

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA DESCUELGO DE ZANJAS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

SOLEDAD ANDREA MAASS VENEGAS

PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CHRISTIAN MOSCOSO WALLACE
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS
RICARDO VARGAS VERGARA

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2013

RESUMEN

Las capacidades productivas, una vez iniciada la explotación de minas con métodos de hundimiento de bloques o paneles, suelen verse afectadas por interferencias no predecibles de flujo de mineral, producidas por grandes colpas que generan atascamientos en altura dentro de las zanjas recolectoras y otras, que logran llegar hasta la salida del punto y obstaculizan el carguío de la pala.

Los atascamientos en altura conocidos como colgaduras de zanjas, son eventos de interferencia frecuentes en la extracción de mineral que involucran alto riesgo en la operación realizada para darles solución y además, dada la metodología manual utilizada en la actualidad, los resultados para un 56% de los casos son insatisfactorios, debido a que la carga explosiva queda mal posicionada, tanto en ubicación dentro de la colgadura, como en orientación del impacto del explosivo, lo que obliga a repetir la operación las veces que sea necesario hasta lograr el descuelgo, con los riesgos y costos que esto significa.

La presente investigación recomienda una alternativa tecnológica para el desarrollo de esta operación, consistente en el diseño conceptual de un equipo que permite colocar la carga explosiva adosada a la roca y luego retirarse a una posición segura antes de realizar la tronadura. Esta solución presenta grandes ventajas desde el punto de vista del negocio minero, ya que mejora los estándares de seguridad de esta práctica, disminuye los costos operacionales del método y permite aumentar la capacidad productiva, mejorando el uso de los recursos. Adicionalmente a lo anterior, su compatibilidad con sistemas de automatización, permiten considerar viables cambios tecnológicos en el método de explotación, como son la Minería Continua y Minería de Transición, que corresponden a nuevos enfoques para explotar yacimientos subterráneos, orientados al uso de sistemas de manejo de materiales altamente automatizados, con bajos costos y altas productividades, los que actualmente se ven limitados por la práctica manual para solucionar las colgaduras de zanjas.

Mediante herramientas computacionales, se pudo constatar la factibilidad de fabricación del prototipo, a partir de la integración de distintas componentes existentes en el mercado, siendo recomendable concretar esta propuesta y validarla en terreno.

ABSTRACT

The production capacities of block cave operations are often affected by unpredictable interference in the material handling flow. These interferences are due to the size of the rocks produced by the caving process. The large blocks produce two kind of interferences, one in hang ups and another are oversize for the equipment at the draw point.

The hang up corresponds to the most complex situation because the actual practice for to solve it involve a high risk in the operation and in addition, the manual systems used to put the explosive into draw bell, frequently generates that the explosive is misplaced. The result of the operation is unsatisfactory and is necessary repeat many times to achieve the break hang up, with the risk and the high cost that this represents.

To do front the problem of hang up, the industry has developed a number of applications, some more sophisticated than others, but none of the techniques used both industrially and in terms of experimentation in the mining industry, has resolved safely, efficiently and economically the hang up into draw bell

In this paper we present a technological prototype and analysis that evaluates the operational convenience of to have this alternative get to solution to hang up, using computational simulation that will allow it to have the productive capacities associated with a productive area for mining methods. The goal is validate the use of technology making a comparative analysis between the actual practice and the new situation.

The results the simulation, considering the use technology, giving to increase of productive capacities, depending of the hang up rate, could increase between 17 % and 19% more than the actual practice. At extraction operation, this is a reflex of optimizing the resources, allowing a decrease in the extraction cost in 15% respect to the actual situation, verifying the potential of this research and its relevance to the results of the mining business.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recopila parte de mi historia laboral y los recuerdos de mi primer trabajo como Ingeniera Civil de Minas y quiero dar mis más sinceros agradecimientos a IM2 y todo el equipo de profesionales de lo conforma, por hacerme parte importante en el desarrollo de proyectos innovadores y con ello, parte importante en el desarrollo y progreso de nuestra minería chilena.

Quiero agradecer a Raúl Castro, mi profesor guía y amigo por apoyarme y ser un pilar para dar este paso tan importante en mi vida profesional y también a Ernesto Arancibia, por comprometerse con la innovación y lograr el financiamiento para el presente trabajo.

Quiero agradecer a mi hermosa familia; Carlitos, Antonia y Francisca por ser mi felicidad día a día y mis fuerzas para lograr las metas que me propongo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	7
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	7
1.3 OBJETIVOS	8
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	8
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	8
1.4 ALCANCES	8
1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO	9
1.6 CONTENIDO POR CAPÍTULOS	9
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 INTRODUCCIÓN	11
2.2 COLGADURA DE ZANJAS	12
2.3 CLASIFICACIÓN DE COLGADURAS	13
2.4 ESTADÍSTICAS DE COLGADURAS	16
2.4.1 <i>Alturas de formación</i>	16
2.4.2 <i>Parámetros e índice de colgaduras</i>	17
2.5 OPERACIÓN DE DESCUELQUE	19
2.6 CONCLUSIONES REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	21
3. LEVANTAMIENTO DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS	23
3.1 INTRODUCCIÓN	23
3.2 PROPÓSITO DE LA OPERACIÓN DE DESCUELQUE	23
3.3 CONCEPTUALIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN	24
3.4 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL DESCUELQUE	27
3.4.1 <i>Tecnologías con requerimiento de brazo telescópico</i>	28
3.4.2 <i>Tecnologías sin requerimiento de brazo telescópico</i>	44
3.5 CONCLUSIONES DE LEVANTAMIENTO DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS	50
4. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA DESCUELQUE	52
4.1 INTRODUCCIÓN	52
4.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	52
4.2.1 <i>Criterios de decisión para nuevas tecnologías</i>	53
4.3 DESCARTE DE TECNOLOGÍAS	55
4.3.1 <i>Matriz de decisión</i>	55
4.4 CONCLUSIONES DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA DESCUELQUE	65
5. SISTEMA DE DESCUELQUE DE ZANJAS	66
5.1 INTRODUCCIÓN	66
5.2 DISEÑO CONCEPTUAL DE SISTEMA DE DESCUELQUE	66
5.2.1 <i>Características del brazo telescópico</i>	67
5.2.2 <i>Selección de componentes para integrar brazo telescópico</i>	74
5.2.3 <i>Sistema Integrado de Descuelgue de Zanjas</i>	77
5.2.4 <i>Descripción de la operación</i>	78
5.2.5 <i>Restricciones</i>	78
5.3 CONCLUSIONES DE SISTEMA DE DESCUELQUE DE ZANJAS	80
6. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE DESCUELQUE	82
6.1 INTRODUCCIÓN	82
6.2 EVALUACIÓN CASO DE REFERENCIA	82
6.2.1 <i>Parámetros de estimación</i>	82
6.2.2 <i>Costo caso de referencia</i>	84

6.3	EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍA DE DESCUELGUE	85
6.3.1	<i>Parámetros de estimación</i>	85
6.3.2	<i>Costo tecnología de descuelgue</i>	87
6.4	SIMULACIÓN CAPACIDAD PRODUCTIVA.....	90
6.4.1	<i>Características de alternativa tecnológica</i>	90
6.4.2	<i>Simulaciones</i>	90
6.5	CONCLUSIONES DE EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMA DE DESCUELGUE	94
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
7.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	100
8.1	INFORMES	100
8.2	PAPERS E INVESTIGACIONES.....	102
8.3	PRESENTACIONES Y SITIOS WEB	103
9.	ANEXO 1: DETERMINACIÓN MATRIZ PONDERADORES RELATIVOS	104
10.	ANEXO 2: CALIFICACIÓN MATRIZ PONDERADORES ABSOLUTOS	108

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción general

La explotación subterránea de mineral primario de mayor competencia mediante el método de hundimiento de bloques, ha significado un importante incremento en la granulometría del material que se genera como producto del quiebre natural del macizo rocoso. Esta situación ha originado que la operación de extracción de mineral, se vea enfrentada a frecuentes interrupciones debidas a la presencia de rocas de gran tamaño en los puntos de extracción (zanjas), las cuales se presentan como rocas con sobretamaño al piso o como atascamientos de ellas en altura. Una de las interferencias más compleja y riesgosa de solucionar, es la provocada por el atascamiento de rocas con sobretamaño en el interior de la zanja (colgadura de zanjás) a alturas que varían entre los 4m y los 12 m de altura (G. González, 2001).

El problema de colgaduras de zanjás, propias de las explotaciones con método de hundimiento de bloques, ha sido enfrentado utilizando procedimientos de alta exposición al riesgo. Usualmente esta operación consiste en colocar en altura conos de pentolita amarrados al extremo de coligües. Los coligües son utilizados para levantar el explosivo, posicionarlo en contacto con la roca y sostenerlo establemente hasta que se realice la tronadura de descuelgue. Esta práctica, requiere que el operario encargado de colocar los explosivos, tenga que acercarse hasta el marco boca del punto, para poder visualizar la posición donde ubicará el explosivo y para realizar la colocación de éste en altura, hecho que lo deja altamente expuesto y vulnerable al riesgo, en la situación en que se desencadene sorpresivamente el flujo de mineral.

En la búsqueda de mejorar los estándares de seguridad de las operaciones mineras se ha propuesto la investigación y desarrollo de una tecnología que dé solución a la problemática de enfrentar eventos de colgaduras de zanjás en la minería subterránea. Bajo estas consideraciones, los requerimientos para las tecnologías se desarrollan como respuesta a una variedad de dificultades que presenta el sistema actual, siendo el alto riesgo al que se expone el manipulador de explosivo, la dificultad de posicionar la carga en el lugar deseado y el elevado número de intentos para lograr el descuelgue, la problemática a la que se busca dar solución con la presente investigación.

1.2 Justificación del problema

Para enfrentar el problema de la colgadura de zanjás, la industria ha desarrollado una serie de aplicaciones, unas más sofisticadas que otras, pero ninguna de las técnicas empleadas tanto industrialmente como a nivel de experimentación en la industria minera, ha resuelto en forma segura, eficiente y económica el descuelgue de los puntos de extracción.

Las tendencias actuales de las explotaciones de minas han sido incorporar tecnologías con sistemas automatizados como parte de la configuración del sistema de manejo de materiales, siendo una limitante para la modernización de la operación de extracción, el no disponer de una

alternativa tecnológica para la práctica actual de descuelgue. Un ejemplo de estas tendencias es la incorporación de palas autónomas en la extracción de mineral en la Mina Diablo Regimiento , Codelco-Chile.

Sumado a lo anterior, la práctica actual dificulta la colocación de cargas en altura, originando que muchas veces el cono explosivo quede orientado en una dirección diferente a las colpas que forman la colgadura, lo que estadísticamente se refleja en que en un 56 % de los eventos requieren un segundo intento (S. Maass, 2010). Este hecho, crea la necesidad de implementar tecnologías que aumenten la eficacia de la operación.

1.3Objetivos

1.3.1Objetivo general

Desarrollar a nivel conceptual un sistema descolgador de zanjas, que constituya una alternativa tecnológica moderna y con altos estándares de seguridad, en reemplazo del actual sistema de descuelgue.

1.3.2Objetivos específicos

- Disponer de un documento en donde se encuentre centralizada toda la información relacionada a los avances realizados hasta la fecha, tanto a nivel industrial como experimental, de las alternativas tecnológicas potenciales de ser implementadas en la operación de descuelgue de zanjas.
- Identificar, analizar y evaluar distintas alternativas tecnológicas para el descuelgue, considerando un mecanismo de descuelgue y un sistema de izaje, en caso de requerirse.
- Proponer una solución tecnológica diseñada conceptualmente, que corresponda a la mejor alternativa dentro de las investigaciones y desarrollos realizados a la fecha.
- Cuantificación la inversión y evaluarla económicamente.

1.4Alcances

El alcance del estudio es el diseño conceptual de un equipo prototipo descolgador, que tenga la flexibilidad operacional de dar solución a distintos tipos de colgaduras y que constituya la mejor alternativa tecnológica de todos los desarrollos realizados a la fecha, permitiendo modernizar la operación de descuelgue y que tenga la cualidad de ser una tecnología compatible con sistemas automatizados y altos estándares de seguridad y productividad.

1.5 Metodología de trabajo

Este subcapítulo presenta la secuencia de actividades realizadas en el estudio, las cuales se detallan a continuación:

1. La metodología para el desarrollo de esta tecnología innovadora, parte con la caracterización del problema, entendiéndolo como conocer las características principales, las variantes en la que se presenta, la frecuencia de ocurrencia y estadísticas de eventos en distintas minas.
2. Con el problema identificado, se definen los requerimientos para dar una solución y con ellos, se realiza un levantamiento de tecnologías disponibles en el mercado que se ajusten a todas las características de la solución o a alguna de ellas, considerando la posibilidad de desarrollar adaptaciones o integración de componentes.
3. La selección de la tecnología que mejor se ajusta a los requerimientos de la solución, se realiza mediante criterio experto, considerando una encuesta de profesionales del área con conocimiento de la operación.
4. Para reducir la incertidumbre de los resultados, debido al grupo reducido de expertos encuestados, el criterio experto se complementa con una metodología de selección mediante análisis de matriz multicriterio que permite obtener una solución recomendada.
5. Esta recomendación es conceptualizada y se analiza la factibilidad técnica de que cada componente pueda dar cumplimiento a los requerimientos solicitados.
6. Finalmente se realiza la evaluación económica de la solución considerando 2 escenarios de operación, con uno o dos operadores. Estos resultados se comparan con la evaluación económica del caso actual. Sumado a lo anterior, se realizan simulaciones en Promodel, que permiten cuantificar económicamente la solución como costo por evento, para la operación de descuelgue y como costo por tonelada, para la operación unitaria de extracción.

1.6 Contenido por capítulos

Como parte de la metodología se detallan las etapas de desarrollo del presente estudio, en donde cada una corresponde a un capítulo de investigación que utiliza como base el anterior y fundamenta al siguiente. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos:

Introducción: Este capítulo plantea la problemática y define los objetivos y alcances del estudio

Revisión bibliográfica: Este capítulo caracteriza el problema, mediante una recopilación de antecedentes y describe la práctica actual, que constituye la línea base para el estudio.

Levantamiento de alternativas tecnológicas: Este capítulo define las cualidades de la solución y en base a ellos, se determina un conjunto de alternativas tecnológicas para el descuelgue de zanjas.

Selección de tecnología para el descuelgue: Este capítulo entrega una tecnología recomendada, la cual es seleccionada en base a una metodología de selección con la ayuda de profesionales del área

Sistema de descuelgue de zanjas: Este capítulo define componentes tecnológicas que integran el sistema de descuelgue de zanjas, realizando una recomendación factible técnicamente, con componentes disponibles en el mercado.

Evaluación económica del sistema de descuelgue: Este capítulo cuantifica económicamente el uso de la tecnología, considerando el análisis por intervención como impacto en la operación de extracción, mediante el uso de software de simulación.

Conclusiones y recomendaciones: Este capítulo resumen e integra los principales aportes de los capítulos anteriores.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tiene por objetivo realizar una revisión del estado del arte del problema de las colgaduras a través de una recopilación de antecedentes, identificando los aspectos claves de la problemática que permitan caracterizarla en relación al evento de colgadura como tal y a las técnicas empleadas actualmente para darles una solución.

2.1 Introducción

Históricamente se ha evidenciado que independiente de las características de cada yacimiento explotado con métodos de hundimiento masivo, siempre existirán eventos de interferencia de flujo y además que la frecuencia de ellos, afecta el resultado final del método. Un buen ejemplo es comparar los resultados entre la extracción de roca secundaria y primaria por métodos de hundimiento de bloques, en donde, en el primer caso, las interferencias son muchas menos que en el segundo. Para ilustrar lo anterior, basta señalar que en las actuales explotaciones por hundimiento en las minas de Codelco Chile se obtienen tasas de extracción que apenas alcanzan cifras entre 0,3 a 0,5 tpd/m², en circunstancias que en sus yacimientos emplazados en roca de fragmentación fina - como la denominada roca secundaria – se obtenían tasas de extracción en el rango de 0,8 a 1 tpd/m² (IM2., 2003).

La presencia de material de gran tamaño, finos o agua favorece la formación de arcos estables en altura al interior de la zanja, lo que trae asociado una serie de inconvenientes. Uno de ellos, son las frecuentes interferencias de flujo en los puntos de extracción, que obligan a realizar tronaduras de reducción secundarias, aumentando los riesgos asociados a las operaciones de extracción, a lo que se suma una disminución de la disponibilidad de puntos de extracción y la capacidad productiva asociadas a las calles de producción involucradas.

La continuidad del flujo de mineral, que afecta directamente la tasa de extracción, involucra en gran medida los resultados de éxito o fracaso de la operación. La frecuencia de eventos de interferencia de flujo y la rapidez en darles una solución son el parámetro clave del método de explotación por hundimiento de bloques. Lo anterior debido a que si gran cantidad de puntos de extracción de un área activa se encuentran interrumpidos, el tonelaje asociado a ese sector será menor, disminuyendo la tasa de extracción en ton/m²día y el cumplimiento de tonelaje programado por punto de extracción.

Atendiendo al hecho de que el aumento de producción debe provenir de la misma área desarrollada, es decir de la misma área disponible para la extracción del material hundido, la técnica implementada para habilitar los puntos debe ser rápida, eficaz y de poca interferencia con las demás operaciones que se realizan de forma simultánea en el sector productivo.

2.2 Colgadura de zanjas

La colgadura de zanjas se define como el proceso en el cual el mineral que fluye a través de un punto de extracción queda interrumpido por la formación de encadenamientos estables de fragmentos de roca de distintos tamaños en el interior de la zanja recolectora de mineral. El mineral quebrado fluye dependiendo de la gravedad y la resistencia a la fricción y cohesión. Cuando estas últimas variables sobrepasan los valores críticos pueden generarse interrupciones en el flujo o colgaduras. Otro tipo de colgaduras puede generarse cuando colpas de gran tamaño se encadenan formando arcos estables en el interior de la zanja. La formación de arcos depende de diversos factores dentro de los que se destacan el tamaño máximo de partículas, cantidad de fino, cohesión de finos, densidad, ángulo de fricción, contenido de agua, granulometría del mineral y el diseño minero. (Hurtado et al., 2007¹).

Las características de la formación en función del origen de las colgaduras, permiten diferenciarlas en tres grupos:

- Colgaduras originadas por encadenamientos naturales de fragmentos de roca de gran tamaño que impiden el flujo de mineral a través de los puntos de extracción.
- Colgaduras originadas por la compactación de material fino en presencia de humedad en la parte inferior de la pila de material fragmentado al interior de la zanja, lo que genera un piso natural de apoyo de fragmentos de gran tamaño, impidiendo el flujo del mineral.
- Colgaduras originadas por que el diseño y dimensiones de la infraestructura de zanja recolectora esta subestimada en relación al tamaño de los fragmentos que fluyen gravitacionalmente por ella.

Las dimensiones de la malla de extracción y el diseño de zanja y punto de extracción, son factores importantes que determinan, en conjunto con las características del mineral, la frecuencia de colgaduras. Existen metodologías de determinación de estos parámetros, las cuales vistan desde la ingeniería de minas, constituyen medidas de mitigación a los inconvenientes que con llevan las interrupciones de flujo y control geomecánico de estabilidad de infraestructuras.

De estudios realizados por IM2 (Hurtado et al., 2008), es posible dimensionar el impacto de los eventos de colgadura en la capacidad productiva de la mina. La Tabla 2-1 muestra el estado de un conjunto de zanjas del sector Inca Oeste de Mina Salvador, en donde, se tiene que el 45,4% de las zanjas se encuentran colgadas², lo que implica que casi la mitad de los puntos de extracción no están en condiciones de operación, por presentar interrupción de flujo, considerando valores promedios por mes, en un registro realizado por 2 meses durante el turno A en División Salvador.

¹ NNM-ICO-GEO-INF N°003: Informe Final Backanalysis de Fragmentación, Minas: Diablo Regimiento, Reno y Teniente 4 Sur Tonalita. CODELCO-CHILE, 2007.

² Colgada, significa un punto que se encuentra con el flujo de mineral interrumpido

Tabla 2-1: Estado de zanjas sector Inca Oeste - Mina Salvador (IM2, 2003).

Levantamiento	Colgadas [%]	Largadas ³ [%]	Zanjas[un]
Abril, 2000	44,8	55,2	116
Mayo, 2000	45,9	54,1	111
Total	45,4	54,6	217

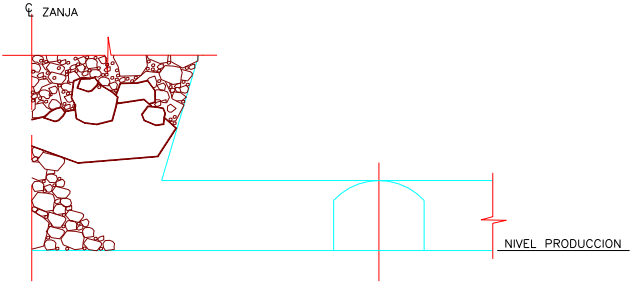
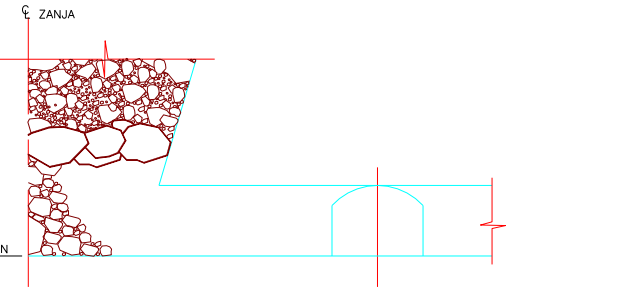
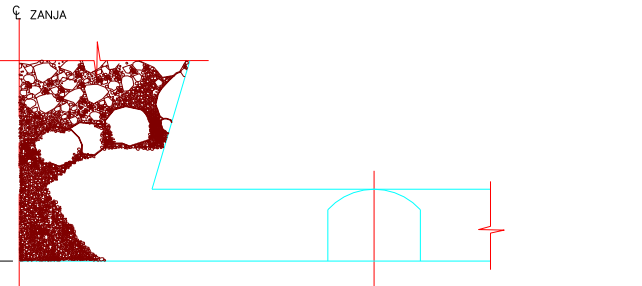
Adicionalmente al impacto en la capacidad productiva, los eventos de colgaduras generan inconvenientes operacionales tales como:

- Reducen significativamente el área disponible, debido a que puntos de extracción quedan inhabilitados para la extracción disminuyendo el área o puntos disponibles para cumplir la producción comprometida.
- Impiden un tiraje uniforme, debido a que al disminuir la cantidad de puntos disponibles de la calle productiva, la extracción se concentra en aquellos puntos habilitados.
- Provocan pérdidas de mineral. En algunos casos las colgaduras presentan características tan adversas y riesgosas para la operación de descuelgue, que se determina no intervenirlas quedando el punto de extracción inhabilitado por largos periodos o cerrado permanentemente para la extracción.
- Causan dilución del mineral, en circunstancias en las que se sobre extrae de los puntos que quedan habilitados de una calle de producción.
- Interrumpen la continuidad de la extracción en cualquier tipo de colgadura, debido a que su ocurrencia obliga a suspender la extracción desde ese punto hasta que sea habilitado nuevamente por la cuadrilla de reducción secundaria.

2.3 Clasificación de colgaduras

Las colgaduras se clasifican en función de su altura de formación y el tamaño de los fragmentos que la forman, en donde una de las clasificaciones actuales definen 3 tipos de colgaduras, que se detallan en la Figura 2-1.

³ Largada, significa que el punto se encuentra habilitado y disponible para la extracción de mineral.

	<p><u>Esquema 1- Bloqueo:</u></p> <p>Interrupción de flujo originada por el atascamiento en altura de una colpa de gran tamaño.</p>
	<p><u>Esquema 2- Arco Mecánico:</u></p> <p>Interrupción de flujo originada por el encadenamiento estable en altura de varias colpas con sobre tamaño.</p>
	<p><u>Esquema 3- Arco Cohesivo:</u></p> <p>Interrupción de flujo originada por el apoyo de colpas en altura sobre una base estable de fino compactado.</p>
<p>Figura 2-1: Clasificación de colgaduras de zanjas.</p>	

Otra clasificación fue realizada por IM2 en el año 2000, que utiliza el mismo concepto de agrupación, caracteriza por la altura en que se forma y por la granulometría de las rocas que se encadenan. Esta clasificación fue realizada con información proveniente de las faenas subterráneas de Codelco-Chile y cuyo resumen se muestra en la Tabla 2-2.

Colgadura a Baja Altura (C1): Con una frecuencia de ocurrencia menor que la Colgadura Intermedia, se caracteriza porque normalmente el encadenamiento se encuentra apoyado en el talud de mineral, pudiendo descolgarse por el sólo hecho de extraer el material de la base.

Colgadura Intermedia (C2): Es la más frecuente y ocurre a media altura de la zanja, es decir entre los 4,0m y 6,0m. La granulometría del material atascado es variable, encontrándose fragmentos de gran tamaño (4,0-6,0m), como también encadenamientos de rocas de menor tamaño.

Colgadura en Altura (C3-C4): De muy baja ocurrencia y se caracteriza por el encadenamiento de las colpas a una altura superior a 12,0m. De acuerdo a lo observado, se trata de fragmentos de gran tamaño (> 6,0m), juntos a otros de menor envergadura.

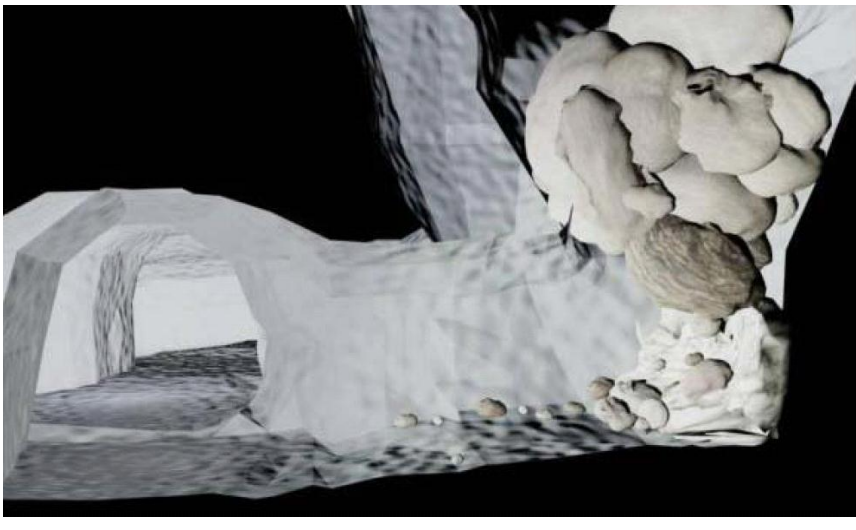

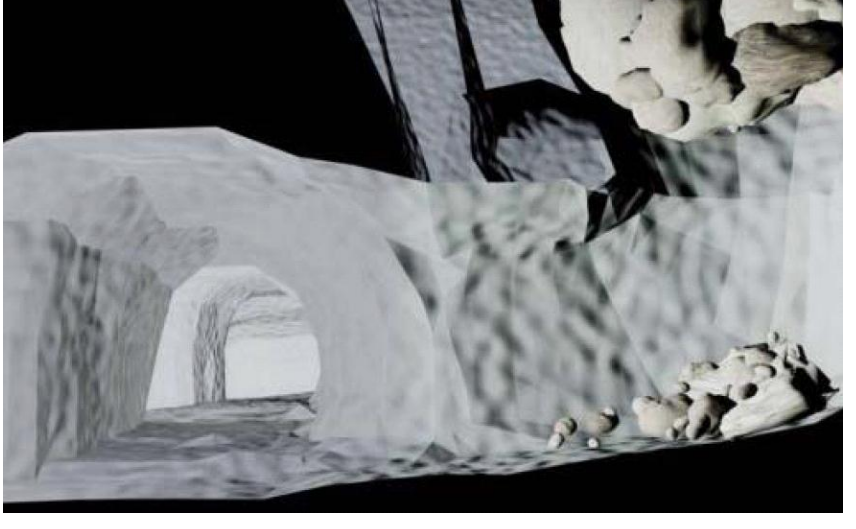
	<p>Colgadura C1</p>
	<p>Colgadura C2</p>
	<p>Colgadura C3-C4</p>
<p>Figura 2-2: Clasificación de colgaduras por altura (2.0 m).</p>	

Tabla 2-2: Tabla resumen de clasificación de colgaduras

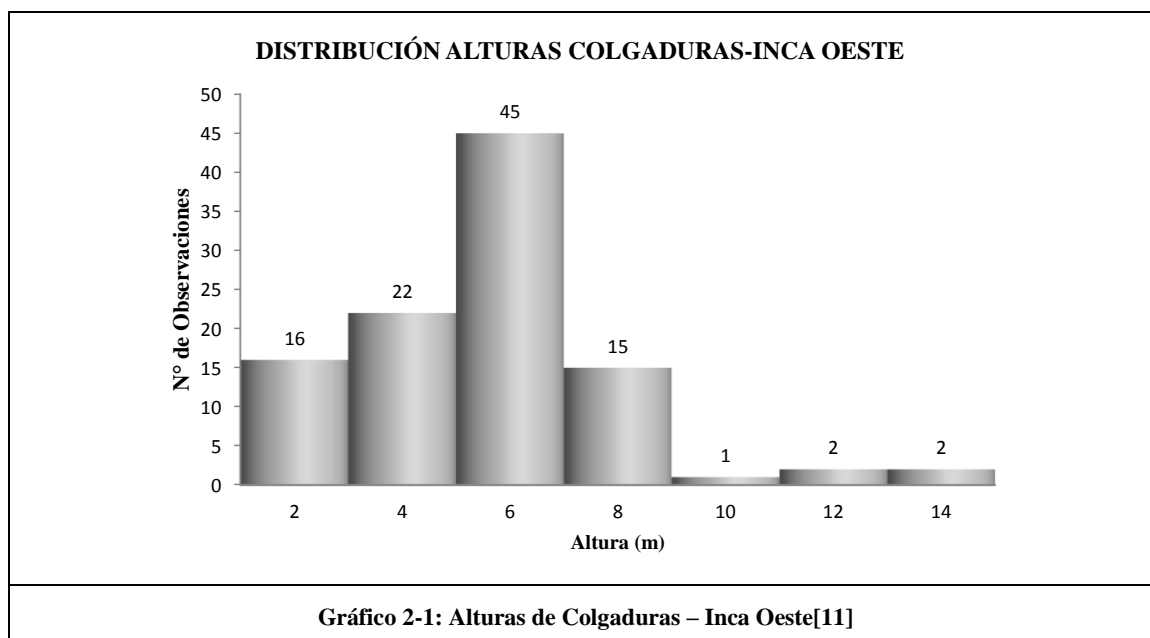
CLASIFICACIÓN	ALTURA DE COLGADURA	TAMAÑO DE FRAGMENTOS
Colgadura C3-C4	>12m	>6m
Colgadura C2	4 a 6 m	4-6 m
Colgadura C1	<4m	<4m

2.4 Estadísticas de colgaduras

Las estadísticas de colgaduras son datos escasos que generalmente no se registran en los reportes generados para notificar el estado de los puntos de extracción. Los registros comúnmente identifican si el punto está habilitado o no, pero no identifican el tipo de evento que origina la inhabilitación de ellos. Este hecho ha dificultado el análisis del problema y ha obligado a realizar levantamientos de información enmarcados en estudios de innovación, en donde los primeros registros de colgaduras que se han identificado en faenas chilenas, corresponden a los realizados por IM2 en División Salvador en el año 1999.

