

PROYECTO FONDEF DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

INFORME FINAL

TITULO DEL PROYECTO: DESARROLLO DE ELECTRODOS DE ALTA EFICIENCIA EN BASE A MATERIALES NANOESTRUCTURADOS PARA APLICACIONES EN PROCESOS DE ELECTRO-OBTENCIÓN EN LA MINERÍA

CÓDIGO DEL PROYECTO: ID17I10012

FECHA DE EMISION: 13/04/2020

FIRMA DEL (DE LA) DIRECTOR(A) DEL PROYECTO
CAROLINA PARRA GONZALEZ

I. Acta De Término Del Proyecto

1.1 Identificación del proyecto

TITULO DEL PROYECTO	DESARROLLO DE ELECTRODOS DE ALTA EFICIENCIA EN BASE A MATERIALES NANOESTRUCTURADOS PARA APLICACIONES EN PROCESOS DE ELECTRO-OBTENCIÓN EN LA MINERÍA
CÓDIGO FONDEF	ID17I10012
DIRECTOR(A) DEL PROYECTO	CAROLINA PARRA GONZALEZ
INSTITUCIÓN(ES) BENEFICIARIA(S)	UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA UNIVERSIDAD DE VALPARAISO
EMPRESA Y OTRAS ENTIDADES ASOCIADAS	INPPAMET LTDA. MINERA SPENCE S.A.

1.2 Ejecución del proyecto

FECHA DE TOMA DE RAZON POR LA CONTRALORÍA GENERAL DE LA REPÚBLICA	06/12/2017
DURACIÓN CONTRACTUAL	24
FECHA EFECTIVA DE INICIO	01/01/2018
FECHA EFECTIVA DE TÉRMINO	29/02/2020
DURACIÓN EFECTIVA	26

1.3 Plan de Continuidad

Nombre Institución Beneficiaria	Nombre Representante Legal	Firma
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA	DARCY FUENZALIDA O'SHEE	Firma Electrónica
UNIVERSIDAD DE VALPARAISO	ALDO SALVADOR VALLE ACEVEDO	Firma Electrónica

1.4 Tabla de Conformidad

Nombre Institución Empresa u Otra Entidad Socia	Nombre Representante Legal	Documento conformidad
INPPAMET LTDA.		Si
MINERA SPENCE S.A.		Si

II. Informe Ejecutivo

2.1 Resumen Ejecutivo

Versión en Castellano

La minería es la industria más importante de la economía nacional y en promedio es responsable del 18% del Producto Interno Bruto. De este total un 32% corresponde a ingresos por cobre obtenido por electro-obtención (EO). La EO es un proceso electroquímico mediante el cual se recupera el mineral en forma sólida a partir de una solución ácida rica en iones cúpricos. En la actualidad los ánodos empleados para este proceso son mayormente de plomo o aleaciones de plomo, los que (1) se desgastan e introducen este elemento en el cobre cosechado, bajando la ley del mineral, y (2) presentan un alto consumo energético asociado al voltaje requerido para generar la reacción anódica. Este consumo energético (del orden de 3000kWh por ton de Cu) está principalmente determinado por las propiedades del material que se utilice como ánodo en la reacción. En este contexto, el uso de nanomateriales ofrece el potencial de mejorar a escala nanométrica el desempeño electroquímico de materiales empleados para ánodos de EO. En este proyecto desarrollamos un ánodo nanoestructurado de alta eficiencia para el proceso de electro-obtención de Cu. Esta solución fue desarrollada a escala de planta piloto de laboratorio y permite reducir considerablemente el potencial necesario para generar la reacción anódica necesaria para producir la electro-obtención de cobre u otros minerales, como el zinc y el oro. Se evaluó nuestro producto en relación a los existentes actualmente en el mercado (ánodos de Pb-Ca-Sn) para determinar las ventajas comparativas en términos de costos operacionales, eficiencia energética y calidad del Cu cosechado. Estas variables fueron evaluadas para una geometría de planta piloto escala laboratorio, que fue construido reproduciendo las condiciones industriales del proceso de electro-obtención a esa escala. En términos de eficiencia, hemos alcanzado reducciones de voltaje de hasta un 40% en comparación a los ánodos de Pb-Ca-Sn utilizados industrialmente. Además como nuestro ánodo no contiene plomo ni otros metales, no genera inclusión de contaminantes en el cobre cosechado ni problemas ambientales o sanitarios por el manejo de metales pesados. Los costos estimados de producción del ánodo son inferiores a los costos de los ánodos de Pb-Ca-Sn, considerando el proceso de producción de nanomateriales escalado. Finalmente, la calidad del cobre cosechado utilizando los ánodos nanoestructurados es mayor al obtenido utilizando ánodos de plomo, por no poseer contaminantes de plomo, manteniendo la misma microestructura del cobre obtenido por procesos de electro-obtención.

