

4417

628.4
P117
2002
○

PROYECTO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

PROYECTO FONTEC N° 200-2540

INFORME FINAL

***“NUEVO PROCESO DE RECUPERACION DE METALES
ESPECIALES EN DESECHOS ELECTRÓNICOS”***

Entidad Ejecutora : Pacific Chemical Ltda.

Fecha de entrega : Septiembre de 2002

628.4
P 117
2002

PRESENTACIÓN

En el último decenio, se constata que el país ha sabido enfrentar con éxito el desafío impuesto por la política de apertura en los mercados internacionales, alcanzando un crecimiento y desarrollo económico sustentable, con un sector empresarial dinámico, innovador y capaz de adaptarse rápidamente a las señales del mercado.

Sin embargo, nuestra estrategia de desarrollo, fundada en el mayor esfuerzo exportador y en un esquema que principalmente hace uso de las ventajas comparativas que dan los recursos naturales y la abundancia relativa de la mano de obra, tenderá a agotarse rápidamente como consecuencia del propio progreso nacional. Por consiguiente, resulta determinante afrontar una segunda fase exportadora que debe estar caracterizada por la incorporación de un mayor valor agregado de inteligencia, conocimientos y tecnologías a nuestros productos, a fin de hacerlos más competitivos.

Para abordar el proceso de modernización y reconversión de la estructura productiva del país, reviste vital importancia el papel que cumplen las innovaciones tecnológicas, toda vez que ellas confieren sustentación real a la competitividad de nuestra oferta exportable. Para ello, el Gobierno ofrece instrumentos financieros que promueven e incentivan la innovación y el desarrollo tecnológico de las empresas productoras de bienes y servicios.

El Fondo Nacional de Desarrollo Tecnológico y Productivo FONTEC, organismo creado por CORFO, cuenta con los recursos necesarios para financiar Proyectos de Innovación Tecnológica, formulados por las empresas del sector privado nacional para la introducción o adaptación y desarrollo de productos, procesos o de equipos.

Las Líneas de financiamiento de este Fondo incluyen, además, el apoyo a la ejecución de proyectos de Inversión en Infraestructura Tecnológica y de Centros de Transferencia Tecnológica a objeto que las empresas dispongan de sus propias instalaciones de control de calidad y de investigación y desarrollo de nuevos productos o procesos.

De este modo se tiende a la incorporación del concepto "Empresa - País", en la comunidad nacional, donde no es sólo una empresa aislada la que compete con productos de calidad, sino que es la "Marca - País" la que se hace presente en los mercados internacionales.

El Proyecto que se presenta, constituye un valioso aporte al cumplimiento de los objetivos y metas anteriormente comentados.

FONTEC - CORFO

CONTENIDO

A)	SÍNTESIS DEL PROYECTO	2
B)	ANTECEDENTES GENERALES	3
C)	DESCRIPCION DE ACTIVIDADES DESARROLLADAS	5
D)	PROBLEMAS PRESENTADOS EN LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO	31
E)	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	33
F)	BIBLIOGRAFIA	35
G)	ANEXO: Rendición de Gastos	36

“NUEVO PROCESO DE RECUPERACION DE METALES ESPECIALES EN DESECHOS ELECTRÓNICOS ”

A) SÍNTESIS DEL PROYECTO

En este proyecto se desarrolla un nuevo proceso innovativo de recuperación y purificación de los metales oro, plata, paladio y cobre contenidos en los circuitos impresos de los computadores de desecho (aquellos descartados por antigüedad y por desperfectos).

El estudio comprende el desarrollo de la tecnología a nivel de laboratorio y planta piloto, de separación y purificación de los metales oro, plata, paladio y cobre contenidos en los circuitos de computadores y otros artefactos electrónicos.

Estos circuitos son actualmente exportados o descartados en vertederos sin ningún proceso y el objetivo principal de este proyecto es la recuperación y purificación de los metales oro, paladio, plata y cobre, lo que permite mejorar sustancialmente el valor comercial de los circuitos. Por otro lado se evita la pérdida de metales escasos y de alto valor. La empresa ha dado los primeros pasos en la formación de una red de proveedores, lo mismo que ya hizo con la recolección de convertidores catalíticos de autos en la que desarrolló una red de más de 300 proveedores.

Este informe contiene (1) los resultados del desarrollo de la tecnología a nivel de laboratorio y planta piloto productiva, que comprende las diferentes operaciones unitarias comprendidas desde la incineración de los circuitos hasta la purificación de los metales especiales contenidos en estos, (2) desarrollo de los sistemas de mitigación de la contaminación, (3) las bases para el desarrollo de una red de proveedores de circuitos impresos y (4) la evaluación técnica económica del negocio donde se ha tomado en cuenta los nuevos antecedentes técnicos y de mercado detectados durante el desarrollo del proyecto.

B) ANTECEDENTES GENERALES

El desarrollo del proyecto de innovación tecnológica se llevó a cabo entre los meses de Marzo del 2001 hasta el mes de Febrero del 2002, periodo durante el cual se llevó a cabo el desarrollo tecnológico comprometido en la propuesta original. Durante el desarrollo del proyecto fue necesario modificar el plan técnico de trabajo propuesto originalmente, con el fin de optimizar el proceso a ser desarrollado.

Dado que el potencial económico del negocio se basa principalmente en el contenido de metales de los circuitos electrónicos, se dio énfasis a la determinación del contenido de metales en diversos tipos de circuitos, por lo cual se llevó a cabo el análisis de metales en una muestra de 10.000 kilos de diferentes tipos de circuitos. Este análisis se llevó a cabo en Alemania, obteniéndose como resultado la identificación del valor comercial de los diferentes tipos de materiales de que se dispone en Chile.

En el país aun no se ha instaurado la práctica de recuperar los circuitos y partes de computadores, por lo que gran parte de ellos están siendo acopiados o dispuestos en vertederos. Durante el desarrollo del estudio se han identificado potenciales proveedores de circuitos de computadores y de equipos de comunicaciones, a quienes se les adquirió más de 11.000 kilos de estos materiales, con el fin de su envío a análisis de contenido de metales fuera del país y por otro lado para disponer de material suficiente para llevar a cabo las pruebas de laboratorio y de planta piloto productiva.

Se ha desarrollado un proceso para la recuperación y purificación de los metales oro, paladio, plata y cobre, contenidos en los circuitos impresos de artefactos electrónicos. Este proceso consta de una serie de operaciones unitarias entre las que se cuentan incineración, tratamiento de gases, molienda, fusión-separación de escoria, moldeo de ánodos, electro-refinación de cobre y separación-purificación de oro/paladio/plata.

