria que contiene hasta 10% de cobre, que en el caso del proceso Noranda es reciclada hacia la trituración en la etapa de beneficio, y en caso del proceso Mitsubishi, es tratada en un horno intermedio eléctrico para limpiar la escoria.

Como resultado el proceso Noranda es usado para producir una mata de alta ley (70-75% Cu) que es tratada en un convertidor Pierce-Smith. El proceso Mitsubishi si produce como producto final un producto de cobre ampolloso que es comercializable (UNIDO, 1987 a : 68-73).

En relación con los procesos mismos, ambos usan concentrados peletizados para su alimentación. El reactor Noranda consiste de solamente un horno que es alimentado por la parte de arriba y por un lado con los concentrados peletizados, el fundente, combustible en polvo y sólido, mientras que el oxígeno enriquecido es suministrado desde toberas alineadas a lo largo del fondo del horno. Tres fases líquidas de escoria, mata y ampolloso están siempre presentes en el reactor que se las hace fluir fuera del horno a través de huecos hacia los cazos de colada.

El reactor Mitsubishi, por otro lado, consiste de tres hornos interconectados a través de los cuales la mata y la escoria fluyen por gravedad. En el primero, donde los concentrados peletizados, aire, oxígeno, fundentes, y escorias granuladas y recicladas del horno de conversión son alimentados, y en el cual tiene lugar la fundición. El segundo, es un horno eléctrico para la limpieza de la escoria, que una vez que elimina esta escoria permite la mata fluir al tercer horno, que es un convertidor que producirá el producto ampolloso final.

El proceso Noranda necesariamente requiere aire enriquecido de oxígeno para ser económicamente viable, y puede ser un proceso totalmente autógeno. El proceso Mitsubishi requiere por lo menos 65% de enriquecimiento de oxígeno en el horno de fundición para formarse en proceso totalmente autógeno.

Por último, y de una relevancia central aquí, las concentraciones de emisiones de SO<sub>2</sub> en los gases de salida del convertidor Mitsubishi están típicamente entre el 14% y 17% para la fundición y entre 17% y 19% para los hornos de conversión, por lo tanto son apropiadas para una recuperación económica del azufre (UNIDO, 1987 a: 71).

Finalmente, la última innovación importante para ser discutida aquí, particularmente porque parece tener una relevancia particular para los países en desarrollo, es el proceso *El Teniente*. Este consiste en la fundición con oxígeno de concentrados en reverberos apoyados por calor excedente liberado por la oxidación de la mata.

El proceso tiene lugar a lo largo de tres etapas, a saber, un horno de reverbero con una modificación física menor pero importante desde el punto de vista de eficiencia, un Convertidor El Teniente y un Convertidor Pierce-Smith.

La innovación en el horno de reverbero consiste en el reemplazo de los quemadores de aire de llama larga, por quemadores de llama corta de más alta temperatura de tipo oxígeno-combustible (oxy-fuel), localizados en el techo del horno que permite una transferencia de calor más eficiente y, de importancia crucial desde una perspectiva de control ambiental, una significativa reducción en el volumen final de gases de salida con un 6% a 8% de concentraciones de SO<sub>2</sub>.

La alimentación fría de concentrados que es acompañada por una proporción determinada de fundentes, es transformada en el horno de reverbero en mata, y después dirigida al convertidor El Teniente. En este convertidor el soplado de la escoria con aire enriquecido de oxígeno y la fundición autógena de concentrados, tiene lugar simultáneamente, produciendo un metal blanco (74% a 78% de Cu). Esto

es finalmente enviado al convertidor Pierce-Smith para producir cobre ampolloso (UNIDO, 1987 a : 73-77).

Debe añadirse aquí que la introducción de la tecnología de fundición con oxígeno ha permitido, aparentemente, a Codelco alcanzar niveles de costos hasta 35% menores que aquellos mostrados por tecnologías convencionales (ver cuadro 1).

**CUADRO 1**  
**COSTOS DE FUNDICION DE COBRE CHILENO**  
(en US\$ por tonelada de concentrado)

	Chuquicamata (a)	El Teniente (a)	El Salvador (b)
Capacidad instalada tpa. de concentrados	1,000,000	800,000	265,000
Ley de Concentrado % Cu	37.8	38.00	34.00
<b><u>COSTOS DIRECTOS</u></b>			
<b><u>Costos Variables:</u></b>			
Combustibles	15.35	12.06	29.85
Oxígeno	3.34	2.76	...
Refractarios	1.83	1.67	0.37
Aire	2.17	1.17	0.30
Energía Eléctrica	1.00	0.42	0.07
Otros	2.42	2.93	21.53
Total	26.11	21.01	52.12
<b><u>Costos fijos:</u></b>	9.92	14.41	4.65
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>	36.03	35.42	56.77
<b><u>COSTOS INDIRECTOS</u></b>	14.93	17.51	13.95
<b>COSTOS TOTALES POR TONELADA</b>	50.96	52.93	70.72
Costo por Libra de Cobre en Centavos	6.11	6.32	9.43

(a) usando el proceso El Teniente

(b) Usando hornos reverberos convencionales

**Fuente:** UNIDO(1987a:82)

Aquí se debe indicar que la tremenda rapidez de la fundición con oxígeno incrementa substancialmente la real capacidad de los hornos de reverbero y por lo tanto reduce los costos de capital por unidad de producto. De esta manera, si esta observación es considerada conjuntamente con las tecnologías de oxígeno que también ofrecen la factibilidad económica de control ambiental (suponiendo que existe un adecuado mercado para el eventual subproducto del proceso de control), se deberá estar de

acuerdo que estas tecnologías parecen ofrecer alternativas tecnológicas ambientales relevantes para productores de países en desarrollo.

Para complementar la presente discusión, se presenta en el Cuadro 2 los costos comparativos de operaciones típicas de tecnologías de oxígeno.

**CUADRO 2**  
**COMPARACION DE COSTOS ENTRE FUNDICION CONVENCIONAL Y DE OXIGENO**

Costos Basados en:

(1) Costos de Energía: US\$ 3.5 ctvs./Kwh.

(2) Petróleo Bunker C: US\$ 225/tm.

(3) Carbón: US \$ 40/tm

	FUNDICION INSTANTANEA OUTOKUMPU en Ashio		FUNDICION INSTANTANEA INCO en Copper Cliff	FUNDICION CONTINUA MITSUBISHI en Naoshima	
Porcentaje de Enriquecimiento de Oxígeno	21	41	100	30	50
Energía Requerida para la Producción de Oxígeno ctvs./lb. Cu	0	0.48	0.44	0.27	0.86
Combustible de Petróleo Adicional Requerido (Bunker C) ctvs./lb. Cu.	2.66	0.37	0	1.56	0.57
Combustible de Carbón Añadido ctvs./lb. Cu	-	-	-	0.09	0.09
<b>COSTOS TOTALES</b> de energía por Lb. de cobre	2.66	0.85	0.44	1.92	1.52
Porcentaje Cu. en la mata	48	60	50	65	65

Fuente: UNIDO (1987a:80)

(iii) Cambio Técnico en la Fundición de Cobre y Control Ambiental

Es verdad que los riesgos ambientales relacionados con la fundición de metales en general y de la fundición de cobre en particular no están relacionados solamente al SO<sub>2</sub>. Al lado de este hay emisiones de otros gases tóxicos, de importantes volúmenes de polvo y presencia de metales pesados. Sin embargo, el SO<sub>2</sub> es señalado individualmente en todos los documentos revisados como el más serio problema a tratar en lo que respecta al control ambiental.

En un distante segundo lugar en esta jerarquización de peligros ambientales es colocado el polvo que acompaña a los gases durante la tostación y la fundición, y que es controlado más frecuentemente con el uso de precipitadores electrostáticos y por su reciclaje al proceso (Lajzerowicks 1976 : 189).

La importancia decisiva asignada a la emisión de dióxido de azufre en el impacto ambiental final en la fundición de cobre, debe justificar que en lo que sigue la discusión se focalise específicamente en analizar las alternativas tecnológicas abiertas para su adecuado control.

Antes de entrar en la discusión misma puede ayudar a seguir el hilo general de su argumento el adelantar un hallazgo de la investigación. Este es, que los costos del control ambiental de la fundición de cobre parecen ser importantes en la estructura general de costos de esta etapa de producción, independientemente de la particular tecnología de producción empleada. Estos costos deben incluir los costos de operación y de capital de las instalaciones adicionales requeridas para este propósito, que pudieran ser reducidos por el valor de los eventuales subproductos que pudieran encontrar mercado o un uso real dentro de las operaciones mismas. Sin embargo, en el caso de los productores de países en desarrollo los mercados requeridos pueden simplemente no existir, debido al pequeño tamaño de su sector manufacturero y/o a su imposibilidad de canalizarlos hacia la exportación debido a las limitaciones de su infraestructura de transporte o a la naturaleza misma de los subproductos en referencia (vg. ácido sulfúrico, SO<sub>2</sub> en estado líquido).

De acuerdo con Castle y Balakrishnan (1990:133 ) “[...] alrededor de 35% de los costos de capital de una nueva fundición es para el lavado de gases y la captura de azufre”. En forma más detallada OTA (1988:170) indica que: “Los costos de capital para remover el azufre, lo que incluye el manejo de gas de un 4% de dióxido de azufre en la corriente de gas y las instalaciones de una planta de ácido sulfúrico de unas 50,000 toneladas por año de cobre, han sido estimados [Citando a Agarwal and Loreth (1981)] en US\$560 por tonelada anual de cobre producido. Esto es aproximadamente 20% del total de costos de capital de las instalaciones”.

Se debe añadir que de la participación del control de la polución en los costos de producción es prevista por algunos analistas de la industria, particularmente refiriéndose a países desarrollados, que aumente substancialmente en los años 90, debido a la legislación ambiental mucho más estricta que se considera será introducida en estos países. De esta manera, en la reciente Tercer Conferencia sobre Concentrados de Metales Básicos, organizada por el respetado Metal Bulletin, un representante de una firma consultora especializada sostuvo que "los avances en la tecnología de control de la polución no evitarán la subida en los costos que pueden crecer en un 20% y en casos extremos hasta 50%", y refiriéndose a las instalaciones de fundición en Europa oriental, que seguramente son más cercanas a las que son típicas en países en desarrollo, advierte que : "cierres generalizados de fundiciones de plomo, de zinc y de cobre pueden ocurrir en Europa Oriental en la medida que los gobiernos allí puedan encontrar que los equipos adecuados de control de la polución no están disponibles". (FT,05/06/91:36).