Versión en Ingles

Mining is the most important industry in the national economy and on average it is responsible for 18% of the Gross Domestic Product. Of this total, 32% corresponds to income from copper obtained by electro-winning (EW). EW is an electrochemical process by which the mineral is recovered in solid form from an acid solution rich in cupric ions. At present, the anodes used for this process are mostly lead alloys, which (1) wear out and introduce this element into harvested copper, lowering the ore grade, and (2) have a high energy consumption associated to the voltage required to generate the anode reaction. This energy consumption (of the order of 3000kWh per ton of Cu) is mainly determined by the properties of the material used as the anode in the reaction. In this context, the use of nanomaterials offers the potential to improve the electrochemical performance of materials for EW anodes on a nanometric scale. In this project we develop a high efficiency nanostructured anode for the process of Cu electrowinning. This solution was developed at the scale of a laboratory pilot plant and allows to reduce considerably the potential necessary to generate the anodic

reaction required for electrowinning of copper or other minerals, such as zinc and gold. Our product was evaluated in relation to those currently available in the market (anodes of Pb-Ca-Sn) to determine the comparative advantages in terms of operational costs, energy efficiency and quality of the extracted Cu. These variables were evaluated for a laboratory scale pilot plant geometry, which was constructed by reproducing the industrial conditions of the electro-obtaining process at that scale. In terms of efficiency, we have achieved voltage reductions of up to 40% compared to industrially used Pb-Ca-Sn anodes. In addition, since our anode does not contain lead or other metals, it does not generate inclusion of contaminants in harvested copper or environmental or health problems due to the handling of heavy metals. The estimated production costs of the anode are lower than the costs of the anodes of Pb-Ca-Sn, considering a large-scale production of nanomaterials. Finally, the quality of the copper harvested using the nanostructured anodes is higher than that obtained using lead anodes, since it does not have lead contaminants, maintaining the same microstructure of the copper obtained by electro-obtaining processes

2.2 Cuadro De Sintesis de Resultados y Objetivos

Objetivos Generales	
Nombre Objetivo	Objetivo General
Descripción	Proveer soluciones tipo ánodo basadas en nanomateriales grafíticos que permitan reducir el consumo energético en el proceso de electro-obtención de cobre en la industria minera en Chile

Objetivos Específicos	
Nombre Objetivo	Objetivo Específico
Descripción	1. Desarrollar la síntesis de nanotubos de carbono (CNTs) utilizando las técnicas de deposición de vapores químicos (CVD)
Nombre Objetivo	Objetivo Específico
Descripción	2. Desarrollar y optimizar estrategias de fabricación de ánodos en base a CNTs y polímeros a escala de laboratorio y de planta piloto

RESULTADO	
Tipo	Resultado de Producción
Nombre	Electrodo nanoestructurado para proceso de electro-obtencion
Descripción	Desarrollo de electrodos nanoestructurados de alta eficiencia para el proceso de electro-obtención de cobre