A partir de los resultados de recuperación de los metales, obtenidos del escalamiento a nivel piloto, y de los datos de mercado de adquisición de la materia prima se ha llevado a cabo una evaluación técnica económica para determinar el atractivo económico del negocio. Esta evaluación económica está basada en datos reales de disponibilidad de materia prima en el país y en inversiones en infraestructura, equipos y personal necesario para llevar a cabo la actividad productiva.

De acuerdo a los Términos de Referencia y a la carta Gantt se realizaron las siguientes actividades:

0. Análisis de los distintos tipos de circuitos.

1. Desarrollo de la tecnología a nivel de laboratorio.

Actividad 1.1 : Conminución o molienda.

Actividad 1.2 : Separación del plástico de lo metálico

Actividad complementaria 1.2.1: Incineración de circuitos.

Actividad complementaria 1.2.2: Molienda de circuitos incinerados.

Actividad 1.3 : Fusión de la parte metálica.

Actividad complementaria: Fusión de material conminuido.

Actividad 1.4: **Electrorrefinación del cobre y obtención de barro anódico.**

2. Desarrollo de la tecnología a nivel de planta piloto.

Actividad 2.1: Conminución o molienda.

Actividad alternativa: Incineración en horno piloto.

Actividad 2.2. Separación del plástico de lo metálico.

Actividad alternativa: Molienda en molino piloto.

Actividad 2.3: Fusión de la parte metálica

Actividad alternativa: Fusión de material conminuido.

Actividad 2.4: **Electrorrefinación de cobre y obtención de barro anódico.**

Actividad 2.5: **Disolución del barro anódico.**

Actividad 2.6: **Separación y purificación de los metales oro, paladio y plata.**

3. Organización de antecedentes para sondeo de mercado de proveedores.

Actividad 3.1: **Identificación de proveedores.**

Actividad 3.2 : **Ampliación de proveedores**

Actividad 3.3: **Estudio de importaciones de computadores.**

C) DESCRIPCION DE ACTIVIDADES DESARROLLADAS.

0.- ANALISIS DEL CONTENIDO DE METALES DE LOS CIRCUITOS ELECTRONICOS

Actividad 0.1: Determinación del contenido de metales.

Parte Experimental y Resultados

Con el objetivo de disponer de valores reales del contenido de los metales oro, paladio, plata y cobre, se llevó a cabo una recolección de diferentes tipos de circuitos electrónicos provenientes de computadores, equipos de comunicación y de artefactos electrónicos tales como radios, televisores y similares. Con el fin de disponer de un contenido de metales representativo, se llevó a cabo la recolección de 11.000 kilogramos de circuitos de diferentes tipos.

El procesamiento y determinación del contenido de metales los diferentes tipos de materiales se llevó a cabo en la empresa Deutsche Edelmetall Recycling, DEMET, de Alemania. Esta empresa cuenta con certificación ISO 9000 e ISO 14.000 en lo que respecta a la determinación del contenido de metales en este tipo de materiales.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Descripción de los circuitos	Contenido de metales	Pertinencia de su reciclaje
Tipo I	Au: 260 g/Ton. Pd: 100 g/Ton. Ag: 800 g/Ton. Cu: 15 %	Es pertinente su reciclaje
Tipo II	Au: 150 g/Ton. Pd: 90 g/Ton Ag: 700 g/Ton Cu: 15 %	Es pertinente su reciclaje
Tipo III	Au: 40 g/Ton. Pd: 35 g/Ton. Ag: 600 g/Ton. Cu: 15 %	Es pertinente su reciclaje
Tipo IV	Au: 5.5 g/Ton.	No es pertinente su reciclaje

	Pd: 7.5 g/Ton. Ag: 125 g/Ton. Cu: 12.5 %	
--	--	--

A continuación se muestran fotografías de los diferentes tipos de materiales que fueron sometidos a análisis de contenido de metales:

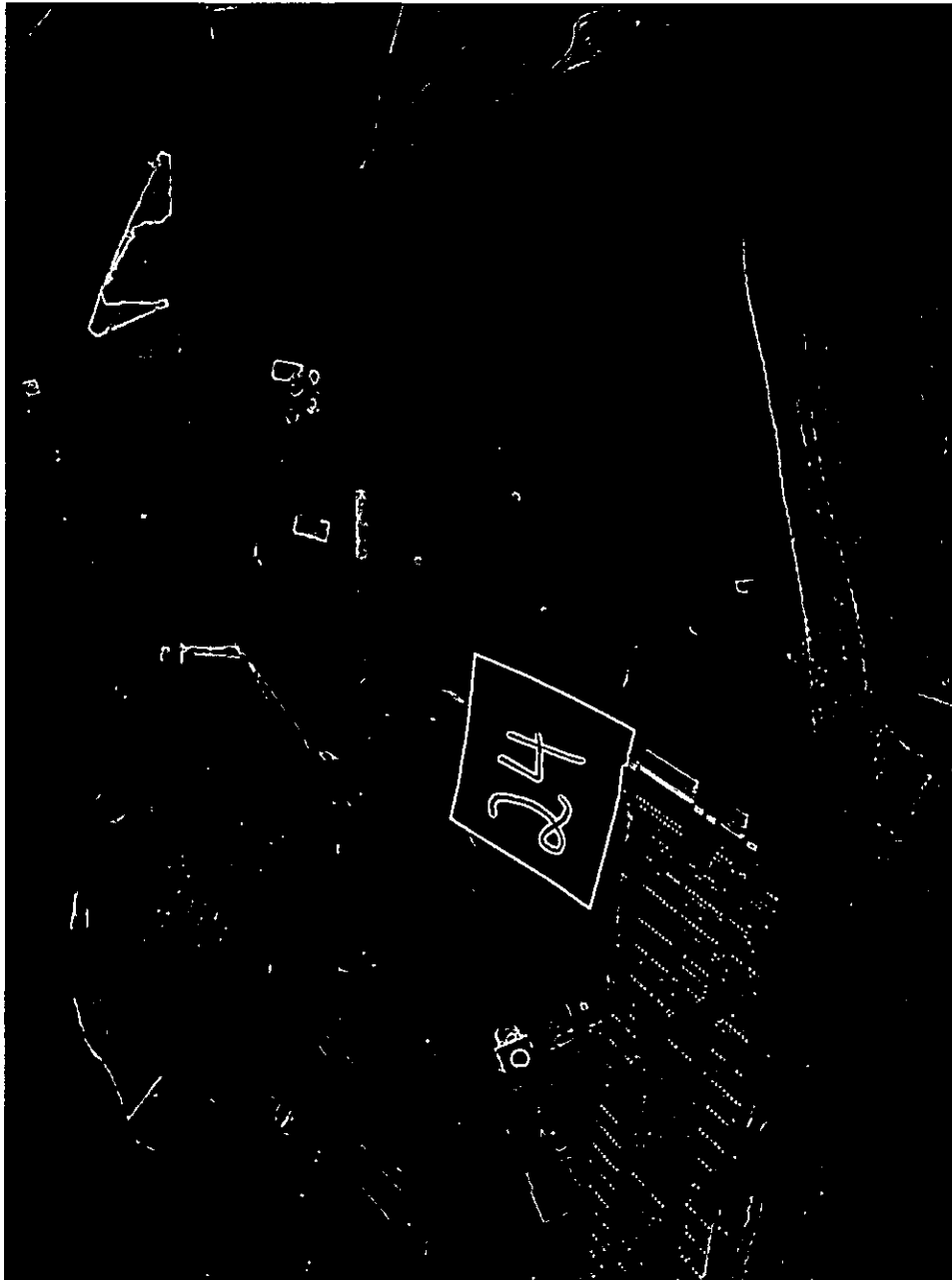
Material Tipo I



Material Tipo II



Material Tipo III



Material Tipo IV



Composición de los circuitos electrónicos

Los circuitos electrónicos están constituidos principalmente por fibra de vidrio, resina epóxica, cobre y en menor cantidad metales preciosos tales como oro, plata y paladio. La constitución aproximada de un circuito es la siguiente:

Material	Porcentaje
Fibra de vidrio	55 %
Resina epóxica	30 %
Cobre	15 %
Metales preciosos (Ag,Au, Pd)	0,1 %

1.- DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA A NIVEL DE LABORATORIO

Actividad 1.1: Conminución o molienda.

- **Parte Experimental y Resultados**

La molienda preliminar se realizó con molino de martillos fijos, acoplado a un sistema de separación tipo ciclón y a un sistema captador de polvos tipo filtro de mangas.

Las experiencias se realizaron a distintos tiempos para obtener diferentes grados de tamaño de producto con la idea original de realizar una posterior separación físico - mecánica del material plástico y metálico.

Esta etapa permitió determinar que el material orgánico mantiene en su interior una gran cantidad de partes metálicas, no siendo posible una buena separación. Con el fin de optimizar el proceso se utilizaron dos tipos de malla de salida en el molino, diferenciándose ambas en el diámetro de las perforaciones.

En consecuencia, fue necesario eliminar esta etapa en el proceso, que fue reemplazada por la incineración.

Las condiciones de operación de esta operación son las siguientes:

Velocidad de giro del molino :	2860 RPM
Potencia del motor :	5 HP
Diámetro del rotor :	35 cm.
Diámetro de orificio de la rejilla de paso :	1.- 6 mm. 2.- 12 mm.

- **Conclusiones**

La conminución o molienda de los circuitos impresos en un molino de martillo fijo no permite separar completamente el material orgánico de la parte metálica, lo cual puede conducir a pérdidas económicas importantes si esta operación es considerada en un proceso propuesto.

En base a estos resultados se llevó a cabo el rediseño del proceso, sustituyendo esta operación por la incineración.

Actividad 1.2: Separación del plástico de lo metálico.

Dado que la molienda de los circuitos no permite una buena separación de los metales, se llevó a cabo una operación diferente, incineración de circuitos electrónicos.

Actividad complementaria 1.2.1: Incineración de circuitos.

- **Parte Experimental y Resultados**

Esta etapa fue realizada mediante el uso de un incinerador de laboratorio consistente en una cámara cilíndrica de incineración de dimensiones 10 cm de diámetro y 50 cm de longitud. En un extremo de la cámara se situó un quemador a gas tipo Bunsen, con control de intensidad de llama. En el interior de la cámara se colocó cargas batch de 500 gramos de circuitos previamente disgregados en trozos de 5 X 5

cms. El sistema de incineración se instaló en una campana de extracción de gases provista de un lavador de gases.

La operación de incineración se comenzó con llama de baja intensidad de manera de permitir una combustión controlada. A medida que se consumió el material orgánico, se fue aumentando la intensidad de la llama de manera de permitir la combustión completa. Finalmente se incineró el material hasta que no se apreció presencia de comburentes en los circuitos. Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio se muestran en la Tabla N°1.

Los porcentajes de pérdida de material son mayores con las *tarjetas computacionales* (muestras 1 - 5) que con las de *tarjetas de telefonía*, (muestras 6 - 14) debido a que éstas últimas poseen mayor porcentaje de componente metálico.

Tabla N°1. Resultados en prueba de laboratorio de incineración de circuitos

Experiencia	Masa inicial (gramos)	Tiempo de calcinación (minutos)	Masa final (gramos)	% de pérdida de peso
1	306	50	170	44.4
2	600	50	440.1	26.6
3	500	100	331.4	33.7
4	300	40	199.5	33.5
5	555	50	391.1	29.5
6	502.3	50	432	14.0
7	503	50	396.4	21.2
8	500	50	426.9	14.6
9	500	50	414.2	17.2
10	500.5	50	405.6	19.0
11	500.7	60	395.2	21.1
12	501.8	50	416.5	17.0
13	500	50	404.9	19.0
14	500.3	50	391.4	21.8

- **Conclusiones**

Este proceso pasa por etapas sucesivas de quemado de orgánicos más volátiles, temperatura de ignición de orgánicos más pesados, explosión de condensadores, quemado y recalentamiento de la materia. Por lo anterior, se requerirá en la operación batch de la planta piloto controlar el proceso (quemadores) para ir por las etapas detalladas.

Es necesario determinar que para una cierta temperatura de incineración existe un tiempo crítico por sobre el cual no hay descenso en peso y que ello debe ser determinado en la planta piloto para no incurrir en gastos innecesarios de energía en el incinerador.

Actividad complementaria 1.2.2: Molienda de circuitos incinerados.

- **Parte Experimental y Resultados**

Esta etapa fue realizada a nivel de laboratorio con un molino de bolas de 10 litros de capacidad, en el cual se colocaron unos 12 kilogramos de bolas de acero de 25 mm de diámetro y 1.5 kilogramos de circuitos electrónicos incinerados por batch, por aproximadamente 2 horas de tratamiento para obtener una homogeneización del material para su posterior fusión en un hornon tipo Morgan.

Las condiciones de operación de la molienda a nivel de laboratorio son las siguientes:

Carga de circuitos incinerados	:	1,5 kgs.
Tiempo de conminución	:	2 horas
Velocidad de giro del molino	:	20 RPM

- **Conclusiones**

La molienda en un equipo de laboratorio ha permitido obtener un material conformado por dos fracciones, una de ellas un polvo fino y la otra constituida por una fracción gruesa constituida por partes metálicas que no son disgregables por el molino de bolas.