Sin embargo, en oposición a estos antecedentes un tanto sombríos, sobre la base de los cambios técnicos detallados en la sección previa, se argumentará adelante que parece haber desarrollos tecnológicos que podrían proveer mejoras substanciales en el control de riesgos ambientales claves, vg. de emisiones de dióxido de azufre, cuyo costo de implementación podría ser compensado por lo menos en algunos casos con incrementos importantes en la productividad. Más específicamente, la referencia aquí es a las tecnologías de oxígeno y entre ellas, al proceso El Teniente que ofrece la posibilidad de básicamente readecuar los hornos de reverbero convencionales que son típicos de las instalaciones de fundición en países en desarrollo.

Las emisiones de dióxido de azufre en contacto con el oxígeno y el agua de la atmósfera produce la lluvia ácida que representa la principal preocupación en relación al impacto ambiental de la fundición. Estas emisiones son generadas en todas las etapas de fundición. El volumen total de gases liberados y la concentración típica de SO<sub>2</sub>, que es clave para determinar la factibilidad económica de la recuperación del azufre, variarán de acuerdo a la particular etapa de producción y de la particular tecnología con que se trabaje. Esta información a la que se hizo referencia

anteriormente cuando se discutió el cambio técnico en la fundición, es presentada en el Cuadro 3.

**CUADRO 3**  
**TECNOLOGIA DE FUNDICION Y EMISIONES ASOCIADAS**

TECNOLOGIA	GASES DE SALIDA (% SO <sub>2</sub> , POR VOLUMEN)	EMISIONES FUGITIVAS
Tostadores de múltiple hogar Tostador de lecho fluidizado	5-10 10-12	Fuga a través del escudo y puertos abiertos durante el llenado del carro de <i>transferencia</i> ) para transportar la <i>mata</i> al homo).
Hornos de reverbero	0.5-2.5	Escapes de emisiones a través de aberturas en el enladrillado, durante la carga de calcina o concentrados nuevos, durante la adición de la escoria del convertidor, en los lavadores de escoria y de <i>mata</i> durante el accionado de las llaves ( <i>uptake and waste heat boilers</i> )
Convertidor Plerce-Smith - Durante el soplado - Durante la carga (cambio debido a la disolución con aire)	15-21 1-7	Escape de emisiones a través del sistema primario de campanas extractoras ( <i>primary hooding system</i> ) y son emitidas directamente de la boca del convertidor durante la carga.
Fundición Continua: - Proceso Noranda - Proceso Mitsubishi	16-20 11	Las emisiones del Noranda, entre la primera campana de toma de calor ascendente ( <i>primary uptake hood</i> ) y la boca del homo, de la boca cuando está en la <i>rolled out position</i> , alrededor del <i>tapping</i> de la <i>mata</i> , y en el puerto de alimentación de concentrados y fundentes.
Homo eléctrico	5+	Emisiones fugitivas menores que la mayoría de hornos de reverbero sino son mantenidos apropiadamente el enladrillado puede ser una fuente de emisiones. Las emisiones pueden ocurrir durante la extracción de la escoria, y la <i>extracción de la mata</i> , el retorno de la escoria del convertidor alrededor de los electrodos y el manipuleo de la calcina.
Fundición Instantánea - 30% de Oxígeno Enriquecido - Tonelaje de Oxígeno	10-20 70-80	Emisiones fugitivas en los lavadores y cucharones ( <i>ladles</i> ) y de filtraciones a través de las paredes y el techo del homo.
Convertidor Hoboken	8-9	Este convertidor no tiene un <i>hood</i> primario por lo tanto cualquier emisión de la boca del convertidor es <i>emisión fugitiva</i> ; si es diseñado, operado y mantenido apropiadamente hay mínimas emisiones fugitivas. Las emisiones fugitivas ocurren durante la carga de la <i>mata</i> de metal caliente o el vaciado de metal ampolloso.

**Fuente:** Timothy W. Debit, Control of Copper Smelter Fugitive Emissions, PEDCo.- Environmental Inc., Mayo 1980, p. 14; citado por OTA (1988:164).

En términos reales con la tecnología presente, únicamente es factible recuperar SO<sub>2</sub> de los gases cuando este está en concentraciones mayores al 4%.<sup>VIII</sup> Como ya se anotó anteriormente y como se puede observar en el Cuadro 3, solamente son los hornos de reverbero los que producen emisiones de SO<sub>2</sub> en concentraciones menores que esta cifra. Dada la preeminencia de este tipo de hornos en la fundición de cobre en países en desarrollo esto señala que prácticamente no hay innovación disponible al final de la línea de producción para controlar aquellas emisiones en estos países.

Hay tres maneras bien establecidas para neutralizar las emisiones de SO<sub>2</sub>, con requerimientos diversos de concentración de este gas de entre 4% y 80% en los gases de salida, a saber, conversión en ácido sulfúrico, conversión en SO<sub>2</sub> líquido y conversión en azufre elemental. El Cuadro 4 presenta las características que las emisiones deben de tener para su conversión óptima, estas características incluyen la concentración del SO<sub>2</sub>, el contenido de oxígeno y la composición y tasa de flujo de las corrientes de gases. Sin embargo, la conversión de SO<sub>2</sub> en ácido sulfúrico es por mucho la más ampliamente usada.



## CUADRO 4

## CARACTERISTICAS DE CORRIENTES DE GAS REQUERIDAS PARA EL TRATAMIENTO

## OPTIMO EN PLANTAS DE RECUPERACION DE AZUFRE

	Porcentaje de SO <sub>2</sub>	Porcentaje de O <sub>2</sub>	Tasa de Flujo y Composición
Acido Contacto:			
- Simple	5-8	8-12	Puede ser variable
- Doble	5-8	8-12	Puede ser variable
SO <sub>2</sub> Líquido:			
- Físico	70-80	Tan bajo como sea posible	Constante
- Químico	10-11(a)	0	Constante
Azufre Elemental:	10 (c)	1-3	Constante

(a) Más económico cuando es constante.

(b) La planta requiere absorción a presión o química seguida por tratamiento de una fuerte corriente regenerada.

(c) De acuerdo a OTA (1988 : 165) La concentración de SO<sub>2</sub> debe ser de 75 a 80%. —Ver nota IX del texto.

Fuente : Lemmon, W.A. "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel", UNEP Workshop, Ginebra, 13-16 de abril de 1981. Citado por UNIDO (1987b:24).

La conversión en **Azufre Elemental** es señalada como la más compleja tecnológicamente, requiriendo una muy alta concentración de SO<sub>2</sub> en los gases de salida, que puede ser producida solamente por el proceso INCO, <sup>ix</sup> que como fue explicado en la sección previa trabaja con cantidades grandes de oxígeno puro. Esta conversión requiere también de grandes cantidades de combustibles de hidrocarburos relativamente caros. Sin embargo es comparativamente más fácil transportar y almacenar que el ácido sulfúrico o el SO<sub>2</sub> líquido.

El proceso en si mismo, consiste en la reducción del SO<sub>2</sub> al H<sub>2</sub>S que es después convertido catalíticamente a azufre elemental. Los varios procesos desarrollados para esta conversión, tales como Outokumpu, Allied Chemical, ASARCO y Texas Gulf, todos usan estas dos etapas (UNIDO, 1987b:25).

El dióxido de azufre líquido, también requiere niveles muy altos de concentración de SO<sub>2</sub> (70-80%) en los gases de salida, y por lo tanto es solamente relevante para procesos tales como el INCO. El proceso consiste en la compresión y refrigeración de estos gases de salida limpios. Este producto requiere instalaciones especiales para su adecuado transporte, pero dado que su mercado es demasiado

pequeño aún en los Estados Unidos, estas instalaciones no han sido todavía desarrolladas.

El ácido sulfúrico, por otro lado, es un insumo industrial ampliamente usado. Sin embargo es caro transportarlo y por lo tanto si no hay un mercado cercano quizá no sea posible comercializarlos.

La conversión de SO<sub>2</sub> en ácido sulfúrico requiere primero que nada, antes de entrar en la planta de ácido, que los gases sean previamente enfriados y limpiados a través de sistemas colectores de polvo. En la planta, el SO<sub>2</sub> es contactado con el oxígeno en presencia de un catalizador para formar SO<sub>3</sub> que es entonces absorbido en una corriente circulante de 98.5% de ácido sulfúrico y 1.5% de agua, reaccionando con el agua para producir un ácido sulfúrico más concentrado. Algunas plantas son diseñadas para que los gases pasen solamente una vez por el sistema y otras para que pasen dos veces. Las primeras son llamadas plantas de contacto simple / absorción simple y muestran una eficiencia típica de conversión del 96-98%. Las segundas son llamadas plantas de doble contacto/doble absorción y pueden capturar hasta el 99.8% del SO<sub>2</sub> (OTA, 1988:163-164).

Sobre la base de la discusión anterior, los párrafos siguientes presentarán las innovaciones que aparecen como particularmente relevantes para mejorar, en forma fundamental, el control ambiental de la fundición de cobre en estructuras productivas similares a aquellas que prevalecen en países en desarrollo.

a. Soluciones Ambientales al Final de la Línea de Producción

Ha quedado claro de las secciones previas que con las tecnologías presentes, sin importar qué técnica de fundición particular es usada, las emisiones de dióxido de azufre están siempre presentes como un peligro ambiental, el control adecuado de las cuales requiere de instalaciones especialmente diseñadas, más frecuentemente de plantas para su conversión en ácido sulfúrico. Estas instalaciones realmente requieren importantes asignaciones de capital y la proximidad del mercado para el respectivo subproducto. (vg. en el caso del ácido sulfúrico se ha señalado el crucial problema que representa su transporte y almacenamiento).

Por lo tanto, la instalación de una planta de ácido sulfúrico, en la mayoría de casos, será la más importante solución ambiental al final de la línea de producción para la fundición de cobre. Los importantes costos de capital involucrados en esta fueron resaltados anteriormente. Si el mercado de ácido sulfúrico es muy limitado, o inexistente localmente, como es el caso en muchos países en desarrollo, los costos de producción subirán y por lo tanto las ventajas comparativas de los países que introducen este tipo de control ambiental, ceteris paribus, se deteriorarán o aún se revertirán en comparación a otros productores presentes o potenciales.

Sin embargo, esta no es de ninguna manera la primera decisión real que muchos países en desarrollo enfrentan, o tendrán que enfrentar bajo la presión de regulaciones ambientales que tengan como objetivo neutralizar los peligros presentados por las emisiones de SO<sub>2</sub>. De hecho, puesto que sus típicas fundiciones usan hornos de reverbero que emiten gases con concentraciones de SO<sub>2</sub> demasiado débiles (0.5%-2.5%) para ser susceptibles a su conversión económica en ácido sulfúrico, una decisión para realmente controlar estas emisiones necesariamente implicará ya sea la adecuación de estos hornos, siguiendo por ejemplo el proceso El Teniente, o su completo reemplazo por alternativas tecnológicas modernas.