2.4.1 Alturas de formación

A la fecha se han realizado levantamientos de antecedentes de colgaduras en todas las Divisiones de Codelco con faenas subterráneas. El primer levantamiento fue realizado en el sector Inca Oeste de División Salvador en el año 1999 y con él, se realizó la primera clasificación de colgaduras (IM2, 2000). Los resultados de este muestreo, permiten tener una distribución de colgaduras en función de la altura, de acuerdo al Gráfico 2-1.



Del Gráfico 2-1 se desprende que el mayor porcentaje de colgaduras se encuentra entre 4 y 6 m de altura. Sobre 8 m de altura, los casos son menos frecuentes.

2.4.2 Parámetros e índice de colgaduras

El índice que normalmente se utiliza en minería para referirse a los eventos de colgaduras es la cantidad de eventos cada 1.000 toneladas extraídas. Complementariamente, se utiliza la frecuencia de colgaduras que corresponde a la cantidad de tonelaje entre un evento y otro, para un mismo punto de extracción. De la revisión bibliográfica se obtienen parámetros estadísticos asociados a distintas faenas de División El Teniente [12], las que se detallan en la Tabla 2-3 :

Tabla 2-3: Resumen comparativo de los sectores estudiados(Hurtado et al, 2007)

Sector estudiado	Diablo Regimiento		RENO Fw (C01-09)		RENO Hw' (C11-14)		Tte. 4 Sur	
Litología	CMET		CMET		CMET		Tonalita	
Sobretamaño	min	max	min	max	min	max	min	max
% > 1 m ³	32%	38%	23%	31%	28%	35%	28%	37%
% > 2 m ³	26%	33%	16%	25%	24%	30%	24%	32%
Tonelaje colgado promedio (ton)	103		38		38		65	
Altura colgadura promedio (m)	6.9		2.9		3.2		3.9	
Tonelaje Promedio entre colgadura (ton)	605		403		450		251	
Nº Colgaduras/1000 ton	1.65		2.25		2.03		3.79	
Factor de forma	0.39		0.40		0.40		0.34	
Consumo explosivos colgaduras, peso equiv. Dinamita 60% (gr/ton)	33.8		27.8		25.1		21.4	
Consumo explosivos cachorro, peso equiv. Dinamita 60% (gr/ton)	34.4		10.6		8.2		24.8	
Area de influencia (m ²)	340		260		260		300	
Dist. (Calle ⊥ Calle)/2 y Zanja ⊥ Zanja	17 x 20		15 x 17.32		15 x 17.32		15 x 20	
GSI	70 - 85		75 - 80		70 - 90		75 - 90	
UCS (MPa)	116		110		115		125	

En las Tabla 2-4 y Tabla 2-5 se muestran los resultados del análisis de las inspecciones visuales a puntos colgados, realizados para el sector Tte. 4 Sur-Tonalita (sector con mayor cantidad de registros). Para poder obtener estos parámetros, se ha incluido la información entregada por las cuadrillas de cachorreros, debido a la necesaria continuidad en el registro de colgaduras.

Tabla 2-4: Análisis de colgadura según altura de extracción, sector TTE 4 Sur Tonalita[12]

ALTURA DE COLGADURAS	0-50m	0-100m	0-200m	0-300m
Tonelaje promedio entre colgaduras	251	327	461	514
N°colgaduras/1000 ton	3,79	3,06	2,09	1,91
Altura promedio colgadura	3,87	4,19	4,92	4,98

Tabla 2-5: Análisis de colgadura según porcentaje de extracción, Sector TTE 4 Sur Tonalita[12]

PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN	0-20%	0-30%	0-50%	0-70%
Tonelaje promedio entre colgaduras	317	357	461	514
N°colgaduras/1000 ton	3,14	2,69	2,09	1,91
Altura promedio colgadura	4,08	4,70	4,92	4,98

De la información entregada por las tablas anteriores se concluye que:

- Existe un aumento gradual del tonelaje que fluye entre colgadura a medida que aumenta el porcentaje y la altura de extracción.
- El número de colgaduras cada 1000 toneladas disminuye notablemente con el porcentaje y la altura de extracción a una razón constante.
- El tonelaje colgado promedio aumenta con la altura de extracción, pero este comportamiento no se puede determinar como una tendencia ya que la diferencia es de una tonelada y la cantidad de datos utilizados para el análisis es reducido, más bien el comportamiento es constante. Del mismo modo, el tonelaje colgado promedio disminuye con la extracción, pero no se puede determinar como una tendencia ya que la diferencia es muy pequeña.
- La altura de colgadura aumenta a medida que el porcentaje de extracción y la altura de extracción aumentan.
- La mayor cantidad de colgaduras se encuentra en un rango de 4 y 4.5 metros de altura, lo que nos indica que el diseño de zanjas es adecuado.

2.5 Operación de descuelgue

Actualmente y por muchos años, la operación de descuelgue de zanjas se ha realizado colocando en altura, una cierta cantidad de explosivo (usualmente conos de pentolita⁴), amarrados al extremo de coligües, los que sirven para posicionar el explosivo en contacto con las rocas que forman la colgadura y mantenerlo en esta posición hasta que se realice la tronadura de descuelgue. Esta práctica, requiere que el “cachorrero” o persona encargada de colocar los explosivos, tenga que acercarse hasta el marco boca del punto, para poder visualizar la posición donde ubicará el explosivo y para realizar la colocación de éste en altura, hecho que lo deja altamente expuesto y vulnerable al riesgo, en la situación en que se desencadene el flujo de mineral sorpresivamente, como se muestra en la Figura 2-3.

Las colgaduras pueden ser a baja altura o gran altura, entiendo que las de baja altura son aquellas que quedan fuera del alcance de seguridad del jumbo reductor y por tanto no pueden ser perforadas. Generalmente, la diferencia entre ambas es la complejidad para maniobrar en la colocación de la carga explosiva, en donde para alturas superiores a 4 m, la dificultad en la maniobra de elevar la carga limita la ubicación final del explosivo a las posibilidades del manipulador y adicionalmente a ello, es frecuente que en las colgaduras formadas a mayor altura, la carga explosiva no quede con la base⁵ orientada hacia las rocas que forman la colgadura, lo que disipa sus propiedades rompedoras.

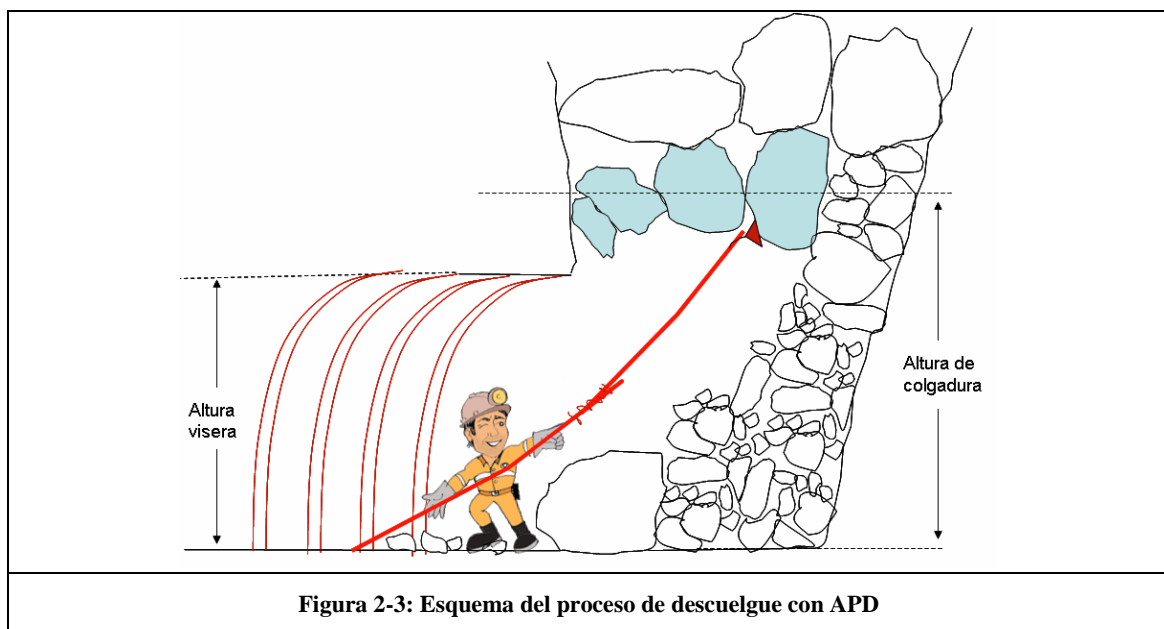


Figura 2-3: Esquema del proceso de descuelgue con APD

⁴ Explosivo compuesto de PETN (tetranitrato de pentaeritritol, también conocido como pentrita) y TNT (trinitrotolueno).

⁵ Los explosivos son de forma cónica de base redonda con efecto direccionado hacia la base del cono.

El descuelgue de zanjas actual se puede describir globalmente en base a las siguientes características operacionales:

- Colocación manual del explosivo mediante utilización de coligues.
- Explosivo de alta potencia con efecto direccionado.
- Operación anexada a la reducción secundaria, en relación al equipo de personas y los tiempos para tronadura.

Otras características del sistema son:

- Los conos APD se ubican donde resulte posible, dado el alcance del coligüe y la distancia al bolón. Uno de los puntos normalmente usados es en la vertical del marco boca, cuando una roca se apoya algo más arriba que la visera.
- Normalmente, para evitar que los conos se muevan, el mismo coligüe que los sube se deja asegurado contra una roca o pared.
- La eficiencia de la tronadura depende mucho de la calidad del contacto del explosivo con la roca.
- El cono es conectado antes de subirse a la zanja, y el cordón es utilizado para tensar el cono y guiar el coligüe.

Las ventajas que presenta el sistema actual son:

- **Eficiencia del explosivo utilizado:** El explosivo de cono APD de alta capacidad rompedora y efecto direccionado, ha dado buenos resultados en la práctica actual, siendo validado para la aplicación en descuelgues de zanjas.
- **Costo aceptado e incorporado a los costos mina:** El principal costo es el relacionado al explosivo en donde cada cono de pentolita tiene un valor de 10US\$, lo que agregando el valor del resto de insumos del circuito de tronadura y el valor de HH de los manipuladores de explosivos da un valor estimado que 55 US\$ por intento de descuelgue. Este valor ha sido aceptado e incorporado en el costo mina y será considerado como el caso base para las propuestas de alternativas tecnológicas.

Para el sistema actual de descuelgue se han identificado debilidades como:

- **Alto riesgo para el manipulador de explosivo:** La colocación de conos mediante el alzamiento con coligüe es una operación compleja y de alto riesgo, dado que normalmente, el manipulador no tiene visibilidad ni maniobrabilidad desde una distancia segura, ante un posible desencadenamiento sorpresivo de las colpas. Para lograr la posición deseada del explosivo, el manipulador se acerca a la zanja hasta una posición altamente riesgosa, quedando totalmente expuesto a un aplastamiento por caídas sorpresivas de colpas.

- **Daño a infraestructura:** Debido a la dificultad de posicionar el explosivo en altura, el manipulador aumenta la carga para disminuir la probabilidad de fracaso de la operación. Este hecho, dado que se utiliza más explosivo, aumenta las probabilidades de generar daños a la infraestructura cercana, las cuales son difícilmente cuantificables, ya que es variable dependiendo de la altura de la carga y la cantidad usada.
- **Poca eficacia en descuelgue:** Dada la dificultad que tiene el manipulador para instalar la carga en altura, la mayoría de las veces se posiciona la carga cerca de las colpas y no en contacto con ellas o en la posición más ventajosa para facilitar el descuelgue . Este hecho genera que los descuelgues de zanjas frecuentemente no se logren al primer intento, haciendo necesario en un 56 % de las veces, repetir la operación hasta lograrlo (S. Maass, 2010).
- **Aplicación en diseño minero tradicional:** La operación actual de descuelgue es una práctica estándar asociada al método de hundimiento de bloques. Esta operación es impracticable en un diseño alternativo como por ejemplo, un diseño con minería continua, ya que no existen accesos seguros para que pueda colocarse la carga en altura de forma manual.

El riesgo incorporado en esta actividad y el número de intentos necesarios para lograr el descuelgue son los principales factores que motivan la búsqueda de una solución alternativa para esta operación. Sumado a lo anterior, la tendencia por automatizar y tele comandar los sistemas, generan una necesidad por incorporar tecnologías y modernizar esta práctica, motivando la búsqueda de soluciones que entreguen resultados satisfactorios, seguros y de bajo costo.

2.6 Conclusiones Revisión Bibliográfica

Como resultado de la revisión bibliográfica en relación a las colgaduras y la práctica de descuelgue utilizada en la actualidad, se puede concluir lo siguiente:

- Los antecedentes bibliográficos corroboran la presencia inevitable de eventos de colgadura de zanjas, los cuales pueden variar en número y características, dependiendo principalmente de la roca, diseño minero y porcentaje de extracción del punto en cuestión, con lo que se confirma la necesidad de abordar este tema, orientando los esfuerzos a la búsqueda de una solución más moderna y segura que la práctica actual.
- Se observa mayor ocurrencia de colgaduras entre 4 y 6 m de altura y existen registros de eventos menos frecuentes a más de 10 m de altura.
- Un patrón común para los distintos yacimientos es el notable aumento del índice de colgaduras en el primer 30 % de extracción. La frecuencia de colgaduras es más del doble que para una extracción en régimen.
- De acuerdo con el análisis de colgaduras, a medida que aumenta el porcentaje de extracción y la altura de extracción, se observa que hay una mayor cantidad de toneladas que fluye entre colgadura y disminuye el número de colgaduras

- En la operación es posible realizar un control de colgaduras, donde es requerido registrar lo siguiente:
 - ✓Frecuencia de colgadura por calle.
 - ✓Número de colpas.
 - ✓Estimación de la altura de la colgadura media y determinación del tonelaje entre colgadura.
 - ✓Explosivo utilizado (tipo y cantidad).

- En relación a la práctica actual de descuelgue, se identifica una operación de alto riesgo y baja eficacia, debido a la dificultad de maniobrar la carga explosiva en altura, lo que potencia la necesidad de disponer de prácticas alternativas para esta operación.

3.LEVANTAMIENTO DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

3.1 Introducción

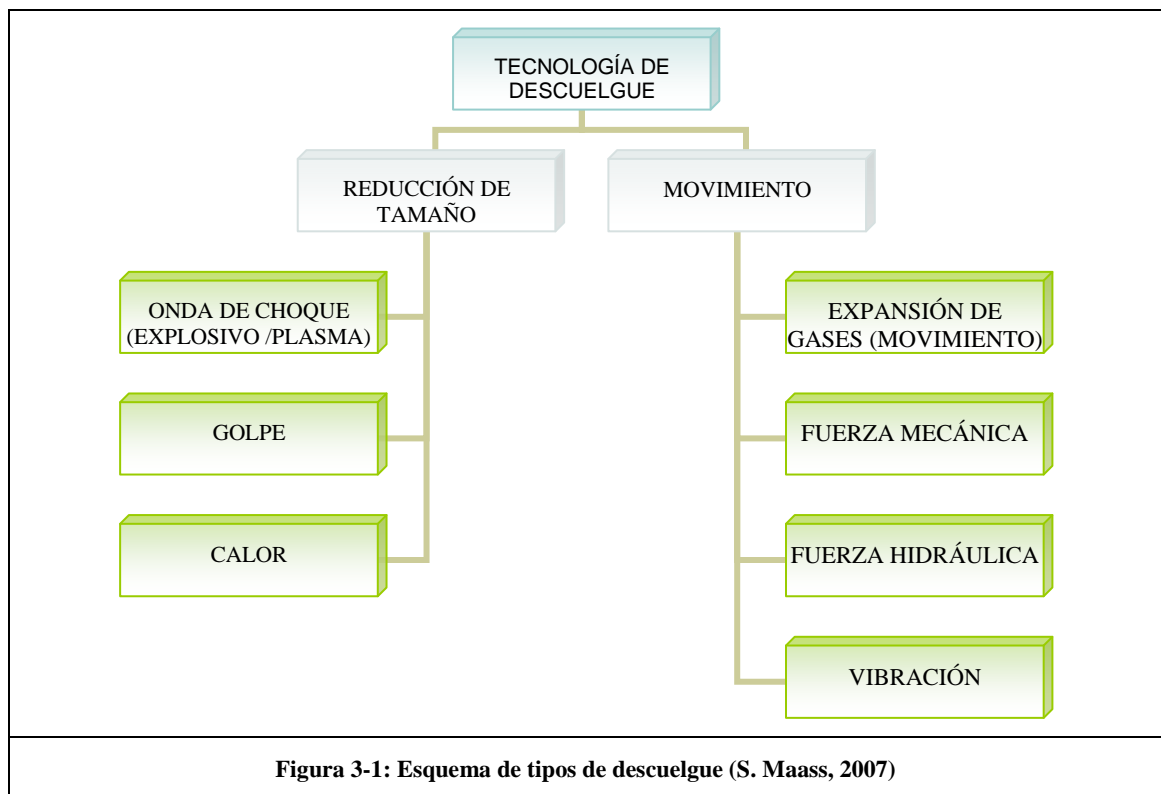
Este capítulo tiene por objetivo presentar las alternativas tecnológicas identificadas en el estudio, que presentan cualidades que por sí solas o en conjunto con otras componentes, permiten considerarlas posibles como solución. El levantamiento de alternativas considera tecnologías de mercado, innovaciones tecnológicas y conceptos, los cuales son analizados en el contexto de la operación de descuelgue.

La búsqueda de alternativas se inicia con el planteamiento conceptual de la solución tecnológica, identificando los requerimientos y características principales que debería tener la tecnología, para cumplir con las exigencias de la operación. Para canalizar las soluciones es importante realizar un levantamiento para identificar las opciones disponibles y las que hay que desarrollar, para integrar una tecnología que compita con la práctica actual.

3.2 Propósito de la operación de descuelgue

La operación de descuelgue, busca activar el flujo de mineral a través del punto de extracción, mediante la aplicación de algún tipo de energía en puntos de equilibrio de las rocas que forman la colgadura, a fin de provocar la inestabilidad y pérdida del equilibrio que la mantiene, originando la caída del material al piso del punto de extracción. El descuelgue de mineral se puede lograr aplicando movimiento a las colpas que forman a colgadura o bien, reduciéndolas de tamaño, ver Figura 3-1.

- **Movimiento de rocas**: Corresponde a inducir movimiento en el encadenamiento de rocas, en busca de lograr el descenso de éstas hasta una posición accesible para realizar reducción secundaria.
- **Reducción de tamaño**: Consiste en quebrar aquellas rocas que soportan la pila de mineral en altura y que actúan como base estable de la colgadura, provocando con esto la reactivación del flujo dentro de la zanja. El sobre tamaño queda definido por el sistema de manejo de minerales, siendo definidas como aquellas rocas que no pueden ser transportadas por la pala de carguío.



3.3 Conceptualización de la solución

La conceptualización de la solución parte caracterizando la práctica actual y en base a ello, identifica las componentes principales que son requeridas para construir una tecnología para el descuelgue de zanjás. La solución distingue 3 elementos claves, como se muestra en la Figura 3-2.

1. **El vehículo**, que transporta el sistema hasta el punto de operación o punto colgado
2. **Sistema de izaje**, es la componente que permite alcanzar las colpas que forman la colgadura. Dado que las colgaduras se presentan a diferentes alturas, es importante definir la tecnología con la cual se logrará llegar con la energía de descuelgue a la posición requerida, tal como hoy en día se realiza con los coligües. En muchos de los desarrollos se considera utilizar un brazo telescópico, en otros casos, se plantea llegar mediante algún sistema de propulsión, sin embargo es materia de estudio, definir para cada opción el sistema más adecuado.
3. **Elemento descolgador**, que interacciona con las colpas y transmite la energía requerida para perturbar el sistema estable y provocar la pérdida del equilibrio. Si bien, la mayoría de las soluciones consideran el uso de algún tipo de energía, es importante identificar cual será el mecanismo de transmisión de la energía a la colgadura. A su vez, la interacción debe ser controlada, dando el tiempo en el caso de las tecnologías que requieren ingresar a la zanja, de retirarse hasta un lugar seguro antes de realizar el descuelgue.



Figura 3-2: Conceptualización de componentes de solución de descuelgue.

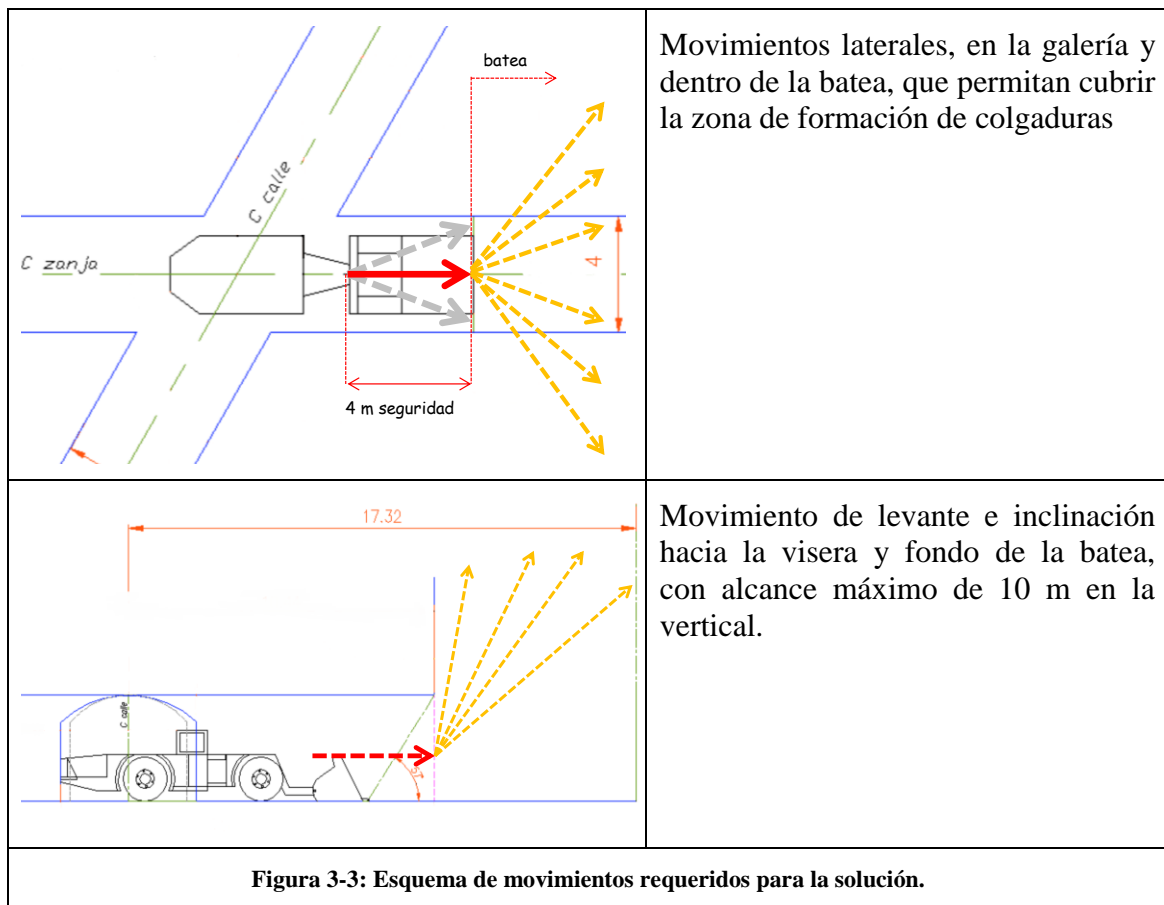
Considerando la altura de colgaduras y el propósito de la operación de descuelgue, vistos en el Capítulo 2, se definen las características mínimas que debe tener una solución tecnológica:

- Permitir el alcance hasta la posición deseada del elemento descolgador, dada por la altura de la colgadura (máximo 10m).
- Lo anterior, debe lograrse con colpas en el piso de la zanja.
- Ser estable, permitiendo controlar la posición de llegada del elemento descolgador en la colgadura.
- Su operación no debe perturbar la condición original de la colgadura, permitiendo el control operacional, del momento en que se realice el descuelgue.
- Debe operarse a una distancia mínima, definida como distancia de seguridad, de la zanja.
- Debe ser una tecnología que pueda movilizarse rápidamente de un punto de extracción a otro y que pueda realizar giros en la intersección calle-zanja.
- Debe tener las dimensiones adecuadas para trasladarse y operar en galerías de sección mínima de 3,6mx3, 6 m, cumpliendo con los estándares de seguridad para la operación de equipos en el interior de las minas.

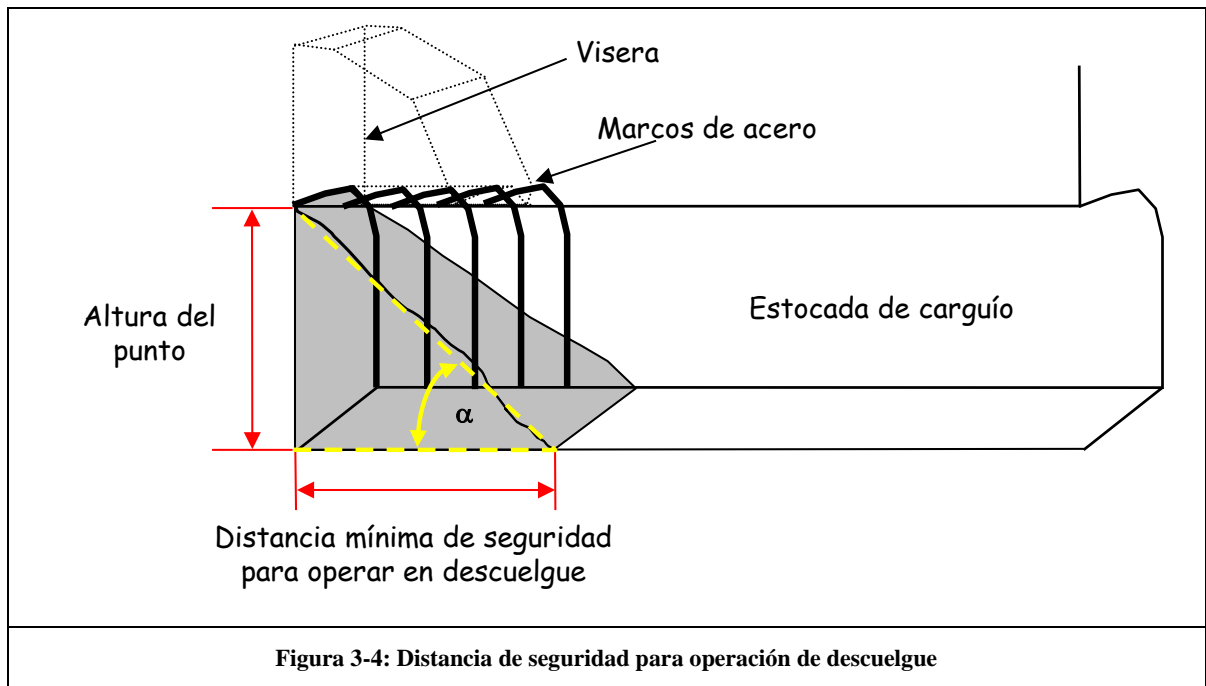
Para identificar alternativas tecnológicas, es necesario conocer los alcances dentro del punto de extracción y zanja, que debe lograr para considerarse como una solución factible técnicamente. Las distancias críticas de la operación son 3, las cuales se definen a continuación:

Altura de operación: La altura se define en base a la sección de la galería, entendiendo como altura mínima la altura de la galería de zanja y la altura máxima, determinada en base a las estadísticas de los eventos, se fija en 10 m ([1] IM2, 1999), medido como la distancia vertical desde el piso de la zanja, hasta las colpas en altura que forman la colgadura (ver Figura 3-3, recuadro inferior)

Distancia lateral: Corresponde a la distancia hacia las paredes de la zanja recolectora, que es donde frecuentemente se ubican los puntos de equilibrio de la colgadura (ver Figura 3-3, recuadro superior).