Actividad 1.3: Fusión de la parte metálica.

Actividad complementaria: Fusión de material conminuido

- **Parte Experimental y Resultados**

Esta etapa fue realizada a nivel de laboratorio en un horno Morgan equipado con un crisol de arcilla de 1.2 litros de capacidad. En este crisol se colocó carga batch de los circuitos electrónicos incinerados y conminuidos, junto a una mezcla de fundentes, todos previamente mezclados en el molino de bolas.

El objetivo principal de la fusión es lograr una óptima separación de la parte metálica, que contiene cobre y metales preciosos, de la parte no metálica, constituida principalmente por fibra de vidrio. Con el fin de que la fibra de vidrio forme una fase líquida de baja viscosidad, se agregan fundentes. La mezcla fue sometida a fusión en un horno Morgan, utilizando para ello un quemador alimentado con aire a presión y gas licuado de mediana presión.

En una primera etapa se comenzó la fusión con una llama rica en gas y poco aire para lograr un calentamiento paulatino del crisol, luego se fue aumentando el flujo de aire para obtener una llama rica en oxígeno con la cual se pueden obtener altas temperaturas incluso superando los 1300°C, temperatura más que suficiente para lograr fundir el cobre contenido en los circuitos electrónicos. Una vez alcanzada la temperatura de fusión de los circuitos electrónicos se mantuvo esta temperatura por unas 3 horas, luego se procedió a sacar el crisol del horno Morgan con unas pinzas adecuadas y voltear la mezcla fundida en unos moldes especialmente diseñados para esta etapa de la prueba. Una vez frío el material en los moldes, se procedió a sacarlo, obteniéndose dos capas, la primera y de menor densidad, compuesta por un material vidrioso y la segunda y de mayor densidad, compuesta de metales. Las pruebas de fusión a nivel de laboratorio se muestran en la Tabla N°2.

Tabla N°2. Pruebas de Fusión de Circuitos Electrónicos

Prueba	Cerámica (gramos)	CaCO ₃ (gramos)	Borax (gramos)	Vidrio (gramos)	T° empieza a fundirse (°C)	T° de fusión (°C)
1	300	0	30	0	900	1150
2	300	5	25	0	850	1070
3	300	15	15	0	900	1100
4	300	25	5	0	950	1080
5	300	15*	15	0	900	1100
6	300	22.5	22.5	0	900	1100
7	300	30	30	0	900	1100
8	300	15	15	60	900	1070

***Prueba Realizada con Carbonato de Sodio**

Las cantidades de productos obtenidos, metal y vidrio, para cada una de las pruebas se muestran en la siguiente tabla.

	Metal obtenido (Grs.)	Vidrio obtenido (Grs.)
Prueba 1	0	185.8
Prueba 2	0	180.7
Prueba 3	93.0	120.5
Prueba 4	78.0	155.8
Prueba 5	0	175.5
Prueba 6	88.2	132.5
Prueba 7	96.2	127.8
Prueba 8	83.3	135.8

Con el fin de determinar el grado de recuperación de los metales preciosos se llevó a cabo la determinación del contenido tanto en la parte metálica como en el vidrio, en aquellas pruebas en que se obtuvo una buena separación de fases. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas.

Contenido de metales preciosos en fase metálica.

	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 8
Oro (gr./Ton)	2794	1170	4170
Plata (gr./Ton)	9700	8100	10400
Paladio (ppm)	385	403	412
Cobre (%)	69.53	77.81	67.21

Contenido de metales preciosos en vidrio.

	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 8
Oro (gr./Ton)	40	25	60
Plata (gr./Ton)	58	68	47
Paladio (ppm)	161	181	123
Cobre (%)	1.56	2.43	1.40

- **Conclusiones**

La ejecución de pruebas de fusión con diferentes mezclas de fundentes ha permitido determinar aquella mezcla que permite obtener una fase no metálica de baja viscosidad, lo cual ha permitido una buena separación de la fase metálica de la no metálica. Se llevó a cabo la determinación del contenido de metales preciosos en los productos obtenidos, metal y vidrio, en aquellas pruebas con mejor separación de fases, con lo cual se ha podido determinar el grado de recuperación de los metales de interés.

Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio permiten diseñar la operación a escala piloto, para lo cual se cuenta con un horno Morgan de volteo de capacidad de 10 litros.

Actividad 1.4: Electrorrefinación del cobre y obtención de barro anódico.

• Parte Experimental y Resultados

Tomando como referencia la prueba de fusión de circuitos que entregó mejores resultados de recuperación, se llevó a cabo 6 pruebas de fusión con el fin de obtener alrededor de 500 gramos de metal. Las partes metálicas fueron fundidas convirtiéndolas en un ánodo de dimensiones 10x10 cms. La electrorrefinación se llevó a cabo en un sistema constituido por una celda electroquímica de dimensiones 15x15x5 cms., en la cual se introdujo el ánodo, un cátodo conformado por una lámina de cobre electrolítico, de dimensiones 15x15 cms., y una solución sulfúrica de sulfato de cobre. La corriente fue suplida por una fuente de poder de corriente continua y con control de voltaje. Las condiciones de operación para la electrorrefinación fue la siguiente:

Concentración de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:	160 grs/litro
Concentración de H_2SO_4	:	200 grs./litro
Razón de área Anodo/Cátodo	:	1,0
Densidad de corriente catódica	:	2,0 A/dm ²
Temperatura	:	20°C

Se llevó a cabo la electrorrefinación hasta el consumo total del ánodo. Durante el proceso se observó el desprendimiento de barro anódico, el que decantó hasta el fondo de la celda. Una vez finalizada la electrorrefinación, el electrolito fue filtrado, retirándose el barro anódico, el que fue lavado, secado y sometido a análisis químico para determinar su contenido de paladio, oro y plata.

• Conclusiones

El metal obtenido durante el proceso de fusión de circuitos incinerados puede ser sometido a electrorrefinación, obteniéndose como productos cobre electrolítico y barro anódico que contiene los metales preciosos de interés. Las condiciones de operación utilizadas son aquellas indicadas en la literatura.

DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA A NIVEL DE PLANTA PILOTO.

Actividad 2.1: Conminución o molienda.

Actividad alternativa: Incineración en horno piloto.