Como se debe recordar de lo señalado anteriormente, prácticamente no hay tecnologías económicamente factibles disponibles para controlar las emisiones de SO<sub>2</sub> de los hornos de reverbero. Por lo tanto, los productores disponen de ellas directamente a la atmósfera, usando chimeneas altas para ayudar a su dispersión. Esto, por supuesto, no neutraliza el peligro ambiental de las emisiones de SO<sub>2</sub>. Una solución real requerirá cambios técnicos en planta, para asegurar las requeridas concentraciones de SO<sub>2</sub> que permitan su potencial control ambiental en términos económicamente factibles.

#### b. Soluciones Ambientales en Planta

Refiriéndose específicamente a las fundiciones que usan hornos de reverbero, como se acaba de argumentar, el control ambiental de sus emisiones de SO<sub>2</sub>

requerirá ya sea las adecuadas modificaciones de estos hornos o su reemplazo por tecnologías de oxígeno o eléctricas.

Las modificaciones del horno de reverbero con la introducción de los quemadores oxígeno-combustible y la simultánea fundición-conversión autógena, siguiendo el proceso El Teniente, parece ofrecer una alternativa viable. Esta ha sido aplicada industrialmente por CODELCO en por lo menos dos fundiciones, obteniendo no solamente concentración de SO<sub>2</sub> adecuadas para su recuperación económica sino también costos de fundición 30% más bajos y un sustancial incremento de la capacidad. Todo esto con cambios relativamente menores en los hornos del reverbero y en la disposición general de la planta.

Sin embargo, hasta donde se puede deducir de la información disponible sobre esas fundiciones chilenas (ver cuadro 4), aquellos cálculos no parecen incluir la operación de las plantas de ácido sulfúrico. Esto, por supuesto, debe ser incluido para determinar la factibilidad económica de este tipo de control ambiental. Como se anotó anteriormente, si el adecuado mercado para ácido sulfúrico no existe, o si no se encuentra un uso alternativo para este en las operaciones mismas, los gastos relacionados con la planta de ácido sulfúrico tendrán que ser cargados a la producción de cobre.

En cualquier caso, el reemplazo de los hornos de reverbero por otros tipos de hornos disponibles para un control ambiental económicamente viable, deberá en general implicar la instalación de una planta de ácido sulfúrico específicamente para este propósito. De otra manera sería difícil explicar el por qué esta planta se habría instalado al lado de una fundición cuyas emisiones no pueden tratar económicamente.

Siendo esto así, un cambio de una instalación de fundición basada en la tecnología convencional de hornos de reverbero a una versión modificada de este tipo de horno, como aquella de El Teniente, con el objetivo de controlar las emisiones de SO<sub>2</sub> tendrá que incluir la instalación de la correspondiente planta de ácido. Por lo tanto, las asignaciones de capital requeridas para el real desarrollo de este tipo de proyecto son, por supuesto, posiblemente mucho más altas que aquellas que se refieren sólo a los cambios en la planta misma de fundición (es decir, cambios en los hornos).

Un desarrollo tecnológico aparentemente importante, al cual ya se hizo referencia en la sección correspondiente, y que puede reducir significativamente los costos de modificación del horno de reverbero para hacerlo adecuado al control ambiental, es el que corresponde a la construcción de una pequeña columna de reacción dentro de la cual la fundición de oxígeno de estos concentrados es comenzada para después transformarse en un proceso autógeno. Sin embargo, esta innovación como se anotó anteriormente, está todavía en su fase de prueba piloto.

Por último, el reemplazo del horno de reverbero por un horno eléctrico<sup>x</sup> o por un horno de tecnología de oxígeno con el objetivo de controlar las emisiones de SO<sub>2</sub> de fundición, representa probablemente una solución superior a aquella de adecuación para control. Sin embargo, la primera alternativa es muy probable que requiera compromisos de inversión mucho más grandes que los de la segunda. Esto es muy claramente mostrado por la decisión que INCO tuvo que enfrentar en su fundición en Chino, y que es citada por OTA (1988:191). Esta fundición usó un horno de reverbero convencional y tuvo que decidir, dada las regulaciones ambientales, si cerrar, readecuar o reemplazar dicho horno por una unidad de sus hornos de fundición instantánea. El capital incremental correspondiente y la tasa de retorno incremental para estas dos opciones son presentadas en el Cuadro 5.

**CUADRO 5**

**EVALUACION FINANCIERA DE ALTERNATIVAS DE FUNDICION CONSIDERADAS POR  
LA MODERNIZACION DE CHINO**

	<b>Capital Incremental (En mil. US \$)</b>	<b>Tasa Incremental de Retorno (%)</b>
Planta INCO vs. Cierre	99	23
Readecuación de la Planta vs. Cierre	32	17
Planta INCO vs. Readecuación	67	26

**Fuente:** R.D. Wunder y A.D., Trujillo (Sept. 1987:867-872), citado por OTA (1988:191).

Esto muestra que para reemplazar el horno de reverbero por un horno de fundición instantánea hubiera costado US\$ 67 millones más que su adecuación, sin embargo la inversión en el horno de fundición instantánea ofrecía una tasa de retorno más alta.

Ésta, posiblemente no fue una decisión fácil para INCO y probablemente no hubiera habido mucha diferencia para INCO si hubiera tenido que enfrentar una decisión similar sobre una fundición localizada en un país en desarrollo. Sin embargo, para un productor local en un país en desarrollo sujeto a restricciones financieras fuertes y con sus posibilidades de inversión restringidas a la dimensión nacional, colocado en una situación familiar, su decisión final probablemente hubiera tenido consecuencias de mucho más largo alcance para la firma que aquéllas que tuvieron o pudieron tener para INCO en su decisión sobre su fundición en China. Así no sería aventurado suponer que productores de países en desarrollo tenderían a favorecer la opción de adecuación de los hornos; y probablemente, ellos tratarían de pelear contra las regulaciones ambientales que los habrían empujado a esta situación. Esto sería particularmente así en casos en los cuales el sector minero juega un rol decisivo en la economía nacional, y en el que las firmas implicadas son muy conscientes de esto y logran usar su fuerza para perseguir sus propósitos.

Se debe recordar acá que la naturaleza de la industria minera la ha hecho ser conocida como, en general, conservadora con relación a la adopción de cambios tecnológicos importantes.

El típico gran tamaño de la inversión minera y los largos períodos de maduración requeridos por esta obligan a los niveles de decisión de la industria minera a ser muy cautelosos. Como OTA (1988:191) lo anota: "La incertidumbre de los precios y los costos altos de capital encontrados a través de la vida de una mina o planta tiende a hacer a los gerentes muy conservadores en sus decisiones de inversión. Los gerentes en la industria minera son notorios por su renuencia a invertir en tecnologías no probadas en razón de su riesgos. [..<sup>XI</sup>..] Los gerentes también son conocidos por su tendencia a reparar, reconstruir y readecuar antes que reemplazar su equipo. El reemplazo de equipo es evitado debido a sus costos de capital más las ineficiencias de la fase de arranque, y a las revisiones del plan de minado y de procesamiento de minerales. Más frecuentemente el equipo gastado u obsoleto es reparado, reconstruido o readecuado, algunas veces a lo largo de 40 ó 50 años".

Esta aseveración, que se refiere a la industria minera de Estados Unidos, provee apoyo adicional a la afirmación hecha anteriormente con relación a la posible

decisión de los productores locales de cobre en los países en desarrollo que usan hornos de reverbero, de readecuarlos antes que reemplazarlos por hornos modernos. Y también indica que aún las subsidiarias de firmas transnacionales, por lo menos en el caso de firmas estadounidenses, posiblemente favorezcan la readecuación antes que el reemplazo de los hornos de reverbero para satisfacer las regulaciones ambientales.

Esto por supuesto, no debe ser extrapolado a proyectos enteramente nuevos para concluir que estas subsidiarias posiblemente favorecerían la alternativa de hornos de reverbero para sus proyectos de fundición, puesto que el tamaño de la inversión será grande de cualquier manera y escoger una tecnología más moderna y ambientalmente apropiada es previsible que les ofrezca una imagen nacional menos vulnerable que pueda reducir los riesgos de inversión. Estas subsidiarias podrían hacer esto aún en la ausencia de regulaciones ambientales y no necesariamente incurriendo en inversiones estrictamente de control ambiental, retardando estas últimas hasta el eventual momento en que las presiones para este control emerjan. Así por ejemplo algunas instalaciones para control ambiental quizá no sean instaladas hasta que las firmas estén legalmente obligadas a hacerlo.

De esta manera la conclusión general aquí sería que el control ambiental de la fundición de cobre, con la tecnología actual, siempre requiere soluciones al final de la línea de producción, constituida por una planta de ácido. Sin embargo, los hornos de reverbero que son los más comúnmente usados en la fundición de cobre en países en desarrollo, generan emisiones de SO<sub>2</sub> que no pueden ser controlados económicamente por este ni por ningún otro medio. Las únicas opciones abiertas a su control ambiental son ya sea la modificación del horno con tecnologías de oxígeno-combustible (oxi-fuel), como el proceso El Teniente, o reemplazar el horno por uno eléctrico o uno de tecnología de oxígeno. De estas dos opciones, debido a las características particulares de la inversión minera y las prevacientes restricciones financieras que enfrentan los productores locales en países en desarrollo, parece más posible que estos preferirán readecuar los hornos de reverbero antes que el reemplazo de sus instalaciones. El comportamiento de las subsidiarias extranjeras posiblemente no sea muy diferente, en este respecto, aunque se debe esperar que estas firmas invertirán en tecnologías modernas (vg. tecnologías de oxígeno) y

apropiadas para el control ambiental, en sus proyectos nuevos ("greenfield projects") en países en desarrollo.

## B2 Fundición de Plomo y Fundición de Zinc

Estos dos metales, como ya se mencionó cuando se discutió el proceso de flotación, son muy frecuentemente encontrados juntos en los mismos minerales y producidos como coproductos. Algunas veces hay también una significativa presencia de cobre y, como es común en las minas peruanas, de plata. Se mencionó también allí que de hecho una tendencia tecnológica importante en el proceso de flotación, era el movimiento para mejorar la flotación no selectiva lo que permite tasas de recuperación del metal más altas, y tratar estos concentrados en procesos modernos de fundición de concentrados que están emergiendo para producir simultáneamente dos o más metales.