Descripción del Logro

El resultado logrado es un ánodo nanoestructurado de alta eficiencia para el proceso de electro-obtención de Cu. El electrodo desarrollado, en base a polímero y nanomateriales grafiticos, permite reducir el potencial necesario para generar la reacción anódica necesaria para producir la electro-obtención de cobre u otros minerales, como el zinc y el oro. ¿Cómo se presenta físicamente? A lo largo del proyecto se desarrollaron estrategias de escalamiento, que fueran compatibles con la geometría y el uso de los ánodos actualmente usados en la minería de la electro-obtención (de plomo). Esto quiere decir un formato tipo plancha que se escaló a lo largo del proyecto desde un ánodo de 1cm*1cm a uno de 12cm*8 cm. Este último tamaño fue el adecuado para realizar evaluación en planta piloto escala laboratorio. ¿Cuáles son sus principales competidores o sustitutos? Actualmente en la minería de EO se utilizan ánodos de plomo, que poseen un alto consumo energético asociado a la generación de la reacción anódica, además de generar un problema de contaminación por la inclusión de residuos de plomo en el cobre cosechado durante el proceso. Aunque se han buscado ánodos alternativos a los de plomo, como los de titanio recubiertos con óxidos de metales preciosos como RuO₂, IrO₂ y PtO₂. Sin embargo, el alto costo y la inestabilidad estructural del recubrimiento de óxido de estos metales preciosos que les entrega una reducida vida útil, los hace inviables para su uso industrial. ¿Cuáles son las principales diferencias funcionales, operacionales y productivas que tendrá la solución con respecto al mejor competidor o sustituto? La solución desarrollada en este proyecto son ánodos nanoestructurados que permiten una reducción considerable del voltaje requerido para la generación de EO. En términos de eficiencia, hemos alcanzado reducciones de voltaje de hasta un 40% en el ánodo escalado a nivel de planta piloto de laboratorio. Además como nuestro ánodo no contiene plomo ni otros metales, no genera inclusión de contaminantes en el cobre cosechado. En términos operacionales, el formato desarrollado busca facilitar el uso de los ánodos sin recurrir a cambios en la estructura operativa de los procesos mineros de electro-obtención. En términos productivos, la producción de nuestra solución no requiere del procesamiento de plomo, lo que reduce los riesgos ambientales y sanitarios asociados a la manipulación de este metal pesado. Finalmente el costo estimado de producción de la tecnología es inferior al costo de producción de los ánodos de plomo, considerando el proceso de producción de nanomateriales ya escalado ¿Cuáles son los beneficios que las diferencias mencionadas le generarán al productor, usuario intermedio y/o usuario final? Beneficios para el productor: La empresa productora de los ánodos ya no requerirá de procesar plomo, lo que incluye fundiciones y manipulación de metales pesados. Esto representa un importante riesgo para los operadores, pero además implica un riesgo ambiental y sanitario, en que la empresa ya no debería incurrir. La empresa ofrecería un producto más eficiente para la electro-obtención de metales, energéticamente hablando, lo que les daría ventajas por sobre los otros productos actualmente ofrecidos en el mercado global. Esto no solo se proyecta para la minería de cobre, sino también para la de zinc y oro, donde los ánodos usados son de plomo. Beneficios para los usuarios: a) Reducción en los costos asociados a la producción de metal por EO (por reducción en el consumo energético) b) Reducción en la contaminación del Cu por plomo, bajando su ley c) Reducción en los ciclos de mantención de celdas para evitar desprendimiento

de plomo desde los ánodos. d) Reducción del impacto ambiental por emisiones de gases invernadero (debido a la baja en consumo de energía) y por emisiones de plomo al momento de fundir el Cu contaminado para su procesamiento industrial. ¿Quiénes lo producirían? Las empresas productoras de ánodos para EO. En particular nuestro proyecto será presentado a una segunda etapa de Fondef, contando con el apoyo y financiamiento de Inppamet Ltda. Esta empresa posee una participación del 90% del mercado nacional y busca crecer las cifras de exportación de sus productos hacia el resto del mundo. Para este fin, la empresa debe ser más competitiva. Seguir adoptando tecnologías pre-existentes no es la solución (o estrategia) en la que los propios dueños de INPPAMET confían para dicha expansión. La innovación aparece entonces en el horizonte de sus posibilidades. La empresa menciona la voluntad de adecuar sus instalaciones y equipamiento industrial para la producción de la tecnología desarrollada en el presente fondef.