- **Parte Experimental y Resultados**

Se llevó a cabo el diseño y construcción de un incinerador constituido por una etapa de combustión controlada y una segunda etapa de incineración de los gases y humos generados en el quemado inicial. La cámara de combustión está constituida por un receptáculo rectangular equipado con un quemador en un costado y una puerta de carga en el costado opuesto. Esta sección del incinerador está construida en ladrillos refractarios soportados por una estructura metálica. La chimenea de esta sección entra en forma tangencial a una cámara de incineración cilíndrica, la que está provista de un quemador a gas alimentado con aire a presión. La llama del quemador entra en forma tangencial al postquemador, permitiendo un arrastre eficaz de los gases y humos provenientes de la primera sección. La cámara de postquemado tiene como función llevar a cabo la eliminación de gases y humos nocivos que pueden generarse durante la combustión incompleta de los circuitos.

En el interior de la cámara de combustión de este horno se colocó cargas batch de 50 Kilogramos de circuitos electrónicos. Luego de cargar el horno con los circuitos, se procedió a encender la cámara de postquemado y luego se comenzó a incinerar los circuitos mediante la acción del quemador de baja potencia. En una primera etapa se llevó a cabo la incineración con una llama de baja potencia, con el fin de evitar un quemado sin control. La intensidad de la llama se fue incrementando con el fin de eliminar gran parte del material combustible de los circuitos, tomando este proceso alrededor de 6 horas. El material incinerado pesó 35 kilos, por lo que la reducción de peso fue de 30 %, similar a la alcanzada en las pruebas de laboratorio.

Las condiciones de operación del proceso de incineración son las siguientes:

Dimensiones de la cámara de combustión	:	170 x 55 x 55 cms.
Tipo de quemador	:	A gas de mediana presión, aire no forzado.
Dimensiones de la cámara del postquemador	:	Diámetro : 41 cms. Longitud : 69 cms.
Tipo de quemador	:	A gas de mediana presión, aire forzado.
Tiempo total de operación	:	6 horas

Con el fin de evitar el escape de gases contaminantes, el incinerador fue operado bajo una campana de extracción de gases conectada a un enfriador de lluvia y lavador de gases que se describe más adelante.

- **Conclusiones**

Se ha determinado las condiciones de operación del proceso de incineración de circuitos electrónicos, a un nivel piloto. Se han obtenido resultados muy similares a los obtenidos en el desarrollo a nivel de laboratorio. La reducción en peso es de alrededor de 30 %. En comparación con las pruebas de laboratorio, el uso de un postquemador permite eliminar gran cantidad de humos. Los humos y gases residuales son tratados en un enfriador y lavador de gases del tipo de relleno vertical.

Actividad 2.2. Separación del plástico de lo metálico.

Actividad alternativa: Molienda en molino piloto.

- **Parte Experimental y Resultados**

Para llevar a cabo la operación de molienda se diseñó y construyó un molino de bolas de 280 litros de capacidad y 37 rpm, accionado por un motor de 2,0 HP. Se utilizó bolas de 40 milímetros. Las pruebas de molienda del material incinerado se efectuó con cargas de 40 kilogramos de material y una carga de 100 kilogramos de bolas.

El tiempo óptimo de molienda se determinó analizando la granulometría del material a intervalos iguales de tiempo. El tiempo óptimo de molienda fue aquel en que no hubo un cambio apreciable de la granulometría comparado con la muestra siguiente. La granulometría se determinó mediante la clasificación de una muestra en un sistema de tamices.

Las condiciones de operación son las siguientes:

Relación peso bolas/material	:	1:2,5
Velocidad de giro	:	37 rpm
Tiempo de molienda	:	2 horas

Una vez finalizada la molienda se agregó los fundentes, según la mejor dosificación determinada a nivel de laboratorio y se procedió a mezclar por 15 minutos adicionales.

- **Conclusiones**

Se determinó a nivel piloto las condiciones óptimas de molienda y el menor tiempo de operación, lo cual determina un ahorro en energía y evita el desgaste de materiales del molino.

Actividad 2.3: Fusión de la parte metálica

Actividad alternativa: Fusión del material conminuido

- **Parte Experimental y Resultados**

Esta operación fue realizada en un horno Morgan de volteo, en el cual se encuentra inserto un crisol de carburo de silicio de 10 litros de capacidad, en el cual se colocó cargas batch de 28 kilogramos de circuitos electrónicos incinerados y conminuidos con la proporción adecuada de mezcla de fundentes.

La fusión del material conminuido se efectuó elevando la temperatura del crisol hasta 1200 °C, mediante la combustión de gas licuado con aire a presión. Una vez que se alcanzó la temperatura deseada, esta se mantuvo por 1 hora con el fin de permitir una óptima separación de fases, metal y

escoria. El contenido del crisol fue vertido en una lingotera, mediante el volteo del horno. La lingotera fue acondicionada previamente con un desmoldante.

Una vez que se enfrió el contenido de la lingotera, se desprendió el sólido y se separó en forma mecánica la escoria del metal.

Las dimensiones de la lingotera utilizada son las siguientes:

Longitud : 40 cms.
Ancho : 32 cms.
Espesor : 5 cms.

- **Conclusiones**

Se determinó a nivel de planta piloto las condiciones óptimas de fusión del material conminuido, logrando así un mejor rendimiento del horno Morgan de volteo.

Actividad 2.4: Electrorefinación de cobre y obtención de barro anódico.

- **Parte experimental y resultados.**

Para llevar a cabo la electrorrefinación de cobre y obtención de barro anódico se instaló una planta piloto de electrorrefinación constituida por un rectificador de corriente alterna a corriente continua y un set de cuatro celdas de 60 litros cada una. Las pruebas se llevaron a cabo con una celda, utilizando para ello tres ánodos de cobre provenientes de la fusión y cuatro cátodos de lámina inicial de cobre. Tanto los ánodos como los cátodos fueron sostenidos por barras, las que fueron conectadas eléctricamente al rectificador.

El proceso se llevó a cabo de acuerdo a los parámetros operacionales determinados a nivel de laboratorio y que son los siguientes:

Concentración de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: 160 grs/litro

Concentración de H ₂ SO ₄	:	200 grs./litro
Razón de área Anodo/Cátodo	:	1,0
Densidad de corriente catódica	:	2,0 A/dm ²
Temperatura	:	20°C
Peso de cada ánodo	:	20 kilos
Número de ánodos	:	3
Número de cátodos	:	4

La electrorrefinación se llevó a cabo hasta que se consumieron casi completamente los ánodos. Solo la parte superior de los ánodos no fueron consumidos. La parte restante se retornó al proceso de fusión de nuevos ánodos. Durante la operación los ánodos fueron colocados dentro de una bolsa de polipropileno con el fin de captar el barro anódico generado durante el proceso.