Por lo que se acaba de anotar los casos de la fundición de plomo y de la de zinc serán tratados en la medida de lo posible, en forma simultánea.

### i. Descripción de los Procesos de Fundición de Plomo y de Zinc

#### a. Zinc

Al presente hay dos rutas prevalecientes para la producción de metal de zinc. La ruta electrolítica que corresponde a la casi tres cuartas partes del volumen de producción mundial, procede: primeramente, a través de la tostación de los concentrados de sulfuros para producir óxidos de zinc; este proceso reduce el contenido de azufre en la carga con las consecuentes emisiones de SO<sub>2</sub>. En segundo lugar, estos óxidos son lixiviados en ácido sulfúrico para a su turno producir una solución de sulfato de zinc, que una vez purificada y electrolizada produce el metal de zinc (Hiscock, 1984:15).

La otra ruta alternativa, que corresponde a la mayor parte del resto de metal de zinc producido es la ruta térmica y básicamente corresponde al proceso Imperial Smelting Furnace (ISF). Otros procesos pirometalúrgicos antiguos como aquellos que



usan retortas horizontales o verticales han perdido su peso en el total de la producción y, por lo tanto, no serán discutidos aquí.

El ISF es un proceso relativamente moderno, desarrollado entre 1945 y 1959. Este proceso fue originalmente diseñado para producir zinc, pero puede producir simultáneamente zinc y plomo. Más aún cuando la carga del horno contiene también cobre y metales preciosos, estos pueden seguir al plomo cuando es separado del zinc, aumentando la tasa de recuperación y la producción de subproductos (Atkins y Lowe, 1979:150-153).

El proceso consiste de dos etapas básicas, primero, similarmente a la ruta electrolítica, la tostación debe ser desarrollada pero esta vez en una planta de sinterización para producir óxido de zinc en una forma adecuada, más específicamente pellets, para la carga del ISF. En segundo lugar, en el ISF la reducción de los óxidos es llevada a cabo por carbón o monóxido de carbono a temperaturas suficientemente altas como para producir zinc en un estado de vapor. La absorción de zinc de los gases es llevada a cabo a través del enfriamiento de los vapores de zinc en una ducha de plomo fundido obteniendo como resultado zinc en estado líquido disuelto en plomo fundido. En un circuito condensador, el zinc se separa del plomo para su moldeo o refinación. Este último proceso puede tener lugar por destilación, recuperando de esta manera el cadmio que en la mayoría de casos acompaña al zinc, y que tiene que ser recuperado para evitar la acción de su naturaleza altamente tóxica.<sup>xii</sup>

#### b. Plomo

La ruta convencional para producir metal de plomo ha sido por mucho tiempo la tostación de sulfuros de plomo (por amplio margen la forma más común en que el plomo es encontrado) en una planta de sinter para producir óxidos que son después reducidos por coque en un alto horno. El plomo metálico obtenido está entonces listo para su refinación. Como en la tostación en el caso del metal de zinc, la tostación de sulfuros de plomo en la planta de sinter genera importantes emisiones de SO<sub>2</sub>. La planta de sinter también involucra importantes emisiones de polvo de plomo que son, conjuntamente con las emisiones de SO<sub>2</sub> de importancia central desde una

perspectiva ambiental. Las máquinas de sinter del tipo de calor ascendente, en general producen emisiones de SO<sub>2</sub> con concentraciones superiores al 4% en los gases de salida que por tanto son adecuadas para la recuperación económica de aquel. Este no es el caso de las máquinas sinter de tipo de calor descendente cuyas emisiones de SO<sub>2</sub> son demasiado bajas para dicha recuperación económica (Hiscock, 1984:15; UNIDO, 1987b:34-35).

ii. Cambio Técnico en la Fundición de Plomo y de Zinc

Aunque se ha anotado que hay una tendencia en la fundición de plomo al reemplazo de la ruta de la planta de sinterización/alto horno por los procesos de fundición directa recientemente desarrollados, también se ha reconocido que por buen tiempo el primero continuará siendo la más eficiente alternativa para el tratamiento de determinados minerales complejos. Es así que se ha documentado recientemente que por ejemplo en el caso de fundición Hoboken "el circuito sinterización-alto horno alto [...] permanecerá como una herramienta esencial para tratar concentrados complejos y subproductos".<sup>xiii</sup>

Sin embargo, el proceso de fundición directa, en la mayoría de casos ha sido diseñado para producir simultáneamente metal de plomo y de zinc. Hay dos tipos diferentes de fundiciones directas, a saber, aquellas que usan fundición instantánea y aquellas que usan fundición de baño.

Aunque ambos tipos de fundición están emergiendo como procesos nuevos, las fundiciones instantáneas comenzaron a ser aplicadas en una escala comercial unos años antes, a mediados de los años 80 mientras que las fundiciones baño recién alcanzaron este punto a finales de los años 80. Así por ejemplo, a mediados de los 80 el proceso Kivcet, el único proceso de fundición instantánea de plomo/zinc que ha alcanzado operación a nivel comercial, aparte de sus operaciones en la Unión Soviética, también era operado en Karachipampa, Bolivia, y en Porto Vesme, Italia. En ese mismo momento sólo existía una planta de demostración del proceso QSL en Duisberg, Alemania. Sin embargo, solamente unos años más tarde en 1990 se reportaba que plantas QSL estaban próximas a ser operadas en la República Popular

China, Canadá, Alemania y Corea del Sur (EM/J; UNIDO, 1987a:93; Castle y Balaskrishnan, 1990:136).

En adición a los procesos Kivcet y QSL existen otros procesos de fundición directa que son mencionados en la literatura como que tienen buenas perspectivas, de tornarse competitivas aunque no en el corto plazo; estos son el proceso de fundición instantánea de Outokumpu y los procesos de fundición de baño de Boliden y Kaldor (TBCR). Al presente ninguno de estos procesos está operando a una escala comercial (Castle y Balaskrishnan, 1990:138; UNIDO 1987a:96).

El proceso Outokumpu es en realidad una adaptación del reactor que ha estado por buen tiempo en uso para la producción del metal de cobre y níquel. De una forma similar a lo que fue explicado anteriormente para el caso del cobre, el horno es neumáticamente alimentado con concentrados de plomo/zinc y fundentes a través de un quemador/distribuidor localizado en la parte alta del techo. Así, la alimentación de oxígeno o de aire enriquecido de oxígeno se funde a manera que desciende en el reactor. El propósito es producir una reacción autógena, reduciendo el volumen de gases de salida, de polvo, con una concentración alta de las emisiones de SO<sub>2</sub> y, por su puesto, un consumo más bajo de energía. La escoria del horno de fundición instantánea contiene un nivel alto del plomo (hasta un 40%) de tal manera que es necesario proceder a su recuperación en un horno eléctrico, donde la escoria es reducida con carbón. El zinc que es volatilizado en el horno eléctrico puede ser recuperado hasta en un 80% (UNIDO, 1987a: 87-88).

El proceso Kivcet que como se mencionó anteriormente fue desarrollado en la Unión Soviética fue comercializado internacionalmente por Humboldt Wedag AG de Alemania. El proceso en sí mismo es bastante similar al Outokumpu. De esta manera los concentrados plomo/zinc, que han sido previamente secados, los fundentes y el oxígeno son alimentados bajo presión en el reactor provocando la fundición instantánea. La carga pasa a una sección del horno eléctrico donde el coque es soplado para su reducción a plomo bullion que es colectado en el hogar del horno. La escoria contiene menos del 3% de zinc y 3% de plomo. Además el zinc puede ser recuperado a través de los humos de la sección del horno eléctrico. Desde una perspectiva de control ambiental este también ofrece un alto nivel de concentración

(30% a 55%) de SO<sub>2</sub> en los gases de salida y permite el control ambiental económico de este compuesto.

Se debe añadir aquí, que al presente ya existe información sobre la operación de este proceso en una escala comercial, que indica su potencial como una alternativa altamente competitiva a los procesos de fundición convencional. De esta manera Castle (1991:15) se refiere a un estudio de Perillo et al (1990:903) de los tres años de operación de la planta de Nova Samin en Porto Vesme que concluye que "los logros del proceso [...] en comparación con la tecnología convencional son el cumplimiento con las leyes de higiene más estrictas; una reducción del 50% en los costos de producción; un alto grado de flexibilidad para la alimentación (puede tratar concentrados de baja ley, residuos de lixiviación, y desechos de baterías); alta disponibilidad de planta y alto nivel de automatización; bajos costos de mantenimiento". Debe añadirse, que en un trabajo previo Perillo et al (1989), sobre la base de esta planta dio un estimado preliminar de una nueva fundición Kivcet, excluyendo las plantas de oxígeno y de ácido y con una capacidad de producción de 80,000 tpa. en alrededor de US\$ 40-45 millones.

Se debe indicar por otro lado, que la fundición Kivcet en Karachipampa, Bolivia, aparentemente nunca llegó a operar a plena capacidad, debido a la falta de un suficiente volumen de concentrados para su operación, lo que obligó finalmente a su cierre (EM/J).

El proceso QSL de Lurgi, Alemania, es el único proceso de fundición continua de plomo que está trabajando en una escala comercial. En este proceso, todas las reacciones tienen lugar en el mismo reactor. Este está compuesto de dos zonas, una de oxidación y otra de reducción. Los concentrados y los fundentes sin previo secado son alimentados desde el techo en el reactor horizontal que cuenta con inyectores de oxígeno en la parte de abajo. De esta manera, la alimentación es disuelta en el baño fundido y oxidado por el oxígeno comercial inyectado de abajo, produciendo un bullion de bajo contenido de azufre que es colectado en la parte de abajo, así como una escoria de PbO con hasta un 50% de plomo y SO<sub>2</sub> con una concentración de 15 a 20% en los gases de salida. El PbO se traslada para ser reducido a través de carbón ~~substantivo a lo largo~~ del reactor.

Las ventajas que se afirman, según UNIDO (1987a:93) son las siguientes: "1) operación continua en un solo reactor; 2) gran flexibilidad en el contenido de plomo y azufre en los concentrados; 3) uso de calor de oxidación de sulfuros para fundir la carga; 4) bajos costos de capital y trabajo, los cuales son 30% más bajos que los de fundiciones convencional; 5) altas posibilidades para la automatización de las operaciones".

A eso se debe añadir, la buena concentración de SO<sub>2</sub> para su recuperación económica en una planta de ácido sulfúrico para su control ambiental, y la significativa flexibilidad de su escala económica de cerca de 50,000 tpa. a 160,000 tpa. De hecho, el proceso QSL ha sido calificado como "el principio de una nueva generación de la fundición de plomo ..." (ver Castle 1991:15; Mager y Schulte, 1989).

