



**Mineral
Processing S.R.L.**
Tecnología Minera - Metalúrgica

**MODERNIZACION DE LA INDUSTRIA METALURGICA
BOLIVIANA DENTRO DE UN CONCEPTO SOSTENIBLE,
MEDIANTE UN CAMBIO TECNOLOGICO**

EMPRESA METALURGICA DE VINTO

**SEMINARIO
MINISTERIO DE MINERIA Y METALURGIA
INGENIERIA METALURGICA UMSA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS**

**Consultor: Jorge Lema Patiño
La Paz, Enero 2008**



MODERNIZACION DE LA INDUSTRIA METALURGICA BOLIVIANA DENTRO DE UN CONCEPTO SOSTENIBLE, MEDIANTE UN CAMBIO TECNOLOGICO

Ing. Dip. Jorge Lema Patino

INTRODUCCION.-

Bolivia es un importante productor de estaño metálico (15,000 ton/año). La fundición de estaño de Vinto - de propiedad estatal- fue construida a principios de los años 70 en base a tecnologías actualmente en su mayoría obsoletas, como el uso de hornos de tostación y reverberos, con bajos rendimientos térmicos, de alta contaminación ambiental..Estos hornos utilizados actualmente disponen de un área aprox. de 200 m², y serán reemplazados por un Horno Ausmelt con un área aprox. de 4 m². Ambas tecnologías requieren de reductores sólidos como el carbón vegetal, antracita o coal. El carbón vegetal utilizado en Vinto, producido en los departamentos de Santa Cruz, Chuquisaca y La Paz, originan su preparación una fuerte acción de desertificación de tierras. Sin embargo el nuevo proceso de Lanza sumergida del horno Ausmelt es teóricamente factible de ser convertido – previa investigación – en horno de reducción directa en base a proceso de “reforming indirecto” del gas natural. **Es decir mediante la producción directa del hidrogeno en el mismo horno, que actuaría como reductor en reemplazo del carbón vegetal.**

Cumbre de Río

Bolivia ha participado en la Reunión Cumbre de Río (1992) sobre Desarrollo Sostenible y ha adoptado la **Agenda 21** como compromiso ante la Comunidad Internacional. Este compromiso obliga a encontrar sistemas mas eficientes para producir, distribuir y consumir energía en un contexto de mayor dependencia en energías sanas para el medio ambiente.

La Conferencia de Río convocó la atención al ligar el Medio Ambiente con el Desarrollo Económico, destacando que “el uso sostenido de los recursos naturales es un elemento esencial para cualquier estrategia internacional que tenga en consideración las necesidades de las generaciones presentes y futuras”.

Bolivia participa activamente en varias convenciones que tienen relación con el Medio Ambiente. Especialmente ha ratificado (1/8/96) la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CCC) y ha sido seleccionada como país piloto para desarrollar acciones dirigidas a mitigar o revertir el proceso de desertificación. Al finalizar la Conferencia de Río De Janeiro, los Estados Unidos

juntamente con otros 150 países firmaron la Convención sobre Cambio Climático, (FCC) dedicada a “estabilizar las concentraciones atmosféricas en gases de efecto invernadero, a un nivel que prevenga la peligrosa interferencia humana con el sistema climático.” Asimismo Bolivia es país miembro del UPOV - Convención dedicada a la protección de la Flora y Fauna de especies amenazadas. El presente documento contiene la justificación necesaria para interesar a los Organismos Internacionales que se indican al final, y en especial al Gobierno de Bolivia, por intermedio del Ministerio de Minería, a dar su apoyo a la investigación que se recomienda.

Desertificación en Bolivia

Según estadísticas de la FAO, en Bolivia existen 53 millones de hectáreas con cobertura forestal. Esta extensión representa el 1,28% del mundo y da a Bolivia el quinto lugar en Latino América.

De acuerdo a la Convención de Lucha Contra la Desertificación - CCC - se entiende por desertificación “la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las *actividades humanas*”.

En Bolivia se deforesta más de 200 mil hectáreas anuales y se reforestan menos de 50,000 hectáreas por año. La contribución del sector forestal -dedicado principalmente a la tala / manufactura de madera - es del orden de \$us. 250 millones.



Mediante financiamiento internacional del DFPA/FAAO/Holanda se ha preparado para el Gobierno de Bolivia el Proyecto “ Re poblamiento Forestal y mejoramiento de la Producción de Carbón” para los Departamentos de Santa Cruz, La Paz y Chuquisaca. En este informe se destaca que la erosión de los suelos en Bolivia se ve afectada en una superficie de 450 mil kilómetros cuadrados, lo que significa el 41% del territorio nacional. Este proceso de degradación afecta al 71 % de la población boliviana e incide como causa de la pobreza nacional. El proceso de degradación de tierras por deforestación afecta aproximadamente 127,000 ha. por año, significando el 10 % del total de la Región degradada en escala nacional. En esta Región el 30% de los habitantes se encuentran en estado de pobreza extrema.

El Complejo Metalúrgico de Vinto requiere de aprox. 800 kilos de carbón vegetal por tonelada de metal de estaño producido. Desde el inicio de sus operaciones hasta la fecha la producción de estaño metálico ha alcanzado el monto de aprox. 450,000 toneladas, significando un consumo de aprox. 360.000 toneladas de carbón vegetal, o el equivalente de 2.4 millones de toneladas de leña consumidas y extraídas de los bosques nacionales.

Durante la década de los años 70 hasta mediados de los años 80, el mayor porcentaje del carbón provenía del Departamento de La Paz. Con el incremento de la frontera agrícola en el Departamento de Santa Cruz, en la actualidad este departamento es el mayor productor de carbón vegetal.

Suministro/Origen de Carbón a la EMV (aprox.)

	Ton/año	%
Santa Cruz	9,000	60
La Paz	4,500	30
Chuquisaca	1,500	10

El impacto ambiental mayor se da en las siguientes provincias: (ver Mapa).

Santa Cruz : Provincias Andrés Ibáñez y Provincia Cordillera

La Paz : Provincia Inquisivi

Chuquisaca : Provincia Tomina

Las zonas fitogeográficas varían desde el Sub-andino (definida como templada a sub-tropical), hasta zonas de bosques húmedos (subtropical/templado) y zonas templadas de bosques secos.

La tasa de deforestación más alta se encuentra en el Departamento de Santa Cruz con 13.759 kilómetros cuadrados, seguida por el departamento de La Paz con 3.696 kilómetros cuadrados (1995). El porcentaje de desbosque - para ampliar la frontera agrícola, expansión de la ganadería y explotación de bosques (en parte para la producción de carbón vegetal) - que contribuye a la deforestación total para Santa Cruz es de 88.4% y para la Paz es de 87.6%, es decir la acción humana es preponderante como factor de deforestación.

