

# Evaluación Técnico Económica de Fragmentación de Rocas con Plasma en Proyecto Minero Caletones

2

**Resumen— Frente a los requerimientos de la industria minera en materias de seguridad y medioambiente, nace la necesidad de utilizar nuevos productos en fragmentaciones y tronaduras controladas, capaces de satisfacer las necesidades del proyecto y cumplir con las exigencias del cliente, es por ello que el presente estudio evalúa la utilización de plasma como tecnología de fragmentación de rocas, la que es segura, no produce material particulado y se degrada fácilmente sin provocar daños al entorno ecológico.**

**Keywords: Plasma, Fragmentación, Tronadura.**

## I. INTRODUCCIÓN

Según el Consejo Minero de Chile (CM), los desafíos del sector son: aumentar la productividad en los procesos mineros, incorporar nuevas tecnologías, mejorar el desempeño medioambiental de las compañías mineras y prevenir los accidentes laborales [1]. Sobre esto último, el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (Sernageomin, ha identificado los principales problemas de utilizar explosivos en las faenas mineras [2]. Estos se detallan a continuación:

- 1) *Accidentes directos: proyecciones sobre el radio de seguridad, alcanzando equipos, instalaciones e inclusive el personal.*
- 2) *Accidentes indirectos: debido a los altos niveles de sismicidad, se producen desmoronamientos en sectores de la mina.*
- 3) *Problemas medioambientales: deterioro a nivel geológico y del ecosistema.*
- 4) *Problemas a la salud: en ciertas tronaduras se elevan partículas semimetálicas tales como el arsénico, que provocan problemas a la salud de los trabajadores. De igual forma, el alto nivel de ruido ambiente de los explosivos, es factor del desarrollo de hipoacusia.*

Dado lo anterior, la utilización de plasma en tronaduras se hace necesaria frente a los requerimientos de seguridad y relación con el entorno, dado que es un producto que no provoca proyección de material particulado, genera poca vibración, tiene bajos niveles de ruido ambiente y posee excelente manejo de los aspectos de seguridad (ver Tabla 1).

**Digital Object Identifier:** (to be inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

TABLA 1  
COMPARACIÓN DE PLASMA Y EXPLOSIVOS  
FUENTE: PRESENTACIÓN INGEOL.

Item	Explosivos	Plasma
Distancia de seguridad	500 metros	30 metros
Velocidad de detonación	5000 m/s	350 m/s
Proyección de rocas	Sin controlar	Controlada
Ruido	< 150 dB	> 85dB
Vibración	Máxima	Mínima
Biodegradable	No	Si

## II. ¿QUÉ ES EL PLASMA?

El plasma es considerado el cuarto estado de la materia, y se alcanza al someter un gas a elevadas temperaturas, provocando la separación de los átomos y formando iones positivos y electrones libres (gas ionizado), con un alto nivel de conductividad eléctrica [3].

Se encuentra en alrededor del 99% del universo observable, el que contiene plasma en diferentes formas tales como:

- 1) *Corona Solar.*
- 2) *Cinturones de Van Allen.*
- 3) *Estrellas.*
- 4) *Plasmasfera.*
- 5) *Entre otros.*

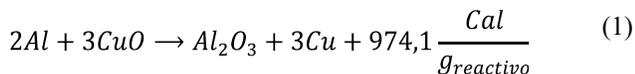
En la tierra se encuentra en: la Ionosfera que protege la tierra de la radiación solar, descargas luminosas de relámpagos, plasma termonuclear, plasmas artificiales [4].

Existen plasmas a elevadas temperaturas, llamados plasmas calientes (entre 100 eV y 300 keV) y otros más fríos (menores a 100 eV) presentes en la ionosfera y la tierra [5]. En forma artificial es utilizado para combustible de cohetes, termo-plasma en soldaduras, fabricación de microprocesadores por plasma láser, cápsulas plasma para fragmentación de rocas, entre otros.