Los detalles de la capacidad de producción y los materiales de la carga de las cuatro plantas QSL en operación o próximas a ser operadas, propiedad de Berzelius Metalhütten GmbH (Alemania), Cominco Ltd. Trail (Canadá), Korea Zinc Co. Onsan (South Korea) y China Non-Ferrous Metal Import (CNIEC), son presentados en e Cuadro 6.

CUADRO 6

## CAPACIDAD Y MATERIALES DE CARGA DE PLANTAS QSL

	República Popular China	Canadá	República Federal Alemana	República de Korea
<b>Planta QSL</b>				
Capacidad Producción de Plomo Bullion en tpa.	52,000	120,000	80,000	60,000
<b>Capacidad del Reactor</b>				
- Largo Total, m	30	41	33	41
- Diámetro Zona de Oxidación, m.	3.5	4.5	3.5	4.5
- Diámetro Zona de Reducción, m	3-0	4-0	3-0	4-0
<b>Carga Diaria de Materia Prima, tpd.</b>	260	1,230	500	230
<b>% de Concentrados y de Residuos en la Mezcla de la Carga de Materias Primas</b>	100% concentrados	53% concentrados 47% residuos	63% concentrados 37% residuos	53% concentrados 47% residuos
<b>Composición de la Mezcla de Materias Primas</b>				
- % Pb	66	34	45	35
- % Zn	5	10	5	10
- % Cu	0.2	1.4	0.7	0.6
- % As	0.05	0.4	0.3	0.3
- % Sb	0.04	0.5	0.4	0.3
- % Cd	0.04	0.2	0.05	0.3
<b>Nm<sup>3</sup>-h de Gases al Reactor:</b>				
- Oxidación				
Oxígeno de Toberas	2,250	13,000	4,700	7,300
Nitrógeno de Toberas	480	1,350	1,100	1,200
Gas Natural de Toberas	-	-	-	-
Oxígeno de Combust. Aire de Combust.	-	2,350	500	-
	-	-	-	4,500
- Reducción:				
Polvo de Carbón Toberas tph.	0.7	-	0.9	1.4
Aire de Cargador Toberas	270	-	400	700
Oxígeno Toberas	630	1,450	700	950
Nitrógeno Toberas	540	-	-	850
Gas Natural Toberas	-	1,750	400	-
Oxígeno Combust. Aire Combust.	?	-	-	-
	?	3,000	1,650	2,580
<b>Plomo Bullion, Tph.</b>	7.2	33.8	9.6	7.9
<b>Escoria, Tph.</b>	4.0	28.4	7.1	8.8
<b>Nm<sup>3</sup>/h de Gases</b>				
- Oxidación	14,000	44,000	22,400	31,000
- Reducción	-	25,300 (350°C)	-	65,300 (120°C)
<b>Vapor Tph</b>	6.0	33.0	14.3	19.0

Fuente : Castle y Balakrishnan (1990:136) basado en Mager and Schulte (1989).

De la discusión anterior acerca de las tecnologías que están emergiendo para la fundición de plomo y zinc, las tecnologías de fundición directa, (por lo menos los casos particulares del Kivcet y de los procesos QSL) parece al presente ofrecer suficiente evidencia de su competitividad y potencial para su uso en países en desarrollo.

Unos años atrás UNIDO (1987a:97) concluyó acerca de este punto que "estas tecnologías emergentes [los procesos de fundición directa] tendrán todavía que ser probadas convincentemente en plantas de producción de plena escala [...] la naturaleza real de los problemas y las consideraciones comerciales recomiendan fuertemente que los países en desarrollo usen solamente una tecnología probada y confirmada". Parece ahora, que estas condiciones puestas para la aplicación de estas tecnologías en países en desarrollo han sido ya satisfechas.

### iii. Cambio Técnico en la Fundición de Zinc y de Plomo, y Control Ambiental

#### a. El caso del Zinc

La ruta electrolítica convencional para la producción de metal de zinc que involucra tostación y lixiviación, según fue esquemáticamente descrita en la sección previa, presenta riesgos ambientales a todos los medios: agua, aire y suelos.

La tostación de concentrados genera gases de salida con contenido de SO<sub>2</sub>, polvo, humos de metales pesados (incluyendo mercurio, cadmio y arsénico) que deben ser controlados para evitar potenciales daños ambientales.

La concentración de SO<sub>2</sub> en los gases de salida de antiguas instalaciones de tostación tales como los hornos de tostación de hogares múltiples es demasiado baja para su recuperación económica en una planta de ácido sulfúrico y la única medida que es frecuentemente tomada, si esta es posible, es incrementar su dilución y enviarla a una chimenea alta. Este no es el caso de los modernos tostadores, como el de lecho fluidizado que genera gases de salida con niveles de concentración de hasta un 9.5% del SO<sub>2</sub>, que están muy por encima del mínimo necesario para su control ambiental económico (UNIDO 1987b:45). Más aún recientemente se ha documentado, que mejoras importantes obtenidas a través del uso del

enriquecimiento de oxígeno en este tipo de tostadores, han permitido importantes incrementos en la capacidad de flujo de este tipo de tostadores. De esta manera, ha sido posible alcanzar una reducción en más del 50% en los costos de operación por tonelada producida,<sup>xiv</sup> tornando esta alternativa mucho más atractiva para alcanzar simultáneamente una importante reducción en costos y una más grande capacidad para el control ambiental del SO<sub>2</sub>.

El polvo y los humos en los gases de salida del tostador son controlados por enfriamiento, el uso de ciclones y de precipitadores electrostáticos. Una vez que los gases son limpiados de los metales pesados a través de limpiadores estos pueden pasar a la planta de ácido para la conversión del SO<sub>2</sub> en ácido sulfúrico.

En lo que respecta a la segunda etapa del proceso, esto es, a la lixiviación de los óxidos de zinc, los principales peligros ambientales son presentados por los residuos insolubles de la lixiviación que deben ser neutralizados con cal y finalmente colocados en una laguna diseñada apropiadamente.

En relación a la otra ruta principal para la producción de zinc (plomo), la del Imperial Smelting Furnace, las emisiones de SO<sub>2</sub> y de polvo en los gases de salida permanecen como los principales peligros ambientales. Sin embargo, por lo menos en el caso de las emisiones de SO<sub>2</sub> estas son más apropiadas para el control ambiental debido a su alta concentración en los gases de salida de la fundición. Se debe recordar que este proceso necesita material sinterizado de un determinado tamaño como carga, y que la sintetización produce también emisiones de SO<sub>2</sub> y polvo (Atkins' y Lowe, 1979:153-154). El uso de plantas de sinterización de tipo "calor ascendente" como se anotó anteriormente, genera gases de salida con concentraciones de SO<sub>2</sub> suficientemente altas para su recuperación en una planta de ácido sulfúrico. En cualquier caso si los gases de salida de la máquina de sinterización tuvieran niveles de concentración más bajos, habría la posibilidad de su elevación con los gases de salida del ISF, de tal manera de asegurar su conversión económica en ácido sulfúrico.

Aunque el caso de las fundiciones antiguas de zinc, que usan retortas horizontales y verticales, debido a su bajo peso en la producción total, fue



explícitamente excluido de la presente discusión, se puede indicar que su reacondicionamiento es considerado "difícil" . Como un ejemplo relevante para este punto se menciona, que en los Estados Unidos durante el período 1969-1978 debido a la aplicación de regulaciones ambientales, "seis de cada ocho fundiciones de zinc primario que utilizaban procesos de retorta horizontales y verticales, cerraron definitivamente. Una fue convertida al proceso electrolítico y la otra estaba en operación en 1979" (UNIDO, 1987b:46).

Por último como se mencionó en la sección previa, el cadmio muy frecuentemente acompaña al zinc en los minerales; dado sus efectos altamente tóxicos, los estándares ambientales (es decir, el contenido de metal en los efluentes) son mucho más estrictos que aquellos establecidos para el zinc o el plomo, y tiene que ser recuperado. En la ruta pirometalúrgica para la producción de zinc "la mayor parte del cadmio se volatiliza en la fase de sinterización y es colectada para su mayor procesamiento. En el proceso electrolítico el cadmio también aparece en la solución de lixiviación y es removido por tratamiento de precipitación seguido por redisolución y después electrólisis. (Hiscock, 1984:15). De hecho el grueso del cadmio primario es producido como un subproducto de la producción de metal de zinc. De esta manera, las instalaciones para la producción de cadmio en una planta de fundición de zinc son fundamentalmente requeridas para el control ambiental, sin embargo sus reales costos netos pueden ser substancialmente reducidos, o aún convertidos en utilidades, por la venta del cadmio en el mercado a un precio generalmente mucho más alto que el del zinc.

En lo que respecta a los costos de control ambiental, como se mostrará posteriormente, las cosas no parecen ser demasiados diferentes de lo que ha sido observado para el caso de la fundición de cobre. De esta manera, independientemente de la tecnología usada (incluyendo las nuevas tecnologías de fundición directa), siempre es necesario el establecer instalaciones para el control de las emisiones de dióxido de azufre, más frecuentemente una planta de ácido sulfúrico y otras para controlar emisiones de material particulado. El principal gasto continuará siendo el de la planta de ácido.

Esto es claro de la información que Atkins y Lowe (1979:155-157) presentan para casos en el Reino Unido y de Estados Unidos. De esta manera, en el caso de la planta de ISF en Avonmouth, el control de la polución, incluyendo la planta de ácido representó aproximadamente un cuarto del total de los costos de capital de la planta en 1974 a precios del Reino Unido. Alrededor del 60% de los costos de capital para control ambiental correspondieron a la planta de ácido. Sin embargo la mitad de los costos de operación del equipo de control de polución fueron cubiertos por la venta del ácido sulfúrico producido.

En lo que se refiere a los Estados Unidos los autores presentan estimaciones producidas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en 1974 sobre los costos de control ambiental por tamaño de planta típica. Estas estimaciones están basadas en el reconocimiento que las tareas de control ambiental requieren, fundamentalmente "la introducción de plantas de ácido para controlar las emisiones de dióxido de azufre y casas de manga para controlar material particulado". Estos estimados son presentados en el Cuadro 7. Debe anotarse que las cifras presentadas están muy probablemente desactualizadas, pero aparentemente no hay mucha información relevante fácilmente disponible en este respecto, como puede ser inferida del hecho de que UNIDO (1987b:47), trece años más tarde, cite los mismos estimados.