Una vez finalizada la electrorrefinación, se retiró la bolsa, se lavó su contenido con agua y luego se retiró el barro anódico para su posterior secado en estufa. Los productos obtenidos son los siguientes;

Cobre refinado	:	51,5 kilos
Anodo sin tratar	:	6,5 kilos
Barro anódico	:	1,5 kilos

El barro anódico seco fue homogeneizado y luego muestreado según procedimiento estandarizado. La muestra fue analizada para determinar su contenido de metales preciosos y cobre.

Análisis químico del barro anódico:

Plata	:	26,6 %
Oro	:	4,5 %
Paladio	:	3,2 %
Cobre	:	55 %

- **Conclusiones**

Se ha desarrollado a nivel piloto el proceso de electrorrefinación de cobre y obtención de barro anódico, a partir de ánodos generados de la parte metálica de los circuitos de computadores y equipos de comunicación. El escalamiento de la operación a partir de los parámetros obtenidos a nivel de laboratorio ha permitido establecer los parámetros de operación del proceso a nivel industrial, dado que de los resultados obtenidos a nivel piloto han sido satisfactorios.

Actividad 2.5: Disolución del barro anódico.

- **Parte Experimental y Resultados**

El barro anódico fue tratado con “agua regia”, una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico, a una temperatura de alrededor de 80 °C, con agitación. Una vez que se observó la disolución de los metales y la precipitación de la plata como cloruro de plata, se eliminó el remanente de ácido nítrico mediante sucesivas evaporaciones y adiciones de ácido clorhídrico. La mezcla resultante fue filtrada en frío, separándose una solución conteniendo oro, paladio y cobre y un precipitado formado por cloruro de plata.

La disolución del barro anódico se llevó a cabo en un reactor de vidrio de 4 litros, equipado con agitación mecánica, calefacción, condensador de reflujo y embudo de adición de ácido nítrico. Inicialmente se agrega el ácido clorhídrico, en cantidad tal que el sólido forme una pulpa fácilmente agitable. la temperatura se aumenta gradualmente, manteniéndose la agitación. Una vez que la temperatura alcanza los 70°C, se comienza la adición de ácido nítrico de tal manera que la reacción no sea violenta y tampoco se genere gran cantidad de vapores nitrosos. Una vez que se ha adicionado la totalidad del ácido nítrico, se continua el calentamiento y la agitación hasta que no se observa la emisión de vapores nitrosos.

La mezcla resultante, constituida por una solución de cobre, oro y paladio y un precipitado de cloruro de plata, se traspasa a un vaso de precipitados y se calienta con agitación hasta evaporación de un 80% de la solución. A la solución se le agrega ácido clorhídrico hasta restituir el volumen inicial y nuevamente se evapora. La operación se repite una vez más y finalmente se restituye el volumen inicial

con ácido clorhídrico. La solución se enfría a temperatura ambiente y luego se filtra, separándose la solución clorhídrica de cobre, oro y paladio y un precipitado de cloruro de plata.

El precipitado de cloruro de plata se lava con agua hasta eliminar la impregnación con la solución que contiene los otros metales.

- **Conclusiones.**

El procedimiento utilizado para la disolución del barro anódico ha permitido separar la plata del resto de los metales. Dado que el concentrado obtenido desde 1000 kilos de circuitos no es mas de 3 a 4 kilogramos, el procedimiento de disolución solo se ha desarrollado a nivel de banco y laboratorio.

Actividad 2.6: Separación y purificación de los metales oro, paladio y plata.

- **Parte Experimental y Resultados.**

El desarrollo experimental de separación y purificación fue asumido por el comité evaluador como una tecnología ya desarrollada por la empresa en un desarrollo anterior, por lo que se describe solo en forma somera.

Purificación de la plata.

El precipitado de cloruro de plata fue suspendido en agua y luego calentado a 70°C con agitación. Sobre la suspensión se agregó hierro en polvo induciendo de esta manera la reducción de la plata. Una vez que se agregó hierro en polvo en exceso, la suspensión fue filtrada y el polvo de plata lavado con agua. El sólido fue tratado con ácido sulfúrico diluido con el fin de disolver el hierro en exceso. El polvo fue nuevamente filtrado y lavado con agua. Finalmente se secó.

El polvo seco se fundió en un crisol de cerámica a una temperatura de alrededor de 1000°C, obteniéndose plata metálica.

Separación del oro y el paladio.

La solución conteniendo oro, paladio y cobre fue tratada con sulfato ferroso, con lo cual precipitó el oro en forma de polvo. El precipitado fue filtrado y lavado con agua. El polvo seco se fundió en crisol obteniéndose oro metálico.

La separación del paladio desde la solución se llevó a cabo mediante la adición de cloruro de amonio, con lo cual precipita el compuesto de paladio $(\text{NH}_4)_2\text{PdCl}_4$. Este compuesto se filtra, se lava con solución de cloruro de amonio y luego se seca. El producto seco es sometido a calcinación, con lo cual se obtiene paladio en esponja.

- **Conclusiones.**

La separación de los metales se lleva a cabo aplicando la metodología desarrollada con anterioridad por la empresa y utilizada extensivamente en la separación y purificación de metales preciosos obtenidos desde los convertidores catalíticos de automóviles.

Otras Actividades en Planta Piloto:

- **Sistema de Tratamiento de Gases**

La incorporación de una etapa de incineración - para eliminación del componente plástico - implicó una inversión adicional en sistemas de extracción, adecuación térmica y lavadores de gases, junto con el diseño de un horno incinerador con postquemador.

Se determinó de acuerdo con antecedentes bibliográficos que la quema del material soportante (placa) de los circuitos genera una gran cantidad de gases los cuales deben ser eliminados ya sea por una operación unitaria de absorción; En este caso se optó por seguridad, implementar ambas etapas.

Considerando que la torre de absorción y el relleno son de propileno se instaló un sistema de humidificación adiabática para reducir la temperatura de llegada de los gases al relleno.

Descripción del sistema de tratamiento de gases:

Campana de extracción:

Se diseñó y construyó e instaló una campana de extracción de medidas 180 X 150 cms, a una distancia de 2.0 metros del piso. Esta se conectó al sistema de enfriamiento adiabático mediante un sistema de conducción de sección rectangular de medidas 40 X 40 cms.

Enfriador adiabático de gases:

Constituido por un receptáculo de medidas 180 x 60 x 60 cms, equipado con un sistema de duchas, alimentadas por una bomba centrífuga de 1,5 HP, y con un estanque de recirculación de agua de 500 litros de capacidad.