Referencia Bibliográfica	
--------------------------	--

RESULTADO

Tipo	Resultado de Protección
Nombre	Solicitud de patente
Descripción	Se dará inicio al proceso de tramitación de patentamiento del resultado de producción electrodo nanoestructurado. En concreto se solicitará la patente a INAPI en la modalidad PCT.
Resultados de Producción Asociados	Electrodo nanoestructurado para proceso de electro-obtencion
Descripción del Logro	Se dió inicio al proceso de tramitación de patentamiento del resultado de producción electrodo nanoestructurado. En concreto, se ingresó la solicitud de patente Electrodo nanoestructurado de alta eficiencia energética para proceso de electrobtención de cobre a INAPI (PCT/CL2018/050038).

RESULTADO DE PRODUCCIÓN

Categoría	Cantidad Comprometida	Cantidad Lograda
Producto	1	1

RESULTADO DE PROTECCIÓN

Categoría	Cantidad Comprometida	Cantidad Lograda
Patente	1	1

2.3 Informe financiero a la fecha de término

	Montos Comprometidos según Convenio por fuente de financiamiento	Monto Girado por Fondef	Gastos financiados por fuente de financiamiento	%
FONDEF	199.842.000	199.842.000	173.680.136	47,94 %
FONDEF	199.842.000	199.842.000	173.680.136	23,97 %
Institución(es) Beneficiaria(s)				
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA	132.035.000	No Aplica	177.648.818	49,04 %
UNIVERSIDAD DE VALPARAISO	11.430.000	No Aplica	10.940.570	3,02 %
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA	132.035.000	No Aplica	177.648.818	24,52 %
UNIVERSIDAD DE VALPARAISO	11.430.000	No Aplica	10.940.570	1,51 %
Empresas y otras Entidades Asociadas	52.554.000	No Aplica		0 %
Totales	395.861.000	199.842.000	362.269.524	50 %

Monto por Reintegrar		26.161.864		
Monto Reintegrado a FONDEF		(0)		
Costo Final del Proyecto		724.539.048		

2.4 Autoevaluación de la Ejecución del Proyecto

El(la) Representante Institucional de cada Institución Beneficiara
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
El desarrollo de la investigación por parte de nuestra Institución fue de manera íntegra, cumpliendo con todos los objetivos comprometidos en la propuesta original y dentro de los plazos acordados, destacando aquellas actividades que requirieron coordinar su ejecución con personal de empresas externas. Por lo señalado anteriormente, y por los resultados obtenidos, es que continuaremos respaldando las actividades relacionadas a una segunda etapa, la cual ya cuenta con el compromiso de apoyo por parte de la empresa Inppamet.
UNIVERSIDAD DE VALPARAISO
La participación de la Universidad de Valparaíso en el desarrollo del Proyecto se realizó de manera óptima y coordinada con todas las instituciones y laboratorios involucrados. Las investigaciones y análisis desarrollados en el Laboratorio de Electroquímica de la Facultad de Ciencias de esta casa de estudios ayudaron en gran medida a cumplir los objetivos generales y específicos propuestos inicialmente. De esta manera, se puede decir que el apoyo de la Universidad de Valparaíso fue de gran ayuda para culminar de manera exitosa el presente Proyecto y compromete su ayuda en una eventual segunda etapa.