La excesiva explotación de bosques ha causado una sobre explotación de ciertas variedades de valor comercial - aprovechamiento selectivo - afectando así el ecosistema. Según el citado estudio de la FAO “el desconocimiento de mejores prácticas agrícolas sumado a la desmedida destrucción de bosques para su habilitación como tierras de cultivo y la explotación del carbón, ha ocasionado que aparezcan considerables superficies de tierras en barbecho que son abandonadas a una regeneración natural a objeto de recuperar (a largo plazo) la fertilidad de los suelos”.

Producción de Carbón Vegetal

El carbón vegetal está catalogado junto a la leña y los carbones fósiles: la turba, el lignito, la hulla y la antracita, como combustible sólido.

El carbón vegetal - producido en Bolivia, para consumo principal de la fundición de estaño - resulta de la carbonización de la leña (en hornos cerrados), dejando escapar a la atmósfera todos los productos volátiles de la destilación

La producción de una (1) tonelada de carbón vegetal requiere de 6 a 7 toneladas de madera (25% humedad), rendimiento del 17%, con un tiempo de preparación de aprox. 30 días. Se emplea una persona para producir 2.5 ton/carbón como promedio en Bolivia, con un salario de 5 \$us. /día.

El proceso de fundición de minerales en general - industrias siderúrgica y no ferrosa - emplea un carbón vegetal con contenidos en carbón fijo (cf) mayor al 75% % y bajo en contenido de cenizas (aprox. 8%). Este condicionamiento en calidad hace aun más selectiva la tala de árboles, ocasionando adicionalmente la reducción de las especies de valor comercial. Los productores que entregan carbón vegetal a la fundición de Vinto no cumplen necesariamente con estas exigencias.

Las maderas para producir el carbón vegetal varían dependiendo la zona de producción pero en general son seleccionadas para obtener un producto superior. Entre estas el cuchí (*Astronium urundeuva*), tajibo (*tabebuia* sp), jichituriqui (*Aspidosperma* sp), momoqui (*Cesalpineia integrifolia*), cuta (*Phyllostylon orthopterum*) y mora (*Chlorophora tinctoria*), principalmente en Santa Cruz; duraznillo (*Weinmannia* sp) soto kolo (*Astroniuar urundeuva*) ciquili (*Inga* sp) en La

Paz y el soto (*Schinopsis haenkeana*) quebracho blanco (*Aspidosperma*) en Chuquisaca. Durante el proceso de explotación de los bosques parte de la madera es destinada para otros usos, especialmente para la fabricación de troncos para durmientes, y para postes de cercado. Sin embargo el ingreso principal se lo obtiene de la preparación y venta del carbón vegetal a la Fundación de Vinto.

Existen en Bolivia prácticas inadecuadas en la preparación del carbón vegetal que incluyen la falta de planificación, del conocimiento sobre técnicas de reforestación, renovación de suelos, ausencia de una política gubernamental. etc. que originan la deforestación del área explotada. No existen técnicas de aprovechamiento de los subproductos lo que afecta el costo final del carbón vegetal.

La Ley Forestal de 1996, Ley No. 1700, actualmente modificada incluye los siguientes objetivos:

- 1) “Normar la utilización sostenible y la protección de los bosques y tierras forestales en beneficio de las generaciones actuales y futuras, armonizando el interés social, económico y ecológico del país.”
- 2) “Lograr rendimientos sostenibles y mejorados de los recursos forestales y garantizar la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y el medio ambiente.”
- 3) “Proteger y rehabilitar las cuencas hidrográficas, prevenir y detener la erosión de la tierra y la degradación de los bosques, praderas, suelos y aguas, y promover la forestación y reforestación”.

En este sentido, la nueva ley es cada vez más exigente y tiende a la preservación de los bosques como factor fundamental.

EFFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE.-

Contaminación Ambiental

Nuestro país comparado con el resto del Mundo no es un emisor importante de gases de Efecto Invernadero GEI. Emitimos un mínimo de 50 millones de toneladas de CO2 anualmente. De esta cantidad el 75% proviene de la deforestación, y el saldo de los sectores energético y de transporte.

El desarrollo económico, el desarrollo social, la protección del medio ambiente “son componentes del desarrollo sostenible e independientes que se refuerzan mutuamente”.

Problemas Comunes

Los procesos físicos de biodiversidad, cambio climático y desertificación están íntimamente conectados. El cambio climático afectará las áreas secas al influenciar

el suministro de agua, calor extremo, la humedad y temperatura del suelo y la producción agrícola y amenazarán también la diversidad biológica. Al mismo tiempo, la deforestación y la degradación de las áreas secas influyen en los climas locales, el ciclo global del carbono y la reflectividad sobre la superficie de la tierra.

El Ecosistema de la Región Afectada

La biodiversidad y la desertificación están también relacionadas una con la otra. La degradación de la tierra no solamente afecta la productividad agrícola, sino también la vegetación natural, la vida salvaje y los suelos. La pérdida de biodiversidad de la misma manera degrada la salud ambiental de la tierra y la hace más vulnerable a las acciones humanas y de la naturaleza. Afortunadamente, estos tres aspectos están relacionados entre sí por sus soluciones comunes, como ser la deforestación que reduce las emisiones de dióxido de carbono, la degradación de la tierra y la pérdida de biodiversidad. Asimismo, la introducción de tecnologías de energía renovable pueden disminuir las emisiones de gas de efecto invernadero mientras disminuyen la presión sobre la tierra y los bosques al proporcionar una alternativa a combustibles de biomasa.

La pérdida de biomasa que ocurre como consecuencia de la tala indiscriminada de especies selectivas, seguida del chaqueo (quema) y otros usos que se dan a la tierra (habilitación de potreros) afectan directamente al ecosistema, por la erosión de los suelos. Este fenómeno es un factor que interviene directamente en la pobreza de la población.

El Acuático - Ecosistema de la Región Afectada

La foresta Boliviana tiene una gran variedad de plantas y animales. Con seguridad que la deforestación producida en las zonas señaladas como productoras de Carbono vegetal han resultado en la pérdida de la diversidad biológica. Este hecho no ha sido estudiado.

La deforestación ocasiona daños a la tierra y perturbaciones a los sistemas hidrológicos. La diversidad biológica incorpora todas las formas de vida existentes en la tierra. El desbosque, para la producción de carbono vegetal mediante el proceso selectivo de tala de árboles, causa un impacto adicional al medio ambiente. La deforestación afecta las condiciones del micro clima porque esta a su vez afecta la degradación de la flora y la fauna. La deforestación es seguida por una erosión masiva del suelo, donde la capa superior del suelo (humus) es lavada y perdida en los ríos, de esta forma se pierde el poder natural de reforestación.

El proceso de deforestación/desbosque ocasiona la disminución de la precipitación pluvial y la contaminación mayor de los ríos por el arrastre de los suelos erosionados. Así mismo se originan periodos secos con déficits de agua en

temporadas críticas, en la totalidad de las zonas productoras afectando la profundidad de la capa del suelo (humus).

No se dispone de informaciones sobre la precipitación pluvial en un amplio periodo de tiempo que permita precisar la forma como la deforestación afecta al eco y aquí sistemas. Sin embargo se han determinado los ciclos pluviales, intermedios y de sequías en cada una de las zonas afectadas. En general es obvio que el balance hídrico confirma el déficit en precipitaciones en las zonas estudiadas.