Lavador de gases:

Constituido por una torre de dimensiones: diámetro=160 cms., altura=450 cms. El lavador está conformado por una sección inferior que mantiene un volumen de agua suficiente para su funcionamiento, luego una sección por donde entran los gases, una zona de relleno con anillos Rashing y finalmente un sistema de rejilla cortagotas. El material de construcción del lavador y el relleno es polipropileno. Sobre la zona de relleno se tiene el sistema de duchas, que envían el agua sobre el relleno. Las duchas son alimentadas por una bomba centrífuga de 2,5 HP y 2 pulg. En la parte superior del lavador, e instalado sobre una torre metálica, se encuentra el sistema de extracción de gases, constituido por un extractor centrífugo fabricado en polipropileno, de dimensiones ancho: 120 cms. Y diámetro: 70 cms. El extractor es accionado por un motor de 7,5 HP.

Actividad 3.1: Identificación de proveedores.

El mercado de proveedores consta de dos empresas formales y grandes y alrededor de tres informales de pequeño tamaño que pueden suministrar material de calidad en forma irregular.

El principal proveedor es un depósito de excedentes de computacionales que se provee en remates y por compra directa a particulares de material obsoleto y que desarma para obtener piezas y partes para repuestos cuya venta es directa o a redes de clientes básicamente servicios técnicos que requieren reparar equipos discontinuados o bien acceder a repuestos de menor precio.

Un segundo proveedor consiste en unos depósitos de excedentes de telecomunicaciones que clasifica su material y exporta a muy bajos precios el material en bruto y que ha demostrado interés en ser parte de una red de proveedores a la empresa.

Los proveedores arriba mencionados cumplen requisitos básicos para conformar una red que requiere i) volumen constante de suministro y ii) aceptar que el proveedor imponga una selección/clasificación del material.

Los proveedores mencionados como informales nos han suministrado en forma irregular material clasificado de buena calidad pero no se pueden considerar una continuidad en el tiempo para efectos de cuantificación del mercado.

En relación con las empresas que representan marcas de reconocidas en el mercado y que dan servicio técnico, se llevaron adelante conversaciones para retirar material en desuso, pero lo anterior es sujeto de evaluación debido a que es necesario armar una línea de desarme de los equipos, manejar espacios grandes para acopio y descarte, considerando que se deberá manejar un porcentaje alto de desechos y que llevarlo a vertederos implica un pago adicional para la recepción de estos.

- **Conclusiones**

Se hace necesario evaluar la factibilidad de tener una línea de desarme de computadores y el costo de disposición de excedentes computacionales al ir directamente a las empresas y retirar los computadores, estableciendo la real rentabilidad de ello debido básicamente al fuerte impacto que tiene sobre la rentabilidad de este proceso los gastos de flete y el pago por la disposición de los desechos.

Actividad 3.2 :Ampliación de proveedores

Hoy en día ya existe un mercado donde se comercializan desechos de placas de computadores que en Chile alcanza unas 20 toneladas año, por lo bajo. La empresa ya ha tomado contacto con los principales proveedores de desechos y existe un potencial de abastecerse desde el inicio de al menos del tonelaje mencionado.

Durante el año 2001 se tomó contacto con una docena de proveedores con a los que se compraron 10 toneladas de material en un par de meses. Este material fue enviado en su totalidad los clientes en Alemania, en donde se realizaron análisis de contenidos los que determinaron que tipo de materiales son los más atractivos.

A su vez existe un interés por parte de estos proveedores de vender a Pacific por dos poderosas razones. Una, es que los compradores hoy día son personas extranjeras que vienen una o dos veces al año y compran volúmen, lo que no les asegura un flujo mensual de ingresos ni precios estables. Otra, es que una empresa nacional como Pacific además de resolverles el problema anterior les ofrece la posibilidad de desarrollar otros negocios en Chile con apertura internacional y eso les parece muy atractivo. De todos modos, primero hay que realizar el esfuerzo de desarrollo de la tecnología antes de establecer relaciones comerciales de abastecimiento que se ven perfectamente viables.

Para el desarrollo de una red de proveedores de pequeña escala se estableció ya se iniciaron conversaciones para un trabajo conjunto con una empresa importante en el tema de recolección de desechos de papeles y cartones y fabricación de productos finales a partir de estos desechos¹.

¹ La confidencialidad de estos datos es una herramienta de competencia de Pacific por lo que se ha mantenido reserva de estos datos tanto de proveedores como de este acuerdo estratégico en el presente documento. En caso de ser necesarios para el evaluador se entregaría información verbal de ello para la ratificación de la información y de las conversaciones.

Competencia

En Estados Unidos este mercado de reciclaje existe, detectándose cerca de 30 empresas que están en este rubro. Estos podrían ser potenciales compradores del concentrado o de los metales y, adicionalmente de la chatarra que en Chile tiene un precio muy bajo.

Estas empresas serán materia de investigación comercial que la empresa PACIFIC CHEMICAL llevará a cabo durante el desarrollo de este proyecto de pre-inversión, dadas las oportunidades de negocio que de aquí se puedan derivar.

Del estudio y toma de contacto inicial se detecta poco interés en comprar por parte de estas empresas, dados los volúmenes transados. Sin embargo, los clientes europeos demuestran mayor interés detectándose incluso clientes nacionales que podría ser sumamente atractivos para Pacific, como es el caso de ENAMI. Hoy se está en pleno proceso de conversaciones con dicha empresa.

Actividad 3.3 : Importaciones de computadores

El negocio funciona por volumen, por lo que se estima que existe unos cuatro a cinco años para penetrar y posicionarse en el mercado antes de que ingrese la competencia. Cuando esto ocurra, la disponibilidad de convertidores de desecho asociado al desarrollo del mercado de proveedores y al posicionamiento de la empresa será tal, que se estima existirá mercado para más de un competidor.

La tasa de crecimiento del parque de computadores en el país es en el rango de 10-14 %. El año 2003 se aprecia altamente conveniente para implementar productivamente el proyecto, dado que basado en la información recolectada por la empresa, se tendrá cantidades interesantes de desechos electrónicos.

En su debido momento también se estudiarán alianzas o ventas de la tecnología, todo dependerá del curso que tome el negocio en todo caso durante el lapso de tiempo considerado. Para ello incluso se han hecho contactos en El Salvador venta tecnología, visitando a potenciales compradores de la tecnología. Esto porque en este país se concentra una fuerte capacidad empresarial que busca inversiones y por su conexión muy fuerte con USA.

D. PROBLEMAS PRESENTADOS EN LA EJECUCION DEL PROYECTO.

Las compras de materia prima a diferentes proveedores dejaron en evidencia que solo un porcentaje del material tiene valor para efectos de procesar metales finos que compensen el costo de procesamiento y dejen un margen de ganancia atractivo para la empresa.