**CUADRO 7**  
**COSTOS DEL CONTROL DE LA CONTAMINACION POR LOS PRODUCTORES DE ZINC**  
**PRIMARIO EN EE.UU.**

Tamaño del Modelo (Ton.)	Inversión en mil. US\$			Costos Anualizados en mil. US\$			Costos por Tonelada de Capacidad Anual		
	Esperad	Min.	Max.	Esperad	Min.	Max.	Esperad	Min.	Max.
91,000	8.67	6.66	11.1	2.17	1.65	2.77	23.8	18.1	30.4
139,000	11.6	8.82	15.0	2.91	2.23	3.76	20.9	16.0	27.1
149,000	12.2	9.42	15.6	3.09	2.37	3.97	22.2	17.1	28.6

Fuente : Atkins y Lowe (1979:157) citado por EPA-US (1974).

De esta manera se puede resumir en este punto, que las soluciones ambientales al final de la línea de producción a los peligros ambientales presentados por la producción de metal de zinc están disponibles a todos los procesos de fundición, excepto a aquellos que usan antiguos tostadores (vg. hornos de múltiples hogares) y/o máquinas de sinterización (como las de calor descendente), que

producen concentraciones demasiado bajas de SO<sub>2</sub> en los gases de salida para permitir su económico control ambiental. La construcción de una planta de ácido, sin embargo tiene que ser asumida para este propósito. Los gases de salida del proceso ISF contienen altos niveles de concentración de SO<sub>2</sub> que pueden ofrecer la posibilidad para elevar los gases de salida de otras secciones de la planta, de tal manera de tornarlos adecuados para su conversión económica en una planta de ácido. Los costos de capital para control ambiental son importantes, y pueden representar alrededor de un cuarto de lo requerido por la planta de fundición. Por supuesto, esta proporción se incrementará si a estos gastos para el control ambiental al final de la línea de producción fuera necesario añadir inversiones para el control en la misma planta.

b. El caso del Plomo, incluyendo el Moderno Proceso de Fundición Directa

La ruta convencional de la planta de sinterización / alto horno para la producción de plomo bullion, presenta riesgos ambientales similares a aquellos señalados anteriormente para la ruta pirometalúrgica de metal de zinc. Aquí también, las emisiones de SO<sub>2</sub> y de polvo con contenido de plomo son los principales problemas en este respecto y son controlados en una forma similar. El polvo y los humos de metal de la máquina de sinterización y de alto horno son recolectados y limpiados por filtros antes de ser liberados a la atmósfera a través de chimeneas altas (Hiscock 1984:15).

Asimismo, los gases de salida son limpiados de metales pesados a través de enfriamiento para condensarlos y a través del uso de precipitadores. Una vez que los gases de salida son limpiados, y si la concentración de SO<sub>2</sub> es suficientemente alta, este puede ser susceptible para su conversión económica en ácido sulfúrico. Como también se anotó anteriormente, el proceso de sinterización es la más grande fuente de emisiones de SO<sub>2</sub>, y los gases de salida de las máquinas de tipo de calor ascendente tienen concentraciones de SO<sub>2</sub> superiores al 4%, suficientemente altas para su conversión económica. Sin embargo, las emisiones de SO<sub>2</sub> en los gases de salida del alto horno, que representan alrededor del 10% del total de estas emisiones, están demasiado diluidas para su recuperación económica y frecuentemente es más diluida en aire fresco para su final liberación a la atmósfera a través de chimeneas

altas (UNIDO, 1987b:35). Esto por supuesto no siempre elimina el peligro ambiental impuesto por estas emisiones.

En relación con los costos de control ambiental la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha producido también estimados, basados en los requerimientos de las seis plantas más grandes en producción en dicho país en 1974. Estas estimaciones son presentadas por Atkinson y Lowe (1979:93) y reproducidas aquí en el Cuadro 8. Los principales componentes de los costos de capital, como en el caso de zinc, son la planta de ácido y el equipo para control del polvo, las cifras reales son apenas un poco más bajas que aquellas citadas para el caso de las plantas de zinc.

Estas son inversiones en soluciones al final de la línea de producción para el control ambiental, que independientemente de la particular tecnología usada, tendrán que ser llevadas a cabo si éste va a ser realmente implementado. La readecuación de plantas, es decir, soluciones en planta para el control ambiental, a través de cambios parciales implicará inversiones adicionales encima de las ya referidas como inversiones al final de la línea de producción, y aquella puede probar ser demasiado difícil. De esta manera, por ejemplo, UNIDO (1987b:38) cita un estudio de Charles River Associates and the Research Corporation of New England of the Lead Industry Association <sup>xv</sup> indicando que cumplir con los estándares de 1978 establecidos por la EPA de los Estados Unidos, llevaría al cierre de las siete fundiciones del país. Sería, por supuesto enormemente significativo el ver en qué medida este ha sido realmente el caso.

**CUADRO 8**

**COSTOS DE CONTROL AMBIENTAL PARA PLANTAS MODELOS SELECCIONADAS EN LA INDUSTRIA DE PLOMO PRIMARIO EN EE.UU.**

Tamaño del Modelo (Ton.)	Inversión en mil. US\$			Costos Anualizados en mil. US\$			Costos por Tonelada de Capacidad Anual		
	Esperad	Min.	Max.	Esperad	Min.	Max.	Esperad	Min.	Max.
107,000	8.9	4.3	12.5	2.1	1.0	3.0	17.8	8.8	26.3
131,000	9.9	5.1	13.8	2.5	1.2	3.4	17.4	8.3	23.6

Fuente : Alkins y Lowe (1979:93) citado por EPA-US (1974).

Por último, es necesario presentar un comentario final acerca de la relevancia de las nuevas tecnologías emergentes especialmente de las tecnologías de fundición directa en relación al control ambiental, desde la perspectiva de los productores de países en desarrollo. Estas tecnologías ofrecen directamente la capacidad para llevar a cabo el control ambiental de la fundición de plomo/zinc. La alta concentración de SO<sub>2</sub> permite su conversión económica en ácido sulfúrico, en el proveído de que exista el mercado para este producto. Más aún, estas también ofrecen ahorros de energía a través de procesos autógenos de fundición/conversión, y costos de producción más bajos. Se debe recordar que, por lo menos para los procesos más desarrollados de Kivcet y el QSL estas son tecnologías ya comercialmente probadas y por lo tanto, los riesgos ligados a alcanzar su competitividad operativa parecen haber sido ampliamente reducidos. Sin embargo la aversión de las empresas mineras a invertir en nuevas tecnologías hasta que estas sean plenamente probadas, y su preferencia por readecuaciones antes que reemplazos, respondiendo a la particular naturaleza del negocio, como fue explicado cuando se analizó el caso de la fundición de cobre, posiblemente tienda a postergar la difusión de estas tecnologías. Esto es más posible que sea así en el caso de productores sujetos a fuertes restricciones financieras como es el caso de muchas firmas locales privadas y estatales en países en desarrollo. En esta área, bajo el proveído de que la preocupación por el medio ambiente crecientemente expresada por los países desarrollados, tiene algún significado real, parece posible que haya un espacio significativo para propuestas imaginativas para la cooperación con países en desarrollo, para la transferencia de tecnología y/o el desarrollo de tecnologías ambientalmente apropiadas. De cualquier manera, hay signos claros que aquellos productores más avanzados y competitivos en el mundo en desarrollo ya se están moviendo en esta dirección. Así por ejemplo, CODELCO, la compañía estatal chilena, ha firmado un amplio acuerdo de cooperación con Outokumpu de Finlandia, que incluye entre los más variados aspectos del negocio minero, "... el intercambio tecnológico, incluyendo trabajos de investigación y desarrollos conjuntos sobre nuevos métodos, procesos y equipo". (MM, Oct. 1990:254).

Se debe enfatizar aquí, que este ejemplo también indica que por lo menos en algunos países en desarrollo que son importantes productores mineros, han

desarrollado capacidades tecnológicas domésticas a un nivel que pueden estar en situación de jugar un importante rol en una eventual estrategia ambiental, según ha sido provisionalmente argumentado en otra instancia para el caso del Perú.<sup>xvi</sup> En el área de la cooperación internacional en este tema del desarrollo de capacidades tecnológicas domésticas, la identificación de las mismas debe ser por supuesto, el necesario punto de partida.

### III. Conclusiones

El comportamiento de la industria minero-metalúrgica respecto al cambio técnico en el presente siglo ha sido caracterizado como claramente conservador. Los grandes requerimientos de inversión y largos periodos de maduración de la misma, constituyen probablemente una importante parte de la explicación del mismo.

Los países en desarrollo que son importantes productores mineros, han tenido como participantes líderes a empresas de los países industrializados al lado de las cuales en determinados casos se han desarrollado empresas mineras locales de importancia bastante significativa con limitadas conexiones con las primeras. En determinados casos estos vínculos han permitido cierta transferencia tecnológica a las empresas nacionales a través de la movilidad de profesionales y técnicos a través del sector.

El cambio técnico ha tenido tradicionalmente como objetivo central la búsqueda de mejores niveles de productividad por parte de las empresas innovadoras, independientemente del sector de producción del que se trate. Sólo a partir de los años 70, se puede observar la emergencia del control ambiental como el segundo objetivo central del desarrollo tecnológico a nivel de la economía mundial. Los marcos normativos ambientales desde entonces han profundizado sus exigencias y ampliado su cobertura en los países industrializados, los cuales están armonizando al nivel de bloques económicos.. Los países en desarrollo en su condición de altamente dependientes de los países industrializados, han tenido que incorporar ordenamientos legales ambientales que hace pocos años hubieran parecido utópicos en esos medios. La identificación de problemas ambientales de carácter global ha llevado a los países industrializados a concluir que para enfrentarlos con posibilidades de éxito es necesaria la participación de todos los países, y no han dudado en usar su capacidad de coerción sobre los países en desarrollo.

Los condicionamientos de agencias multilaterales de crédito y aun de sectores de la banca comercial internacional, potenciadas por delicadas situaciones financieras en países en desarrollo, han constituido y constituyen un incremento de presión para la incorporación de marcos de normatividad ambiental en estos países.

No es que en los países en desarrollo no hubiera sectores que hubieran mostrado su preocupación por el creciente deterioro de su ambiente, sino que su real capacidad de acción resultaba realmente muy limitada para que pudiera plasmarse en una efectiva política ambiental. El componente externo definitivamente ha cambiado esta situación en general, y es de esperar cambios más claros en sectores tan internacionalizados como el sector minero-metalúrgico.