Ahora bien, el plasma fragmentador de rocas es una mezcla compuesta por sales metálicas que funcionan como electrolito al interior de una cápsula [6]. Estas sales, se activan

por medio de un arco eléctrico, que deriva en una reacción exotérmica de liberación de energía en forma de calor. El gas ionizado se expande y propaga por las grietas de la roca, provocando el fracturamiento. Las reacciones del plasma fragmentador, son de baja vibración por lo que no producen elementos proyectados, además su velocidad de programación corresponde al de una onda subsónica, menor a 343 m/s.

Ejemplo de plasma fragmentador es el producto de la reacción entre el aluminio y el óxido de cobre (1). Los productos de la reacción son Alúmina, cobre y energía en forma de calor



En base a la información de la *Asociación de Investigación de Plasma de Corea del Sur (KAPRA)*, en la Tabla 2 se muestran las principales diferencias entre las propiedades del plasma versus los explosivos convencionales utilizados en Chile [7].

Tabla 2  
CARACTERÍSTICAS DEL PLASMA VERSUS EXPLOSIVOS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A KAPRA.

Características	Explosivos	Plasma
Componentes	Nitratos M(NO <sub>3</sub> ) <sub>n</sub> + agente	Mezcla metal y óxido metálico
Método de activación	Detonador (polvo de alta densidad), Booster (detonador débil)	Descarga o arco eléctrico
Energía de tronadura	Mayor 800 Kcal/Kg	Entre 409 y 980 Kcal/Kg
Permisos	Requiere control de Dirección General de Movilización Nacional (DGMN).	Exento de control DGMN.

Conforme a lo anterior, y dadas las características favorables del producto, se ha de evaluar un proyecto minero en el que se utiliza plasma como tecnología de fragmentación de rocas. Este estudio se divide en cinco partes, estas son: *estudio de mercado, estudio estratégico, análisis técnico, estudio legal y evaluación económica.*

### III. ESTUDIO DE MERCADO

En los últimos cinco años, la demanda de explosivos en el mercado chileno ha aumentado en más de doscientas mil toneladas, según lo indica el reporte de Enaex, empresa líder en la producción de Nitrato de Amonio, encartuchados, gránulos y servicios integrales de voladura. Por su parte se proyecta que el número de empresas de la actividad económica de explosivos y otros agentes aumentará en un 20% para fines del año 2020 (ver Figura 1), de igual forma las ventas

pronosticadas en el sector económico bordearán los 830 millones de dólares anuales en promedio (ver Figura 2).

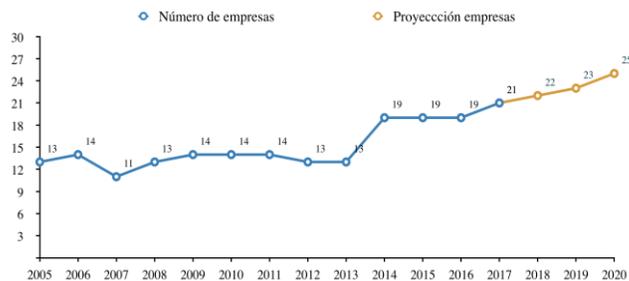


Fig. 1 Proyección empresas actividad económica explosivos.  
Fuente: Elaboración propia en base a información del SII.



Fig. 2 Pronóstico demanda de explosivos.  
Fuente: Elaboración propia en base a información de Enaex.

### IV. ESTUDIO ESTRATÉGICO

Al realizar un análisis PEST+MA (ver Tabla 3) entorno al producto y el servicio de fragmentación de roca con plasma se han de obtener los siguientes resultados sobre el Macroentorno [8].

Tabla 3  
ANÁLISIS PEST+MA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Oportunidades	Amenazas
O1. Oportunidad de importación de plasma por convenios de comercio exterior.	A1. Bajos índices en I+D gubernamental impiden mayor crecimiento e inversión.
O2. Se espera repunte en crecimiento del sector minero por aumento del precio del cobre.	A2. Reforma laboral puede traer consigo conflictos en gran minería, aumentando el stand-by de proyectos.
O3. Baja inflación del país, acompañada de TPM sostenida, siendo oportunidad para inversión privada.	A3. Aún existe ambigüedad en la clasificación de sustancias químicas y sus disposiciones de seguridad.