Distancia mínima de seguridad: Se refiere a la distancia horizontal medida desde la visera del punto hacia la calle, definida por el alcance que tiene el talud de mineral en la estocada de carguío. Para el diseño se considera una distancia horizontal mínima de 4,0m (ver Figura 3-4). Es importante considerar en la solución, que el descuelgue de zanjas puede movilizar bruscamente fragmentos de roca hacia la estocada de carguío llegando incluso hasta la calle de producción.

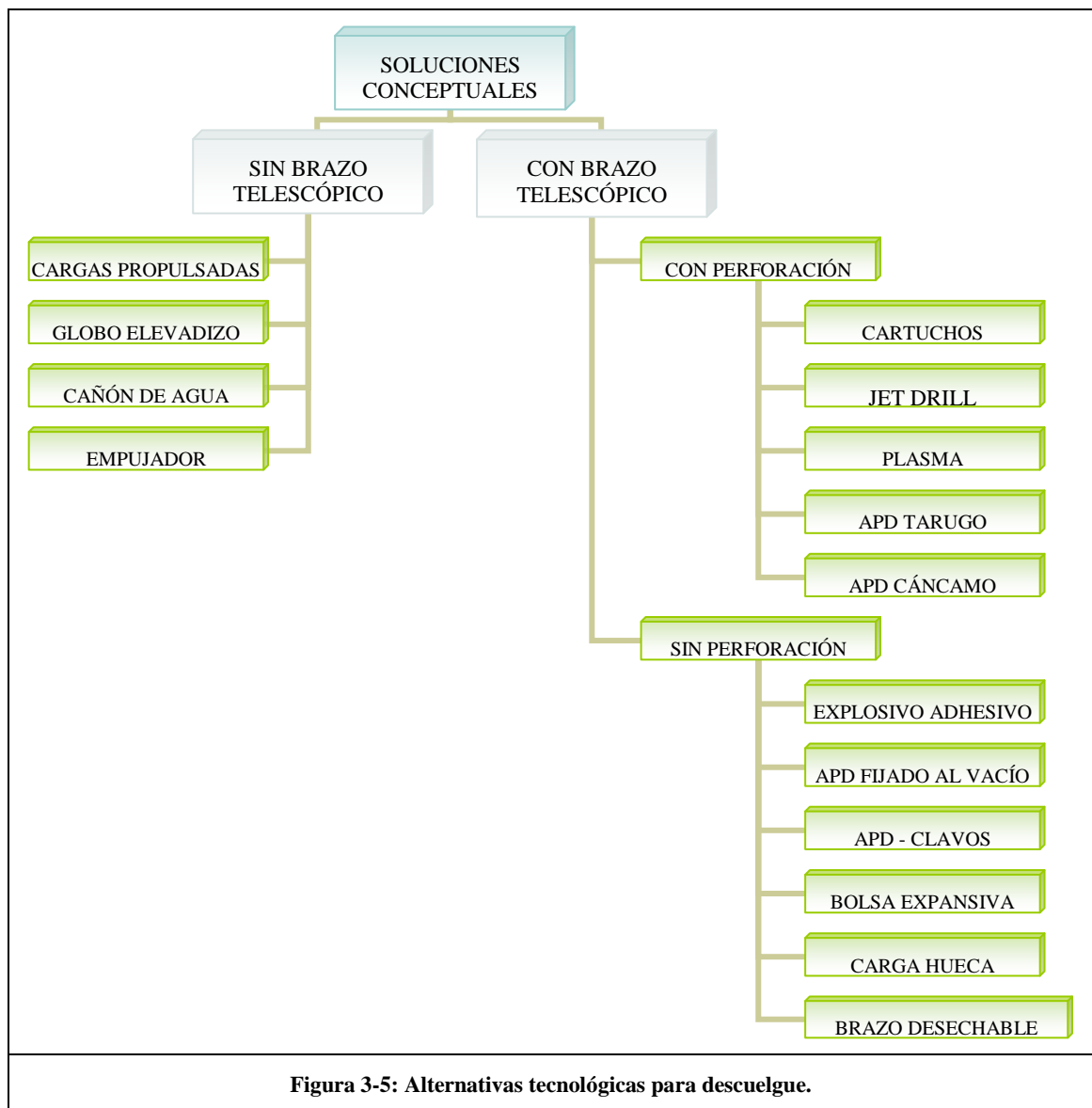


3.4 Alternativas Tecnológicas para el descuelgue

Corresponde a la tecnología que otorga la energía requerida para lograr desestabilizar la coladura y restablecer el flujo de mineral en el punto de extracción inhabilitado.

Para identificar las tecnologías con potencial uso en descuelgue de zanjas, se realiza un levantamiento de alternativas considerando tecnologías disponibles en el mercado, tecnologías innovadoras, desarrollos conceptuales e ideas provenientes de opiniones de expertos en el área. Cada una de las tecnologías se enmarca en la operación de descuelgue, conceptualizando un sistema integrado, en algunos casos vehículo y brazo telescópico, que permita tener una visión analítica de cuáles serían las ventajas y desventajas de su uso.

El levantamiento de alternativas tecnológicas se divide en dos grupos, dependiendo de la autonomía para realizar la operación de la opción analizada, diferenciándolas por el requerimiento de brazo telescópico. Se identifican 14 tecnologías, algunas de las cuales presentan variantes en su implementación. El resultado del levantamiento de tecnologías se muestra en la **Figura 3-5**.



3.4.1 Tecnologías con requerimiento de brazo telescópico

Para el estudio se identifica el grupo de aquellas tecnologías que consideran como parte integral de la solución, un brazo telescópico para alcanzar la colgadura. Estas tecnologías presentan diversas características que permiten agruparlas como se indica a continuación:

Con perforación: Agrupa tecnologías que requieren algún tipo de perforación en la roca que forma la colgadura. Se han identificado distintas modalidades para realizar la perforación, dentro de los cuales se tiene:

- **Perforación normal:** Considera la perforación de alguna roca que forme parte del soporte estable de la colgadura, con perforación electrohidráulica, pero en altura. Aquí se encuentra la alternativa de cartuchos estándar (con uso del Jumbo Descolgador) y la alternativa de plasma.

- Perforación eléctrica (taladro): Perforación de pequeño diámetro, con herramienta eléctrica más liviana (para usar cartuchos explosivos de pequeño diámetro). En este grupo se han identificado también las opciones de cono explosivo con tarugo y cono explosivo anclado a la roca con cáncamo.
- Perforación con agua: Perforación de pequeño diámetro con agua a alta presión y arena como material abrasivo (para cartuchos explosivos de pequeño diámetro). La tecnología Water Drilling tiene la posibilidad de implementarse en todos los casos con perforación.

Sin perforación: Agrupa tecnologías que logran posicionarse y mantenerse fijas junto a la roca que forma la colgadura, sin necesidad de perforar previamente la colpa. Dentro de estas tecnologías encontramos:

- Explosivo adhesivo: En esta alternativa se considera la opción de cono de pentolita con adhesivo diseñado para aplicaciones en ambientes subterráneos ([13] IM2, 2010).
- Fijación por vacío: Cono de pentolita adosado a la colpa mediante un sistema de sellado al vacío (concepto de ventosas)
- Pistola de clavos: Considera un sistema de fijación directa a la colpa mediante disparo de un clavo o anclaje en la roca.
- Bolsa expansiva: Bolsas posicionadas en cavidades entre colpas de colgadura, rellenas con ANFO o emulsión. O bien, las bolsas elevadas con brazo desechable para sostenerlas en contacto con la roca.
- Explosivo de carga hueca con adhesivo: Corresponde a un diseño de explosivo de gran poder exotérmico que mediante un proceso de presión y fusión, logra penetrar y partir la colpa.
- Descolgador desechable: Sistema similar a la operación actual, donde en vez de coligüe se utiliza brazo telescópico de bajo costo.

A continuación se realiza una descripción de cada tecnología, en el contexto de su aplicación como solución o parte de ella, en el descuelgue de zanjás con requerimiento de brazo telescópico.

3.4.1.1 Perforación y explosivo (Jumbo descolgador)

El prototipo desarrollado por División El Teniente y probado en División El Salvador, corresponde a un Jumbo empernador modificado para descoldgar zanjás. El equipo cuenta con un brazo telescópico, con el que es posible perforar y cargar tiros en colpas ubicadas a gran altura. El equipo está dotado con cámaras y focos, que permiten al operador ubicado fuera de la batea, lograr perforar y luego cargar el tiro con cartuchos de explosivo tradicionales ([2] IM2, 2001).

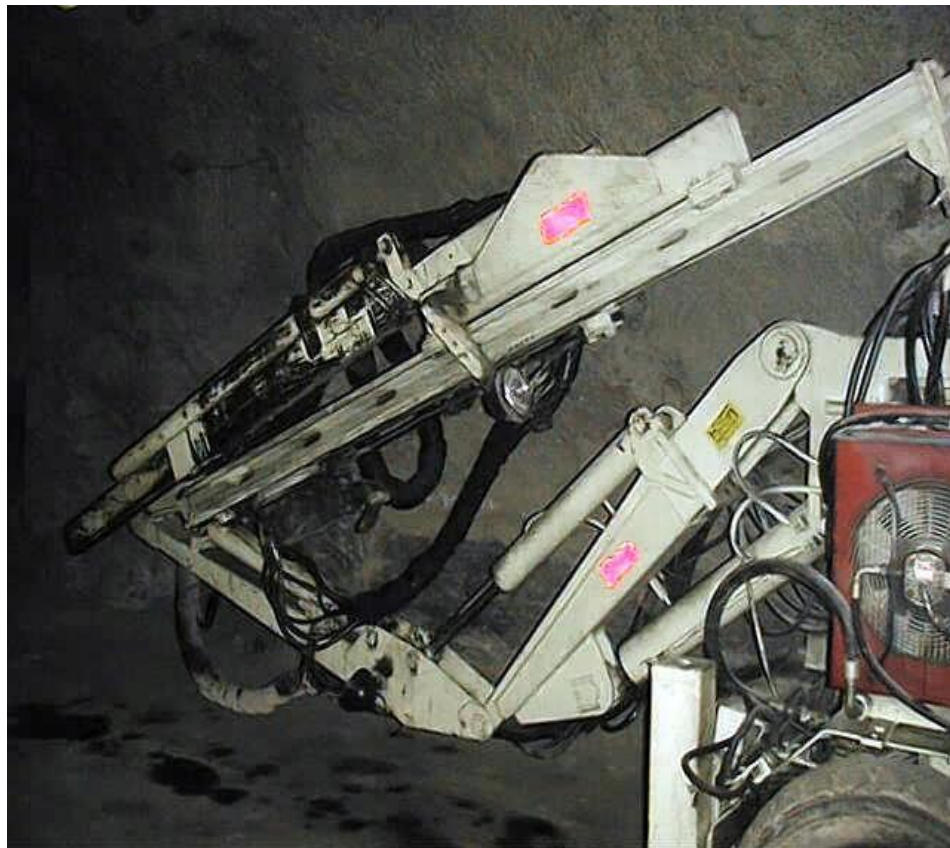


Figura 3-6: Equipo Descolgador, División El Teniente, año 2000.

Pruebas realizadas en División Salvador (sector Inca Oeste) en el año 1999, por un período de 54 días, arrojaron los índices operacionales que se señalan en la Tabla 3-1 , siendo la utilización del equipo y la disponibilidad mecánica muy bajas.

Tabla 3-1: Índices Operacionales Jumbo Descolgador

Fecha de Control		Disponibilidad Mecánica	Utilización Efectiva
Desde	Hasta	(%)	(%)
07/10/1999	30/11/1999	78,21	5,41

El equipo está pensado para operar en colgaduras ubicadas por sobre los 4 m, ya que bajo ella, los fragmentos con sobre tamaño son perforados con el jumbo cachorrero tradicional. De acuerdo a los antecedentes registrados en el sector, el 19,4% de los casos presentó alturas sobre los 6 m, con un registro de 6,93 largaduras/día, para el periodo de tiempo analizado. La productividad promedio del equipo fue de 1,07 descuelgue por turno, para lo cual requería en promedio efectuar 4,5 perforaciones de 2,4 m cada una, totalizando 10,8 m por cada punto descolgado (J. Moya, 1999).

En la literatura, se encuentran también equipos similares ofrecidos por proveedores, sin embargo, no se cuenta con información fidedigna y objetiva sobre el desempeño y los resultados alcanzados⁶. Se sabe, no obstante, que el costo de adquisición de uno de estos equipos es mayor al de un jumbo normal, por lo que fácilmente puede llegar a US\$ 1 millón.

En la Tabla 3-2, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

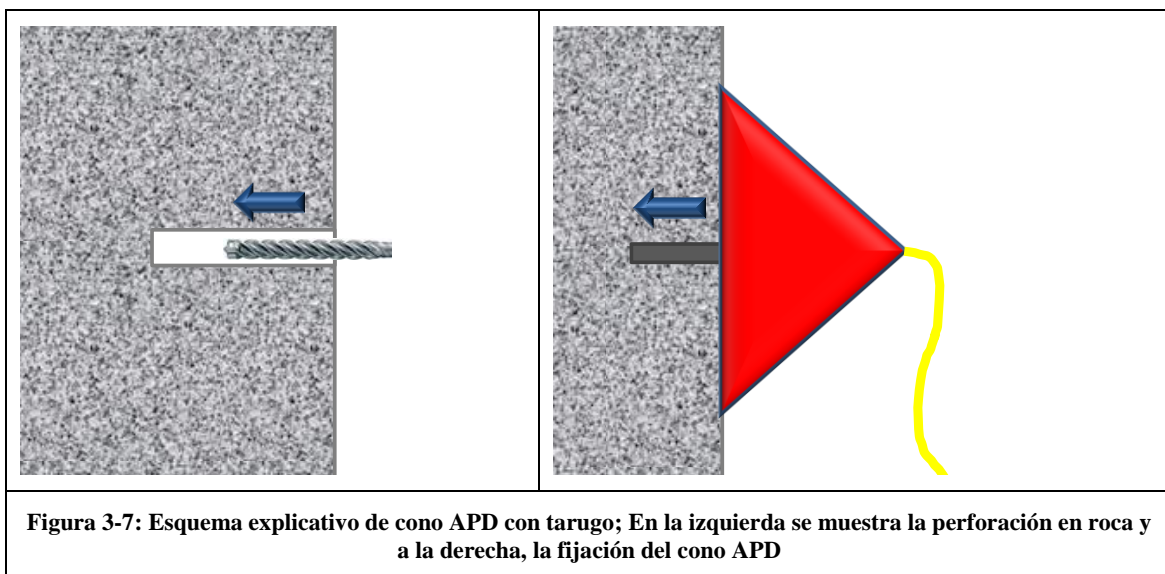
Tabla 3-2: Análisis de ventajas-desventajas en el contexto de la operación.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • El equipo opera en colgaduras de más de 6 metros de altura. • Es una operación mecanizada, por lo que el personal no está expuesto a un descuelgue sorpresivo. • Utiliza el mismo explosivo que para el cachorro. • Este es un equipo ya fabricado y además probado en División Salvador. 	<ul style="list-style-type: none"> • El principal problema del equipo prototipo es el riesgo de daño, ante un eventual descuelgue del mineral suspendido, producto de la vibración transmitida a la roca durante la perforación. • Equipo y brazo telescópico de gran tamaño, necesarios para soportar el peso de la perforadora hidráulica tradicional. • Lo anterior implica un alto costo de adquisición. • Dadas las restricciones de altura en las que el equipo puede operar, existe más de un 50 % de los eventos que no se pueden enfrentar con esta tecnología.

3.4.1.2 Perforación pequeño diámetro, explosivo APD con tarugo

Esta alternativa considera la utilización de conos de pentolita, similares a los utilizados en la operación actual, los cuales tendrían un tarugo introducido en la base, del cual sobresalen de 5 centímetros aproximadamente. Este tarugo sería introducido en una perforación hecha previamente, fijando el explosivo a la superficie rocosa. Dado que la perforación requerida es de pequeño diámetro (8-10mm) y poca longitud, se considera la utilización de taladros para roca (taladro eléctrico o de aire comprimido). La perforación y el posicionamiento del explosivo en la roca serían realizados por un brazo telescópico, dotado de un carrusel que portara ambas componentes (taladro y cono) (A. Moyano, 2009).

⁶ International Mining, January 2009.



En la Tabla 3-3, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-3: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico, perforación pequeño diámetro, con cono y tarugo

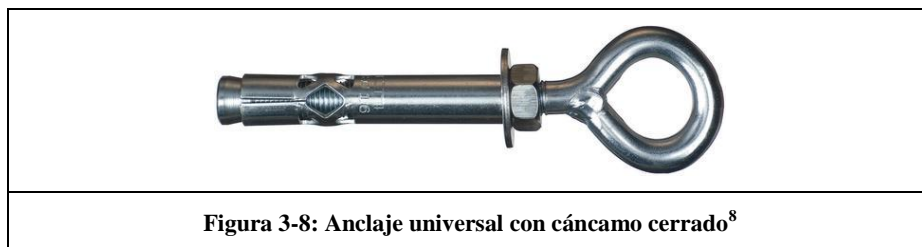
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Es una operación mecanizada, por lo que el personal no está expuesto a un descuelgue sorpresivo. • Utiliza un taladro, por lo que el brazo telescópico requerido es más liviano. • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • Los resultados con conos APD están validados en la industria minera. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un sistema para operar el taladro a distancia. • Es necesario hacer coincidir el tarugo con la perforación, lo que agrega dificultad al sistema del brazo. • La tecnología como sistema integrado no está desarrollada en el mercado, ya que es una idea innovadora. Sin embargo, el cono y el sistema de taladro se encuentran desarrollados y validados. El siguiente paso corresponde a unir todos en un sistema único con brazo telescópico.

3.4.1.3 Perforación pequeño diámetro, explosivo de pentolita con cáncamo

Esta opción considera la utilización de conos de pentolita o APD. En esta alternativa se realiza una perforación en la roca y se introduce un cáncamo⁷ (ver Figura 3-8) en ella. Por el cáncamo

⁷ Tornillo que tiene un anillo en lugar de cabeza en uno de sus extremos.

fijo a la roca se hace pasar una cuerda, con la cual se levanta el cono explosivo hasta posicionarlo adherido a la roca. Esta alternativa requiere de una perforación de poca longitud y pequeño diámetro para introducir el cáncamo en la roca, por lo que se considera la utilización de un taladro perforador en roca (A. Moyano, 2009).



En la Tabla 3-4, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-4: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico, perforación, anclaje de cáncamo para izar cono de pentolita

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Es una operación mecanizada, por lo que el personal no está expuesto a un descuelgue sorpresivo. • Utiliza un taladro, por lo que el brazo telescópico requerido es más liviano. • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • Los resultados con conos APD están validados en la industria minera. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un sistema para operar el taladro a distancia. • Es necesario hacer coincidir el cáncamo con la perforación, lo que agrega dificultad al sistema del brazo. • Incorpora más etapas operacionales para lograr posicionar el explosivo en el lugar requerido. • No asegura que la base del cono explosivo quede en contacto con la roca. • La tecnología como sistema integrado no está desarrollada en el mercado, ya que es una idea innovadora. Sin embargo, el cono y el sistema de taladro se encuentran desarrollados y validados. El siguiente paso corresponde a unir todos en un sistema único con brazo telescópico.

⁸ http://www.hilti.es/holes/page/module/product/prca_rangedetail.jsf?lang=es&nodeId=-77674

3.4.1.4 Perforación pequeño diámetro con agua y explosivo de cartuchos⁹

Esta alternativa considera la perforación de la roca, usando un sistema más liviano que una perforadora tradicional y sin vibraciones, para luego introducir explosivo tradicional para tronar la roca.

Dentro del ámbito de tecnologías no tradicionales para la perforación de rocas, la denominada “Water Jet Drilling” (J.J. Kollé, 2005), presenta un potencial interesante como aplicación para la perforación de bolones tanto en el piso como en altura. Para la operación de descuelgue de zanjas, esta tecnología permite realizar perforaciones de pequeño diámetro idealmente de 19 mm y no transmitir vibraciones a la roca como lo hace la perforación tradicional, permitiendo realizar esta tarea en forma mucho más segura.

El equipo perfora las rocas mediante chorros de agua a alta-presión (igual o superior a 60.000 lb/pulg²) y uso de abrasivo del tipo sílice inyectado a una velocidad de un macho o superior, con una boquilla de succión retroactiva para recuperar agua a través de una herramienta doble (inyección y succión) de descenso programado y controlado de interrupción automática (ver Figura 3-9).

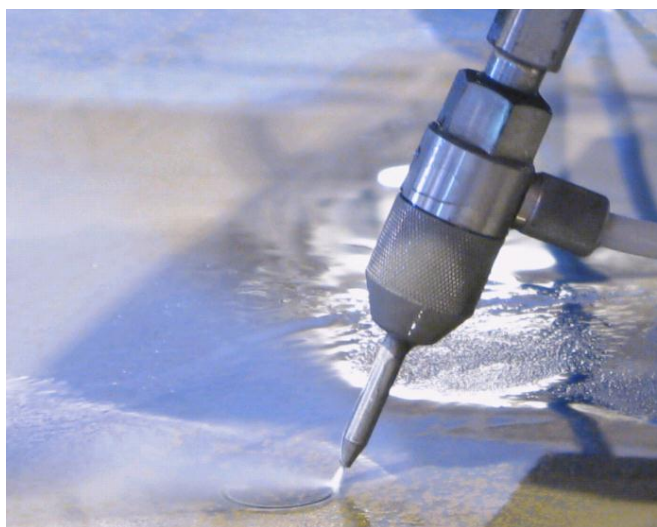


Figura 3-9: Tecnología con agua para corte y perforación

En la Tabla 3-5, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

⁹ IM2, Marzo 2001. Informe Final 44/99” Técnicas de manejo de materiales en el nivel de producción”.

Tabla 3-5: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico, perforación con agua y explosivo

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de perforación con agua a alta presión que no produce vibraciones y por consiguiente reduce la posibilidad del descuelgue de las mismas. • Permite realizar perforaciones de pequeño diámetro (19mm) requeridas en reducción secundaria. • La herramienta de perforación (inyector) es mucho más liviana que una perforadora tradicional, por lo que el brazo telescópico también puede ser más liviano. • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • Permite utilizar cartuchos de dinamita que tienen un costo menor que los conos APD. • La tecnología de perforación con agua se encuentra disponible en el mercado como un producto validado para roca. Sin embargo falta probarlo en descuelgue de zanjas, para evaluar si cumple los requerimientos de seguridad principalmente para el sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere suministro de agua en cantidades no identificadas. • Requiere del desarrollo de cartuchos de menor diámetro, no masificados en la industria minera. • El hecho de emitir bajo nivel de vibraciones no elimina el riesgo de descuelgues sorpresivos. Por lo que este punto debe ser probado en terreno, para resguardar la seguridad del equipo.

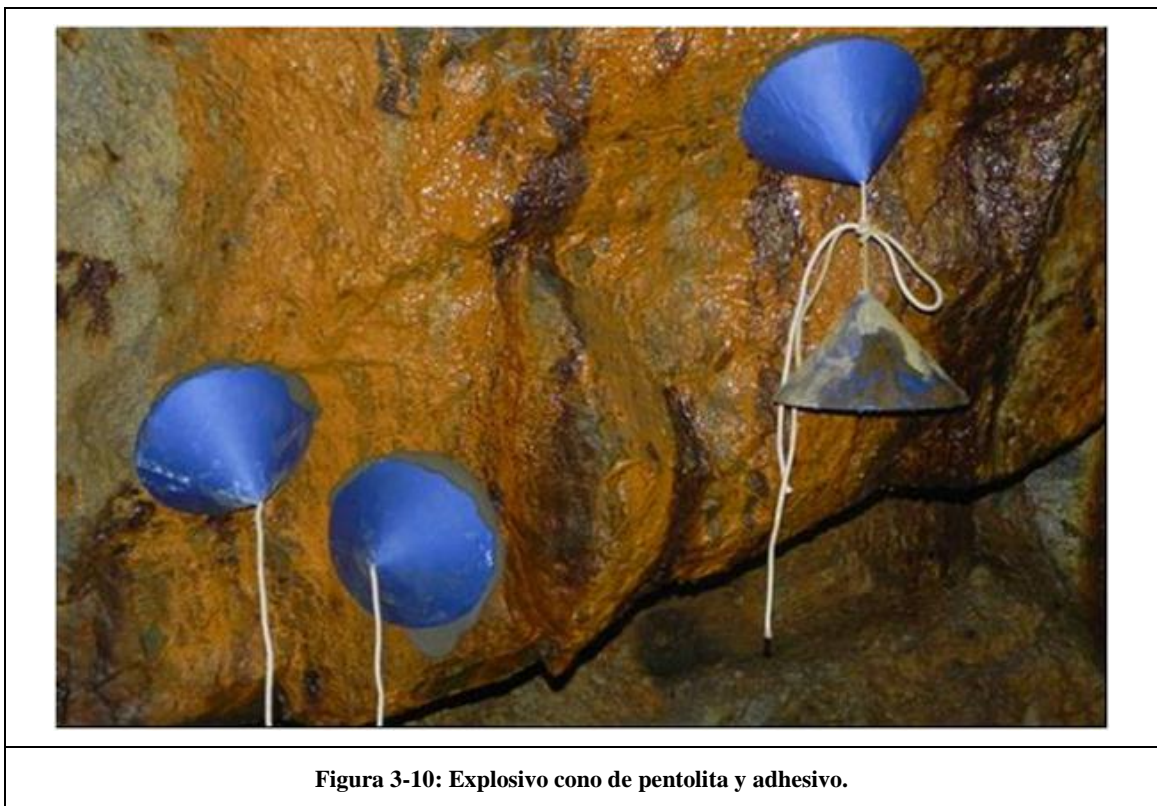
3.4.1.5 Cono explosivo de pentolita con adhesivo¹⁰

Conceptualmente corresponde a la adhesión en la roca de un cono tradicional de pentolita, en donde la función del adhesivo reemplaza la actual utilización del coligue (G. González, 2001). Esta solución aunque parece simple, incorpora la dificultad de sostener con un adhesivo un peso de más de un kilo en contra de la gravedad, por un tiempo equivalente a lo que demore la operación de reducción secundaria a lo largo de la calle completa. Adicionalmente, las particularidades de las superficies de las rocas, normalmente muy irregulares y con polvo suelto o humedad, obstaculizan la adherencia rápida con cualquier pegamento (S. Maass, 2005).

¹⁰ IM2 24/04, Junio 2006. Informe Final: “ Pruebas de explosivos, equipo reductor de bolones y equipo descolgador de zanjas”

Una investigación realizada por IM2 S.A. (S. Maass, 2010) sobre más de 100 productos disponibles en el mercado y mezclas de laboratorio, entregó como resultado un producto fabricado con cementos y polímeros que permite cumplir las exigencias de operación y ambientales para sostener de forma segura el explosivo por el tiempo requerido para realizar la operación.

En cuanto a la potencia del explosivo, se desarrollaron pruebas que confirman que el incorporar una capa de adhesivo en la base (composiciones químicas autorizadas por los fabricantes de explosivos), no disminuye la capacidad rompedora de los conos APD y corrige el direccionamiento del efecto rompedor a la roca, aumentando la eficacia de la operación (S. Maass, 2005).



Existe la alternativa de utilizar emulsión explosiva como adhesivo, sin embargo la viscosidad de los productos actualmente disponibles en el mercado, no permiten sostener de manera segura, conos APD de más de 450 gr.

En la Tabla 3-6, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-6: Ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico, con cono de pentolita adherente

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No utiliza perforación. • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • Los resultados con conos APD están validados en la industria minera. • Es aplicable en cualquier tipo de colgadura • La emulsión adherente y los conos de APD están desarrollados y disponibles en el mercado. El agente adhesivo puede reemplazarlo con cualquier pegamento que pegue en roca 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario disponer de un brazo que eleve la carga hasta la colgadura y que incorpore un sistema que sople la zona donde se pegará.

3.4.1.6 Cono explosivo de pentolita fijado al vacío

Esta alternativa corresponde a una idea innovadora en donde se considera el anclaje del cono de pentolita con un sistema de ventosa que permita fijarlo a la roca. Este sistema se encuentra a nivel de idea, sin mayor antecedente de la factibilidad técnica y operacional en aplicaciones para el descuelgue de zanjas (M. Vicuña, 2009).