Principalmente en la Provincia Inquisivi - del Departamento de La Paz - debido a que la zona tiene relativa humedad - el proceso de regeneración natural es lento.

METALURGIA DEL ESTAÑO

El sistema de fundición de estaño que utiliza la Fundición de Estaño de Vinto en Oruro, actualmente obsoleto en su Planta de Alta Ley, que se estima será modernizado con un horno Ausmelt, que puede operar con carbón vegetal, antracita y coal. El proceso Ausmelt, por sus características de diseño, puede operar con reductores de menor calidad y mayor porcentaje de volátiles. La empresa Funsur en el Perú esta empleando antracita y coal de baja calidad. La razón se encuentra en que los materiales volátiles a las temperaturas y en la punta de la lanza se transforman en H₂.

El proceso metalúrgico que sigue el tratamiento de los concentrados de estaño en la fundición de Vinto (Oruro) cubre las etapas de tostación / fundición / volatilización / refinación, en la Planta de Alta Ley y de los procesos en Horno Ciclón, Horno Fuming y Horno Eléctrico en la Fundición de Baja Ley. La Fundición de Baja Ley, ha sido diseñada para procesar en el horno ciclón únicamente concentrado de media ley en estaño, a un alto costo.

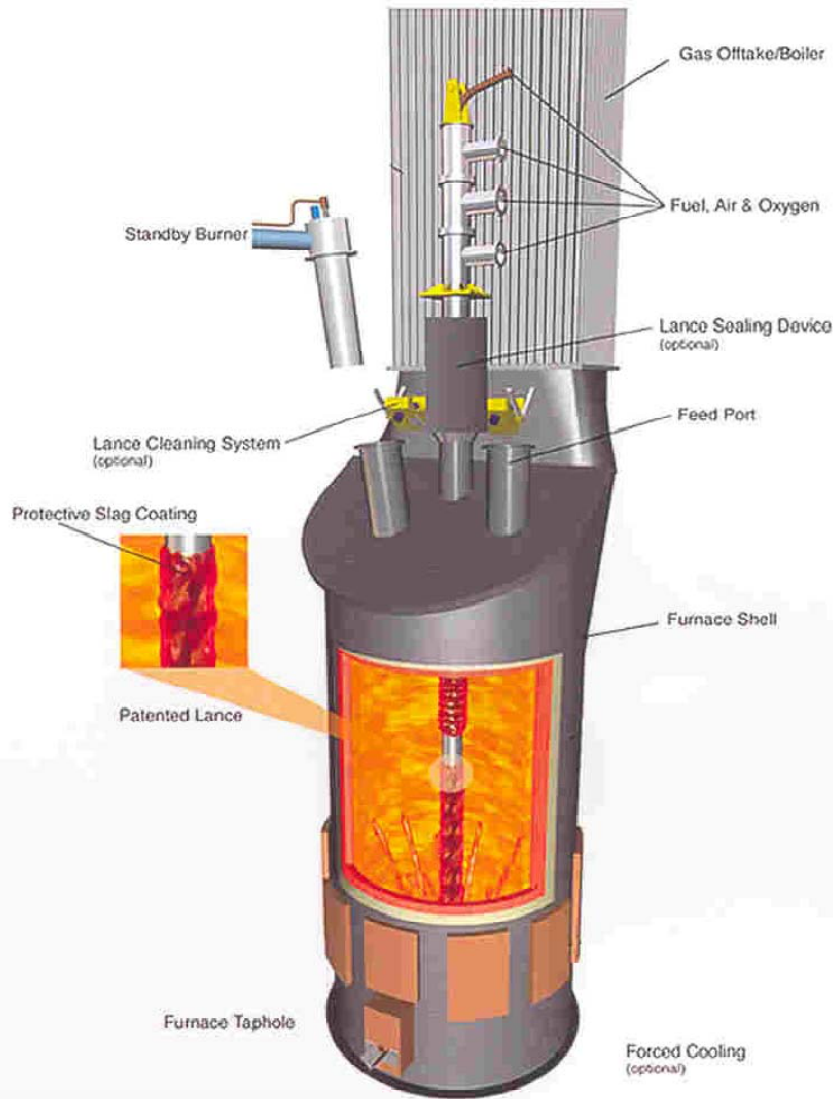
Proceso Ausmelt

Este proceso desarrollado por el Dr. J. Floyd a principios de la década de los 70, se aplica en la metalurgia no ferrosa del estaño, cobre, plomo y zinc. Actualmente el proceso AusIRON constituye una novedad, para producir arrabio.

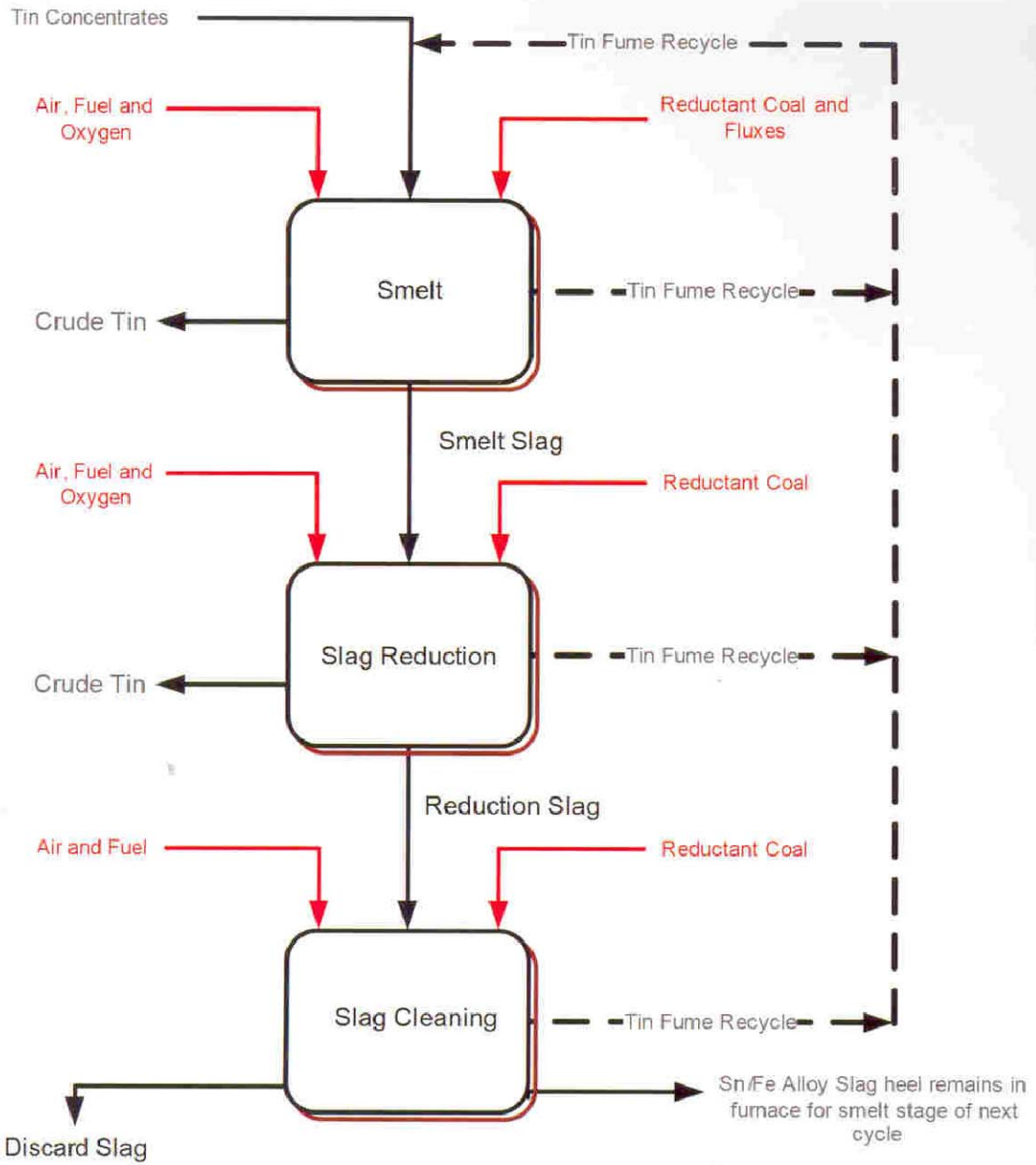
El Horno Ausmelt permite, debido al posicionamiento de la lanza en la zona de la escoria, realiza varias operaciones en secuencia. Dependiendo del nivel de carga en el horno y el porcentaje del estaño en la alimentación; este posicionamiento puede variar significativamente y es controlado mediante el PCS (Process Control System), controlando la eficiencia de la operación metalúrgica.