De igual forma, al realizar un análisis del Microentorno por medio de la herramienta Porter con escala de 1 a 10 (ver Tabla 4), se obtiene una atractividad media de la industria [9]. Del análisis se obtiene que:

- 1) Existe gran amenaza de ingreso de nuevos participantes por bajas barreras de entrada (internación de producto e inversión).
- 2) Fuerte rivalidad entre los competidores del servicio (integración de tecnología a unidades negocio).
- 3) Gran poder de negociación de los proveedores del producto, y posibilidad de integración hacia adelante.

TABLA 4  
ANÁLISIS PORTER  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Ítem evaluado	Puntaje promedio	Ponderación
Amenaza de nuevos participantes	7.7	20%
Rivalidad entre competidores	6.3	30%
Poder de negociación de los clientes	5.3	15%
Poder de negociación de los proveedores	5.8	30%
Amenaza de sustitutos	6.7	5%
Puntaje ponderado	6.3	100%

## V. ANÁLISIS TÉCNICO

Para el análisis técnico se considera el proceso de fragmentación de roca con plasma (ver Figura 3), el cual se desarrolla por medio de herramienta Business Process Management Notation (BPMN) [10]. A partir de ello se obtienen los siguientes parámetros, para el cálculo de los tiempos de operación (ver Tabla 5).

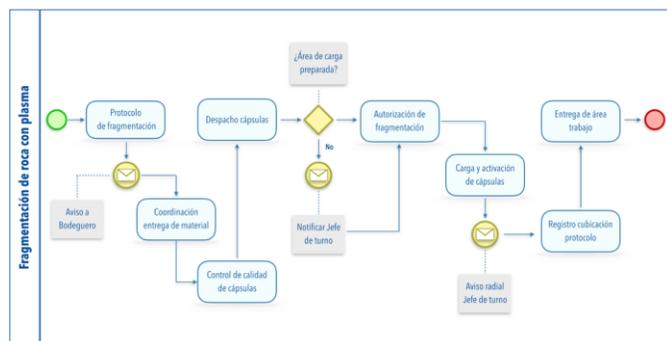


Fig. 3 Proceso de Fragmentación de Roca con Plasma.  
Fuente: Elaboración propia.

TABLA 5  
TIEMPOS DE OPERACIÓN FRAGMENTACIÓN CON PLASMA.  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Ítem	Valor	Unidad
Profundidad de tiro o largo pozo	6	m
Rendimiento promedio de perforación	25	ml/hr
Tipo de malla de perforación	2x2	m <sup>2</sup>
Metros cúbicos totales por día	540	m <sup>3</sup>

Tiempo promedio de perforación	6.5	hr
Tiempo de carga de capsulas de plasma	2	hr
Tiempo promedio de fragmentación	1	hr

## VI. ESTUDIO LEGAL

La normativa asociada al proyecto de fragmentación son las que se presentan a continuación:

- 1) Ley 17 798 sobre el control de armas y explosivos: el producto plasma se encuentra exento de control por la entidad fiscalizadora, DGMN.
- 2) Norma Chilena 382: Sustancias Peligrosas, el plasma es considerado un óxido con clasificación 5.1 y número de las Naciones Unidas NU 1 489.
- 3) Clasificación NFPA: con pocos riesgos para la salud, no se inflama, inestable en caso de cambio químico violento y con riesgo específico de oxidante.
- 4) Legislación ambiental aplicable (ver Tabla 6).

TABLA 6  
REGULACIÓN MEDIOAMBIENTAL  
FUENTE: BASES TÉCNICAS DEL PROYECTO.

Tema	Norma	Descripción general
Residuos sólidos (RISES)	DS 594/1999	Regula las condiciones básicas sanitarias y ambientales del lugar de trabajo, para preservar la salud de las personas y medio ambiente.
Sustancias Peligrosas	DS 298/1994 NCh 382 of.89 NCh 2120 of.89 NCh 2190 of.93 NCh 2245 of.89 NCh 2353 of.89	Transporte de sustancias peligrosas, clasificación y rotulación con información de riesgos, hoja de datos de seguridad.