Por parte de algunos proveedores existe una sobrevaloración del material electrónico, que en determinados casos hacen que estos sean rechazados como suministradores de materia prima, a pesar de los volúmenes interesantes de material que pueden suministrar.

Es básico hacer entender a los proveedores que el material debe ser suministrado limpio y clasificado y que el precio dependerá de la calidad del mismo, y que hay material cuya calidad no amerita su procesamiento; sobre la base de lo anterior es que se calcula que existe entre un mínimo de 600 Kgs – 1000 Kgs/mes de material de buena calidad y de 1000- 1500 Kgs /mes de material de segunda calidad, cuyo menor contenido de metales preciosos se hace interesante procesarlo solo a partir de cierto precio de compra.

La etapa de proceso en laboratorio permitió descartar procesos y diseñar otros que nos permitieran una mejor vía para la recuperación de metales y por ello que en las actividades desarrolladas aparecen procesos alternativos a los originales planteados. Una vez que se definió el proceso más adecuado a nivel de laboratorio, se procedió a desarrollarlo a nivel de planta piloto, lo cual ha permitido iniciar la etapa piloto comercial del proyecto, procesando actualmente 1000 kls/mes de circuitos .

Respecto de los aspectos técnicos fue necesario realizar un cambio en la concepción del proceso que requería un diseño de equipos para procesar mediante un proceso pirometalúrgico y no una vía de separación hidrometalúrgica ya sea por medios físico mecánicos, el material orgánico del material metálico. El diseño de horno incinerador para la planta piloto y los procesos de tratamiento de gases nos permite también demostrar que un proceso de incineración bien conceptualizado es una etapa de producción limpia y que puede ser manejada dentro de los estándares ambientales exigidos por la autoridad.

De acuerdo a los antecedentes el rango de operación del postquemador debiera estar en un mínimo de 423 °C (mínimo) y de 562 ° C (máximo) para eliminar los compuestos generados en la combustión (benceno, tolueno, etilbenceno, estireno, naftaleno, m-p xileno, 1,3,5 y 1,2,4 trimetilbenceno); ambas temperaturas serán logradas con un quemador adicional de mediana presión. Sin embargo se ha definido una temperatura de operación sobre 800°C y atmósfera oxidante, con el fin de destruir todo tipo de compuestos orgánicos.

El circuito de tratamiento de gases consta de un humidificador/ enfriador que adecua la temperatura de estos a las condiciones de operación de una torre de absorción para el lavado de los gases; el sistema es de tiro inducido con un ventilador que permite una tasa de extracción (flujo) adecuada para el volumen estimado a producir en incineración y postquemado de gases.

Cabe hacer notar que uno de los mayores problemas encontrados durante la ejecución del proyecto fue la caracterización química de los productos intermedios y de los finales. Inicialmente se recurrió al Dpto. de Análisis Químico y Control de Calidad de ENAMI-Ventanas, unidad que lleva a cabo este tipo de análisis pero su tiempo de respuesta es lento, dado que da prioridad a aquellas muestras de control de proceso de la empresa. El tiempo de respuesta es de alrededor de 2 a 3 meses. También se recurrió al Laboratorio de Análisis Químico de la USACH, lugar donde el tiempo de respuesta es rápido, 1 a 2 semanas, pero los resultados no permitieron caracterizar los productos y llevar a cabo un control de proceso. El Centro de Servicio Externo de la Facultad de Química de la U. Católica de Chile era otro lugar que podía llevar a cabo la caracterización de los productos, pero el equipo de caracterización no funcionó en el período Febrero-Agosto del 2002. Finalmente los productos fueron caracterizados por la empresa DEMET de Alzenau-Alemania.

La no disponibilidad de resultados de caracterización de productos intermedios y finales, no permitió terminar el proyecto y preparar el informe final en los plazos estipulados originalmente.

E. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El desarrollo de la primera etapa del proyecto en su parte experimental de laboratorio generó como consecuencia un rediseño del proceso, lo cual se expresa como resultado en la siguiente secuencia de proceso a nivel piloto:

- Selección de materia prima
- Incineración de placas
- Conminución / homogeneización del material
- Fusión del material conminuido

El resto de las etapas en planta piloto permanecen (formación de anodos y electrodeposición)

El rediseño del sistema ha implicado un empleo de tiempo adicional en el diseño de equipos (incinerador, molino de bolas), instalaciones accesorias (humidificador adiabático y torre de lavado de gases) y auxiliares (gas licuado de mediana presión) que no estaban del todo contempladas en el programa original, pero que como resultado de la experiencia de laboratorio - básicamente en lo que respecta a la separación del material plástico del metálico - hicieron ineludible su modificación.

En lo que respecta al aspecto comercial las compras de material han permitido por una parte educar al cliente, identificar tipos clase y calidad de material y llegar a acuerdos de precio convenientes para las partes, como así también dimensionar el volumen real del negocio.

A lo anterior, se suma en lo que respecta a la venta del producto es posible negociar precios interesantes de compra de material semiterminado (por. Ej. barro anódico) que hacen innecesario la producción de productos metálicos de alta pureza.

El principal resultado del proyecto, es que los resultados obtenidos de la ejecución de este, han permitido iniciar, por parte de la empresa, la etapa piloto comercial, siendo la capacidad inicial de procesamiento de 1000 kilos/mes de circuitos electrónicos. La operación, que partió en Julio del 2002, ha permitido optimizar el proceso y determinar los puntos críticos de este. Generalmente en este tipo de procesos, la mayor parte de los problemas se generan a partir del mal funcionamiento de equipos de

proceso, especialmente aquellos que son sometidos a condiciones extremas de trabajo, como son los hornos e incineradores.

La empresa está interesada en llevar a cabo el diseño y construcción de una planta de mayor capacidad, razón por la cual se encuentra preparando un proyecto de preinversión, con el fin de profundizar en el mercado y por otro lado llevar a cabo el desarrollo de la ingeniería que permita llevar a cabo la ampliación productiva.

F. BIBLIOGRAFÍA

Ambrose, Fred y B.W Dunning “ Mechanical Processing of Electronic Scrap to Recover Precious Metal Bearing Concentrates ” Proceedings of the Fourth International Precious Metals Institute Conference, June (1980)

Schulz R.L and G. G. Wicks“ Hybrid Microwave Technology – A new technology for destruction and recycling of discarded electronic circuitry and reclamation of precious metals “ and “Mi crowave remediation of emissions resulting from treatment of electronic components “ disponible en www.doe.gov/bridge