Para el caso boliviano la lanza será modificada para permitir el ingreso del CV directamente al horno. Recuperación en el horno Ausmelt alcanza el 98%. El proceso de lanza TSL (top sumerge lance) fue concebido durante la década de los

70 por el profesor Floyd y se derivan las variantes Ausmelt, Sirosmel e Isasmet (Mount Isa Mine), actualmente el Ausmelt es el único aplicado en la metalurgia del estaño, y compite con éxito en el tratamiento de concentrados de cobre y plomo, además de que este proceso se aplica en la recuperación de residuos de zinc producto de la lixiviación de concentrados de zinc, en combinación con el horno Kivcet.



Ausmelt Furnace



Process Schematic of Ausmelt Tin Smelting

Utilización del Hidrógeno como Elemento Reductor

Metalurgia del Estaño

El uso del hidrógeno como reductor de la casiterita ha sido discutido por primera vez en la literatura especializada en 1950. En efecto el proceso de la New Enterprises Inc. fue sugerido por el Dr. Carle R. Hayward, profesor Emeritus del Instituto Tecnológico de Massachusetts, destacado metalurgista de esa época.

Consiste en la “reducción selectiva de los minerales de estaño (casiterita) que contiene óxidos de hierro por una corriente de hidrógeno y vapor de agua. “Las experiencias realizadas han confirmado que bajo condiciones establecidas - especialmente de temperaturas optimas – es posible realizar la reducción del óxido de estaño, sin reducir simultáneamente el óxido de hierro.” Debido a que el proceso es de baja temperatura, en estado pastoso, el estaño requiere ser recuperado posteriormente del material así reducido mediante una etapa previa de preconcentración gravimétrica seguida de lixiviación y electrólisis.

Las pruebas metalúrgicas se efectuaron siguiendo las etapas de tostación, briqueteado (necesario para cargar el alto horno) - recomendado en ese entonces como apto para la reacción gas (Hidrógeno) sólido (mineral) – produciéndose el proceso de reducción en estado pastoso del mineral. La temperatura recomendada para la aplicación del proceso de la New Enterprises Inc. era de 700 - 850° C con una presión atmosférica de agua e hidrógeno de 0.8 a 1.3 atmósferas dependiendo de la temperatura del horno. Las pruebas demostraron que era factible la reducción total del estaño sin reducir el hierro. Posteriormente se realizaron pruebas a nivel piloto en un horno tipo cuba que operaba con alimentación continua.

Debido a que el proceso mencionado fue concebido con anterioridad a las nuevas técnicas de fundición de estaño (como las que se aplican en Vinto), era indispensable eliminar el hierro para evitar dos etapas de fundición que incluía antiguamente (Williams Harvey, Capper Pass en Inglaterra) el retratamiento de compuestos metálicos intermedios en forma de aleación Sn-Fe (hard head). Por ese motivo la reducción con hidrógeno se realizaba en el proceso de la New Enterprises Inc. a baja temperatura (reducción), seguido de la etapa de concentración gravimétrica y flotación.

En el proceso descrito se recupera el 80 al 90% del estaño en un metálico con 85% de pureza. El residuo, (con el 10% al 20% del estaño en peso) es recuperado por lixiviación, mediante una solución cáustica, electrolizando la solución resultante para obtener el estaño metálico refinado de alta pureza. El metal de estaño que proviene de la sección gravimétrica es refinado electrolíticamente por procesos

convencionales conocidos, pero de alto costo por encontrarse el estaño en su valencia superior.

De acuerdo con la tecnológica propuesta en 1950, era necesario adicionar vapor de agua al sistema de reducción con hidrógeno para favorecer la reducción selectiva de la casiterita evitando la reducción del hierro. En estas pruebas se encontraron las condiciones optimas desde el punto de vista termodinámico así como la constante K que establece la relación de las presiones parciales de p_{H_2O} / p_{H_2} (0.76).

Posteriormente el Batelle Memorial Institute demostró en forma independiente que era posible reducir selectivamente el estaño en los minerales de baja ley procedentes de Bolivia, mediante un control preciso de las presiones de vapor de agua y de hidrógeno en los gases reductores. Estos sistemas de baja Temperatura fueron desarrollados antes de introducir la etapa de volatilización de escorias, para evitar la formación del hard head.

Como se describe posteriormente, el único proceso conocido al que puede aplicarse la reducción directa, a la carga en estado líquido, a altas temperaturas resultaría el horno Ausmelt, a ser confirmadas preliminarmente mediante pruebas batch efectuadas en laboratorios de Australia. Esta propuesta actualizada de Mineral Processing, aplicada al horno Ausmelt, mediante técnicas de alta temperatura, elimina las etapas de gravimetría / lixiviación y electrólisis sugeridas inicialmente por la New Enterprisess Inc. Aparentemente similares al sistema Kanakar. Además de requerir este caso un proceso previo de “steam reforming”, ver grafico, para la generación de hidrogeno a partir del gas natural, mediante reacción con vapor de agua. La EMV realizo experiencias propias, mencionadas en la literatura, simultáneamente a al trabajo de consultoría que realizo Mineral Processing para Vinto. Sin embargo estos trabajos contemplaban la producción del hidrogeno mediante el proceso steam reforming independiente. Nuestra propuesta apoyada en los trabajos de J. Floyd se refieren a la conversión del Gas Natural en Hidrogeno directamente en el mismo Horno Ausmelt.