## VII. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para evaluar económicamente el proyecto, se realiza un flujo de caja proyectado por los meses que dura el mismo (10 meses). A su vez se somete el proyecto a dos escenarios financieros, uno con el proyecto puro y el segundo con financiamiento privado. El resultado de la evaluación es un aumento del 42% en el VAN del proyecto con financiamiento por sobre el puro (ver Tabla 7). Finalmente, se realiza un análisis de riesgo por medio de metodología de sensibilidad, a fin de reconocer las variables más susceptibles a las variaciones del proyecto. El resultado del análisis de riesgo otorga variaciones críticas al cambio en el precio del producto plasma (ver Tabla 8), ello debido a que representa el principal costo del proyecto (75%) [11].

TABLA 7  
RESUMEN EVALUACIÓN ECONÓMICA.  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Ítem	Proyecto puro	Proyecto financiado
Tasa de descuento	5.01%	5.01%
Tasa interés banca privada	-	10.2%
Tasa impositiva	25.05%	25.05%
VAN	\$ 63 684 691	\$ 90 435 763
TIR	25.5%	41%

TABLA 8  
RESUMEN ANÁLISIS DE RIESGO.  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Variable	Variación	Delta VAN	Delta TIR
Precio insumo plasma	-15%	+ 18 925 576	+ 2,47
	-5%	+ 6 304 120	+ 0,87
	+20%	-25 249 519	-4,17

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La cartera de proyectos mineros aumentó en más de un 40% para el año 2018 con respecto al 2017 lo que, para la actividad económica de explosivos y plasma, significará un aumento de la producción de estos mismos. Es por esto que se proyecta un aumento del 20% en la cantidad de empresas que fabricarán estos productos en los próximos 3 años, aportando con un promedio de 830 millones de dólares en ventas anuales.

La atractividad de la industria se presenta como una oportunidad para la empresa en inversión de proyectos con utilización de tecnología plasma, utilizando además financiamiento privado, la baja inflación y una Tasa de Política Monetaria (TPM) estable.

Del estudio económico se recomienda financiar el proyecto con inversión privada, ya que aumenta el VAN del proyecto en más del 40%.

Finalmente, por medio del análisis de riesgo se recomienda establecer relación comercial estrecha con el o los proveedores de plasma del proyecto, a fin de evitar susceptibilidades en las utilidades.

#### REFERENCIAS

- [1] Consejo Minero. "Reporte Anual 2016"  
<http://dev.consejominero.cl/wp-content/uploads/2017/05/ReporteAnualConsejoMinero.pdf>
- [2] Sernageomin. "Reporte de Accidentabilidad Minera", 2016  
[http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/accidentabilidad\\_Minera/Presentacion-Accidentabilidad-2016.pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/accidentabilidad_Minera/Presentacion-Accidentabilidad-2016.pdf)
- [3] Gibbon, P. "Introduction to Plasma Physics". Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School. Geneva, 2014.
- [4] Langmuir, I. "Oscillations in ionized gases", Proceedings of the National Academy of Sciences, 1928.
- [5] Bittencourt, J. "Fundamentals of plasma physics". Springer, 2004.
- [6] Olivero, P. Larson, C. "Tecnología de plasma para la fragmentación de roca en zonas sensibles", 2013.
- [7] KAPRA. "Pulse Plasma Rock Fragmentation Technology", 2014.  
[http://www.archiems.com/pdf/Product6\\_KES\\_1.pdf](http://www.archiems.com/pdf/Product6_KES_1.pdf)
- [8] Universidad Nacional de Colombia (2012). Guía análisis PEST  
[https://ccerd.files.wordpress.com/2014/03/guia\\_analisis\\_pest.pdf](https://ccerd.files.wordpress.com/2014/03/guia_analisis_pest.pdf)
- [9] Porter, M. "Estrategia Competitiva: Técnicas para el Análisis de los Sectores Industriales y de la Competencia". México, 2007.
- [10] Object Management Group. "Business Process Model and Notation"  
<http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/PDF/>
- [11] Sapag Nassir y Reinaldo Sapag (1995). Preparación y Evaluación de Proyectos. McGraw Hill, 3a. ed., 1995.