En esta perspectiva global, el interés de este trabajo ha sido analizar las alternativas técnico-económicas para el control ambiental en el procesamiento de minerales y metalurgia extractiva de metales básicos como el cobre, el plomo y el zinc. De este análisis emergen las siguientes conclusiones:

Los principales desarrollos tecnológicos en el proceso de flotación en los últimos quince años están identificados por una definida tendencia hacia flujos de producción más simples, basados en el enorme crecimiento de las celdas de flotación convencionales, la introducción y rápida difusión de las gigantes columnas de flotación, el ingreso de la revolución micro-electrónica en la planta de flotación para lograr su automatización, y por último, el desarrollo de más eficientes y menos contaminantes reactivos.

Sin embargo, en lo que se refiere a su impacto ambiental sólo se puede observar un limitado avance. Este avance ha tenido lugar de manera colateral, en la búsqueda de una más alta productividad, a través de una mayor tasa de recuperación de metales y un uso más eficiente de reactivos caros. De esta manera la calificación de los efluentes de flotación como ambientalmente riesgosos no cambia por la introducción de las innovaciones mencionadas, también se mantienen para los efluentes de la plantas innovadoras. La conclusión que se alcanza aquí es que las "soluciones al final de la línea de producción" son inevitables, pero el incremento en productividad derivado de la introducción de las mencionadas innovaciones mejorará la capacidad económica de las firmas innovadoras para desarrollar las requeridas Inversiones para el control ambiental.

En relación a la fundición de los tres metales aquí examinados, el principal riesgo ambiental identificado ha sido la emisión de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), en los gases de



salida. En el caso de la fundición de cobre, el problema principal se presenta por las emisiones de SO<sub>2</sub> de los convencionales hornos de reverbero, ampliamente usados en países en desarrollo, que están demasiado diluidos para permitir su recuperación económica.

El principal desarrollo tecnológico en las últimas décadas, en lo que se refiere al incremento de la productividad, ahorro de energía y posibilidades reales de control ambiental, particularmente referente al SO<sub>2</sub>, ha sido la introducción de las tecnologías del oxígeno. La fundición en hornos con este tipo de tecnología se desarrolla con la emisión de gases con altos niveles de concentración de SO<sub>2</sub>, que garantiza la posibilidad para llevar a cabo su recuperación económica, más frecuentemente, a través de plantas de ácido sulfúrico. De esta manera, también aquí la solución del control ambiental al final de la línea de producción es también inevitable.

Asimismo, la introducción de quemadores oxígeno-combustible y de procesos de fundición - conversión simultáneos en los hornos de reverbero convencionales, siguiendo el proceso de El Teniente, parecen ofrecer una solución apropiada a productores de países en desarrollo, porque produce emisiones de SO<sub>2</sub> adecuadas para el control ambiental, incrementa la capacidad de los hornos en una magnitud importante sin el requerimiento de cambios fundamentales en el horno, y requiere inversiones substancialmente más bajas.

En los casos de la fundición de zinc y de plomo, el control de las emisiones de SO<sub>2</sub> es importante, pero en la mayoría de casos puede ser recuperado económicamente para su conversión en ácido sulfúrico. El impacto de tecnologías de oxígeno también son considerados importantes en este caso, para lograr substanciales incrementos en productividad y un más fácil control ambiental. En este caso, el proceso QSL de Lurgi y el Kivcet parecen ofrecer suficiente evidencia de competitividad para países en desarrollo. No obstante aquí también las soluciones al final de la línea de producción son ineludibles.

<sup>i</sup> Debe señalarse que esto está en claro contraste con lo que UNIDO (1987<sup>a</sup>:30) anota, particularmente con relación a los Estados Unidos y Canadá, justamente antes de que la recuperación de los precios a partir del año 1987: “Esencialmente lo que está pasando es que el clásico y antiguo flujo de producción del sulfuro de cobre, consistente en chancado y molienda, lixiviación y electrodeposición, a través del cual, las etapas caras de molienda fina, flotación y fundición son eliminadas con la subsecuente reducción de costos de producción”.

<sup>ii</sup> Por lo menos, no se ha encontrado en el material revisado ninguna aseveración en este sentido. UNIDO (1987:S:43) refiriéndose a la flotación de MoS<sub>2</sub>, obtenido como subproducto de la producción de cobre de Chuquicamata, Chile, explica que el 55% de tasa de recuperación obtenida con celdas convencionales pasó 87% con la introducción de celdas en columna. Esto significa que allí hay todavía una magnitud significativa de molibdeno, y probablemente de reactivos con respecto a los cuales la información no es proveída, en los afluentes de este proceso que puede todavía requerir un significativo gasto en tratamiento y en reciclaje para eliminar su potencial de riesgo ambiental.

<sup>iii</sup> Esto también es expresado por UNIDO (1987 b:23)

<sup>iv</sup> Su mata típica contiene 70% de Cu, 22% Fe, 8% S (UNIDO 1987 a:66)

<sup>v</sup> En Willy (1989) citado por Castle y Balakrishnan (1990:132)

<sup>vi</sup> El grado típico de la mata del INCO es estimado en 48% Cu, 24% S y 26% Fe por ONUDI (1987:66)

<sup>vii</sup> Según ha sido citado en Castle and Balakrishnan (1990:133)

<sup>viii</sup> OTA (1988:166) Argumenta que es posible incrementar las bajas concentraciones de SO<sub>2</sub>, vg. menores al 4%, a niveles mayores que esta cifra por la aplicación de sulfurización del gas de combustión (FGD). Este proceso consiste en remover SO<sub>2</sub> a través de reacciones químicas con cal, óxido de magnesio, amoníaco y dimetil. El FGD no regenerativo obtiene un barro residual por el uso de limpiadores. Sin embargo, esta misma fuente alude a problemas al elevar la escala y de conexión en la aplicación real de esta tecnología, y que solamente una fundición en Estados Unidos la está usando.

<sup>ix</sup> Esto es argumentado por OTA (1988:165). Sin embargo, en este punto hay una discrepancia principal en el nivel requerido de concentraciones de SO<sub>2</sub> en la corriente de gases para la optimización de su conversión en azufre elemental, entre las cifras de 75% y 80% presentada por OTA, por un lado y, entre el 10% y 11% dado por ONUDI (1987 b:24) presentada en el Cuadro 1, por el otro.

<sup>x</sup> El horno eléctrico produce emisiones de SO<sub>2</sub> con concentraciones superiores al 5% (ver Cuadro 1), y por lo tanto ofrece la posibilidad de recuperación económica del azufre. Sin embargo, no se le ha dado particular atención aquí por que primero, este requiere de la disponibilidad de amplias fuentes de energía eléctrica barata y en segundo lugar porque los desarrollos tecnológicos de la tecnología del oxígeno han sido comparativamente bastante más importantes en un periodo de tiempo más corto.

<sup>xi</sup> Se explica además que: "más aún, es extremadamente difícil guardar exitosamente la propiedad de las innovaciones. La tecnología se transfiere rápida y fácilmente en la industria del cobre, de tal manera que solo pequeñas ganancias llegan a la operación que primero trata una nueva tecnología". En una nota a pie de página se explica que "la facilidad y rapidez de la transferencia tecnológica viene de la apertura general en la industria y del hecho de que las tecnologías son principalmente desarrolladas por los vendedores de equipos".

<sup>xii</sup> Esto corresponde a la operación de la planta de ISF de Commonwealth Smelting Ltd. en Avonmouth en Inglaterra según es descrito por Atkins y Lowe (1979:151). También se señala allí que "La absorción de zinc de los gases necesita un control cuidadoso para evitar la reoxidación y también la formación de un condensado finamente dividido. Debido a estos problemas un alto horno a escala comercial no fue construido sino hasta 1959, aunque trabajos a escala piloto grande fueron comenzados en 1950. El principal problema a ser superado en el desarrollo del proceso de reducción de alto horno para producir zinc fue el problema del condensamiento del zinc a partir de grandes volúmenes de gas, que contienen un alto porcentaje de dióxido de carbono". Este problema fue resuelto con la aplicación de una ducha de plomo fundido, como fue explicado en el texto.

<sup>xiii</sup> Esto es argumentado por Van Camp y Crauwells (1989:357-364) según ha sido citado por Castle y Balakrishnan (1990:136).

<sup>xiv</sup> Castle y Balakrishnan (1990:138) indica que Sala et al (1989) explica que "Una planta ha usado 3% de enriquecimiento de oxígeno y ha realizado un incremento de

---

producción del 21% y se postulan incrementos de flujos de producción de hasta 30% [...]. Los autores afirman que con crédito por la producción adicional de ácido el próximo costo por tonelada extra de flujo de producción en un tostador es cerca de US\$25 comparado con un costo de operación convencional de US\$45 a 65 por tonelada en los Estados Unidos”.

<sup>xv</sup>. Ver Cole (1979)

<sup>xvi</sup> Ver Núñez (1991)

**BIBLIOGRAFIA**

- AIMME (1973)  
SME Mining Engineering Handbook  
EUA
- AGARWAL, Jadish C. and Loreth, Michael J. (1981)  
Preliminary Economic Analysis of SO<sub>2</sub> Abatement Technologies,  
in Sulfur Dioxide Control in Pyrometallurgy. The metallurgical Society of AIMME  
Febrero 1981
- Atkinson, M.H. y Lowe, J.F. (1979)  
The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Industry  
Londres
- Bertram, G. y Thorp, R. (1978)  
Peru 1890 - 1977: Growth and Policy in an Open Economy  
Londres
- Brewis, T. (1991)  
Flotation Cells  
En: MM Jun 1991 (:383-393)
- Castle, J.F. (1991)  
Extractive Metallurgy  
En: Minerals and Metals 1991 (:9-25)  
Londres
- Castle J.F. y Balakrishnan, R. (1990)  
Extractive Metallurgy  
En: Minerals and Metals 1990 (:131-140)  
Londres
- EPA-USA (1974)  
The Cost of Clean Air  
Environmental Protection Agency  
EUA
- EMJ  
Engineering and Mining Journal
- FT  
Financial Times
- Hall, S. (1991)  
Developing Flotation Technologies  
En: MM Jun 1991 (:379-381)
- Hishcock, S. (1984)  
Environmental Impacts and Controls for Lead, Zinc and Cadmium: Industry  
Experience and View Points

En: UNEP Industry and Environmental Jul/Ago/Set

MM  
Mining Magazine

Núñez, A. (1991)  
Heterogeneity of Production and Development of Technological Capabilities in Mining and Mining Directly Related Productive and Service Activities in Peru: Their Relevance for an Environmental Strategy, Research Proposal presented to the First Mining and Environment Research Network Workshop at Wiston House, 10-13 April 1991, Sussex, Inglaterra