En la Tabla 3-7, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-7: Ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico, con cono de pentolita fijado al vacío

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No utiliza perforación • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • Los resultados con conos APD están validados en la industria minera. • Aplicable en cualquier tipo de colgadura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario un mecanismo de sellado al vacío para superficies irregulares. • Es necesario un brazo telescópico que limpie y seque la zona previa adherencia. • La superficie de roca debe ser libre de fisuras o cavidades por las cuales entre aire y suelte la succión de la ventosa. • No existen desarrollos o aplicaciones similares.

3.4.1.7 Cono explosivo de pentolita con fijación directa de clavos¹¹

Esta es una idea innovadora consiste en disparar hacia la roca un clavo dotado con un pasador tipo cáncamo¹², de tal forma que este pasador quede fijo a la roca y actúe como polea, permitiendo que por él, se pueda elevar la carga a través de un hilo hasta posicionarla en contacto con la roca (A. Moyano, 2009). La tecnología que dispara clavos se encuentra disponible en el mercado y está validada en la industria de la construcción con aplicaciones en acero y hormigón, sin embargo los materiales que existen para la fabricación del clavo no son lo suficientemente fuertes para penetrar la roca.

En base a lo anterior, se deduce que el elemento clave de esta tecnología es el clavo de fijación directa, ya que debe estar fabricado de un material de alta dureza y resistente a la compresión, de tal forma que logre penetrar la roca sin deformarse en el proceso. Esto da pie para futuras investigaciones en relación a los materiales con los que se fabrican los clavos y a la potencia de la herramienta, ya que conceptualmente, esta alternativa presenta grandes potenciales.



Figura 3-11: Pistola HILTI de fijación directa.

¹¹ Manual de Sistema de Fijación Directa , HILTI

¹² Tornillo con un anillo en lugar de cabeza en uno de sus extremos.

En la Tabla 3-8, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue.

Tabla 3-8: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico con pistola para fijar anclaje para conos de pentolita

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No requiere perforación. • La pistola requerida para fijar los clavos es muy liviana y de fácil manejo, lo que permitiría montarla sobre un brazo telescópico que la eleve hasta la colgadura. • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • Los resultados con conos APD están validados en la industria minera. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere varios pasos para fijar el cono a la roca, lo que dificulta la operación. • Requiere el desarrollo de un brazo telescópico de alta complejidad que incorpore cada una de las tecnologías. • La pistola está validada a nivel industrial pero no en aplicaciones en roca. Pruebas en terreno evidenciaron que los clavos de fijación actualmente disponibles en el mercado, no son capaces de penetrar la roca, por lo que este sería un tema a desarrollar y probar en terreno.

3.4.1.8 Perforación y plasma¹³

Esta opción consiste en fragmentar rocas mediante la producción de plasma a partir de altos niveles de energía eléctrica (Comisión Chilena de Energía Nuclear, 2010). El plasma es un gas ionizado a alta temperatura y es catalogado como el cuarto estado de agregación de la materia.

La perforación es similar a la requerida para una tronadura con explosivos, con una densidad de perforación mayor, dependiendo del tipo de roca. Para la fragmentación de rocas, el método consiste en introducir dos electrodos compuestos por aluminio, óxido de cobre y agua en una perforación, conectados mediante cables conductores a un capacitador que almacena gran cantidad de energía eléctrica (8.000 volts). Esta energía es descargada a una velocidad de 1 mm/seg. al electrolito, produciendo plasma a alta temperatura, cuyo aumento de volumen genera presión en el barreno provocando la fragmentación de la roca, a diferencia de los sistemas que consideran tronadura con explosivos.

¹³ http://www.cchen.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=308&Itemid=152
http://www.cchen.cl/mediateca/revista_mn/07-13_Divulgacion.pdf

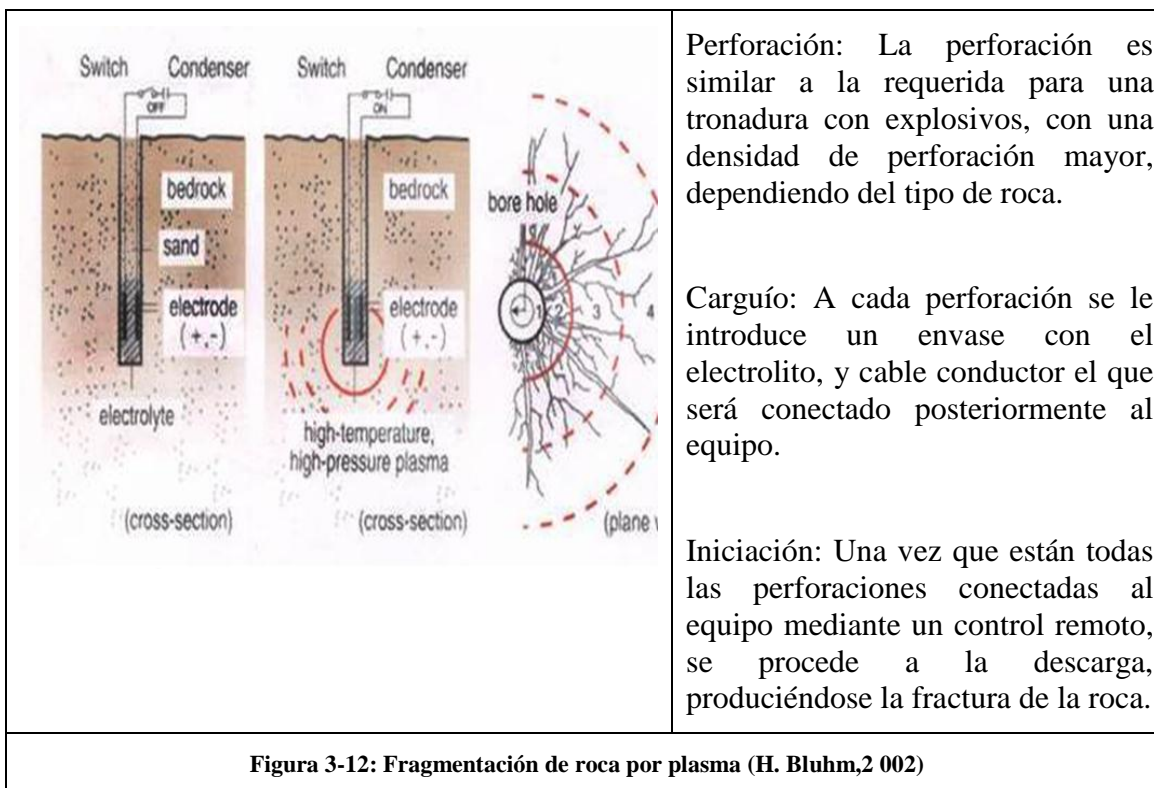


Figura 3-12: Fragmentación de roca por plasma (H. Bluhm,2 002)

Perforación: La perforación es similar a la requerida para una tronadura con explosivos, con una densidad de perforación mayor, dependiendo del tipo de roca.

Carguío: A cada perforación se le introduce un envase con el electrolito, y cable conductor el que será conectado posteriormente al equipo.

Iniciación: Una vez que están todas las perforaciones conectadas al equipo mediante un control remoto, se procede a la descarga, produciéndose la fractura de la roca.

El sistema de fragmentación de rocas por plasma tiene las ventajas que produce vibraciones muy bajas de 10 a 20 mm/seg (para tronadura con explosivo se permite 50 mm/seg, de velocidad de partículas como máximo) y emite bajo nivel de ruido, de 65 a 75 db para una distancia de 15 a 20 m por un periodo muy corto de tiempo[35]¹⁴. Además, el método por plasma no produce gases tóxicos, y los que se producen son en cantidades muy pequeñas y con baja dispersión. Otra ventaja es que no hay proyección de rocas.

En la actualidad existen sistemas comerciales de fragmentación de rocas por plasma, sin embargo la información técnica relevante se mantiene de manera reservada (duración y energía de la descarga eléctrica, componentes del electrolito, geometría de los electrodos, etc.). Asimismo como esta es una tecnología reciente es posible aún optimizarla. Las dos razones anteriores justifican o motivan la realización de investigación en el tema.

Producto de las investigaciones orientadas a la generación de radiaciones pulsadas que se realizan en el Departamento Plasmas Termonucleares de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, la CCHEN cuenta con la tecnología y el conocimiento para producir plasmas pulsados con descargas eléctricas rápidas. A partir de esta base la CCHEN podría explorar seriamente en el campo de la investigación, desarrollo e innovación de fragmentación de roca por plasma.

¹⁴ ICEM, Soosan Artificial Lightning; "Plasma rock fragmentation system".

En la Tabla 3-9, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-9: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico, perforación y tecnología de plasma

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No utiliza explosivo • No produce vibraciones • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • Menores consumos de energía • Menor impacto ambiental. • La tecnología está desarrollada en el mercado. Se ha probado en roca con muy buenos resultados sin embargo, no hay antecedentes de aplicaciones en altura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario realizar perforación para instalar el sistema en la roca. • La instalación de los electrolitos en las perforaciones podría resultar riesgoso para el personal y los equipos, considerando la instalación en una colgadura. • Los electrodos requieren permanecer conectado durante la operación y después de la largadura, estos elementos se pierden, lo que aumenta el costo de la operación.

3.4.1.9 Bolsas expansivas

Esta técnica consiste en colocar dentro de una bolsa plástica, un cartucho de dinamita amarrado al cordón detonante y rellenarla con ANFO, la que es cerrada y adosada al extremo de un brazo desechable, mediante el cual se puede elevar hasta que quede en contacto con la roca. La operación es similar a la práctica actual, solo que en vez de un cono de APD, se utiliza la bolsa rellena de ANFO.

Otra alternativa es introducir la bolsa con el cartucho y el cordón detonante en una cavidad del encadenamiento de colpas y una vez en esa posición, rellenarla con ANFO o emulsión. Con el aumento de volumen de la bolsa queda atrapada en la cavidad y se puede retirar el brazo telescópico.

En la Tabla 3-10, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-10: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico/desechable y bolsas expansivas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No requiere perforación. • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • Las bolsas de ANFO constituyen una práctica probada en la industria minera. • Ha sido probada en aplicaciones para descuelgue pero no de forma mecanizada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de cavidades en donde colocar la bolsa con explosivos. • Presenta la complejidad de tener que llenar la bolsa con explosivo. • Requiere de un sistema que permita elevar hasta la colgadura , el explosivo e inyectarlo a la bolsa

3.4.1.10 Cono explosivo de pentolita con varilla telescópica desechable

Esta alternativa consiste en elevar hasta la colgadura un cono de APD mediante un brazo telescópico de PVC, accionado por aire comprimido, el cual permanece sosteniendo en cono hasta la tronadura. Esta práctica es similar a la actual, pero se reemplaza el coligüe por un brazo mecanizado de bajo costo, que puede ser desechado (GMP Ltda., 2009).

El objetivo de esta tecnología es mejorar la seguridad del personal involucrado en las operaciones de destranque de pique, la que actualmente se realiza de una manera muy riesgosa, debido a que se tiene que instalar los explosivos en lugares que están en la zona de alta probabilidad de caída de rocas o derrumbes, sin modificar en gran medida la práctica actual, pero aumentando la seguridad para el operador.

En la Tabla 3-11, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-11: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico desechable y cono de pentolita

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No utiliza perforación. • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • Los resultados con conos APD está validado en la industria minera. • Disminuye la incerteza del resultado del sistema de anclaje, dado que el 	<ul style="list-style-type: none"> • El brazo se pierde con la tronadura. • Requiere instalar y mantener una red de aire comprimido o un compresor portátil.

<p>brazo es más seguro.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existe el desarrollo a nivel de equipo prototipo y dado que la operación es similar a la actual, la incertidumbre con esta práctica disminuye. 	
--	--

3.4.1.11 Carga hueca con adhesivo

La carga hueca (FAMAE ,2009), descubierta por Monroe en 1883, es un proyectil de uso militar principalmente, muy ligero y de gran potencia¹⁵, que se caracteriza por dirigir y concentrar la onda de choque en un punto del objetivo, amplificando la energía en ese punto. Este principio permite a la carga hueca perforar blindajes de acero de gran espesor. También es usado para destruir bunkers de hormigón y en la industria de la demolición de estructuras y edificios, para el corte de vigas y pilares metálicos.

Para que una carga hueca sea efectiva, es necesario que el explosivo sea de un tipo especial que reúna dos características específicas: ser de velocidad de reacción intermedia (3000-8000 metros/segundo) y que la reacción sea altamente exotérmica ya que debe producir temperaturas de más de 3500 grados centígrados.

Otra de las claves en cuanto al diseño de las cargas huecas es la forma del cono (saber cuál es el ángulo que produce más rendimiento para una carga concreta) y también que el sistema de iniciado debe estar en la parte posterior de la carga ya que por la naturaleza de este tipo de explosivos tienen un sentido de reacción unidireccional en vez de omnidireccional que tienen los explosivos convencionales.

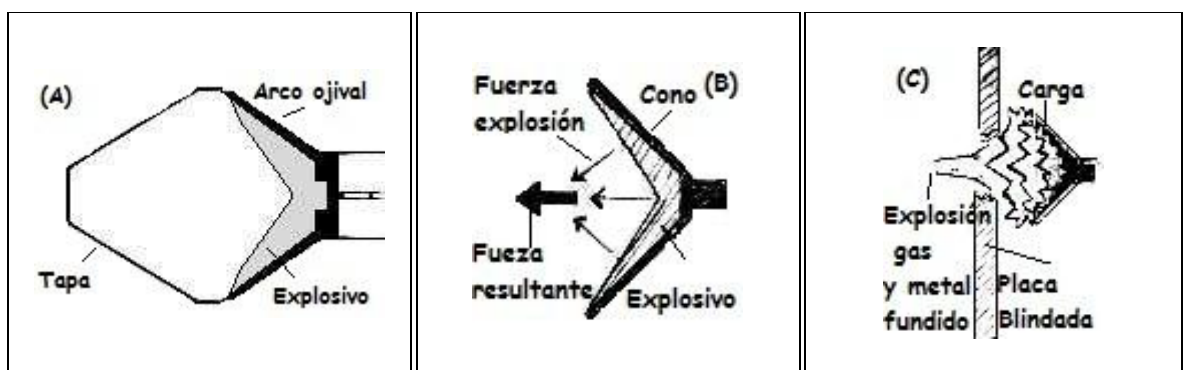


Figura 3-13: Esquema de funcionamiento de carga hueca

¹⁵ <http://www.de1939a1945.bravepages.com/tecnicos/016cargahueca.htm>

El metal que funde la explosión puede observarse en la Figura 3-13, y corresponde a la línea entre el área blanca y el área gris de la granada. El área gris de la figura corresponde al explosivo, el cual focaliza el efecto detonador hacia el frente y en un solo punto, debido a la distribución con forma cónica (Figura 3-13, B y C).

En la Tabla 3-12, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-12: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de brazo telescópico y carga hueca

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No requiere perforación. • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorprendidos. • La tecnología se encuentra desarrollada y disponible en el mercado para aplicaciones militares. Sin embargo, no existen antecedentes de aplicaciones en roca. 	<ul style="list-style-type: none"> • No está comprobada la eficiencia de la carga hueca como explosivo en roca. • Requiere de un brazo desechable o sistema de anclaje no desarrollado

3.4.2 Tecnologías sin requerimiento de brazo telescópico

Existen tecnologías que se caracterizan por no requerir de un brazo telescópico para lograr la altura deseada para el descuelgue. Dentro de estas, se encuentran los proyectiles o tecnologías con auto izaje.

- Cargas propulsadas: Bazuca que dispara un explosivo que detona al contactar con la roca en altura.
- Globo elevadizo: Cono APD elevado por un globo hasta posición de descuelgue.
- Cañón de agua: Pitón que dispara un chorro de agua a alta presión para remover el material fino, desestabilizando el encadenamiento de colpas.
- Punzador mecánico: Barra o punta metálica dispuesta en una perforación hacia la zanja, que genere un desplazamiento leve de las colpas atascadas en el interior de ésta, desestabilizando la colgadura.

A continuación se realiza una descripción de cada tecnología, en el contexto de su aplicación como solución o parte de ella, en el descuelgue de zanjas sin requerimiento de brazo telescópico.

3.4.2.1 Globo elevadizo con explosivo

Esta idea se basa en el principio de Arquímedes y consiste en elevar el cono explosivo amarrado al cordón detonante, mediante un globo lleno de un gas liviano (más liviano que el aire), en el interior de la zanja, hasta alcanzar la posición de contacto con las colpas. El concepto busca dejar la base del cono en contacto con la roca, por lo que el globo elevadizo debería tener una forma tipo argolla o cónico, que cobije el cono explosivo elevándolo de forma estable con la base hacia arriba.

Una variante es la opción llamada “Sputnik”, que corresponde a un dispositivo de propulsión por aire comprimido y que puede transportar cargas explosivas de 12 kg hasta a 100 m de altura. Esta tecnología se encuentra desarrollada y probada en terreno.

En la Tabla 3-13, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-13: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de brazo mecánico, globo elevadizo con explosivo

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• No utiliza perforación.• No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos.• Los resultados con conos APD está validado en la industria minera.• Fácil aplicación.	<ul style="list-style-type: none">• El volumen del globo de helio para elevar carga sin sistema de propulsión es de 1 m³ para elevar 0,5 kg de carga. No se ha considerado el uso de otro gas, ni las condiciones de temperatura y densidad de aire de interior mina.• Imprecisión en la posición final del explosivo.• La alternativa Sputnik solo ha sido desarrollada para destrancar piques, en casos muy específicos.

3.4.2.2 Cargas propulsadas¹⁶

Consiste en un dispositivo lanzador de cargas explosivas, las que al impactar con la masa rocosa, detona iniciado por un conjunto espoleta-detonador-iniciador. El cañón cuenta con un rayo láser desmontable que permite orientar el disparo al punto deseado. El explosivo de las cargas corresponde a Pentolita y se puede elegir de 0,9 kg, 1,4 kg y 2,2 kg, dependiendo de las

¹⁶ IM2, Marzo 2001. Informe Final 44/99” Técnicas de manejo de materiales en el nivel de producción”.

características de la colgadura. El alcance de los disparos es de alrededor de 100 m. Es un método seguro ya que evita la sobre exposición del personal. La mayor aplicación del sistema se encuentra en colgaduras a gran altura (sobre 8 m). El proyectil está diseñado para que el sistema se active al impactar la roca, permitiendo una transferencia efectiva de energía de choque hacia la colgadura [2] . La Figura 3-15 muestra la ubicación del dispositivo impulsor.

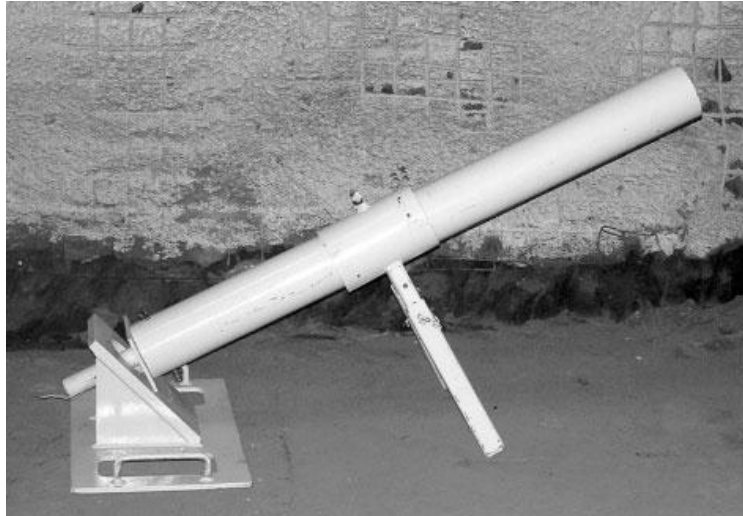


Figura 3-14: Cañón de cargas propulsadas.¹⁷



Figura 3-15: Ubicación del dispositivo impulsor

En la Tabla 3-14, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

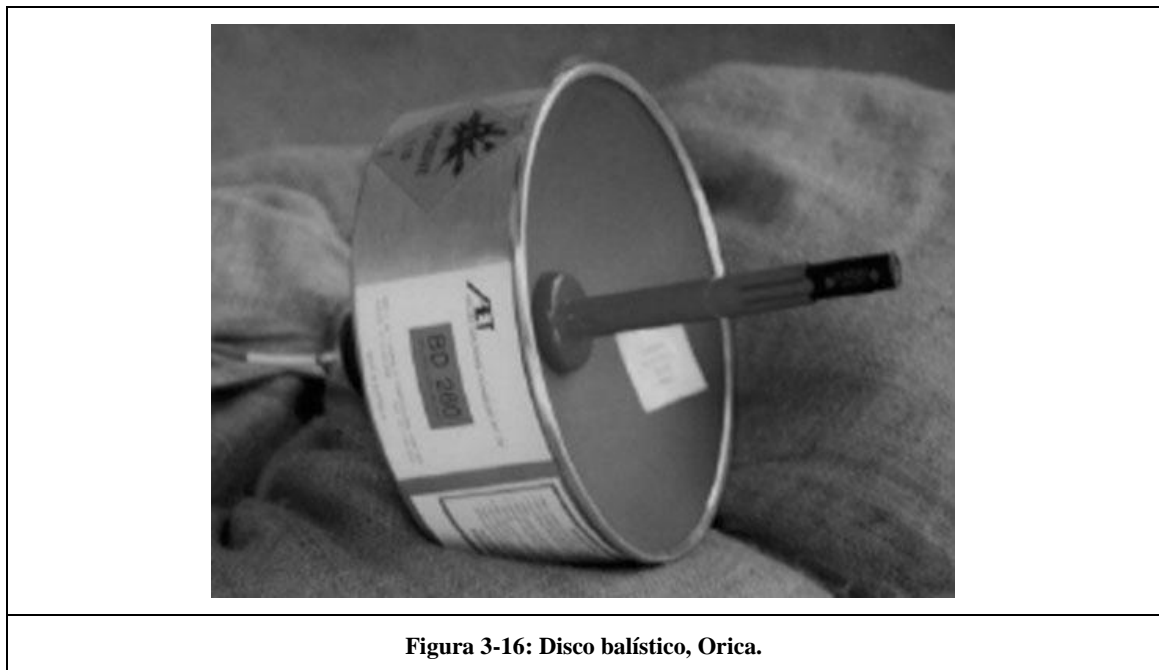
¹⁷ T. Szwedzicki, 2007. Paper “Formation and removal of hangs-ups in ore passes”.

Tabla 3-14: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de cargas propulsadas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No requiere perforación. • Los resultados de pruebas son buenos en relación al éxito del descuelgue • La tecnología está desarrollada en el mercado y se encuentra probada en terreno, con aplicaciones en descuelgue de zanjas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario asegurar que el personal quede en posición totalmente segura, al momento de detonar el proyectil. • El cañón queda expuesto al momento del disparo, por lo que es muy probable que se pierda una vez que caen las rocas. • Puede no ser efectivo en colgaduras formadas por cohesión de finos. • Imprecisión en el lugar de impacto.

3.4.2.3 Disco balístico

Existe una variante al cañón de cargas propulsadas llamada “disco balístico”, que corresponde a un sistema integrado por hasta 9 kg de explosivos, contenidos en un disco revestido de aluminio con un contenido limitado de acero. Cuando es detonado, este disco es impulsado a velocidad de 2000-2600 m/s. El disco puede ser proyectado con un alcance de hasta 60 m. La energía cinética se transfiere al momento de impactar destruyendo el objetivo.



La diferencia con las cargas propulsadas es que el disco balístico no requiere de un cañón que lo proyecte hacia la colgadura, lo que elimina el riesgo de perder el cañón propulsor.

En la Tabla 3-15, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-15: Resumen de ventajas-desventajas para sistema de disco balístico

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No requiere perforación. • No requiere cañón para el disparo. • Los resultados son buenos en relación al éxito del descuelgue. • Es una tecnología disponible en el mercado y que se ha probado en Teniente-Codelco, pero no ha sido validada para la aplicación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario asegurar que el personal quede en posición totalmente segura, al momento de detonar el proyectil. • Puede no ser efectivo en colgaduras formadas por cohesión de finos. • Imprecisión en el lugar de impacto.

3.4.2.4 Cañón de agua

Esta tecnología opera removiendo con agua a alta presión los finos compactados que se encuentran en la base de la colgadura, de tal modo de desestabilizar el encadenamiento de colpas. El efecto del agua a alta presión genera la pérdida de cohesión y remoción de finos a modo de lodo hacia el punto de extracción (Informe 44/99, IM2 S.A., 2001).

En la Tabla 3-16, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-16: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de cañón de agua

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Efectivo cuando existe presencia de finos. • No utiliza explosivos. • No requiere perforación. • No expone al personal a riesgos por 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicable solo para colgaduras asociadas a presencia de finos(limitado rango de aplicación) • Es necesario personal especializado para realizar la operación • Requiere tiempos de llenado de

<p>descuelgues sorpresivos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Esta tecnología está desarrollada e implementada para descuelgue de zanjas en minas subterráneas con mucha presencia de finos (A. Arancibia, 2009). 	<p>estanque.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Requiere suministro de agua y drenaje del punto. • Requiere un tiempo de espera de seguridad posterior a la operación.
---	--

3.4.2.5 Punzador mecánico o hidráulico

La alternativa de punzador mecánico consiste en realizar una perforación desde la estocada de extracción hacia el interior de la zanja, conectando estas dos labores, por donde se introduce una barra de alta resistencia y dureza, la cual desplaza mecánicamente hacia el interior de la zanja, una distancia suficiente para contactar y movilizar las colpas que se encuentren en el interior. Los movimientos de la barra deben ser cortos y rápidos, de tal modo de evitar doblamientos o deformaciones originadas por aplastamiento por colpas.

Otra opción conceptualmente similar a la anterior es el “Punzador Hidráulico”, que consiste en proyectar un chorro de agua a alta presión al interior de la zanja, directamente o a través de una perforación que conecte con la zanja en altura. Esta opción considera introducir una manguera que permita inyectar agua (o también aire con agua) a alta presión en el interior del encadenamiento de colpas, generando movilidad y el descuelgue de la zanja (V. Encina, 2007).

En la Tabla 3-17, se presentan las principales ventajas y desventajas esperadas con el uso de esta tecnología, en el contexto de la operación de descuelgue. El análisis se realiza en base a los antecedentes disponible y la conceptualización de su uso.

Tabla 3-17: Análisis de ventajas-desventajas para sistema de punzador mecánico o hidráulico

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No requiere perforar las colpas que forman la colgadura. • No expone al personal a riesgos por descuelgues sorpresivos. • No requiere explosivos. • Existen antecedentes de perforaciones con las características que se requieren en esta alternativa y también existe el sistema de inyección de agua a presión validada en el mercado 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología estacionaria, que requiere una unidad instalada por punto de extracción. • La zona de interacción con la pila de mineral es fija, por lo que no asegura interacción con las colpas que forman la colgadura. • Su eficacia dependerá de la altura de la colgadura y del tamaño de los fragmentos. • El sistema de empuje con agua, presenta baja autonomía.

	<ul style="list-style-type: none"> • En el sistema de empuje con barra, se requiere de intervenciones muy rápidas para evitar daños por aplastamientos de la barra. • Lograr la movilidad, se requiere de una barra y un cilindro con resistencia y potencia suficientes, que sea capaz de desplazar la barra dentro de la zanja, para cada punto de extracción. • . La tecnología de barra punzadora no se ha desarrollado.
--	---

3.5 Conclusiones de Levantamiento de Alternativas Tecnológicas

Como resultado del levantamiento de alternativas tecnológicas para la operación de descuelgue de zanjas, se identifican 15 tecnologías potenciales como solución, las cuales constituyen el sistema de descuelgue de zanjas por sí solas o requieren complementarse con otras componentes.

De las alternativas se distinguen 10 de ellas que requieren del desarrollo de un sistema vehículo-brazo telescópico que lo complemente. Esto involucra el hecho de ingresar un equipo o parte de él, al interior de la zanja, obligando a maniobrar sin afectar la condición original de la colgadura, para lograr el control operacional del momento del descuelgue forzado.

Las tecnologías que no requieren brazo telescópico presentan limitantes en el rango de aplicación o poca precisión en el punto de interacción con la colgadura. Esto genera la necesidad de lograr una mejora tecnológica o adaptación de ellas, para ajustar sus características, ampliando el rango de colgaduras que se puedan enfrentar y también, el control y precisión de su uso y efecto.

En la Tabla 3-18 se presenta un resumen de las tecnologías de estudio y sus principales características, donde se puede observar las siguientes tendencias:

- La mayoría requiere de un brazo telescópico
- La mayoría no considera perforación
- La mayoría considera el uso de explosivo
- La mayoría no considera anclajes a la roca
- Las energías de descuelgue son de reducción y movilización de las rocas que forman la colgadura.