El(la) Director(a) del proyecto
El proyecto FONDEF fue implementado en su totalidad, permitiendo alcanzar los objetivos establecidos y cumplir los hitos comprometidos. En relación a la implementación en los plazos acordados se solicitó una extensión de dos meses que obedeció a la contingencia dada por el estallido social que retrasó la ejecución de actividades experimentales y reuniones con la empresa asociada al proyecto. El mayor logro científico-técnico del presente proyecto fue el desarrollo de un ánodo nanoestructurado que permite la reducción de hasta un 40% del potencial requerido para generar el proceso de electro-obtención de cobre, en comparación a los ánodos de plomo actualmente usados en la industria. Este producto se encuentra en proceso de patentamiento (PCT \CL2018\ 050038), gracias al apoyo recibido por la Oficina de Transferencia Tecnológica (OTTL-UTFSM). Su evaluación se realizó a nivel de planta piloto escala laboratorio, la que fue construida en el contexto del presente proyecto, y es única en sus características a nivel regional. Inppamet, mayor productora nacional de ánodos de plomo para la electro-obtención de cobre, fue una de las empresas asociadas al proyecto y contribuyó en diversos ámbitos de la ejecución de este; con materiales para las evaluaciones comparativas, con asesorías técnicas sobre los métodos actualmente usados en sus plantas para la producción de ánodos de plomo, con asesorías para el diseño y construcción de una planta piloto escala laboratorio y con acceso a infraestructura. Lamentablemente la segunda empresa asociada, Minera Spence, no participó de la ejecución por cambios en el personal con el que se habían tomado los acuerdos. En lo que respecta al potencial de transferencia y masificación del producto, se ha concretado el apoyo de Inppamet para extender este proyecto a una segunda etapa de fondef IDEA, dado su interés en acceder a desarrollar esta tecnología en forma industrial.

2.5 Propuesta de Continuidad de la(s) Institucion(es) Beneficiaria(s)

UTFSM: El excelente trabajo y la experticia de los investigadores y profesionales asociados al desarrollo de este proyecto permitieron obtener resultados que validan la hipótesis planteada en la propuesta inicial, una disminución del consumo de energía utilizando ánodos en base CNTs -polímeros, por lo que como Institución apoyaremos la segunda etapa de esta investigación cuya propuesta se espera que participe en los Fondef IDeA 2020, y que además ya cuenta con el apoyo de Inppamet. Esto permite proyectar esta línea investigativa a por lo menos 3 años más, permitiendo dar robustez a esta solución que se compromete a generar una reducción en los costos de operación en empresas de mediana y gran minería. El proyecto realizado también permitió fortalecer el laboratorio de nanobiomateriales, el cual permitirá seguir trabajando en la segunda etapa antes mencionada y otros proyectos de la misma línea investigativa. Por otro lado, la universidad se compromete a ayudar a generar la transferencia tecnológica de los resultados obtenidos a través de la oficina de transferencia tecnológica (OTTL) y fortalecer el equipo de investigación a través de incentivos institucionales que se enfoquen en desarrollar trabajos multidisciplinarios. La institución continuará difundiendo las capacidades humanas y tecnológicas logradas con el proyecto con el propósito de generar sinergias con la industria tendientes a buscar soluciones a problemas complejos cuyo eje sea la innovación basada en ciencia.

UV: Debido a los auspiciosos resultados obtenidos, el Laboratorio de Electroquímica de la Universidad de Valparaíso, ha visto la posibilidad de desarrollar un área de investigación mucho más aplicada, como es la evaluación de ánodos para la electro-obtención de cobre, ya sea a escala de laboratorio como en planta piloto. Este tipo de investigación permitirá que alumnos tanto de pre y postgrado, que estén interesados en el desarrollo de tecnologías con directa aplicación en la industria minera puedan desarrollar sus trabajos de investigación en este laboratorio. Gracias a los recursos aportados por el proyecto, que implica la adquisición de equipos especialmente diseñados para la evaluación en planta piloto, puedan ser empleados en desarrollo de estos trabajos de investigación. Lo anterior permitirá la formación por parte de la Universidad de Valparaíso de capital humano altamente calificado para el desarrollo de ciencia con un alto impacto tecnológico en la industria minera chilena.