Perillo, A., Gardini, Ibba, R. (1989)  
Performance of the KSS Lead Smelter at Porto Vesme, Italy  
CIM, Halifax

Perillo, A., Schuermann, N. Berger (1990)  
The Kivcet Furnace Construction at Porto Vesme, In Lead-Zinc 1990

Lajzerowics, J. (1976)  
Environmental Factors and the Requirements for Control of Effluents  
En: Economics of Mineral Engineering, Mining Journal Books, London

Mager, K. and Schulte A. (1989)  
Process and Technological Aspects of the first four Commercial QSL Plants  
CIM, Halifax

OTA (1988)  
Copper: Technology & Competitiveness  
Office of Technology Assessment, Congreso de EUA

UN (1976)  
Economics of Mineral Engineering  
Mining Journal Books, Londres

UNIDO (1987 a)  
Technological alternatives for Copper, Lead, Zinc and Tin in Developing Countries,  
First Consultation on the Non Ferrous Metals Industry, Budapest

UNIDO (1987 b)  
Pollution Problems and Solutions in the Non-Ferrous Metals Industry,  
First Consultation on the Non-Ferrous Metals Industry, Budapest

Van Camp, D., Crauwells, D. (1989)  
Present and Future Trends on the Sintering Blast Furnace at MHO

Warhurst, A. (May 1991)  
Environmental Management in Mining and Mineral Processing: Challenges for Sustainable Development: Objectives, Methods, Programming and Output of the Collaborative Research Network  
SPRU, University of Sussex, Inglaterra

**Washurst, A. (April 1991)**

**Environmental Degradation from Mining and Mineral Processing in Developing Countries: Corporate Responses and National Policies**

**SPRU, University of Sussex**

**Willis, Wixon, B.G. (1982)**

**Environmental Impacts and Pollution Controls in the Lead-Zinc-Copper Industry, in UNEP Industry and Environment, Ene/Feb/Mar**

**Wunder, R.D. and Trujillo (1987)**

**Chino Mine Modernization**

**En: Mining Engineering Set. 1987**

**APENDICE I**

**GERENCIA AMBIENTAL EN MINERIA Y PROCESAMIENTO DE MINERALES:  
DESAFIOS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

**ESTUDIO DE CASO PERU :**

**HETEROGENEIDAD DE LA PRODUCCION MINERA Y CAPACIDADES TECNOLOGICAS  
DOMESTICAS EN MINERIA Y EN ACTIVIDADES DE PRODUCCION Y SERVICIO  
RELACIONADAS : SU RELEVANCIA PARA UNA ESTRATEGIA AMBIENTAL.**

**Angel Alfredo Núñez Barriga  
IDS, University of Sussex, UK  
16-09-1991**



## Hipótesis de Investigación

Sobre la base del trabajo desarrollado para producir el esquema de investigación (Núñez, 1991) para el estudio de caso peruano que fue presentado al Taller de Trabajo del Proyecto en Wiston House en abril de 1991 y material adicional revisado desde entonces (setiembre 1991), las hipótesis centrales de la investigación han sido formuladas como sigue

1) La estructura de producción de la minería peruana es altamente heterogénea como es expresada por las enormes diferencias en la escala de producción, la composición del producto, así como por las muy diferenciadas estructuras de control y propiedad y los correspondientes intereses, mostrados por las empresas del sector. Esta heterogeneidad ha creado un nicho para el desarrollo de relevantes capacidades tecnológicas domésticas en producción de bienes de capital y de servicios de consultoría para la minería que provee a un importante sector de las firmas mineras medianas y pequeñas. Por otro lado, "la gran minería", a diferencia del resto de la minería peruana ya sea estatal o de propiedad extranjera, reposa casi totalmente en tecnología importada. En otras palabras, hay básicamente una segmentación en dos partes en el mercado de tecnología minera relevante para la minería peruana, uno para la gran minería basado fundamentalmente en proveedores extranjeros y el otro relevante para el resto del sector, en el cual los proveedores domésticos mantienen una importante participación en el mercado.

Si la afirmación anterior probara ser cierta habría fundamentos para argumentar que una estrategia diseñada para reducir la degradación ambiental que deriva de la producción minera en el Perú, deberá tomar plenamente en cuenta de estas características del mercado de tecnología minera (vg. proveedores y usuarios). Esto, muy probablemente, requeriría el diseño de aproximaciones de política bastante diferenciadas, para cada uno de estos segmentos, para promover la introducción y difusión de tecnologías que sean más adecuadas desde el punto de vista ambiental.

2) El potencial de degradación ambiental de los proyectos mineros, no necesariamente guardan proporción con el tamaño de los proyectos. El impacto de un pequeño número de grandes proyectos es más evidente, debido a su concentración en áreas particulares, y por lo tanto estas muy posiblemente son más fáciles de controlar

realmente que las más de cien pequeñas y medianas unidades esparcidas principalmente a lo largo de las partes altas de los andes.

Si esta afirmación probara ser correcta, es decir, que los proyectos de pequeño y mediano tamaño fueran responsables por una significativa proporción del impacto ambiental de la producción minera, (particularmente en recursos de agua debido a descargas no controladas de efluentes de las plantas de procesamiento), serán necesarias políticas ad-hoc para confrontar este problema. Estas tendrán que reconocer plenamente las limitaciones prácticas para su supervisión.

3) Aunque el mercado de tecnología relevante para la "gran minería" (incluyendo aquí el minado, el procesamiento de minerales y la metalurgia extractiva) es mucho menos competitiva que aquella relevante para el resto de la minería peruana, pequeñas y medianas unidades, hay todavía una significativa competencia allí. Aunque los proveedores actuales y potenciales de tecnología para la gran minería son extranjeros, estos incluyen firmas de países desarrollados con grandes diferencias en la disponibilidad doméstica o en el control de recursos minerales, lo cual puede determinar posiciones diferenciadas hacia la transferencia de tecnología e inversión extranjera en esta área. Más aún la entrada de los Países de Industrialización Reciente (PIRs), tales como Sur Korea, y principales países productores de mineral del Tercer Mundo como Chile, en el mercado de tecnología en la última década, debe esperarse que la competencia en este mercado se haya incrementado por lo menos en ciertas áreas específicas.

Si esto fuera verdad, sería importante examinar la medida en que este proceso ha tenido lugar en el caso de alternativas tecnológicas "más limpias" y en sistemas de control para los existentes procesos mineros contaminantes.

4) Un progreso fundamental en la solución de uno de los dos mayores problemas de contaminación que se derivan de la minería peruana, a saber, efluentes del proceso de flotación para la concentración de minerales y metales básicos (el otro proceso corresponde la fundición de no ferrosos), requiere la aplicación de métodos bastante estandarizados de control que son en medida relevante, conocidos domésticamente. Por lo tanto no se necesitaría, estrictamente, "alta tecnología" para proceder de esta manera; aunque los sistemas de control automatizado para la planta de flotación

misma y para sus efluentes seguramente mejorarían la recuperación de metales y reducirían los efluentes contaminantes de este, no parecen tener la capacidad para reemplazar completamente la necesidad para un adecuado tratamiento de aquellos efluentes para neutralizar su impacto ambiental potencial.

La confirmación de la afirmación anterior, que involucra al grueso de la minería peruana, indicaría que no es una restricción tecnológica directa la que dificulta el apropiado control del impacto ambiental del procesamiento de minerales (en este caso, de la concentración por flotación) sino probablemente, a parte de la limitada aplicación de la legislación existente, los costos inversión y operación que esos controles implicarían. Una significativa parte de las firmas de pequeño tamaño son productoras marginales y probablemente necesitarían un incremento significativo de la productividad para estar en posición de enfrentar aquellos costos. Este incremento en productividad sólo emergería de la modernización tecnológica de las plantas de concentración que podrían imponer consideraciones de escala fuera del alcance de un importante sector de las unidades pequeñas de producción.

5) Las soluciones técnicas para las otras principales fuentes de contaminación originadas en la producción minero metalúrgica, a saber, la fundición de no ferrosos, no son de ninguna manera desconocidas para las empresas involucradas. Su no aplicación responde a consideraciones económicas de estas firmas y a la limitada aplicación de la legislación ambiental existente. La introducción de cualquiera de los dos tipos de solución ambiental diferenciadas por Atkins y Lower (1979) : sistemas de control ambiental al final de la línea de producción y sistemas de control ambiental en planta, implican inversiones que las firmas en referencia consideran que tienen costos alternativos muy altos.

6) La transferencia de tecnología, concebida como un flujo transfronterizo de conocimiento técnico para aplicación industrial, puede tener lugar no solamente a través de formas mediadas por el mercado con un rol activo de extranjeros, como son los casos, entre otros, de la inversión extranjera directa, empresas conjuntas y contratos de licenciamiento, pero también a través de otras formas alternativas o complementarias, como ha sido mostrado para el caso de los PIRs por Fransman (1985). Entre estas últimas el autor incluye ingeniería inversa, importación de bienes de capital, cooperación técnica internacional, participación en eventos académicos y

tecnológicos, principalmente en áreas de tecnologías manufactureras bien estandarizadas. (vg. textiles).

Puesto que, como se ha considerado anteriormente, las tecnologías estandarizadas pueden todavía contribuir a una reducción substancial del impacto ambiental de la producción minera en el Perú, se propone como hipótesis aquí, que aquellas formas no convencionales de transferencia tecnológica pueden jugar un rol importante para mejorar las ya existentes capacidades tecnológicas domésticas, incluyendo aquellas de control ambiental, por lo menos para la pequeña y mediana minería.

7) Las diferencias en control y/o propiedad de las empresas determinan importantes diferencias entre las actitudes de estas hacia el cambio técnico y hacia la presión pública para el cumplimiento ambiental. Si esto fuera efectivamente así, el diseño de una estrategia ambiental apropiada requeriría una aproximación de política diferenciada para cada uno de los principales sectores de empresas (vg. extrajera, de propiedad estatal y de capital privado nacional) para reforzar su eficiencia potencial.

A las afirmaciones mencionadas en los párrafos anteriores se puede añadir, como ya se señaló en el esquema de la investigación (Núñez, 1991) presentado en el Primer Taller de la Red de Investigación de Minería y Medio Ambiente en Winston House en abril último, que la información disponible sobre impacto ambiental que se origina en la minería peruana señala a dos procesos principales como responsables por el grueso de su impacto, estos son la concentración de minerales básicos por flotación y la fundición de no ferrosos. Ha sido precisamente en estos dos procesos, donde la atención de la investigación se ha focalizado en los últimos meses.