Tabla 3-18: Resumen de tecnologías y principales características

#	TECNOLOGÍA	BRAZO TELESCOPICO	PERFORACION	EXPLOSIVO	ANCLAJE	ENERGIA
1	Perforación-cartuchos	Si	Convencional	Cartuchos o emulsión	No	Reducción
2	Perforación con agua	Si	Water Drilling	Cartuchos o emulsión	No	Reducción
3	Plasma	Si	Convencional/ Water Drilling	No	No	Reducción
4	APD con tarugo	Si	Taladro	APD	Tarugo	Reducción
5	APD con cáncamo	Si	Taladro	APD	Cáncamo	Reducción
6	Explosivo adhesivo	Si	No	APD	Adhesivo	Reducción
7	APD Fijado al vacío	Si	No	APD	Ventosa	Reducción
8	APD fijado con clavos	Si	No	APD	Clavo con cáncamo	Reducción
9	Bolsa expansiva	Si	No	ANFO	Bolsa	Movilidad
10	Carga Hueca	Si	No	TNT/Pentolita	?	Reducción
11	APD –Brazo Desechable	Desechable	No	APD	No	Reducción
12	Cargas Propulsadas	No	No	Pentolita	No	Reducción
13	Globo elevadizo	No	No	APD	No	Reducción
14	Cañón de agua	No	No	No	No	Movilidad
15	Punzador	No	No	No	No	Movilidad

4. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA DESCUELQUE

4.1 Introducción

Este capítulo tiene por objetivo, realizar una recomendación tecnológica para el descuelgue de zanjas, a partir de las alternativas vistas en el capítulo anterior. Debido a que dependiendo de las características del evento mencionados en el Capítulo 2, existirán varias alternativas tecnológicas con potencial de implementarse para solucionar la interferencia de flujo, es necesario establecer criterios de selección, independientemente de las particularidades de cada una, para realizar un análisis comparativo homologado entre todas las opciones¹⁸. La selección se basa en el criterio experto de profesionales del área, el cual complementado con una metodología de selección nuevas tecnologías, permite obtener una solución recomendada.

En una primera etapa la matriz multicriterio permite descartar aquellas alternativas que no cumplen con los requerimientos mínimos establecidos para la solución y cualidades indispensables y luego, permite obtener un ranking con aquellas que presentan las cualidades necesarias para el descuelgue de zanjas.

4.2 Selección de Alternativas

La selección se realiza con matrices de decisión, que utilizan criterios basados en las características esperadas para la solución tecnológica, diferenciando estas características en aquellas que son indispensables para la operación y las que son deseables a cumplir.

A partir de la experiencia de operación y estudios realizados respecto a este tema, se ha podido identificar que una de las mayores debilidades de la práctica actual, corresponde al alto nivel de riesgo para el personal que realiza la maniobra de colocar las cargas en altura. A la fecha no se dispone de un registro de colgaduras que permita cuantificar la accidentabilidad en la operación (debido a que se integran con los registros de cachorreos en una sola operación de reducción secundaria), pero los operadores y profesionales involucrados en el tema, están conscientes de la condición insegura a la que se exponen con la práctica actual. Este hecho, orienta la solución hacia alternativas que descuelguen el punto desde una posición no riesgosa para el personal, incorporando esta característica como una condición indispensable para la solución.

El resto de las características esperadas en la solución, se consideran cualidades deseables para la tecnología y se asocian al cumplimiento de aspectos operacionales y compatibilidad con nuevos

¹⁸ Rafael A. Schiazzano, Gestión de Proyectos: “Procedimiento de selección-Matriz de decisión, aplicación a selección de ideas en proyectos de máquinas”

K.T. Ulrico- S.D. Eppinger, “Diseño y desarrollo de productos”

R.L. Norton “Diseño de maquinarias”

sistemas, tales como capacidad de automatización y compatibilidad con Minería Continua, en una mirada futura basada en las tendencias actuales.

4.2.1 Criterios de decisión para nuevas tecnologías

Los criterios de selección son las cualidades y condiciones a satisfacer por la “tecnología” para ser exitosa (fácil manipulación, menor riesgo, menor costo, mayor eficiencia, etc.). La elección acertada es primordial para el proceso de selección, cualquiera sea el método empleado y se basa en el cumplimiento de aquellos aspectos indispensables requeridos para lograr el objetivo de descuelgue.

Las tecnologías en estudio podrían ser por sí solas la solución para las colgaduras o bien, pueden corresponder al elemento clave o indispensable de un sistema integrado por varias componentes, siendo el objetivo de esta etapa seleccionar aquellas que logren o ayuden a lograr el cumplimiento de los requerimientos de la solución. La determinación de las cualidades de la solución, considera los requerimientos de la operación y la caracterización del sistema actual, que constituye la línea base para el estudio.

Con los antecedentes disponibles se definen los siguientes criterios de decisión:

- Riesgo para personal: Esta cualidad se medirá en comparación al caso referencial y se refiere al nivel de riesgo al que se ve expuesto el personal que realiza la operación, considerando el traslado, la manipulación y la operación de la tecnología.
- Riesgo para el sistema: Se refiere al daño que puede generar el uso de la tecnología sobre sí misma o sobre otros equipos e infraestructura.

Y los aspectos deseables identificados son:

- Uso de tecnologías de apoyo: Considera el grado de autonomía de la tecnología para lograr solucionar la colgadura, referidos a los requerimientos de insumos y otras componentes.
- Eficiencia: Rapidez en provocar el descuelgue, en donde, dependiendo de la tecnología, puede ser tiempo de aplicación, cantidad de explosivo, número de intentos, etc.
- Costos: Este criterio es evaluado como una tendencia de ser mayor , menor o igual, comparado con el caso actual
- Automatización: Compatibilidad con tecnologías automatizadas.

- Nivel de desarrollo: Se refiere al avance tecnológico y de validación que presente a nivel industrial.
- Rango de aplicación: Se refiere a si la tecnología es aplicable a cualquier altura de colgadura y también a cualquier tipo de colgadura.
- Simplicidad de operación: Considera la complejidad de operación, como por ejemplo la cantidad de pasos que debe seguir el operador antes de lograr el descuelgue.
- Interferencia con resto de operaciones: Referido al tiempo que el sistema de producción queda detenido y al área que debe resguardarse para su implementación.
- Compatibilidad con diseño de Minería Continua: Con una mirada futura, se incorpora la compatibilidad o adaptabilidad para implementarse en un diseño con Minería Continua.

4.3 Descarte de tecnologías

El objetivo de esta etapa es descartar mediante criterios sencillos, aquellas alternativas que por sus particularidades, no constituyen una buena solución para el descuelgue de zanjas. Esta preselección es relevante, pues aquí se definirán las alternativas que serán desarrolladas en las siguientes etapas del estudio.

4.3.1 Matriz de decisión

El objetivo de esta metodología es evaluar y priorizar una lista de opciones, mejorando la objetividad del proceso de selección por ser un método estructurado, sistemático, repetible y con resultados universales (numéricos).

El procedimiento consiste en ponderar numéricamente el grado de cumplimiento que cada opción de interés alcanza respecto al criterio de selección que se desea evaluar. Luego, estas ponderaciones se integran en una única calificación global (puntuación) de cada opción de interés y se escoge(n) la(s) idea(s) con mayor puntaje.

En la situación de disponer de varias alternativas complejas, que correspondería a esta situación, se utiliza el método de ponderación relativa en dos pasos:

- Proyección de alternativas.
- Calificación final de ideas.

Para disminuir la incertidumbre de las calificaciones se solicitó el apoyo de un grupo de expertos que en base a su experiencia, evaluaron mediante una encuesta, las cualidades de cada tecnología en una matriz, permitiendo visualizar la desviación de los resultados y la sensibilidad de cada cualidad en función del criterio experto evaluador.

4.3.1.1 Proyección de tecnologías

En este paso se pondera el grado de cumplimiento que tiene la tecnología en cada criterio, comparándola con un caso de referencia, que en este caso corresponde al sistema actual. La matriz se construye entonces colocando los criterios de selección en las filas y las tecnologías alternativas en las columnas. En las celdas intersección se coloca una de las siguientes tres posibilidades:

“MEJOR QUE” representada por un “1”,
 “IGUAL QUE” representada por un “0”,
 “MENOR QUE” representada por un “-1”.

La suma de signos + menos la suma de signos – de cada columna determina una calificación para la tecnología (respecto al caso referencia) y la comparación de los resultados permite definir si la tecnología continua, si se descarta o si debe combinarse con otra tecnología para seguir compitiendo. La suma de evaluaciones de cada columna determina la calificación para la tecnología con respecto al caso de referencia y los resultados permiten definir si la tecnología se descarta (evaluación menor o igual a “0”) o se debe continuar estudiando (evaluación mayor que “0”).

Para recurrir solo una vez al apoyo del grupo de expertos, se les solicitó a cada uno llenar la matriz con las calificaciones utilizadas en la segunda etapa, es decir, con dos grados más de precisión en relación al caso referencia (ver Tabla -4-1, Puntuación de Prioridad) y después fueron transformadas a la puntuación equivalente para la etapa de descarte (ver Tabla -4-1, Puntuación de descarte).

Tabla -4-1: Tabla de puntuaciones para matriz de ponderadores relativos

Cumplimiento	Puntuación de prioridad	Puntuación de descarte
Mucho peor que	1	-1
Peor que	2	
Igual que	3	0
Mejor que	4	1
Mucho mejor que	5	

El llenado de la matriz de descarte de alternativas se realizó por cada celda, considerando el promedio de la puntuación entregada por los expertos, previamente transformada a puntuación equivalente de descarte. Los resultados de la transformación y ponderación de los resultados de las matrices entregadas por el grupo de expertos son:

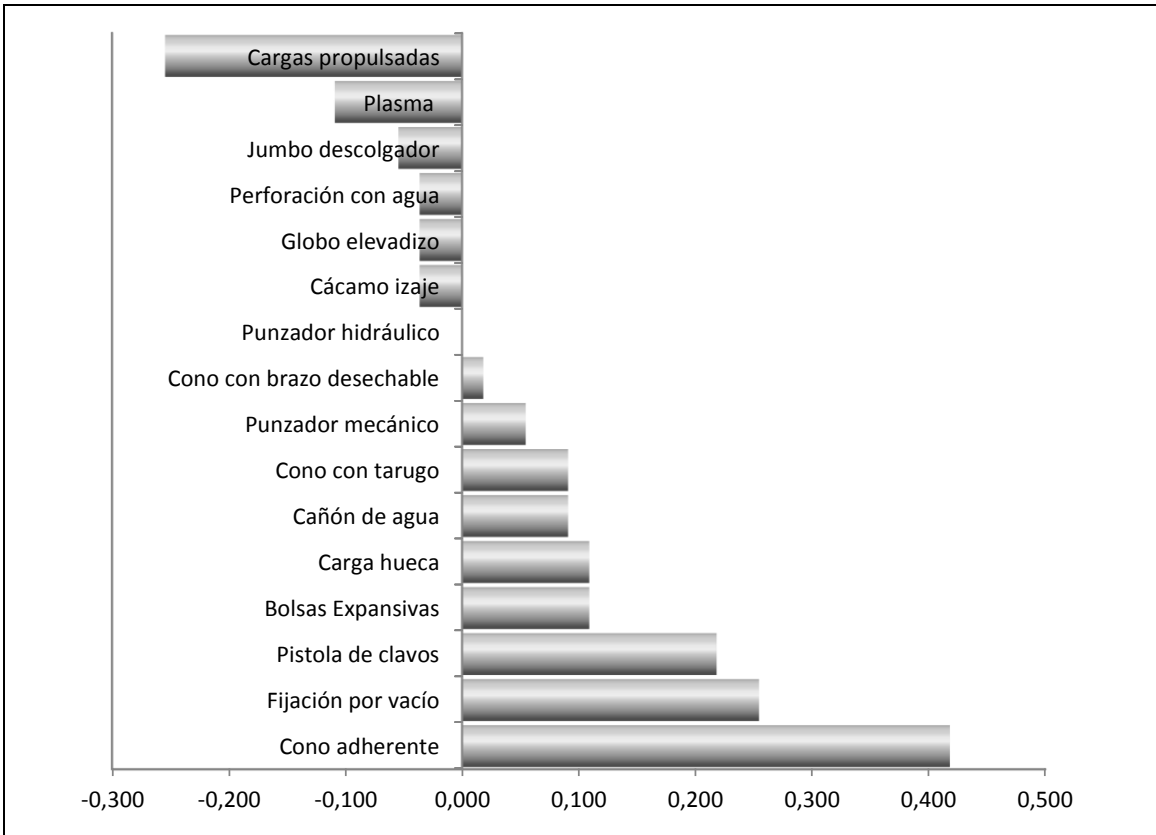


Figura 4-1: Resultado promedio de matrices de ponderadores relativos

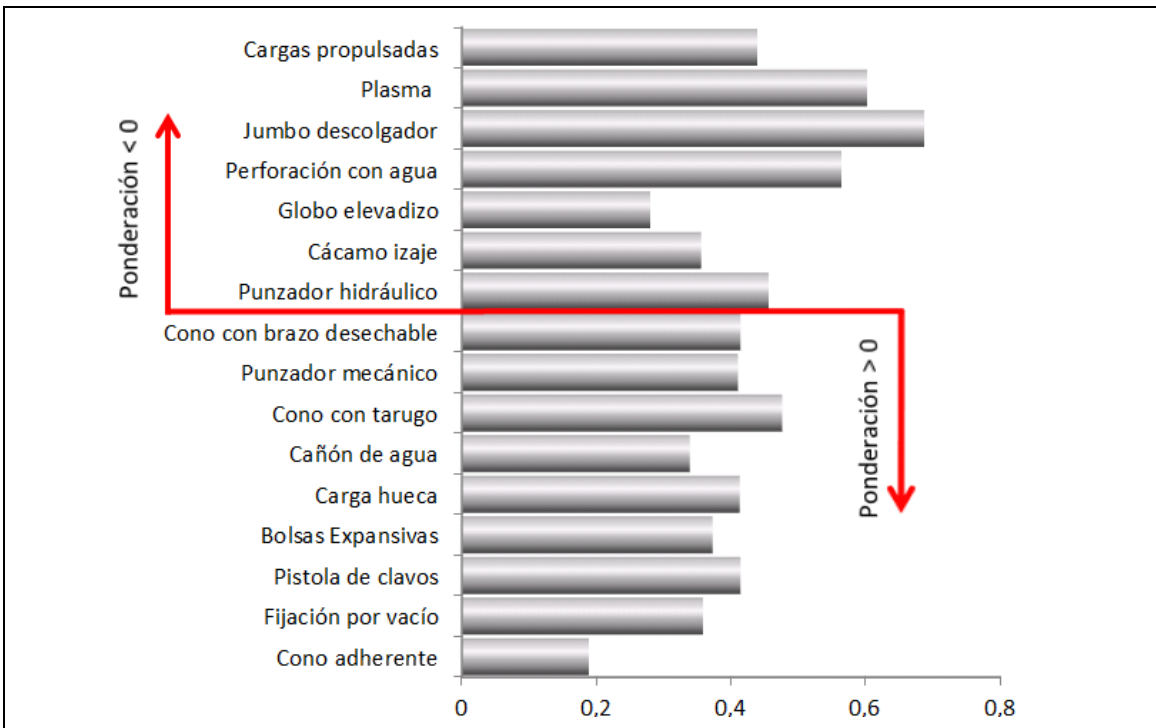


Figura 4-2: Desviación estándar para calificaciones de expertos

De los resultados anteriores (ver Figura 4-1) se observa que 7 alternativas deben ser descartadas, ya que el ponderador relativo asociado a cada una de ellas es menor o igual que cero.

En base a este resultado es posible indicar que las alternativas a considerar en la siguiente etapa del trabajo corresponden a los indicados en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Tabla de alternativas preseleccionadas

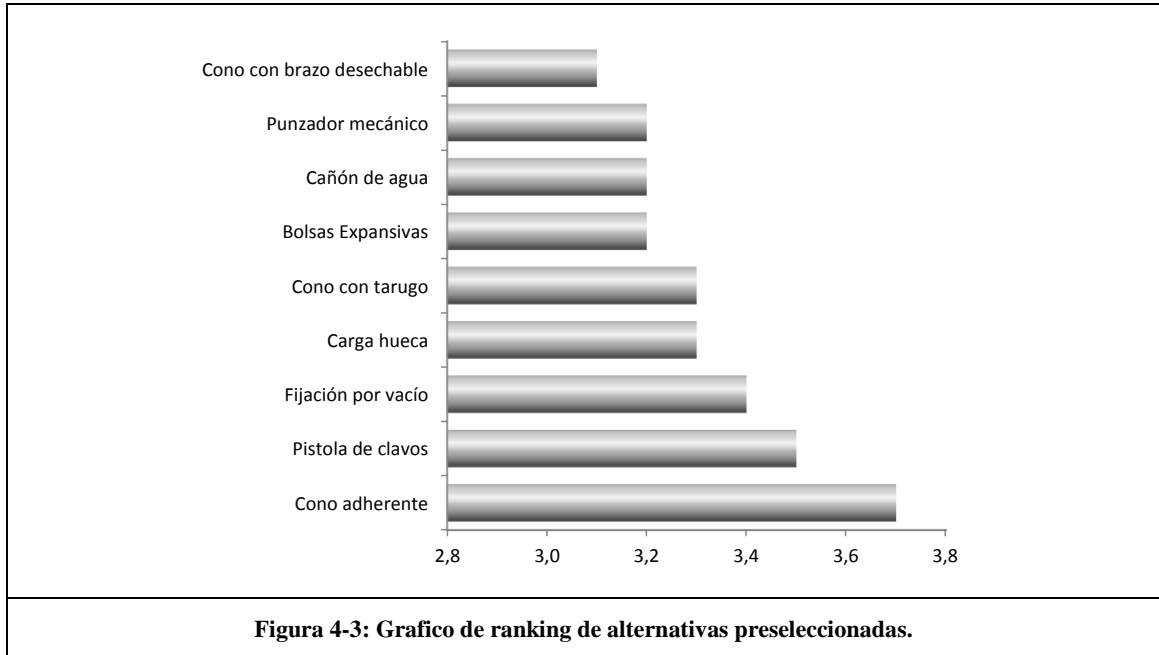
TECNOLOGÍA	PONDERADOR RELATIVO
Brazo telescópico con cono de pentolita adherente	0,42
Brazo telescópico con cono de pentolita fijado por vacío	0,25
Brazo telescópico con pistola para fijar anclaje para conos de pentolita	0,22
Brazo telescópico y carga hueca	0,11
Brazo telescópico / desechable y bolsas expansivas	0,11
Cañón de agua	0,09
Brazo telescópico , perforación pequeño diámetro y cono con tarugo	0,09
Punzador mecánico	0,05
Brazo telescópico desechable y cono de pentolita	0,02

4.3.1.2 Calificación final de las ideas

En esta etapa se evalúa el cumplimiento que tiene cada tecnología (resultados etapa anterior) en cada criterio de selección. Se utiliza un sistema de puntuación más detallado que el paso 1, que califica de 1 a 5 puntos el grado de cumplimiento respecto al caso de referencia. En este caso corresponde directamente al promedio de las calificaciones ponderadas entregadas por los expertos, para las tecnologías preseleccionadas.

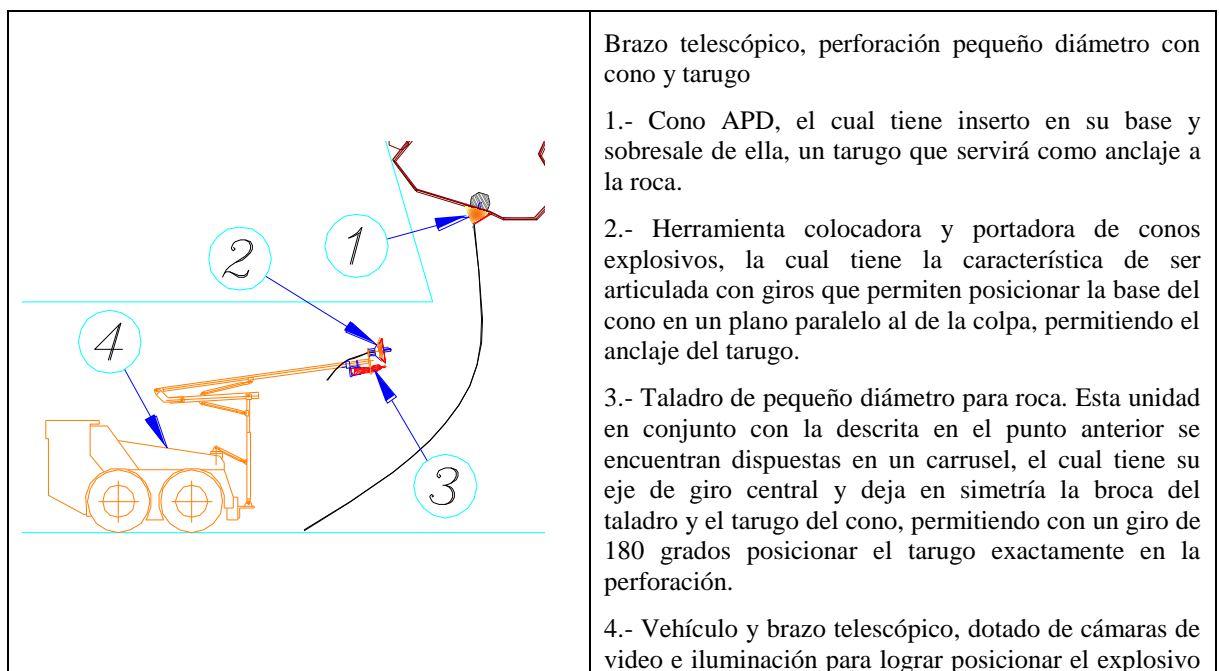
Tabla 4-3: Calificación de tecnología en base a cumplimientos de criterios

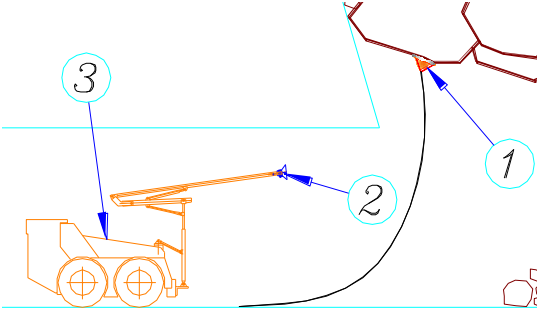
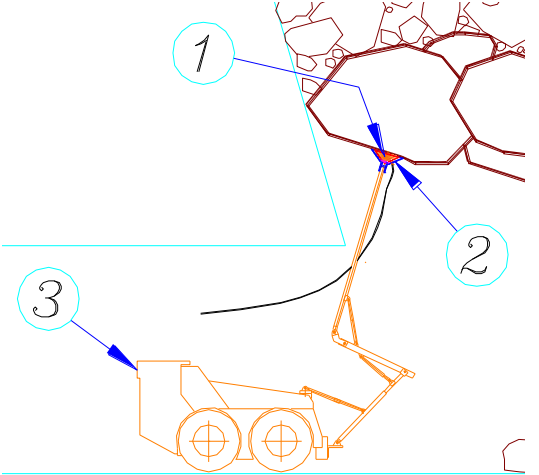
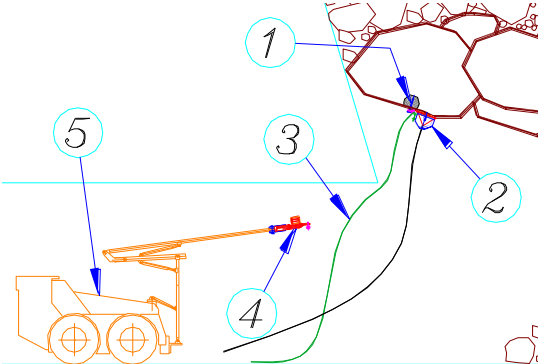
CUMPLIMIENTO	PUNTUACIÓN
Mucho peor que	1
Peor que	2
Igual que	3
Mejor que	4
Mucho mejor que	5



De los resultados (ver Figura 4-3) se puede observar que la tendencia de las alternativas preseleccionadas, es hacia aquellas tecnologías que no utilizan perforación convencional, tienen una operación automatizada (brazo telescópico) y son potencialmente aplicables a minería continua.

A continuación se presenta un cuadro resumen de las componentes para cada alternativa preseleccionada:

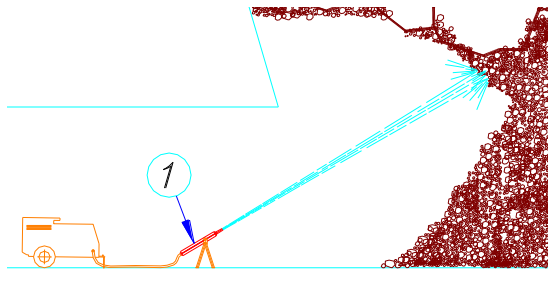
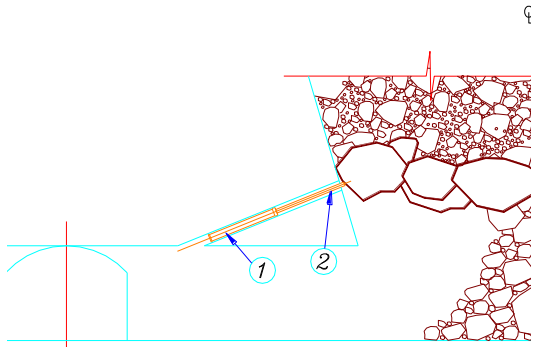


	<p>en las colpas que forman la colgadura.</p>
	<p>Brazo telescópico con cono pentolita adherente¹⁹</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- Cono APD con un agente adherente en la base. 2.- Herramienta colocadora y portadora de conos explosivos, la cual tiene la característica de ser articulada con giros que permiten presionar, posicionando la base del cono en perfecto contacto con las colpas. 3.- Vehículo y brazo telescópico, dotado de cámaras de video e iluminación para lograr posicionar el explosivo en las colpas que forman la colgadura. El brazo lleva incorporado una manguera de aire comprimido para limpiar el polvo de la superficie de la roca, la cual es extensible y retráctil que se mueve acoplada a los movimientos del brazo.
	<p>Brazo telescópico con cono de pentolita fijado al vacío</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- Cono APD. 2.- Unidad selladora al vacío que permite sostener el cono en contacto con la roca hasta la tronadura. 3.- Vehículo y brazo telescópico, dotado de cámaras de video e iluminación para lograr posicionar el explosivo en las colpas que forman la colgadura.
	<p>Brazo telescópico con pistola para fijar anclaje para conos de pentolita²⁰</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- Cáncamo de anclaje inserto en la roca mediante pistola de fijación directa 2.- Cono APD 3.- Pita de izaje de cono explosivo 4.- Pistola de fijación directa la cual dispara clavos de material de alta dureza los cuales tienen acoplado un aro en el cáncamo, que servirá para elevar el cono explosivo hasta la colgadura. 5.- Vehículo y brazo telescópico, dotado de cámaras de video e iluminación para instalar el anclaje en la posición deseada de la colgadura.

¹⁹ IM2 24/04, Junio 2006. Informe Final: “ Pruebas de explosivos, equipo reductor de bolones y equipo descolgador de zanjas”

²⁰ Manual de Sistema de Fijación Directa , HILTI

	<p>Brazo telescópico y bolsas expansivas</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.-Bolsa explosiva rellena de emulsión o ANFO. 2.- Vehículo y brazo telescópico, dotado de cámaras de video e iluminación para instalar el anclaje en la posición deseada de la colgadura. El brazo además debe contar con una unidad de inyección de explosivo para poder llenar la bolsa en la cavidad rocosa. Esta unidad debe moverse acoplada al brazo por lo que debe ser extensible y retráctil.
	<p>Brazo telescópico desechable y cono de pentolita</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- Cono APD. 2.- Brazo telescópico desechable con unidad porta explosivo.
	<p>Brazo telescópico y carga hueca</p> <p>Agente adherente que actúa como sistema de anclaje de la carga hueca.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2.- Explosivo de carga hueca. 3.- Vehículo y brazo telescópico, dotado de cámaras de video e iluminación para instalar la carga hueca en la posición deseada de la colgadura. El brazo además debe contar con una unidad porta carga hueca.

	<p>Cañón de agua</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- Cañón de agua. 2.- Bomba de alta presión y estanque de abastecimiento de agua.
	<p>Punzador mecánico</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- Barra de alta resistencia, que penetrará en el interior de la zanja generando un movimiento que desequilibre el encadenamiento de colpas. 2.- Cilindro de empuje, que dará la fuerza y potencia para que el movimiento de la barra.

4.3.1.3 Selección Final de Alternativas

Para realizar la selección final se utilizará el criterio de matrices de ponderación absoluta que consiste en calificar de manera absoluta sin utilizar un caso referencia. En esta etapa, donde previamente se ha realizado una preselección mediante ponderación relativa, se incluye la situación base o caso actual dentro de la matriz de calificación final, para evaluar la calidad de las tecnologías logradas respecto de la referencia.

El criterio utilizado en la preselección de alternativas tecnológicas, corresponde a un método de selección por sí solo. Sin embargo, en este estudio se aplicará también el criterio de matriz de ponderadores absolutos para verificar y validar la elección recomendada.

La selección final se realiza en dos etapas:

- Evaluación de criterios
- Matriz de evaluación final.

4.3.1.4 Evaluación de criterios

En esta etapa se hace una evaluación del peso relativo de los criterios de selección para el proyecto. Se califica la importancia que tiene cada criterio para la operación de descuelgue,

respecto de los otros criterios, en base a una puntuación predeterminada relacionada al nivel de importancia. En este caso se utiliza la siguiente tabla de puntuación:

Tabla 4-4: Escala de puntuación para Matriz de Evaluación de Criterios.