En la Industria Siderúrgica

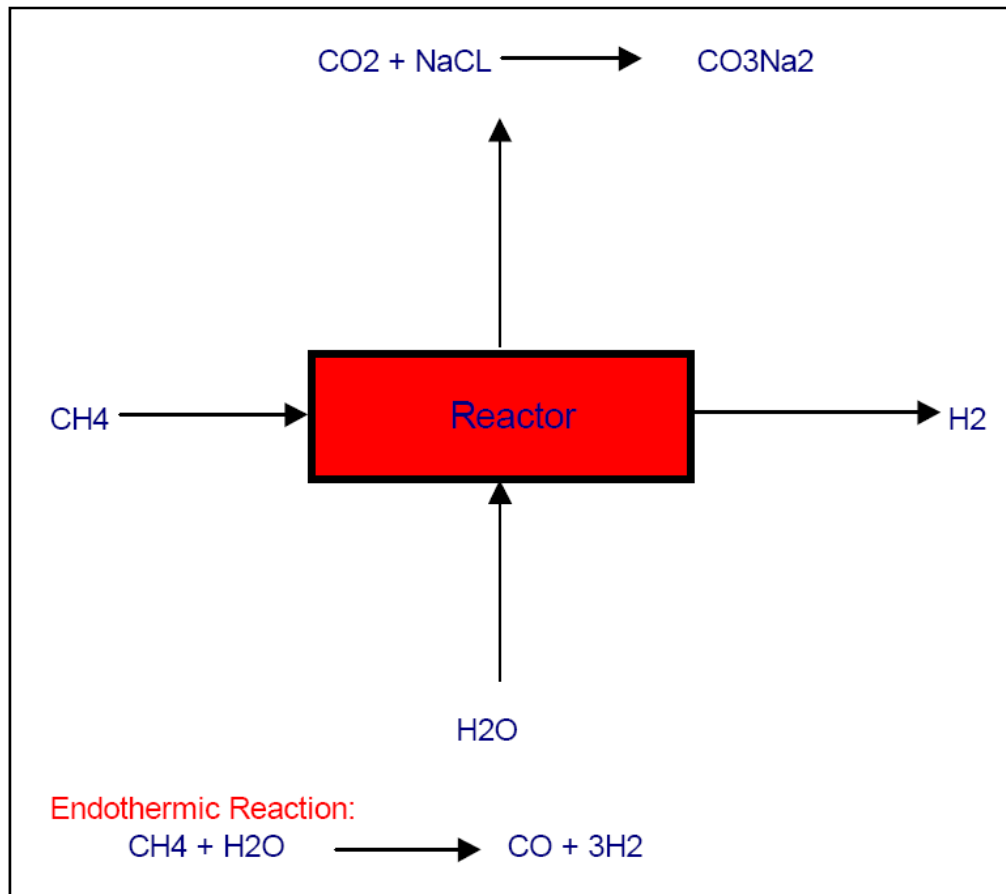
La industria siderúrgica utiliza hidrógeno – producido previamente por steam reforming - en el proceso de preparación de hierro esponja. Actualmente existen varias licencias entre estas la de las empresas: ARCO, HyL y MIDREX a partir del gas natural reformado; PUROFER: que utiliza también combustibles livianos líquidos; el proceso FIOR: con gases con alto contenido de hidrógeno. Una nueva técnica para la producción de hierro esponja hace uso del mismo horno para la reforma del gas y para la producción del metálico de hierro.

Técnicas de Producción de Hidrógeno

En la Industria siderúrgica, al realizarse la reducción y producción de hierro esponja a bajas temperaturas, es necesario producir el hidrogeno externamente.

El hidrógeno puede ser producido mediante un proceso termo químico a partir de cualquier combustible carbonífero, inclusive a partir de los residuos de la basura o biomasa. El proceso más costoso es el de electrólisis del agua. Sin embargo, el sistema aplicado modernamente para la producción de hidrógeno es a partir del gas natural mediante el proceso “steam reforming”, donde el gas natural es alimentado dentro del sistema de reforma para producir CO₂ - que se utiliza como subproducto (hielo seco, etc.) y el hidrógeno en forma de gas. El otro elemento adicionado en el sistema de reforma es vapor de agua. El CO₂ puede asimismo ser utilizado para la producción de carbonato de sodio - previo tratamiento con sal (NaCl). En Bolivia se encuentra el Salar de Uyuni, considerado como el lago salino más alto del mundo con una elevada concentración de sal que hace rentable su transporte hacia el Mutún, para su conversión en carbonato de sodio de amplio uso en la industria en Bolivia y Brasil, incluyendo la propia industria metalúrgica.

Diagrama de conversión de Hidrógeno



El gráfico anterior muestra claramente el esquema de producción de hidrógeno. En el reactor - en su segunda fase - en presencia de vapor de agua es convertido en dióxido de carbón (CO₂) e hidrógeno. Posteriormente, el CO₂ es separado del hidrógeno y venteadado a la atmósfera. Finalmente, para obtener el hidrógeno de la calidad deseada (dependiendo de su uso) se lo somete a un proceso de purificación y compresión. Durante el proceso de producción de hidrógeno, si este es llevado a cabo en el lugar de producción del gas natural, es recomendable la inyección del CO₂ resultante en el pozo gasífero. En este caso, el hidrógeno puro es transportado hacia su lugar de consumo. Si la producción de hidrógeno se realiza en el lugar de consumo final, el CO₂ alternativamente es venteadado y/o utilizado en otras industrias (directamente o previo su transporte). La reducción del estaño en el Horno Ausmelt debería ser factible mediante las reacciones dentro del mismo proceso por ser de alta temperatura, por descomposición del metano, no se precia de esta manera la etapa del steam reforming mencionada, reduciendo además el costo de producir el hidrogeno.