IMPORTANCIA	PUNTUACIÓN
Mucho menos importante	0,1
Menos importante	0,2
Igualmente importante	1
Más importante	5
Mucho más importante	10

Para el estudio, la puntuación “mucho más importante” es asignada a la cualidad considerada como indispensable en la operación y la “mucho menos importante” a aquella cualidad deseable que tiene menos afectado en la operación de descuelgue. La puntuación es asignada en base a criterio personal, considerando los antecedentes disponibles, como se muestra en Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Puntuación de cualidades²¹

CUALIDADES	PUNTUACIÓN
Riesgo para personal	10
Riesgo para sistema	7,5
Uso de tecnologías de apoyo	1
Eficiencia	3
Costos	2,6
Automatización	5
Nivel de desarrollo	1
Rango de aplicación	3
Simplicidad de operación	2,6
Interferencia con resto de operaciones	3
Compatibilidad con distintos diseños mineros	3

²¹ Puntuaciones corresponden a promedio entre puntuaciones realizadas por Soledad Maass V. y Mario Vicuña M.

4.3.1.5 Matriz de evaluación final

La matriz de evaluación final “mide” el grado de cumplimiento que cada alternativa tecnológica presenta para cada uno de los criterios definidos. Se utiliza una escala del 1 al 10 para evaluar cada criterio. La matriz se genera al ponderar estos valores con los pesos asignados a cada cualidad (ver Tabla 4-5).

Los resultados de esta matriz permiten ordenar las tecnologías en base al nivel de cumplimiento de las características identificadas como importantes para la operación, por lo que la opción que presente mayor puntaje, corresponde a la alternativa que se acerca más a la solución buscada. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Resultado de preselección.

MECANISMO	PUNTUACIÓN
Cono adherente	373,2
Fijación por vacío	362,6
Carga hueca	357,8
Punzador mecánico	357,6
Bolsas expansivas	346,2
Cono con brazo desechable	319,2
Pistola de clavos	299
Cono con tarugo	283,9
Cono con coligüe	215
Cañón de agua	178,9

4.3.1.6 Elección de la mejor alternativa

En este paso se escoge la alternativa que, según la evaluación, presenta los mejores resultados como solución al problema del descuelgue de zanjas. Existen técnicas (Análisis Jerárquico de la Decisión) que ayudan a valorar múltiples criterios. Los siguientes términos pueden ayudar a tomar la decisión según el resultado que se busque:

- **Maximizar**: Tomar la mejor decisión posible.
- **Satisfacer**: Elegir la primera opción que sea mínimamente aceptable satisfaciendo de esta forma una meta u objetivo buscado.
- **Optimizar**: La que genere el mejor equilibrio posible entre distintas metas.

La selección se realizará en base al criterio de maximizar, por cuanto se escogerán las alternativas tecnológicas de mayor puntaje.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 4-6, la mejor alternativa corresponde a la del cono de pentolita adherente. La segunda y tercera alternativas son el cono de pentolita fijado al vacío y la carga hueca, respectivamente.

4.4 Conclusiones de Selección de Tecnología para Descuelgue

Como resultado de esta etapa, se entrega una solución tecnológica para el descuelgue de mineral, correspondiente a la mejor alternativa de las identificadas en el levantamiento de tecnologías, que corresponde a la tecnología de cono explosivo adherente. Otras conclusiones de este capítulo son las siguientes:

- Para comparar y seleccionar tecnologías dentro de un grupo de alternativas, es recomendable aplicar metodologías de selección, basadas en criterios de selección, las cuales se basan en el cumplimiento de aquellos aspectos indispensables y deseables requeridos para lograr el objetivo de descuelgue.
- Los criterios de selección se definen en base a los requerimientos definidos para la solución, por lo que se hace indispensables, haber caracterizado el problema y conceptualizado en base a eso, la solución deseada.
- La determinación de los criterios de selección es un proceso no estructurado, a diferencia del método de selección, por lo que se debe actuar con máxima ecuanimidad, basándose en la mejor información disponible.
- Los criterios de selección son las cualidades y condiciones a satisfacer por la “tecnología” para ser exitosa.
- El proceso de selección se realiza en dos etapas; La primera busca reducir el número de alternativas y ordenarlas en un ranking y la segunda, entrega una tecnología recomendada. Los resultados de ambas etapas, entregan como mejor tecnología, la solución que utiliza conos explosivos de pentolita con adhesivo para anclarlo a la roca, lo que confirma la tendencia y finalmente permite obtener una recomendación.
- La alternativa tecnológica recomendada corresponde al sistema descolgador compuesto por vehículo, brazo telescópico y conos explosivos adherentes.

5.SISTEMA DE DESCUELQUE DE ZANJAS

5.1Introducción

Este capítulo tiene por objetivo entregar un diseño conceptual del sistema de descuelgue, tomando como base la recomendación para el descuelgue de zanjas resultante del proceso de selección de alternativas, correspondiente al sistema descolgador con conos adherentes.

La tecnología de cono explosivo adherente requiere integrarse dentro de un sistema de descuelgue, dado que constituye solo una parte de la solución. Para ello, es necesario conceptualizar la tecnología que considera complementariamente, un vehículo y un brazo telescópico.

Esta solución es conceptualizada como un equipo, donde se analiza la factibilidad técnica de poder construir cada una de las componentes que la integran, tomando como base los requerimientos establecidos para la solución, vistos en el Capítulo 3.3 y las tecnologías disponibles en el mercado que mejor se ajustan a esta conceptualización.

5.2Diseño conceptual de sistema de descuelgue

El diseño conceptual de la tecnología parte con definir cuáles son los requerimientos, basados en el problema de las colgaduras. La solución, llevada al contexto de la minería subterránea, significa disponer de un equipo ágil, que pueda acercarse hasta el borde del punto de extracción, sin quedar expuesto directamente a la proyección de piedras, realizar la maniobra de colocar la carga en altura y retirarse para posteriormente, realizar la tronadura. Considerando esta conceptualización global de la operación del equipo, se definen los siguientes requerimientos operacionales:

Movimientos: Los movimientos del brazo deben permitir elevar el explosivo hasta la colgadura y anclarlo, con adhesivo u otro mecanismo, para luego retirarse del interior de la zanja hasta una posición segura.

Alcances: El brazo debe tener un alcance máximo de 10 metros de distancia vertical al interior de la zanja. A este alcance se deben sumar las distancias requeridas para poder adherir la carga en distintos puntos dentro de la batea.

Sistema manipulador de explosivo: El diseño del brazo telescópico debe incorporar una componente que permita cobijar, elevar y posicionar la carga explosiva de manera segura, sin peligros de caída del explosivo en el transcurso de la operación.

Monitoreo y control: El diseño del brazo debe incorporar las tecnologías complementarias de visualización, iluminación y control a distancia.

Sistema de limpieza: Dadas las características del adhesivo, es necesario incorporar un sistema de soplado, con el objetivo de limpiar del exceso de polvo la superficie de la colpa en donde se desea adherir la carga explosiva.

Material: El brazo telescópico debe estar fabricado de materiales livianos y no ferrosos, para disminuir los requerimientos de contrapeso permitiendo la estabilidad de las operaciones y eliminar la estática, al menos de la componente que esté en contacto con el explosivo.

Operación: Los movimientos del brazo deben permitir que el operador pueda instalar la carga explosiva en el porta-cono, sin ingresar a la zona expuesta a caída de mineral.

5.2.1 Características del brazo telescópico

El diseño conceptual del brazo telescópico, utiliza componentes existentes en el mercado y evalúa la factibilidad técnica de adaptarlos a los requerimientos de la operación, considerando como principal restricción, lograr los alcances máximos definidos por las estadísticas de colgaduras y la estabilidad necesaria para colocar la carga explosiva en contacto con las colpas. Considerando los alcances del brazo telescópico y los movimientos necesarios para cubrir todas las posiciones requeridas dentro de la batea, se identifican cuatro componentes principales que lo integran, las que se detallan a continuación:

Componente horizontal: Componente de desplazamiento horizontal que ubica la carga explosiva al interior de la zanja, permitiendo que el vehículo y el operador se mantengan a una distancia suficiente para quedar fuera del alcance de caída de colpas. Por resguardo de seguridad, este brazo debe medir a lo menos 4,0 m en su posición extendida y debe tener la capacidad de soportar el torque generado por el peso del explosivo y las otras componentes del brazo y la fuerza requerida, para adherir el explosivo a la roca.

Unidad de rotación: Unidad que permite generar los movimientos de rotación lateral del brazo de levante.

Componente vertical: Componente de desplazamiento vertical, que realiza la operación de elevar la carga hasta una altura variable dentro de la zanja considerando como máximo 10 metros y ejercer la fuerza suficiente para que la carga pueda adherirse en la roca.

Manipulador de explosivo: Cabezal de soporte que permite sostener, posicionar y adherir la carga explosiva en contacto con las colpas de la colgadura.

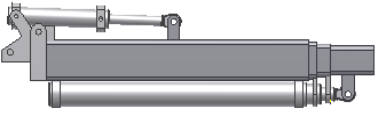
5.2.1.1 Componente horizontal

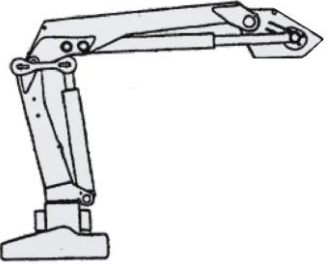

Esta componente tiene como finalidad proteger al operador y al vehículo de caídas sorpresivas de roca, permitiendo que realicen la operación fuera de la zona de riesgo, mediante una componente tecnológica que permita llegar al interior de la zanja. Los alcances que debe lograr esta componente dependen del diseño del punto de extracción y las dimensiones del vehículo y para su diseño se deben tener adicionalmente, las siguientes consideraciones:

- Velocidad en la operación.
- Peso reducido del equipo, ya que el equipo debe ser transportado por un vehículo de pequeñas dimensiones (camioneta, Bobcat o similar).
- Resistencia a la flexión provocada por el peso de la carga explosiva y la componente vertical.
- Compactación del equipo para el traslado.
- Debe ser un equipo sencillo y de fácil mantención.

Para definir esta componente, se realiza una búsqueda de alternativas dentro de las tecnologías disponibles en el mercado, determinando que las que mejor se ajustan a los requerimientos son las que se detallan en la Tabla 5-1:

Tabla 5-1: Tabla comparativa de alternativas tecnológicas para componente horizontal

DESCRIPCIÓN ALTERNATIVAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Brazo Telescópico Tipo Pluma</p>  <p>Se compone por una serie de cajones concéntricos que le da al sistema resistencia a la flexión y un cilindro que permite la apertura del conjunto.</p> <p>Puede estar compuesto de un único cilindro telescópico, controlando y mejorando su resistencia a la flexión con el diseño de cajón y sección cuadrada de sus piezas. Este tipo de equipo en diseños estándar compactos, logra extenderse hasta 5 metros y tiene una capacidad de levante de hasta 400kg.</p>	<p>Buena velocidad en la extensión del equipo, la cual puede ser desarrollada por cilindros hidráulicos o neumáticos. Este equipo tomaría unos 35 segundos para lograr una apertura máxima, dependiendo de las capacidades del cilindro.</p> <p>Buena resistencia a la flexión.</p> <p>Requerimientos de mantención únicamente en la parte del cilindro, debido a que el cajón opera mediante deslizamiento fierro-fierro, sin elementos de rodadura en su interior.</p> <p>Alta reducción en la extensión del equipo.</p> <p>Puede ser desarrollado mediante cilindro neumático debido a las bajas cargas que necesita contrarrestar (fricción entre los cajones).</p>	<p>Alto peso, aproximadamente 300kg.</p>

<p>Brazo Hidráulico</p>  <p>Entrega una gran resistencia a las fuerzas, debido a la forma de trabajo de los cilindros hidráulicos sobre las articulaciones. Su diseño permite la extensión necesaria, sin embargo se necesita un cilindro por cada sección de brazo que se utilice para su funcionamiento.</p>	<p>Buena velocidad en la extensión del equipo. La apertura del brazo hidráulico permitiría una apertura total en aproximadamente 25 segundos.</p> <p>Buena resistencia a la flexión.</p> <p>Adaptabilidad de cada uno de los brazos. Se pueden posicionar en ángulos independientes.</p>	<p>Alto peso, aproximadamente 450kg.</p> <p>Gran cantidad de piezas móviles.</p> <p>Se necesitan varios componentes de movimiento lineal (cilindros hidráulicos).</p> <p>Baja capacidad de compactarse, para el traslado.</p> <p>Se necesita un cilindro por cada sección de brazo, lo que aumenta los requerimientos de mantención.</p>
<p>Pantógrafo Hidráulico</p>  <p>Entrega una gran resistencia a las fuerzas, debido a la forma de trabajo de los cilindros hidráulicos que permiten movilizar las articulaciones. Permite la extensión necesaria para cumplir con los requerimientos del diseño, donde se considera la utilización de un cilindro por cada sección de brazo que se utilice para su funcionamiento.</p>	<p>Buena velocidad en la extensión del equipo. La apertura del brazo hidráulico permitiría una apertura total en aproximadamente 30 segundos.</p> <p>Buena resistencia a la flexión.</p> <p>Requiere pocos componentes de movimiento lineal (cilindros hidráulicos).</p> <p>Adaptabilidad de cada uno de los brazos. Se pueden posicionar en ángulos independientes.</p>	<p>Alto peso, aproximadamente 250kg.</p> <p>Gran cantidad de piezas móviles.</p> <p>Baja capacidad de compactarse, para el traslado.</p> <p>Se necesita un cilindro por cada sección de brazo que se utilice para realizar la extensión.</p>

5.2.1.2 Unidad de rotación

Esta unidad permite posicionar el sistema de levante en un ángulo de -20° a 90° en el plano perpendicular al eje de galería de zanja, cubriendo todo el arco posible de formación de colgaduras dentro de la batea. Esta unidad debe tener las siguientes características principales:

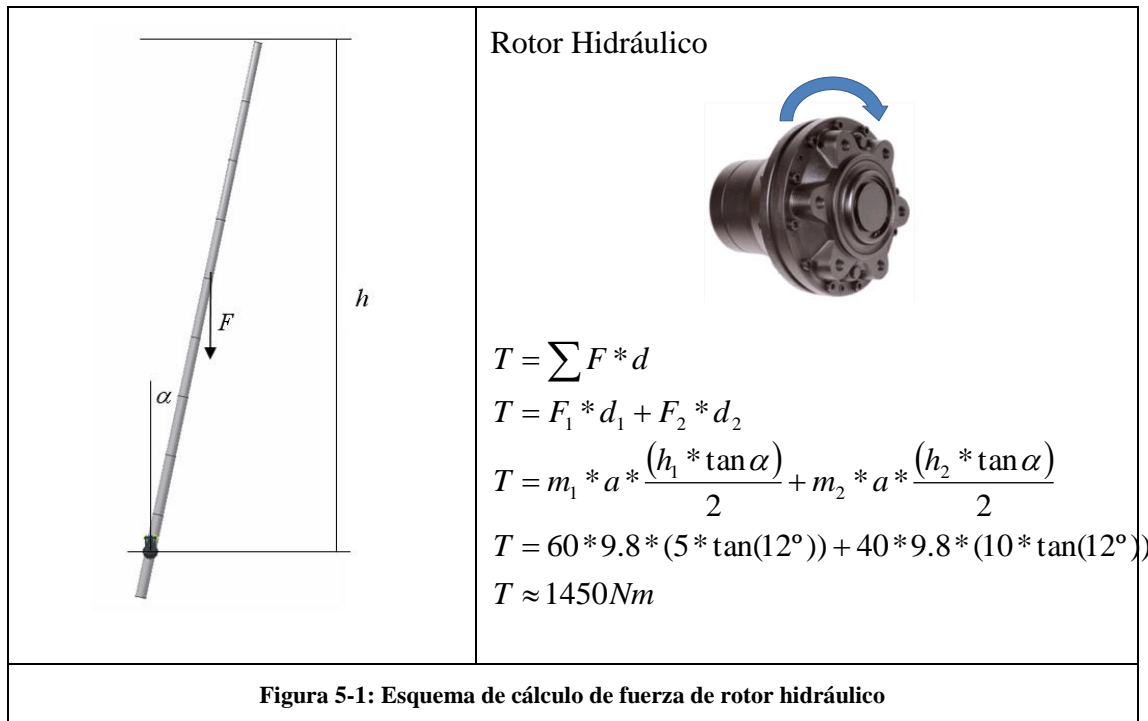
- Debe ser capaz de sostener la componente de levante.

- Debe tener la fuerza de soportar el torque generado por la rotación del brazo de levante en su posición de extensión máxima y con un ángulo que permita cubrir todo el ancho de la zanja.

Para esta componente, existen varias alternativas disponibles en el mercado, en donde se seleccionó el rotor hidráulico (Black Bruin BBR HD Rotator) que tiene un peso de 46Kg, una presión de trabajo de 250 bar, con capacidad de soportar un torque de 1600Nm (ver Figura 5-1) y puede soportar una carga máxima en dirección transversal de 8 toneladas.

El rotor en complemento con un cilindro de alta resistencia, es capaz de lograr todos los movimientos requeridos para la componente de levante, permitiendo movimientos hacia el frente y atrás en la dirección de ingreso a la zanja y hacia ambos costados (cajas), logrando el alcance a todas las posiciones en el interior de la zanja.

Para evaluar la compatibilidad de este rotor con el sistema, se calcula el torque generado por la componente de levante, considerando un peso máximo del conjunto de 100Kg y un ángulo máximo de trabajo de 12°. En esta situación, que corresponde a la posición más adversa, se tiene que el torque máximo que actúa sobre el sistema es de 1.450Nm, tal como se muestra en la Figura 5-1 .



Este cálculo verifica la capacidad del rotor de poder sostener la componente de levante y resistir torques generados por su extensión y movimientos.


5.2.1.3 Componente vertical


Esta componente tiene la función de elevar en el interior de la batea, la carga explosiva hasta contactarla con las colpas que forman la colgadura. Esta componente debe tener las siguientes consideraciones para el diseño:

- Velocidad en el levante de la carga explosiva.
- Debe ser liviano para poder ser trasladado y posicionado en el interior de la zanja
- Debe lograr generar una fuerza de a lo menos el equivalente a 30Kg (necesaria para adherir la carga explosiva a la roca).
- Debe ser un equipo de sencilla y fácil mantención.

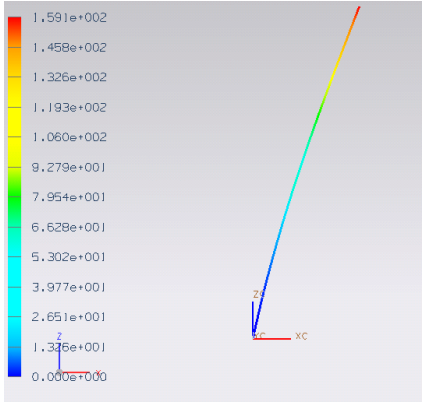
Para definir esta componente al igual que en el caso de la componente horizontal, se realiza una búsqueda de alternativas dentro de las tecnologías disponibles en el mercado, determinando que las que mejor se ajustan a los requerimientos son las que se detallan en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2: Tabla comparativa de alternativas tecnológicas para componente de levante.

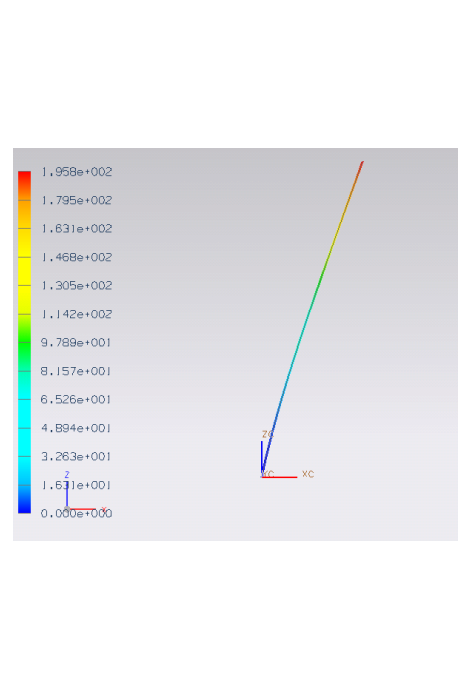
DESCRIPCIÓN ALTERNATIVAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Elevador Cilindro Telescópico</p>  <p>Altamente utilizado en el levante de cargas pesadas. Utiliza presiones neumáticas bajas para el levante y tiene una buena capacidad de compactación en el punto de cerrado. Otras características son:</p> <p>Capacidad de carga de 120 kg</p> <p>Alcance máximo de 9,8m</p> <p>Peso del equipo 60 kg</p> <p>Longitud compacto 1,2m</p> <p>Presión de trabajo 25 PSI</p>	<p>Buena velocidad en la elevación del equipo, en donde como referencia se tiene que la apertura total se puede conseguir en aproximadamente 20 segundos.</p> <p>Bajo costo de fabricación.</p> <p>Bajo peso, aproximadamente 45 kilos.</p> <p>Puede ser adaptada a cualquier tipo de brazo posicionador por su simpleza y bajo peso.</p> <p>Bajas presiones de funcionamiento.</p>	<p>Debilidad estructural que limita su capacidad solo a resistir fuerzas verticales. La aplicación de fuerzas en otras direcciones genera excesiva flexión del brazo.</p> <p>Sólo puede ser utilizada para el levante en forma vertical, debido a que cargas en otras direcciones generan flexión del brazo, lo que puede ser perjudicial para los mecanismos de extensión.</p>

<p>Elevador de Placas</p>  <p>Trabaja a través de poleas, las cuales van extendiendo cada una de las placas que se deslizan por rieles entre ellas. El alcance depende del número de placas. Posee buena resistencia a la flexión sólo en una dirección y en su extensión máxima, puede presentar altas oscilaciones. . Otras características son:</p> <p>Capacidad de carga de 150 kg</p> <p>Alcance máximo de 9,2m</p> <p>Peso del equipo 100 kg</p> <p>Longitud compacto 1,6m</p>	<p>Adaptabilidad de cada uno de los brazos, se pueden posicionar en ángulos independientes.</p>	<p>Alto peso, aproximadamente 110kg.</p> <p>Baja velocidad de apertura, aproximadamente 1,5 minutos.</p> <p>Gran cantidad de piezas móviles.</p> <p>Se necesitan varias componentes de movimiento lineal (cilindros hidráulicos).</p> <p>Poca capacidad de compactarse para el traslado.</p> <p>Se necesita un cilindro por cada sección de brazo que se utilice para realizar la extensión.</p>
--	---	--

Adicionalmente, se solicitó a profesionales expertos mecánicos que realizaran para ambas alternativas tecnológicas, un análisis de oscilaciones utilizando elementos beam²², según condiciones de borde establecidas para la operación, con parámetros de entrada de altura de 10m y el tipo de sección de la componente de levante, con el fin de cuantificar la desviación que tendría la carga explosiva en el escenario de máxima extensión. Los resultados se muestran a continuación:

GRÁFICA	RESUMEN ANÁLISIS
	<p>Cilindro Telescópico</p> <p>Se consideró un cilindro principal exterior de diámetro de 100mm y de 3mm de espesor, según las consideraciones de cargas estimadas y un ángulo máximo de inclinación de 12°.</p> <p>Los resultados de las simulaciones entregan que el brazo está expuesto a un desplazamiento producido por pandeo y flexión máximo estimado de 162mm en el punto superior, con tensiones de trabajo de 52MPa. Es decir el rango de oscilaciones esperado es de aproximadamente 32cm.</p>

²² Elementos 1D que permiten realizar cálculos eficientes y veloces para estructuras tipo de tipo viga (perfiles estructurales, placas, tubos, etc); el software utilizado es el NX6 como modelador y Nastran como solver para el análisis de los elementos finitos.

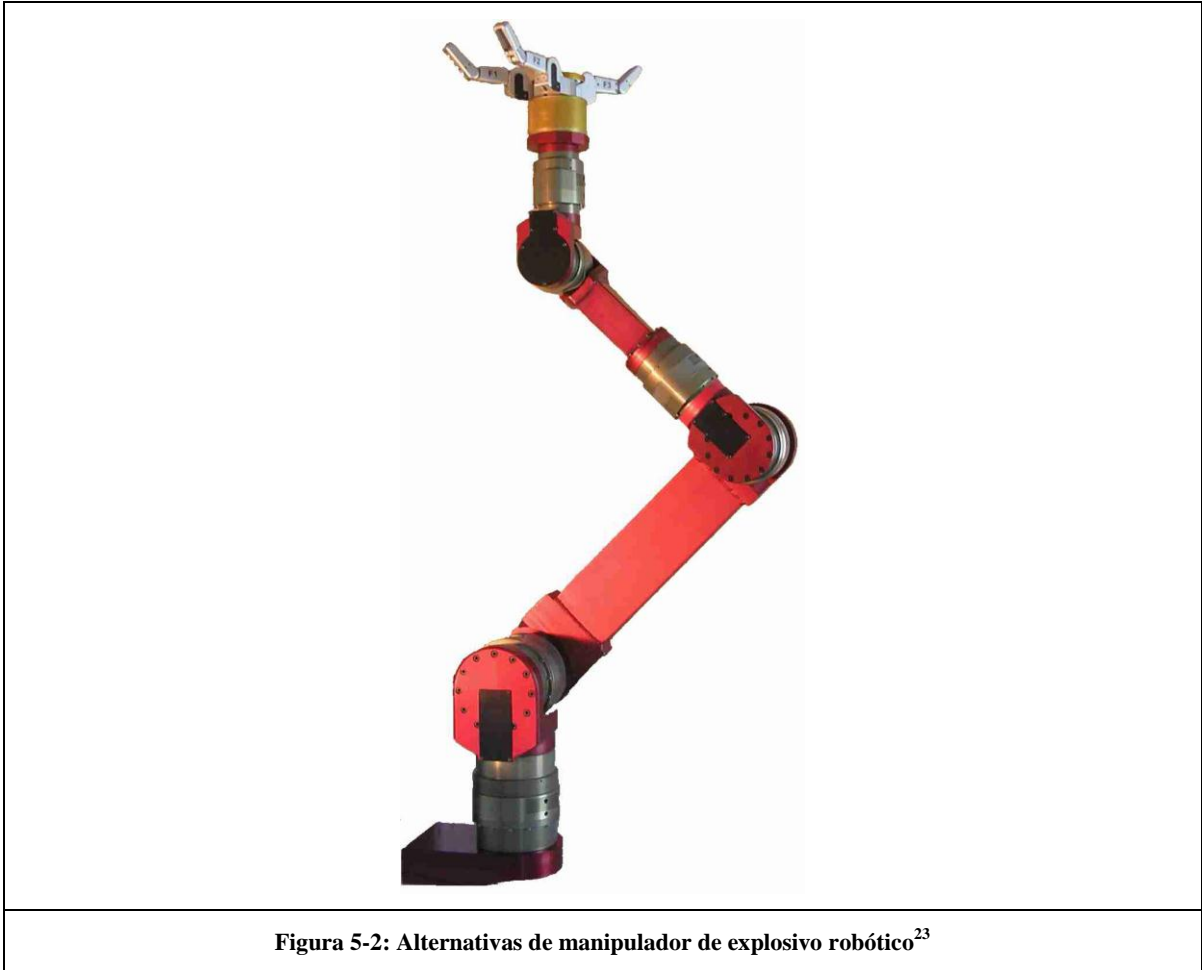
	<p>Elevador de Placas</p> <p>El elevador de placas, considerando una geometría de diseño tipo C de características 300x100x3 que entrega la resistencia estructural para poder trabajar según las cargas consideradas y un ángulo de 12°. Según los cálculos estructurales, para una altura de 10m, el sistema de levante trabajaría con una deformación aproximada de 195mm y con tensiones de trabajo de 136MPa.</p> <p>Se considera extensión netamente vertical, que corresponde a la mejor situación para esta tecnología, con una configuración de placas tipo C de 300x30x3 (placa plana y riel de 30 mm para el deslizamiento) y un ángulo de desviación de 1° debido al ajuste de las placas, al posicionarse una al lado de la otra.</p> <p>Los resultados entregan que el sistema de placas en extensión vertical se desplaza 357mm y trabaja con una tensión de 80 MPa. En este resultando no se considera ninguna de las piezas mecánicas que lo conforman y únicamente se incluyen las secciones que componen los elementos placas.</p>
---	--

5.2.1.4 Manipulador de explosivo

Esta componente tiene por objetivo sostener el explosivo, posicionarlo en contacto con las colpas y presionarlo para lograr la adherencia a la roca. Los movimientos que se requieren para esta componente son complejos debido a que deben ser movimientos suaves y precisos, que aseguren la estabilidad del explosivo durante toda la manipulación y también, la correcta colocación en contacto con las colpas. El manipulador de explosivo debe tener las siguientes consideraciones para el diseño:

- Debe permitir la ubicación de la carga explosiva y mantenerla en posición vertical en el momento de realizar la elevación.
- Al momento de posicionar la carga explosiva, el manipulador debe adaptarse a las irregularidades y a la inclinación de la superficie en la cual se va a adherir.
- Debe transmitir presión sobre la carga, para que esta no tenga desplazamientos y se logre el completo contacto entre la base del cono con adhesivo y la superficie rocosa.
- Debe soltar la carga una vez adherida, sin generar movimientos que la puedan desprender sorpresivamente.

En base a un levantamiento de tecnologías disponibles en el mercado, se identificaron varias soluciones que podrían adaptarse para esta aplicación, siendo las más recomendables aquellas que presentan movimientos precisos y suaves, donde empresas robóticas han desarrollado sistemas de manipulación con estas características para distintas industrias, ver Figura 5-2. La selección de ella debe realizarse en base a pruebas en terreno, por lo que para este estudio se considera como una componente disponible.