Teoría de Reducción de Estaño con gas Hidrogeno

a. Descomposición del Metano

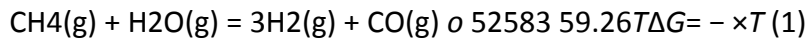
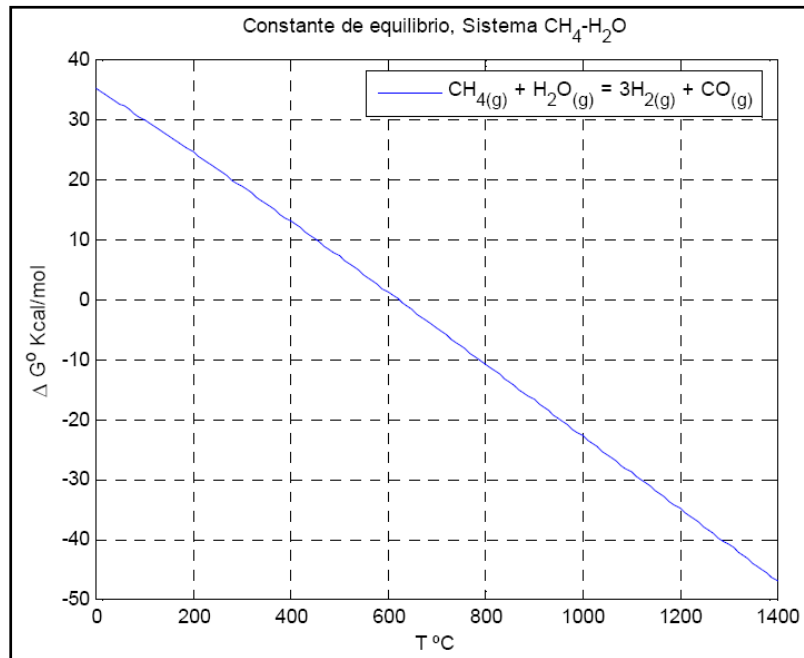


Fig. 1. Energía libre, reacción de descomposición del metano



La reacción anterior confirma que es posible la descomposición directa del Gas natural en hidrogeno y monóxido de carbono, elementos reductores, a partir de los 500 C. Siendo mas notoria esta descomposición a temperaturas mayores a 800°C preferentemente en gas hidrogeno con 71.56% respecto al CO(g) representando tan solo 23.80%.

Tabla 1. Energía libre y constante de equilibrio, reacción 1

T (°C)	Reacción 1	
	$\Delta G^{\circ 2}$ (Kcal)	K2
400	13.031	5.872E-5
500	7.147	9.542E-3
600	1.201	5.004E-1
700	-4.785	1.188E+1
800	-10.798	1.582E+2
900	-16.826	1.364E+3
1000	-22.860	8.406E+3
1100	-28.895	3.974E+4
1200	-34.924	1.519E+5
1300	-40.945	4.883E+5
1400	-46.954	1.361E+6

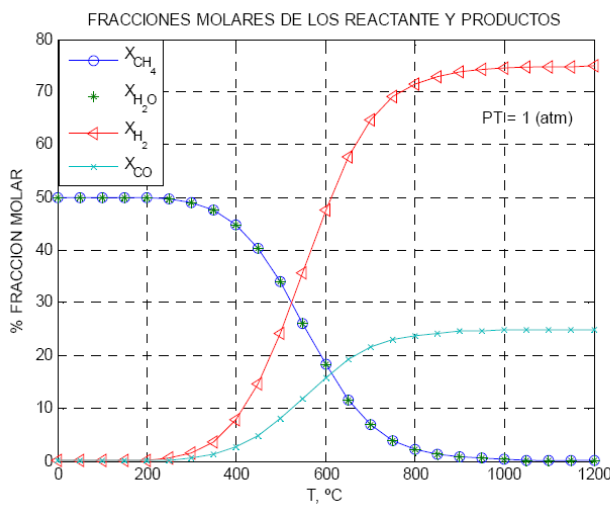


Tabla 2. Fracción Molar, CH₄ y H₂(g) y

T (°C)	Distribución, fracción Molar en función de la temperatura			
	X _{CH4}	X _{H2O}	X _{H2}	X _{CO}
400	44,81	44,81	7,78	2,59
500	33,92	33,92	24,11	8,04
600	18,27	18,27	47,59	15,86
700	6,89	6,89	64,65	21,55
800	2,29	2,29	71,56	23,85
900	0,82	0,82	73,77	24,59
1000	0,32	0,32	74,51	24,84
1100	0,15	0,15	74,78	24,93
1200	0,07	0,07	74,89	24,96
1300	0,04	0,04	74,94	24,98
1400	0,02	0,02	74,96	24,99

Fig.2 Fracciones molares de CH₄(g), H₂(g) y CO(g)

b. Reducción de Estaño y hierro con H₂(g) reductor

Las reacciones que son susceptibles de reducción con hidrogeno gas son las que se detallan:

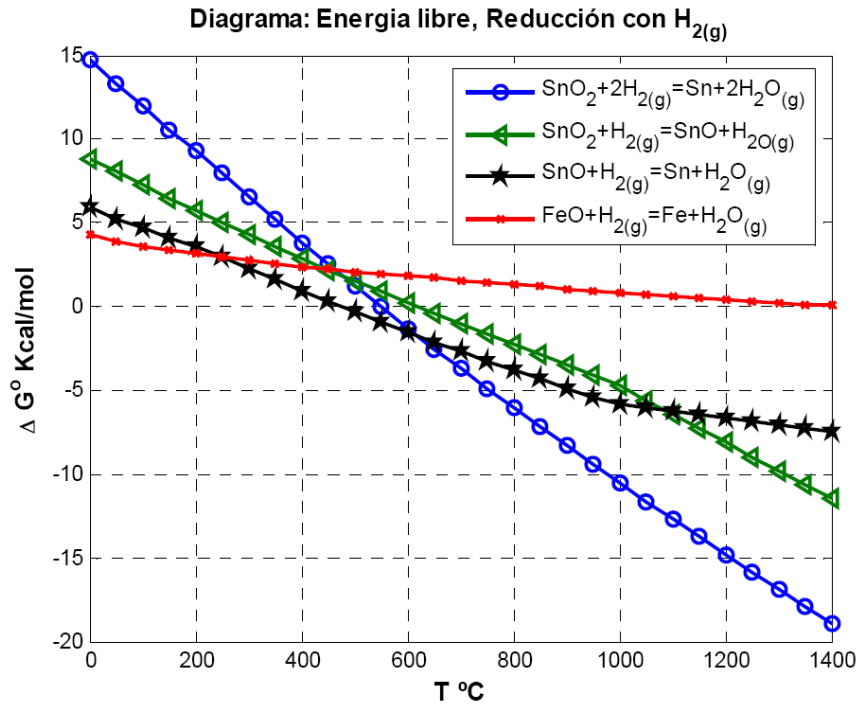
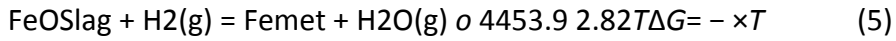
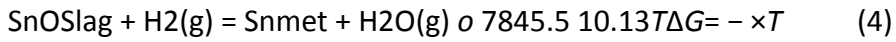
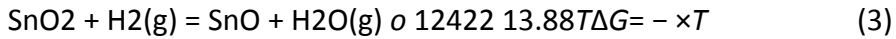


Fig. 3 Energía libre de la reducción de SnO y FeO con hidrogeno (2, 3, 4,5)

Tabla 3. Constantes de equilibrio de las reacciones de reducción con H_{2(g)}

T (°C)	Reacción 2	Reacción 3	Reacción 4	Reacción 5
	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
400	5.699E-2	1.163E-1	4.898E-1	1.678E-1
500	4.507E-1	3.687E-1	1.222E+0	2.558E-1
600	2.095E+0	8.734E-1	2.399E+0	3.477E-1
700	6.788E+0	1.698E+0	3.996E+0	4.406E-1
800	1.703E+1	2.873E+0	5.927E+0	5.358E-1
900	3.546E+1	4.393E+0	8.072E+0	6.308E-1
1000	6.423E+1	6.537E+0	9.825E+0	7.241E-1
1100	1.046E+2	1.060E+1	9.869E+0	8.077E-1
1200	1.567E+2	1.601E+1	9.786E+0	8.810E-1
1300	2.198E+2	2.286E+1	9.615E+0	9.445E-1
1400	2.924E+2	3.116E+1	9.384E+0	9.733E-1

Debido a que es necesario tener la carga fundida, la operación de reforming directamente en el Horno Ausmelt sería factible en carga líquida a partir de los 1100°C que es el punto de fluidización óptima de la escoria. La fracción molar a esta temperatura presenta 74.5% de gas Hidrogeno, lo que garantizaría la reducción directa de la casiterita en estado líquido en el horno apropiado, previa investigación.