5.2.2 Selección de componentes para integrar brazo telescópico

Para seleccionar las componentes del brazo telescópico, se presenta un análisis comparativo de las opciones presentadas en el punto anterior, considerando cada componente de forma individual y también, el conjunto integrado de ellas.

Del levantamiento de tecnologías se consideran dos alternativas para la componente horizontal, cuyas principales características se resumen en la Tabla 5-3 y dos para la componente de levante, cuyas principales características se resumen en la Tabla 5-4. Estas combinaciones entregan cuatro sistemas para descuelgue.

²³http://www.robotnik.es/ilsupload/robotnik_brazos_brazomodular.pdf

Tabla 5-3: Características para alternativas de componente horizontal

CARACTERISTICAS	BRAZO EXTENSIBLE TIPO PLUMA	BRAZO PANTOGRAFO
Tiempo estimado para extensión	35 s.	30 s.
Potencia necesaria para	15 HP	20 HP
Cargas de levante soportadas	400 Kg.	350 Kg.
Distancias capaces de extender	4000mm.	4200mm.
Tamaño mínimo del equipo	1200mm x 400mm	1400mm x 750mm
Peso aproximado del equipo	300Kg.	350Kg
Estabilidad en la operación	Alta resistencia a la flexión	Alta resistencia a la flexión
Aplicación de operación remota	Aplicable	Aplicable

Tabla 5-4: Características para alternativas de unidad de levante

EVALUACION DE CARACTERISTICAS	CILINDRO TELESCOPICO	ELEVADOR DE PLACAS
Tiempo estimado para extensión	20 s.	90s.
Potencia necesaria para funcionamiento	25 PSI	10HP (estimado)
Cargas de levante soportadas	120Kg.	150Kg.
Distancias capaces de extender	9800mm.	9200mm.
Tamaño mínimo del equipo	1200mm x 200mm	1500mm. x 450mm (aproximado)
Peso aproximado del equipo	60Kg.	130Kg.
Estabilidad en la operación	Media (solo cargas verticales)	Media (carga vertical y en dirección corte placas)
Aplicación de operación remota	APLICABLE	APLICABLE
Adaptación de cabezal propuesto	APLICABLE	APLICABLE
Protección mediante fuelle del sistema	APLICABLE. Este debe ser capaz de variar su tamaño en relación 1:8.	APLICABLE. Este debe ser capaz de variar su tamaño en relación 1:8.

La Tabla 5-5 muestra un análisis comparativo de las principales características, ventajas y desventajas para las cuatro soluciones presentadas como alternativas para el diseño de brazo descolgador.

Tabla 5-5: Tabla comparativa de alternativas para brazo telescópico.

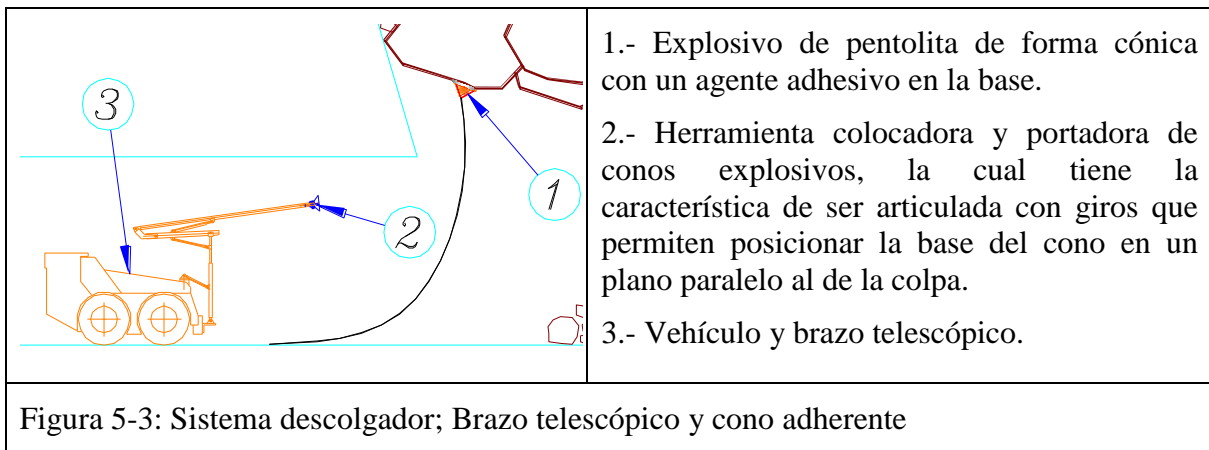
	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4
Sistema integrado Horizontal-Vertical	Cilindro telescópico y elevador cilindro telescópico	Pantógrafo y elevador de placas	Cilindro telescópico y elevador de placas	Pantógrafo y elevador cilindro telescópico
Estabilidad del posicionador	Gran resistencia homogénea a la flexión producida por las cargas en la punta.	Buena resistencia a las cargas verticales en la punta, pero baja resistencia al torque si el elevador se encuentra en ángulo.	Gran resistencia homogénea a la flexión producida por las cargas en la punta.	Buena resistencia a las cargas verticales en la punta, pero baja resistencia al torque si el elevador se encuentra en ángulo.
Estabilidad elevador	Alta estabilidad estructural por el tipo de sección del elevador, con una deflexión máxima de 162mm con una tensión de 52MPa	Debilidad estructural debido al tipo de sección, generando deflexión máxima de 195mm con una tensión de 132MPa	Debilidad estructural debido al tipo de sección, generando deflexión máxima de 195mm con una tensión de 132MPa	Alta estabilidad estructural por el tipo de sección del elevador, con una deflexión máxima de 162mm con una tensión de 52MPa
Costo aproximado	\$14.250.000	\$10.110.000	\$12.510.000	\$11.850.000
Peso estimado posicionador	120 Kg	90 Kg	120 Kg	90 Kg
Peso estimado elevador	100 Kg	180 Kg	180 Kg	120 Kg
Peso estimado equipo	240 Kg	270 Kg	300 Kg	210 Kg
Tiempo de trabajo estimado	55 s	120 s	125 s	50 s
Potencia de Funcionamiento	15 HP	20 HP	15 HP	20 HP
Mantenibilidad del posicionador	El sistema desliza al roce y sólo lo compone el cilindro telescópico, lo que reduce la tasa de fallas.	Gran cantidad de piezas movibles que pueden generar fallas en el equipo.	El sistema desliza al roce y solo lo compone el cilindro telescópico, lo que reduce la tasa de fallas.	Gran cantidad de piezas movibles que pueden generar fallas en el equipo.
Mantenibilidad del elevador	Compuesto de un único cilindro telescópico, lo que reduce la tasa de fallas.	Gran cantidad de elementos y piezas, que pueden generar fallas en el equipo.	Gran cantidad de elementos y piezas, que pueden generar fallas en el equipo	Compuesto de un único cilindro telescópico, lo que reduce la tasa de fallas.

En base a los resultados del análisis comparativo entre las distintas combinaciones de alternativas para integrar el brazo telescópico, se considera que la Alternativa 1 posee el mayor potencial como solución, ya que es la alternativa que presenta mayor estabilidad para enfrentar las operaciones en la máxima extensión, tiene menor cantidad de partes móviles, es de fácil operación, requiere poca mantención y tiene bajas probabilidades de fallas sorpresivas, ver Tabla 5-5.

5.2.3 Sistema Integrado de Descuelgue de Zanjas

El sistema de descuelgue recomendado corresponde a un equipo dotado de un brazo telescópico con componentes telescópicas que permiten desplazamientos horizontales y verticales, los cuales tienen como principal objetivo llevar la carga explosiva con adhesivo hasta las colpas que forman la colgadura, posicionarla, adherirla y luego retirarse hasta una posición segura para realizar la tronadura (ver Figura 5-3). La componente de levante debe incorporar tecnologías de iluminación y monitoreo a distancia, para visualizar la condición de la colgadura y guiar la carga explosiva hasta una posición estratégica determinada por el operador. La operación del equipo se realiza desde el equipo para el traslado y a distancia mediante un sistema control remoto, para la operación. Las cualidades del sistema son las siguientes:

- No emite vibraciones en la operación, manteniendo la condición original de equilibrio de la colgadura
- Las componentes extensibles del brazo y el manejo con control remoto a distancia, permiten resguardar la seguridad del operador y el vehículo, ubicándolos fuera del área de exposición a caídas de colpas
- Es aplicable en colgaduras de hasta 10 m de altura
- Es compatible con sistemas automatizados
- Permite ubicar correctamente la carga explosiva optimizando su uso y el efecto en la colgadura.
- El sistema puede compactarse perfectamente para el traslado y posicionamiento al interior de la mina.
- El sistema no necesita de gran espacio para realizar el movimiento del brazo telescópico, ajustándose a las dimensiones de las calles y galerías de zanjas, considerándose como mínimo una sección de 3,6m x 3,6m.
- Permite un manejo sencillo para lograr el posicionamiento mediante cuatro sistemas de ubicación: cilindro telescópico de extensión, cilindro de posicionamiento angular, rotor de posicionamiento angular y cilindro telescópico de levante.
- La reducida cantidad de elementos motrices disminuye la tasa de fallas del equipo.
- Las componentes del brazo telescópico, entregan buena estabilidad estructural en ambas direcciones de posicionamiento.



5.2.4 Descripción de la operación




El sistema de cámaras a distancia instaladas en el brazo telescópico permite al operador identificar de modo general el tipo de colgadura.

El operador entonces moviliza el brazo hasta aquel punto estratégico para posicionar la carga explosiva y comienza la operación con el manipulador de explosivo para adherir el cono explosivo a la roca que forma las colgaduras. Al momento de adherir el cono a la roca, el brazo debe ejercer presión permitiendo la distribución del adhesivo sobre toda la superficie disponible para el contacto. Una vez pegada la carga, el brazo realiza los movimientos requeridos para retirarse de la batea y luego desplazarse hasta una zona segura y autorizada para poder iniciar la tronadura secundaria.

5.2.5 Restricciones

- Para mejorar la adherencia del cono a la roca, se recomienda seleccionar una superficie para posicionar la carga, que no presente excesos de polvo suelto o agua circulando en exceso.
- Se requiere ejercer una presión mínima para poder adherir el cono a la roca.
- La aplicación de esta tecnología podría no dar buenos resultados en colgaduras formadas por finos compactados. Esto debe ser evaluado en pruebas en terreno, cuantificando el éxito del resultado en esta aplicación.

A continuación se muestra esquemáticamente, la secuencia de movimientos del brazo telescópico, que permiten la operación en el interior de la batea.

	<p>1. Cambio de posición de traslado a primera posición de operación. Este movimiento no incorpora extensión de ninguna de sus componentes.</p>
	<p>2. Extensión de componente horizontal, que permite ubicar al operador y al vehículo a una distancia de seguridad, fuera de la zona de exposición a caída de colpas.</p>
	<p>3. Extensión en la vertical, hasta contactar con las colpas que forman la colgadura</p> <p>4. Movimientos de manipulador de explosivo para adherir la carga explosiva a las rocas de las colgaduras.</p>
<p align="center">Figura 5-4: Movimientos generales del brazo telescópico.</p>	

En la Figura 5-5, se muestra el diseño conceptual de la alternativa tecnológica recomendada para el descuelgue de zanjas.



Figura 5-5: Conceptualización del equipo descolgador de zanjas

La solución de descuelgue de zanjas recomendada es factible desde el punto de vista técnico y económico, adicionalmente satisface la necesidad de otorgar seguridad al operador que realiza la maniobra y constituye la mejor alternativa para reemplazar la actual práctica de descuelgue de zanjas. Esta tecnología como cualquier prototipo, debe ser fabricado y validado en función de un protocolo de pruebas establecido que verifique el cumplimiento de todos los aspectos funcionales y operativos que son de importancia para la operación, posterior a lo cual, existe una etapa de mejoramiento de prototipo en donde se incorporan las mejoras a todas las vulnerabilidades identificadas en las pruebas realizadas en terreno.

5.3 Conclusiones de Sistema de descuelgue de zanjas

Como resultado de este capítulo se obtiene el diseño conceptual de un sistema descolgador de zanjas que integra un vehículo operado con control remoto, un brazo telescópico dotado de cámaras e iluminación y la carga explosiva con adhesivo para generar el descuelgue. Las componentes del sistema, son tecnologías disponibles en el mercado, que logra llegar a las alturas máximas de colgaduras y movimientos exigidos para el éxito de la operación, considerando los requerimientos planteados en la conceptualización de la solución. Este sistema constituye una

alternativa factible técnicamente y la base para futuras mejoras y optimizaciones tecnológicas a este diseño.

Las principales características de la tecnología de descuelgue son:

- Mayor seguridad en la operación
- Menor tiempo de maniobra, para colocar la carga explosiva
- Mayor eficacia, debido a la correcta postura del cono en contacto con la roca.
- No emite vibraciones en la operación, manteniendo la condición original de equilibrio de la colgadura
- Las componentes extensibles del brazo, permiten resguardar la seguridad del operador y el vehículo, ubicándolos fuera del área de exposición a caídas de colpas
- Es aplicable en colgaduras de hasta 10 m de altura
- Es compatible con sistemas automatizados
- Permite ubicar correctamente la carga explosiva optimizando su uso y el efecto en la colgadura.
- El sistema puede compactarse perfectamente para el traslado al interior mina.
- El sistema no necesita grandes secciones de galerías para realizar el movimiento del brazo telescópico, ajustándose a las dimensiones de las calles y galerías de zanjas, considerándose como mínimo una sección de 3,6m x 3,6m.
- Permite un manejo sencillo para lograr el posicionamiento mediante cuatro sistemas de ubicación: cilindro telescópico de extensión, cilindro de posicionamiento angular, rotor de posicionamiento angular y cilindro telescópico de levante.
- La reducida cantidad de elementos motrices disminuye la tasa de fallas del equipo.
- Las componentes del brazo telescópico, entregan buena estabilidad estructural en ambas direcciones de posicionamiento.

6.EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE DESCUELQUE

6.1Introducción

Este capítulo tiene por objetivo presentar la evaluación económica del uso de la tecnología, cuantificando el costo operacional por intervención (US\$/evento) y el impacto en el costo operacional de extracción (US\$/ton). El análisis considera la opción de utilizar 1 y 2 operadores y se complementa, con el cálculo del costo de la práctica actual, considerado el caso de referencia.

Mediante el uso de un software de simulación (Promodel), se realizaron simulaciones de la capacidad productiva de una unidad, definida como una calle de producción con 16 puntos de extracción, donde el uso de la tecnología fue incorporada como una disminución en el tiempo inhabilitado por colgaduras de cada punto, para una curva específica de frecuencia de eventos. Esto se basa en el supuesto que con la tecnología de descuelgue, el posicionamiento del explosivo será adecuado, mejorando los resultados de la operación, que para este análisis se mide como un porcentaje de eficacia de la intervención. A continuación se presentan las consideraciones y los resultados de la evaluación económica.

6.2Evaluación caso de referencia

Como una referencia para este estudio, se realiza la evaluación de la operación de descuelgue actual, medida como costo por intervención (US\$/intento). Los parámetros considerados son los que se indican a continuación.

6.2.1Parámetros de estimación

Producción: La evaluación considera una producción base promedio de 10.000 tpd, como tamaño representativo de un sector típico.

Índice de colgaduras: Dada la variabilidad que presenta este índice en relación a la mina y porcentaje de extracción, se consideran 3 escenarios, que corresponden a índices de colgaduras de 3 minas de Codelco-División El Teniente, año 2007 [12] .

Tabla 6-1: Índices de colgaduras considerados para la evaluación.

Índice de colgaduras	Diablo Regimiento	Reservas Norte	Teniente 4 Sur
Nºeventos /1000t	0,9	2,5	4

Mano de Obra: En el sistema de descuelgue actual se consideran 2 personas por cuadrilla para realizar la operación, las cuales dentro de la operación de reducción secundaria destinan aproximadamente un 30% del tiempo a colgaduras.

- Jefe cuadrilla: Encargado de estimar la carga explosiva, hacer el pedido de explosivos/accesorios y ubicar la carga explosiva en la colgadura.
- Ayudante: Apoyo al jefe de cuadrilla.

Tabla 6-2: Parámetros Mano de Obra

Precio Promedio Mano de Obra Rol B	US\$/año	43.000
Días por mes	días/mes	30
Sistema de turno	Tº/día	3
Factor de Continuidad (Nº cuadrillas)		4
Factor de Ausentismo		1,17
Costo Promedio Mano de Obra	US\$/H-día	119,4
Costo Proporcional Mano de Obra (30%)	US\$/H-día	35,8

Insumos: Los principales insumos corresponden a las cargas explosivas y accesorios de tronadura, los que se resumen en la Tabla 6-3. Se considera el uso de una unidad de APD por intervención.

Tabla 6-3: Resumen insumos explosivos

ÍTEM	UNIDAD	PRECIO US\$/UN	CANTIDAD UN/LARG.	COSTO US\$/LARG.
Cordón detonante	m	0,2	20,0	4,0
Explosivo APD 1.500	un	10,0	1,0	10,0
Fulminante	un	1,6	1,0	1,6
Total Explosivos				15,6

Otros insumos requeridos por la operación, se presentan en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4: Otros Insumos

ÍTEM	UNIDAD	PRECIO US\$/UN	CANTIDAD UN/LARG.	COSTO US\$/LARG.
Coligües	un	1,0	3,0	3,0

6.2.2 Costo caso de referencia

Para estimar el costo de descuelgue del sistema actual, primero se han estimado los tiempos requeridos por intervención y la productividad de la cuadrilla, compuesta en este caso por dos operarios. Se ha supuesto un turno efectivo de 180 min/T° y una efectividad del sistema de 70%, lo que implica que el 30% de las colgaduras debe tener un segundo intento, en el supuesto que con el sistema actual, se mejora la ubicación y direccionamiento del explosivo, logrando mejorar los resultados.

Tabla 6-5: Tiempos de Descuelgue - Sistema Actual

Inspección y coordinación	min	5
Colocación de carga	min	20
Evacuación y ventilación	min	15
Tiempo Total	min	40

Tabla 6-6: Productividad Cuadrilla - Sistema Actual

Cuadrilla	H/Cdlla	2
Tiempo Efectivo	min/T°	180
Tiempo Descuelgue	min	40
Productividad	N° larg./T°	4,5
Efectividad	%	70%

El resultado del cálculo de costo por intervención para la práctica actual, se resume en la Tabla 6-7.

Tabla 6-7: Costo por intervención, caso de referencia.

ESCENARIO	N°EVENTOS /1000T	0,90	2,50	4,00
Producción	tpd	10.000	10.000	10.000
Colgaduras	N° eventos/día	9	25	40
Largaduras	N° larg./T°	4	12	19
Cuadrillas	Cdlla/T°	1,0	3,0	5,0
Dotación	H-día	10	28	47
Costo Mano de Obra	US\$/H-día	35,8	35,8	35,8
	US\$/día	358	1.003	1.684
	US\$/larg.	39,8	40,1	42,1
Explosivos	US\$/larg.	15,6	15,6	15,6
Coligües	US\$/larg.	2,0	2,0	2,0
Costo Total	US\$/larg.	55,4	55,7	57,7
	US\$/t	0,05	0,14	0,23

6.3 Evaluación de tecnología de descuelgue

La evaluación económica de la tecnología recomendada, considera los índices de colgaduras utilizados para el caso de referencia y además, supone la operación del sistema con 1 o 2 operadores.

6.3.1 Parámetros de estimación

Mano de Obra: La operación del equipo descolgador podría ser realizada por una persona, sin embargo por restricciones de seguridad de faenas subterráneas, se evalúa también el escenario con 2 personas (un operador del equipo y un ayudante). Los parámetros de mano de Obra son los mismos usados en el caso de referencia (Tabla 6-2), que consideran una dedicación de la cuadrilla de 30 % para el descuelgue y el resto del tiempo destinados a otras funciones.

Equipo: Para cuantificar el costo del equipo descolgador, se utilizan los costos actualizados de una tecnología prototipo²⁴. Los parámetros asociados al equipo se resumen en las tablas siguientes:

Tabla 6-8: Estimación Costo de Adquisición y Reposición - Equipo Descolgador

Valor de Adquisición Base 2001	US\$	130.830
Factor de Corrección Monetaria 2001-2012	-	1,485
Valor de Adquisición Corregido 2012	US\$	194.334
Vida Útil	h	15.000
Costo de Reposición	US\$/h	13,0

Tabla 6-9: Estimación Costo de Combustible - Equipo Descolgador

Consumo Combustible (diesel)	lt/h	5,9
Precio Diesel ⁽¹⁾	US\$/m3	793
Costo Combustible	US\$/h	4,71

(1) Precio Diesel OOC2013 con factor 1,3 puesto en la mina

Tabla 6-10: Estimación Costo de Mantenimiento - Equipo Descolgador

Costo Mantenimiento Estimado	US\$/h	9,67
Factor de Corrección Monetaria 2001-2012	-	1,485
Costo Mantenimiento Corregido 2012	US\$/h	14,4

Tabla 6-11: Estimación Costo Horario Total - Equipo Descolgador

Costo Combustible	US\$/h	3,17
Costo Mantenimiento	US\$/h	14,36
Costo de Reposición	US\$/h	12,96
Costo Operación Total	US\$/h	30,49

²⁴ IM2.Marzo 2001. Informe Final 44/99” Técnicas de manejo de materiales en el nivel de producción”.

Insumos: Los principales insumos corresponden a las cargas explosivas y accesorios de tronadura, que son los mismos usados en el sistema actual. Se considera el uso de una unidad de APD por intervención. Otros insumos requeridos por la operación se detallan en la

Tabla 6-12.

Tabla 6-12: Otros Insumos

ÍTEM	UNIDAD	PRECIO US\$/UN	CANTIDAD UN/LARG.	COSTO US\$/LARG.
Adhesivo para explosivo	kg	5,0	0,3	1,5

6.3.2 Costo tecnología de descuelgue

El costo de operación se calcula para 3 índices de colgaduras y 2 escenarios de mano de obra. Al igual que en la estimación de costos del caso de referencia, primero se estiman los tiempos requeridos por intervención y la productividad de la cuadrilla, compuesta en por uno o dos operarios.

Se ha supuesto un turno efectivo de 180 min/T° y una efectividad del sistema de 90%, lo que implica que el 10% de las colgaduras debe tener un segundo intento, en el supuesto que con la tecnología de descuelgue, existe mayor probabilidad de colocar las cargas explosivas en el lugar más adecuado para lograr un resultado satisfactorio.

Tabla 6-13: Tiempos de Descuelgue - Sistema Conos Adherentes.

Inspección y coordinación	min	5
Colocación de carga	min	10 ²⁵
Evacuación y ventilación	min	15
Tiempo Total	min	30

Tabla 6-14: Productividad Cuadrilla - Sistema Conos Adherentes.

Cuadrilla	H/Cdlla	2	1
Tiempo Efectivo	min/T°	180	180
Tiempo Descuelgue	min	30	30
Productividad	N° larg./T°	6,0	6,0

²⁵ Considera que el posicionamiento del explosivo con un sistema mecanizado, es más rápido que el manual.

Efectividad	%	90%	90%
-------------	---	-----	-----

Los resultados del cálculo de costos por intervención de la tecnología de descuelgue, considerando uno o dos operados, se muestra en la

Tabla 6-15 y Tabla 6-16, respectivamente.

Tabla 6-15: Estimación Costo Largadura - Sistema Conos Adherentes con 1 Operario.

ESCENARIO	N°EVENTOS /1000T	0,9	2,5	4
Producción	tpd	10.000	10.000	10.000
Colgaduras	N° eventos/día	9	25	40
Largaduras	N° larg./T°	3	9	15
Cuadrillas	Cdlla/T°	1,0	2,0	3,0
Dotación	H-día	5	10	14
Costo Mano de Obra	US\$/H-día	35,8	35,8	35,8
	US\$/día	179	358	502
	US\$/larg.	19,9	14,3	12,5
Explosivos	US\$/larg.	15,6	15,6	15,6
Adhesivo	US\$/larg.	1,5	1,5	1,5
Equipo Descolgador	h/larg.	0,2	0,2	0,2
Costo Equipo Descolgador	US\$/h	32,0	32,0	32,0
	US\$/larg.	5,3	5,3	5,3
Costo Total	US\$/larg.	42,3	36,8	35,0
	US\$/t	0,04	0,09	0,14

Tabla 6-16: Estimación Costo Largadura - Sistema Conos Adherentes con 2 Operarios.

ESCENARIO	N°EVENTOS /1000T	0,9	2,5	4
Producción	tpd	10.000	10.000	10.000
Colgaduras	N° eventos/día	9	25	40
Largaduras	N° larg./T°	3	9	15

Cuadrillas	Cdlla/T°	1,0	2,0	3,0
Dotación	H-día	10	19	28
Costo Mano de Obra	US\$/H-día	35,8	35,8	35,8
	US\$/día	358	681	1.003
	US\$/larg.	39,8	27,2	25,1
Explosivos	US\$/larg.	15,6	15,6	15,6
Adhesivo	US\$/larg.	1,5	1,5	1,5
Equipo Descolgador	h/larg.	0,2	0,2	0,2
Costo Equipo Descolgador	US\$/h	32,0	32,0	32,0
	US\$/larg.	5,3	5,3	5,3
Costo Total	US\$/larg.	62,3	49,7	47,5
	US\$/t	0,06	0,12	0,19

Tabla 6-17: Tabla resumen de costos de largadura (US\$/descuelgue).

ÍNDICE DE COLGADURA	CASO DE REFERENCIA	TECNOLOGÍA DE DESCUELGUE	SISTEMA DESCOLGADOR
N°eventos /1000t		2 Personas	1 Personas
1,65	55,4	62,3	42,3
2,14	55,7	49,7	36,8
3,79	57,7	47,5	35,0

Las cifras muestran que la tecnología de descuelgue, presenta hasta un 39% menos de costo comparado con el caso actual, para el escenario con 1 operador y hasta un 18% menos de costo, para el escenario con 2 operadores. El menor costo por descuelgue de la tecnología recomendada, se debe al supuesto de que con ella, los tiempos de operación disminuyen y la eficacia aumenta, disminuyendo los intentos para lograr activar el flujo.

El hecho de incorporar el costo del equipo y mantención no repercute drásticamente en el costo total por descuelgue. La variable crítica en la estructura de costos es la mano de obra. Se recomienda para investigaciones futuras, realizar mediciones en terreno orientadas a una mejor caracterización de las colgaduras, de la productividad y tiempos de ciclo de la situación actual, que permitan también mejorar la proyección de costos del sistema mecanizado propuesto.

6.4 Simulación Capacidad Productiva

Como parte de la recomendación de una tecnología para el descuelgue de zanjás, se cuantifica la conveniencia operacional de implementarla, analizando mediante simulaciones en Promodel, el impacto en la capacidad productiva y en los costos operacionales de extracción, asociados a un sector específico. Este análisis se basa en las expectativas operacionales de la tecnología recomendada.

6.4.1 Características de alternativa tecnológica

La mecanización de la colocación de la carga, facilita el poder adherirla en aquellos puntos estratégicos de la colgadura y en correcta posición en contacto con las colpas, lo que permite optimizar las características detonadoras del explosivo y aumentar la cantidad de descuelgues logrados al primer intento, mejorando la eficacia de la operación.

Las expectativas operacionales del uso de la tecnología son:

- Mayor seguridad en la operación
- Menor tiempo de maniobra, para colocar la carga explosiva
- Mayor eficacia, debido a la correcta postura del cono en contacto con la roca.

6.4.2 Simulaciones

Mediante el software de simulación Promodel, se realizan simulaciones de capacidad productiva en una unidad definida para este análisis como una calle de producción con 16 puntos de extracción, como se muestra en la Figura 6-1. En él, se definen parámetros y restricciones para la operación de extracción y flujo de mineral. La extracción considera un cargador LHD de 7 Yd³ y para el chancado, se considera un equipo de bajo perfil tipo Sizer.

Para incorporar en la simulación, el efecto del uso de la tecnología de descuelgue, se modifican los parámetros asociados a la eficacia de cada intervención, realizando una sensibilización de esta variable y comparándola con el caso actual, que consideramos en 40% de eficacia en el primer intento [11].

6.4.2.1 Resultados

El tiempo simulado para cada escenario fue de 1 semana, utilizando una curva granulométrica asociada a la mina Reservas Norte de División El Teniente, considerando sobre tamaños aquellos

fragmentos mayores a 2 m^3 y la frecuencia de colgaduras dadas por los índices de colgaduras utilizados en el análisis.