La reducción del hierro en estado líquido a la temperatura de 1200°C no es posible, tal como se puede observar en la Fig. 3 y complementada en la Tabla 3 columna 5, donde se puede observar la constante de equilibrio. En tal sentido el FeO se mantendría en la escoria debido a su constante de equilibrio K muy pequeña. Sin embargo esta reducción puede parcialmente ocurrir parcialmente mediante la presencia de una escoria activa con elevado contenido en CaO.

c. Reducción de Estaño y hierro con CO(g) reductor

En este caso las reacciones consideradas son:

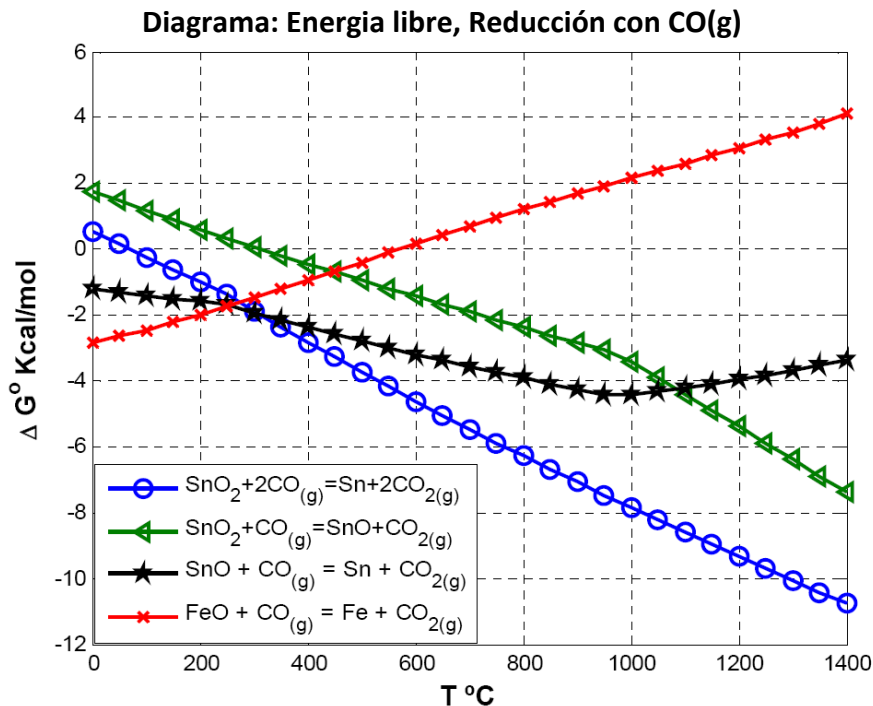
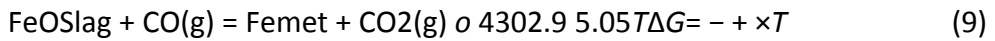
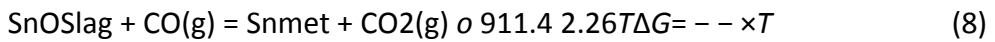
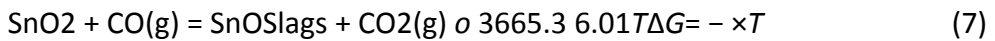
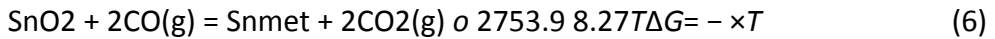


Tabla 4. Constantes de equilibrio de las reacciones de reducción con CO(g)

T (°C)	Reacción 6	Reacción 7	Reacción 8	Reacción 9
	K6	K7	K8	K9
400	8.269E+0	1.402E+0	5.900E+0	2.022E+0
500	1.141E+1	1.855E+0	6.152E+0	1.288E+0
600	1.434E+1	2.285E+0	6.276E+0	9.097E-1
700	1.692E+1	2.681E+0	6.310E+0	6.956E-1
800	1.911E+1	3.044E+0	6.279E+0	5.676E-1
900	2.093E+1	3.375E+0	6.202E+0	4.846E-1
1000	2.240E+1	3.860E+0	5.802E+0	4.276E-1
1100	2.355E+1	5.029E+0	4.684E+0	3.833E-1
1200	2.444E+1	6.323E+0	3.865E+0	3.480E-1
1300	2.509E+1	7.724E+0	3.249E+0	3.191E-1
1400	2.554E+1	9.210E+0	2.774E+0	2.877E-1

En los gráficos anteriores se observa la mayor factibilidad de la reducción de los óxidos de estaño respecto al del hierro y confirmada por su constante K de equilibrio.

A temperatura inferior a los 600 C, es decir en estado solidó, la reducción del estaño tiene una constante de equilibrio baja, que confirma que este proceso además de ser lento no es termodinámicamente favorable. En la Fig. 2 de Fracciones Molares a una temperatura de 600 C el porcentaje de formación del hidrogeno solo alcanza el 47%, por este motivo en el proceso sugerido por New Entreprises Inc. el hidrogeno es obtenido previamente en un reactor reforming.

Por otra parte, cuando es inyectado hidrogeno al horno la casiterita se reduce en estado pastoso en un rango de temperatura de 700 a 800°C. En esta tecnología para recuperar el estaño metálico se precisan de etapas posteriores costosas. Este proceso fue concebido en año 1950 aproximadamente cuando no existían hornos de lanza que permiten esta reducción en forma directa y en estado líquido, previa investigación.

Adicionalmente se puede analizar las siguientes reacciones químicas:



T (°C)	Reacción 8		Reacción 9	
	$\Delta G^{\circ}8$ (Kcal)	K8	$\Delta G^{\circ}9$ (Kcal)	K9
400	-1.433	2.918E+0	44.838	2.763E-15
500	-2.403	4.778E+0	40.998	2.569E-12
600	-3.351	6.899E+0	37.215	4.835E-10
700	-4.264	9.071E+0	33.483	3.018E-8
800	-5.125	1.106E+1	29.801	8.519E-7
900	-5.942	1.280E+1	26.167	1.333E-5
1000	-6.597	1.357E+1	22.701	1.267E-4
1100	-6.829	1.222E+1	19.689	7.346E-4
1200	-7.048	1.111E+1	16.722	3.304E-3
1300	-7.253	1.018E+1	13.796	1.211E-2
1400	-7.534	9.641E+0	10.909	3.758E-2

La reacción (10) muestra que SnOslag es reducido por el Femetal y esta pasa directamente a conformar la escoria, con hard head que es reducido en el mismo proceso Ausmelt.

La reacción química (11) muestra que la volatilización del SnO(g) es viable únicamente a temperaturas superiores a 1300°C, según lo confirmo M. F. Barret, en trabajos de Investigación en hornos eléctricos.

DISEÑO DEL PROYECTO

Conceptualización de la Investigación

La Empresa Metalúrgica Vinto requiere el apoyo del Ministerio de Minería, para respaldar los estudios que permitan determinar la viabilidad técnico/económica de utilizar el Gas Natural como generador directo de hidrogeno en el horno Ausmelt, convirtiendo Vinto en un sistema metalúrgicamente sostenible que evite la utilización del carbón vegetal.

Se parte del concepto concebido por J. Floyd y recomendado para la EMV, de que en las condiciones de desarrollo tecnológico actual solamente es factible estudiar el proceso de reducción con hidrógeno a **alta temperatura, dentro del mismo horno. Esta propuesta se diferencia de otras opciones estudiadas anteriormente.**

Para el desarrollo de procesos en la industria metalúrgica es indispensable primeramente comprobar ciertas variables de termodinámica y de cinética de reacciones para proseguir con pruebas en laboratorio, que las confirmen para posteriormente realizar pruebas a escala piloto que determinen los coeficientes de rendimientos, balances térmicos y otros necesarios para el diseño final. Estas pruebas deberían ser realizadas en Australia en la Planta Piloto de la empresa Ausmelt, mediante un acuerdo de coparticipación de Licencias.

IMPACTO ECONÓMICO PARA LA EMPRESA METALURGICA DE VINTO

El Gobierno de Bolivia, en su calidad de miembro de la Organización Mundial del Comercio, es consciente de la importancia que tendrá en el mediano futuro la comercialización en los mercados internacionales de bienes que en su procesamiento no ocasionen contaminación ambiental. En efecto, será casi imposible que las diversas fundidoras que existen en el mundo puedan colocar libremente - sin gravámenes adicionales - los metales que produzcan si estos no siguen las cada vez más rigurosas políticas que están aplicando los mercados de los países desarrollados, en defensa del medio ambiente.

Esta política es considerada por los países en desarrollo como proteccionista y es rechazada pero existe temor en que sea aplicada en el futuro. Estos temas se encuentran en discusión en la OMC - en el Comité de Comercio y Medio Ambiente.

La competitividad actual de la fundición de estaño en Bolivia, estará sustentada en la tecnología Ausmelt y en el relativo bajo costo de procesamiento que cada vez se hace menos competitivo frente a las monedas devaluadas de los centros metalúrgicos en el Asia.

En el estudio sobre el reemplazo del CV con el hidrogeno deberá determinar el impacto económico que significa el cambio de hidrógeno por carbón vegetal. De acuerdo a los requerimientos estequiométricos de la reducción de la casiterita multiplicado por un factor de tres, se estima un consumo de 25 000 scf de hidrogeno por tonelada de estaño reducido. Este valor deberá ser confirmado durante la realización de las pruebas metalúrgica, y establecer el costo unitario equivalente de reemplazo con el costo del carbón vegetal. La evolución del precio de compra del carbón vegetal por parte de la EMV es como sigue:

Año	\$us. /ton
1987 – 1992	141.5
1993 – 1994	132
1995 – 1996	120
2000 – 2007	120

La calidad del carbón vegetal, sin embargo ha disminuido en carbón fijo (72,3 %); y se ha incrementado el contenido de cenizas (9,8 %) y en productos volátiles (16,9 %); con una humedad del 8,3 %.

EFFECTOS SOCIO ECONOMICOS QUE SE ORIGINAN EN EL REEMPLAZO DEL CARBÓN VEGETAL

La producción del carbón vegetal en los Departamentos de Santa Cruz, La Paz y Chuquisaca se la realiza de manera rudimentaria. Los propios índices de rendimiento en la preparación del carbón vegetal son inferiores a los que se deben esperar de estas operaciones. El grado de mecanización es muy bajo (solamente se utilizan moto-sierras para el corte de la madera) y finalmente la mano de obra del lugar es explotada con salarios equivalentes a 5.0 \$us. /día.

En los tres Departamentos señalados de emplean: aproximadamente 10,000 personas en forma directa que participan en la producción de alrededor de 15,000 toneladas de carbón vegetal. La eliminación del carbón vegetal como insumo para la industria metalúrgica de Vinto, de ser confirmada técnica y económicamente como factible a mediano plazo, será una necesidad ambiental que evitará la deforestación/desertificación.

El proyecto de investigación podría además medir el impacto socio económico que representar eliminar las fuentes de trabajo para los habitantes de las regiones mencionadas, si existieran nuevas alternativas laborales (fuentes de trabajo) y/o se esperan migraciones hacia otras áreas de mayor actividad.

A. Origen del Financiamiento

Organismos Internacionales de las NNUU relacionados con la protección del medio ambiente.

- CCC Convención de Lucha Contra la Desertificación
- FCC Framework - Convención en Cambio Climático
- UNEP Programa de las NUU para el Medio Ambiente
- GEF Facilidad Global del Medio Ambiente
- FIDA Fondo Internacional par el Desarrollo Agrícola

El concepto de tradeable permits (TP) desarrollado en el FCC es considerado como la medida más efectiva desde el punto de vista costo/beneficio aceptada dentro del concepto de Control del Efecto Invernadero, puede ser empleada para financiar el proyecto en su fase de implementación industrial.

Bibliografía

1. J.M.Floyd, D.S Conochie, Reduction of liquid tin smelting slags: 1- laboratory investigations, Institution of Mining and Metallurgy, June 1979 pp c114-c122.
2. A. Roine, J.Mansikka, P.Björklund, HSC Chemistry 6.0, Outokumpu Research Finland 2006.
3. L.Chambi. Cálculos termodinámicos, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales UMSA, 2008.
4. M.F. Barrat, F.H. Howie. Oxide Fuming of Tin Slags by use of Electrical heating. Institute of Mining and metallurgy. 1975.
5. J.Lema Patino. Volatilización de Escorias de Estaño. IV Conferencia Internacional de Etano. Kuala Lumpur. Malasia 1974.
6. J. Lema Patiño. Modernization of the Bolivian Metallurgical Industry within a Sustainable Concept through a Technological Change.Consultoría para EMV. Nov. 1997.
7. J. Floyd, J. Thorlby. Australian Mining 1972.
8. Carlos Sanguenza A., Edgar Pinto. Congreso Nacional de Metalurgia. UTO 1993.

La Paz, Enero 2008.