Algunas consideraciones utilizadas en la programación del simulador son:

Unidad Productiva

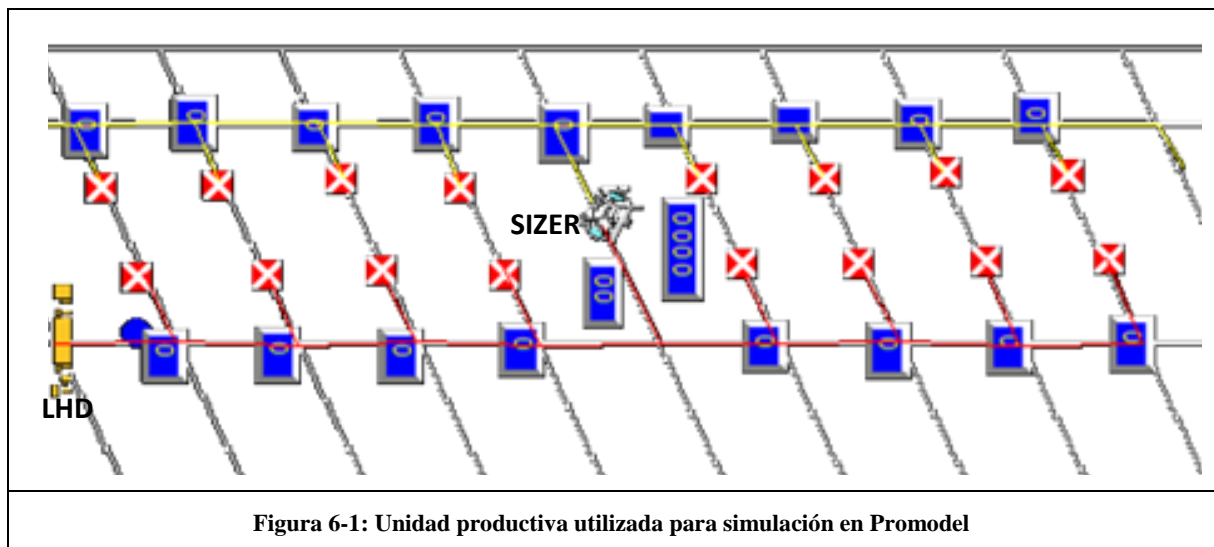
- 16 Puntos
- 1 Sizer
- LHD de 7Yd^3

Cuadrilla

- Entrada con 10 puntos inhabilitados
- Tiempo por calle 1hr
- No todos los puntos colgados se descuelgan al primer intento. Estadísticas resultantes de un levantamiento en División Andina , 2010, indican que en un 56% de los eventos se requiere de un segundo intento

Sizer

- 30 seg. en 1 baldada
- Cada 150.000 ton mantención por 12 hr.

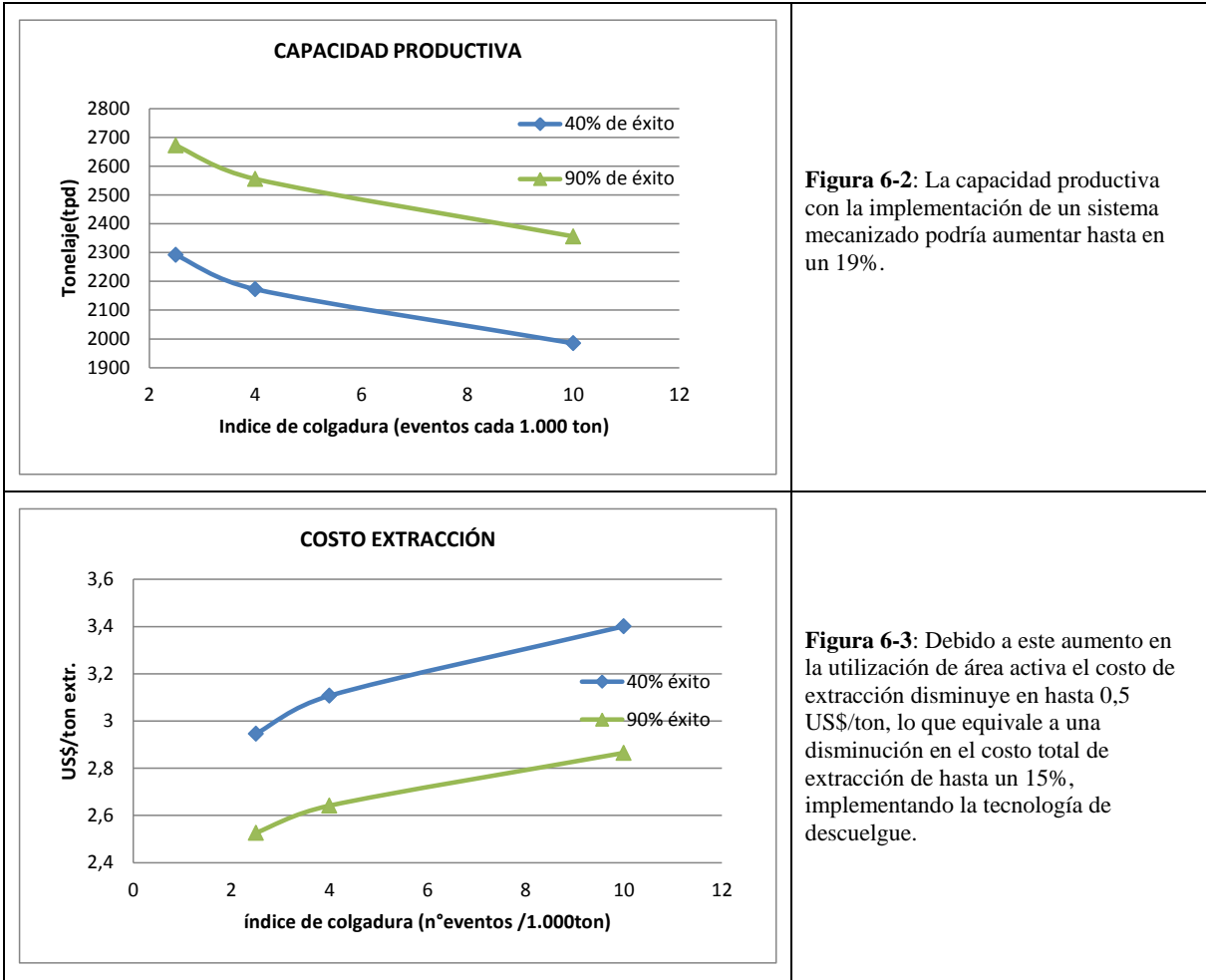


Los resultados de las simulaciones se ajustan al comportamiento esperado, en donde para un aumento en la eficacia de la operación de un 40 % a un 90%, se logra un aumento de capacidad productiva de 17% a 19% dependiendo de la frecuencia de ocurrencia de los eventos. Este aumento se asocia al uso de la tecnología de descuelgue, que supone que aquellas colgaduras del tipo “bloqueo” requieren al menos una segunda intervención, representada como un 90 % de eficacia en la operación.

Tabla 6-18: Resultados de simulación para distintos índices de colgaduras y % de eficacia en la operación

Índice colgadura		% de éxito en el descuelgue		
		0,4	0,7	0,9
2,5	tpd	2.292	2.381	2.672
	Colg/T°	2	2	2
	Bol/T°	11	11	12
4	tpd	2.173	2.364	2.555
	Colg/T°	3	4	4
	Bol/T°	10	11	12
10	tpd	1.985	2.311	2.356
	Colg/T°	7	8	8
	Bol/T°	10	11	11

Los resultados asociados a capacidad productiva indican un aumento hasta en un 19 % en la capacidad productiva de la unidad evaluada y una disminución en el costo de extracción de hasta un 15 % respecto al caso de referencia (Figura 6-2 y Figura 6-3).



El efecto del éxito o fracaso en el intento de descuelgue, se representa como el porcentaje de eficacia de la operación, siendo relevante este resultado en el costo total de extracción, como se muestra en la Tabla 6-19. Estos resultados toman como base un costo de extracción de 3 US\$/ton, el cual se varía en función de los resultados del descuelgue de zanjas. Esta variación entrega hasta un 15 % de disminución en el costo de extracción, para el escenario de 90 % de eficacia.

Tabla 6-19: Costo de Extracción (US\$/Ton)

Índice de Colgadura	Eficacia de la Operación de Descuelgue		
	40%	70%	90%
N°eventos /1000t			
2,5	2,95	2,84	2,53
4	3,11	2,86	2,64
10	3,40	2,92	2,87

Es de interés para futuras investigaciones, cuantificar el efecto del logro de las expectativas productivas de la nueva tecnología, como son la disminución de tiempos de maniobra en puntos colgados y menor cantidad de intentos para lograr activar el flujo, ya que de ser válidas, repercuten no solo en el costo de extracción, sino también en el costo de preparación, ya que genera un aumento de la capacidad productiva para un área determinada, permitiendo optimizar la secuencia de incorporación y mejorando con ello, el negocio minero y el uso del recurso.

6.5 Conclusiones de Evaluación Económica de Sistema de Descuelgue

El análisis ha permitido recomendar una buena alternativa para generar el descuelgue de zanjas de forma mecanizada, eficiente y más segura que la práctica manual utilizada hoy en día para solucionar este problema. La solución corresponde a un equipo que permite adosar la carga explosiva en altura, retirarse a una posición segura y posterior a ello, realizar la tronadura. Esta solución se caracteriza por no requerir perforación, lo que disminuye el riesgo de largaduras sorpresivas producto de las vibraciones; incorpora un brazo telescópico, disminuyendo los riesgos sobre el personal; utiliza cargas explosivas superficiales adheridas a la roca y permite implementar un mayor grado de automatización.

La evaluación económica de la tecnología de descuelgue se desarrolla en una primera etapa, para cuantificar el costo por intervención (US\$/intervención) y posteriormente, utilizando los resultados de simulaciones, calcula el impacto económico en el costo operacional de extracción del uso de la tecnología.

Las principales conclusiones de este capítulo son:

- Uno de los factores relevantes en el costo por intervención de la tecnología de descuelgue, es el índice de colgaduras, que corresponde a la cantidad de colgaduras que se forman en un punto de extracción cada 1000 toneladas extraídas.
- Los costos de la tecnología de descuelgue para una frecuencia media (índice =2,14) son de 49,7 US\$/intervención y 36,8 US\$ /intervención, con 2 y 1 operador, respectivamente.
- El costo unitario estimado para el descuelgue son similares entre la operación actual y el sistema mecanizado con un operador, apostando a un aumento en la eficacia de la operación. Para el escenario con 2 operadores, este costo aumenta en un 20 %.
- Comparando los resultados del uso de la tecnología con el caso de referencia (caso actual), se tiene que la tecnología de descuelgue presenta hasta un 39% menos de costo por intervención, en el escenario con 1 operador y hasta un 18% menos, para el escenario con 2 operadores.
- El menor costo por descuelgue de la tecnología recomendada, se debe al supuesto de que con ella, los tiempos de operación disminuyen y la eficacia aumenta, disminuyendo los intentos para lograr activar el flujo.
- El costo de mano de obra constituye la variable de mayor peso dentro del costo por intervención en colgaduras.

- Las estimaciones realizadas con el simulador Promodel, indican que con la tecnología de descuelgue se podría aumentar la capacidad productiva de una calle de producción, entre un 17% y 19 %, dependiendo de la frecuencia de eventos, en comparación con los resultados para el sistema actual.
- Para la operación de extracción, se obtiene que al optimizar el uso del recurso , reflejado en la capacidad productiva , se logra una disminución en el costo de extracción de un 15 % respecto a la situación actual , equivalente a una variación de 2,95 US\$/ton a 2,53 US\$/ton , con la implementación de la tecnología.
- La operación mecanizada reporta mayor capacidad productiva, disminución de los costos operacionales y riesgos para el operador, lo que concluye la conveniencia de materializar esta propuesta y evaluarla en una aplicación real de descuelgue de zanjas, motivando la necesidad de modernizar esta operación tanto desde el punto de vista productivo, como de seguridad laboral para los operadores que la realizan.
- Se recomienda para investigaciones futuras, realizar mediciones en terreno orientadas a una mejor caracterización de las colgaduras, de la productividad y tiempos de ciclo de la situación actual, que permitan también mejorar la proyección de costos del sistema mecanizado propuesto

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones y Recomendaciones

Para conceptualizar una solución para el descuelgue de zanjas es indispensable una buena caracterización del problema de la colgadura, así como de la operación actual de descuelgue. Los tipos de colgadura, su altura, las condiciones operacionales, los riesgos y los efectos en la producción son aspectos claves para el desarrollo de alternativas de descuelgue. En relación a la caracterización del problema se concluye que:

- Los antecedentes bibliográficos corroboran la presencia inevitable de eventos de colgadura de zanjas, los cuales pueden variar en número y características, dependiendo principalmente de la roca, diseño minero y porcentaje de extracción del punto en cuestión, con lo que se confirma la necesidad de abordar este tema, orientando los esfuerzos a la búsqueda de una solución más moderna y segura que la práctica actual.
- Se observa mayor ocurrencia de colgaduras entre 4 y 6 m de altura y existen registros de eventos menos frecuentes a más de 10 m de altura.
- Un patrón común para los distintos yacimientos es el notable aumento del índice de colgaduras en el primer 30 % de extracción. La frecuencia de colgaduras es más del doble que para una extracción en régimen.
- Uno de los motivos de este aumento al inicio de la extracción se podría deber a que el mineral está más cercano a las zanjas por lo que tiene menor trayectoria e interacción (colisiones) con otras colpas y además, que esta zona de la columna mineralizada, al estar cercana a la socavación, presenta menor cantidad de esfuerzos de compresión que son los generadores de nuevas fracturas.
- De acuerdo con el análisis de colgaduras, a medida que aumenta el porcentaje de extracción y la altura de extracción, se observa que hay una mayor cantidad de toneladas que fluye entre colgadura y disminuye el número de colgaduras
- En la operación es posible realizar un control de colgaduras, donde para lograr un control es requerido registrar lo siguiente:
 - ✓ Frecuencia de colgadura por calle.
 - ✓ Número de colpas.
 - ✓ Estimación de la altura de la colgadura media y determinación del tonelaje entre colgadura.
 - ✓ Explosivo utilizado (tipo y cantidad).
- En relación a la práctica actual de descuelgue, se identifica una operación de alto riesgo y baja eficacia, debido a la dificultad de maniobrar la carga explosiva en altura, lo que potencia la necesidad de disponer de prácticas alternativas para esta operación.

Para efectos de esta tesis, el descuelgue de zanjás se ha definido como la operación que busca activar el flujo de mineral a través del punto de extracción, mediante la aplicación de algún tipo de energía en aquellos puntos estratégicos de inestabilidad de la colgadura, para provocar la pérdida del equilibrio que la mantiene, originando la caída del material al piso del punto de extracción. La tecnología de descuelgue puede diferenciarse en aquellas que buscan reducir el tamaño de las colpas y aquellas que buscan mover las colpas para generar su caída.

En base a lo anterior se conceptualizó la solución como la integración de tres elementos claves

Vehículo, que transporta el sistema hasta el punto de operación o punto colgado

Sistema de izaje, que permita alcanzar las colpas que forman la colgadura.

Elemento descolgador, que interacciona con las colpas y transmite la energía requerida para desequilibrar la colgadura.

La investigación bibliográfica y benchmarking permite el levantamiento de 16 tecnologías de descuelgue con distintos niveles de desarrollo. Algunas alternativas ya han sido probadas en la industria, con resultados dispares y otras, son innovaciones que nacen sólo del análisis de los mecanismos básicos. En relación a esto, se concluye lo siguiente:

- De las alternativas consideradas, la mayoría de ellas constituyen solo una parte de la solución, siendo necesario el desarrollo de un sistema vehículo-brazo telescópico que lo complemente.
- Las tecnologías que no requieren brazo telescópico presentan limitantes en el rango de aplicación o poca precisión en el punto de interacción con la colgadura. Esto genera la necesidad de lograr una mejora tecnológica o adaptación de ellas, para ajustar sus características, ampliando el rango de colgaduras que se puedan enfrentar y también, el control y precisión de su uso y efecto.
- Para comparar y seleccionar tecnologías dentro de un grupo de alternativas, es recomendable aplicar metodologías de selección, basadas en criterios de selección y en el cumplimiento de aquellos aspectos indispensables y deseables requeridos para lograr el objetivo de descuelgue. Esta metodología se complementa con una encuesta a profesionales del área.
- Los criterios de selección son las cualidades y condiciones a satisfacer por la “tecnología” para ser exitosa.
- La metodología de preselección de alternativas demostró ser una herramienta eficaz para descartar soluciones y reducir el número de alternativas posibles. La preselección de alternativas descartó todas aquellas que requieren perforar la roca para colocar explosivos dentro, así como aquellas en que no existe control sobre el punto de la explosión.
- En la preselección, Los mecanismos de descuelgue que presentan mejor evaluación son: a) cono adherente, b) pistola de clavos y c) fijación por vacío.
- La selección final confirma la tendencia, siendo el mecanismo de descuelgue con cono adherente, la alternativa con mayor calificación. Esta tecnología corresponde al sistema

integrado por un vehículo, un brazo telescópico con alcance de 10 m, movilidad en distintas direcciones y componentes extensible y una unidad manipuladora de explosivo, la cual sostiene y posiciona el explosivo adhesivo en las rocas que forman la colgadura.

- En la conceptualización del brazo telescópico se seleccionan los cilindros telescópicos como componentes del sistema, verificando la factibilidad de dar cumplimiento a las restricciones de movimientos y alcances definidos para la operación.
- El análisis con elementos finitos, indica que el brazo está expuesto a un desplazamiento producido por pandeo y flexión, con un rango de oscilaciones esperado de aproximadamente 32 cm, para la extensión máxima de 10m en la vertical, cumpliendo con las expectativas de posicionamiento de carga explosiva.
- El manipulador de explosivos aún es motivo de desarrollo, recomendando componentes robóticas de alta precisión para sostener y adherir el cono a la roca. En la actualidad existe gran variedad de desarrollos tecnológicos con las características deseadas para esta componente, por lo que se considera factible y económicamente viable su fabricación.
- En base a estos resultados se concluye que la tendencia son tecnologías caracterizadas por:
 - ✓ No requerir perforación, lo que disminuye el riesgo de largaduras sorpresivas producto de las vibraciones.
 - ✓ Utilizan brazo telescópico, disminuyendo los riesgos sobre el personal
 - ✓ Utilizan explosivo.
 - ✓ Mayor grado de automatización.
- Las componentes del sistema, son tecnologías disponibles en el mercado, que cumplen con los alcances máximos y movimientos exigidos para el éxito de la operación, considerando los requerimientos planteados en la conceptualización de la solución.
- La tecnología recomendada constituye una alternativa factible técnicamente y la base para futuras mejoras y optimizaciones tecnológicas a este diseño.

De la evaluación económica realizada para la tecnología de descuelgue se concluye que:

- La estimación de costos unitarios para el descuelgue (US\$ /intento descuelgue), considerando el uso de la tecnología, es un 39% inferior al caso actual para el escenario con 1 operador y hasta un 18% inferior, para el escenario con 2 operadores. El menor costo por descuelgue, se debe a que conceptualmente con ella, los tiempos de operación disminuyen y la eficacia aumenta, disminuyendo los intentos por punto para lograr activar el flujo. Estas características conceptuales deben ser validadas en terreno, ya que corresponden a un resultado teórico del uso del prototipo.
- Las simulaciones en Promodel, indican que con la tecnología de descuelgue se podría aumentar de capacidad productiva de una calle de producción, entre un 17% y 19 %, dependiendo de la frecuencia de eventos, en comparación con los resultados para el sistema actual.
- Analizando el impacto en la operación de extracción, se obtiene que al optimizar el uso del recurso, reflejado en la capacidad productiva, se logra una disminución en el costo de

extracción de 2,95 US\$/ton a 2,53 US\$/ton, equivalente a un 15 % respecto a la situación actual.

- Las sensibilizaciones al costo de descuelgue, en función de la frecuencia de colgaduras indican que la tecnología del cono adherente disminuye su costo a medida que aumenta la frecuencia de colgaduras y que casi en todos los escenarios considerados, el costo asociado a este sistema tiene un costo inferior a la situación actual.
- Se cuantifica en costo y productividad, la conveniencia de incorporar una tecnología de descuelgue en la operación, ya que impacta considerablemente en aspectos claves del negocio minero, como son la seguridad, productividad, costos operacionales y compatibilidad con la tendencia de los métodos de explotación, logrando alto grado de automatización y altas productividades.
- Se recomienda considerar esta solución en futuras inversiones en investigación y desarrollo, ya que sin duda constituye un quiebre tecnológico en el negocio minero. Esta solución debe validarse en terreno y complementarse con una completa línea base del problema, donde se identifiquen los efectos en el flujo gravitacional del preacondicionamiento en distintas minas subterráneas del mundo.

8.BIBLIOGRAFÍA

8.1 Informes

- [1] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A., Octubre 2000. Informe Final API T99M222 “Sistema Hidrofracturamiento Mecanizado para Reducción Secundaria Mina El Teniente” (PL-I-147/2000).
- [2] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. Marzo 2001. Informe Final 44/99” Técnicas de manejo de materiales en el nivel de producción”.
- [3] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A., Octubre 2003. Informe Final 09/02 “Diseño conceptual para minería continua”.
- [4] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. 2003. 47p. Diseño conceptual para Minería Continua. Informe Final. Santiago, Chile.
- [5] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. 2005a. 44p. Diseño y prueba del prototipo de un extractor continuo estacionario. Informe Final. Santiago, Chile.
- [6] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. 2005b. 55p. Simulación del extractor en un punto de extracción Etapa I: Simulación 2-D. Informe Técnico. Santiago, Chile.
- [7] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. 2006a. 23p. Validación transportador continuo. Ingeniería básica Proyecto Prueba II Minería Continua. Santiago, Chile.
- [8] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. Junio 2006. IM2 24/2004 Informe Final: “Pruebas de explosivos, equipo reductor de bolones y equipo descolgador de zanjas”. Santiago, Chile.
- [9] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. Sept.2008. API M08DE04 Presentación Avance 1: “Especificación de parámetros básicos para el diseño de equipo EPH”. Santiago, Chile.
- [10] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A. Sept.2008. API P 31/08 Informe Final: “Revisión de avances de la tecnología de pulsos eléctricos para fragmentación de rocas”. Santiago, Chile.
- [11] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A., Octubre 2000 Levantamiento de alternativas tecnológicas para descolgadura de zanjas. Informe Final Proyecto IM2 34/09.
- [12] CODELCO- DIVISIÓN EL TENIENTE, 2007. NNM-ICO-GEO-INF N°003: Informe Final Backanalysis de Fragmentación, Minas: Diablo Regimiento, Reno y Teniente 4 Sur Tonalita.

- [13] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A., 2010. Diseño de brazo descolgador. Informe Final Proyecto IM2 67/09.
- [14] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A., 2010. Operativización de adhesivos para explosivos en descuelgue de zanjas. Avance n°1, Proyecto IM2 20/10, p.22-29.
- [15] IM2 INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA S.A., 2010. Operativización de adhesivos para explosivos en descuelgue de zanjas. Avance n°2, Proyecto IM2 20/10, p.24-33.
- [16] Metálica Consultores S.A., Agosto 1999. Contrato N° 99813: Informe Final “Asesoría en Tronadura Secundaria”.
- [17] IAL Ltda, Junio 2000. Para Codelco-División Salvador: Informe de Avance Asesoría “Optimización de Reducción Secundaria División El Salvador.
- [18] Informe Final, Proyecto FONDEF D99I-1037, “Desarrollo de un Modelo de Flujo Gravitacional para Minería por Hundimiento de Bloques”, Mayo 2002, Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [19] Rustan, Agne. “Gravity Flow of Broken Rock – What is Known and Unknown”, Massmin 2000, 557-567p, Brisbane, Queensland
- [20] Wood, P A. “Fundamentals of bulk solids flow”, International Energy Agency Coal Research, London, Report number ICTIS/TR31, 1986.
- [21] Chacón J., 2000. Tecnología de los explosivos. Universidad de Chile.
- [22] López Jimeno C., 1997. Manual de túneles y obras subterráneas. Capítulo 10.
- [23] Langefors-Kihlstrom, 1987. Voladura de rocas. Capítulo 1-4.
- [24] Hustrulid W., 1999. Blasting principles for open pit mining. Volume 2-Theoretical Foundations, 383-463.
- [25] Rossmanidth H-P., 2006. Understanding the principles of rock breakage using precise initiation systems. JKMRRC, The University of Queensland, Csiro.1-100.
- [26] Chacón J., (2001). Apuntes curso MI47A: perforación y tronadura. Cátedra CODELCO de Tecnología Minera, Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemática, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 130pp.
- [27] Brown, E.T., Block Caving Geomechanics, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2003.
- [28] SME Mining Engineering Handbook por Hartman Howard L. “et al”. 2nd Edition, Vol. 2; Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 1992.
- [29] Codelco-Chile, 2012. “ Orientaciones Comerciales 2013”

8.2 Papers e investigaciones

- [30] Rafael A. Schiazzano, Gestión de Proyectos: “Procedimiento de selección-Matriz de decisión, aplicación a selección de ideas en proyectos de máquinas”.
- [31] K.T. Ulrich- S.D. Eppinger, “Diseño y desarrollo de productos”.
- [32] R.L. Norton “Diseño de maquinarias”
- [33] Jenike and Johanson Chile S.A año 2007. “Seminario sobre diseño y operación de piques de traspaso”.
- [34] HILTI, 2009. Manual de Sistema de Fijación Directa.
- [35] ICEM, Soosan Artificial Lightning; “Plasma rock fragmentation system”.
- [36] T. Szwedzicki, 2007. Paper “Formation and removal of hangs-ups in ore passes”.
- [37] A.Bascetin, Junio 2004. Nota técnica: “An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine”.
- [38] Hustrulid William A.. Final Report: “Quantification and Analysis of Ore Pass/Draw Point Flow Problems Leading to the Development of Design Rule of Thumbs”. Department of Mining Engineering, the University of Utah.
- [39] Hustrulid William A. y Bullock Richard L., Underground Mining Methods, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2001.
- [40] J.J. Kollé. Tempres Technologies, INC. 2005. Topical Report #1: “Microhole Jet Drilling System Configuration and Integration.
- [41] J.J. Kollé. Tempres Technologies, INC. 2000. “Compressed-Water Pulse Generators and Applications”.
- [42] J.J. Kollé. Tempres Technologies, INC. 1999. “A comparison of water jet, abrasive jet and rotary diamond drilling in hard rock”
- [43] Jenike and Johanson Chile S.A. año 2007. “Seminario sobre diseño y operación de piques de traspaso”.
- [44] Cavieres Patricio, 2003, “Dimensionamiento de mallas de extracción , bateas recolectoras y pilar corona para métodos Panel caving en roca primaria, Mina El Teniente”

8.3 Presentaciones y sitios web

[45] Green Mining Process Ltda., mayo 2009. GMP 101/09: “Presentación de propuestas equipo de destranque de piques”.

[46] Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft. Presentation: “A high voltage pulsed electric discharge through a solid creates a plasma channel of high energy density”.

[47] http://www.cchen.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=308&Itemid=152.

[48] http://www.cchen.cl/mediateca/revista_mn/07-13_Divulgacion.pdf.

[49] <http://www.de1939a1945.bravepages.com/tecnicos/016cargahueca.htm>.

[50] <http://www.invenia.es/oepm:p9501064>.

9. ANEXO 1: DETERMINACIÓN MATRIZ PONDERADORES RELATIVOS

Evaluación 1

MATRIZ DE DECISIÓN	Jumbo descolgado r	Cono con tarugo	Cáncamo izaje	Perforación con agua	Cono adherente	Fijación por vacío	Pistola de clavos	Plasma	Bolsas expansivas	Cono con brazo desechable	Globo elevadizo	Carga hueca	Cargas propulsadas	Cañón de agua	Punzador mecánico	Punzador hidráulico
Riesgo para personal	3	5	5	3	4	4	5	3	4	4	4	4	1	3	2	2
Riesgo para sistema	1	5	5	4	5	5	5	4	4	4	3	4	1	3	4	4
Uso de tecnologías de apoyo	1	2	3	2	3	3	3	1	2	2	5	3	4	3	3	2
Eficiencia	4	5	5	3	5	5	5	4	3	5	4	4	3	3	3	3
Costos	1	5	5	2	5	4	5	3	3	3	4	3	3	3	4	3
Automatización	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	3	3	3	2	2
Nivel de desarrollo	5	3	3	4	4	3	2	3	4	3	4	3	5	5	5	5
Rango de aplicación	3	3	3	4	4	4	4	4	3	3	3	4	5	3	3	3
Simplicidad de operación	3	4	4	3	4	4	4	3	3	3	4	4	3	4	3	3
Interferencia con resto de operaciones	3	5	5	3	4	4	5	3	3	4	5	4	3	2	3	3
Compatibilidad con diseño de minería continua	1	3	3	1	3	3	3	2	2	3	4	3	3	2	2	2
PROMEDIO	2,6	4,0	4,1	3,0	4,1	3,9	4,1	3,1	3,1	3,5	3,9	3,5	3,1	3,1	3,1	2,9

Evaluación 2

MATRIZ DE DECISIÓN	Jumbo descolgado r	Cono con tarugo	Cáncamo izaje	Perforación con agua	Cono adherente	Fijación por vacío	Pistola de clavos	Plasma	Bolsas expansivas	Cono con brazo desechable	Globo elevadizo	Carga hueca	Cargas propulsadas	Cañón de agua	Punzador mecánico	Punzador hidráulico
Riesgo para personal	4	2	2	5	3	3	2	2	3	3	4	2	2	2	5	5
Riesgo para sistema	2	2	2	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	3
Uso de tecnologías de apoyo	2	2	2	1	2	2	2	1	3	2	2	1	1	1	2	2
Eficiencia	5	4	4	4	4	4	4	5	3	4	3	4	4	4	4	4
Costos	1	2	2	1	2	2	2	1	3	1	2	1	2	1	1	1
Automatización	4	2	2	4	2	2	2	4	3	2	2	4	4	4	4	4
Nivel de desarrollo	3	2	2	2	3	2	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2
Rango de aplicación	2	2	2	3	3	3	2	2	3	3	3	2	3	2	2	2
Simplicidad de operación	2	2	2	2	3	3	2	2	3	2	3	2	2	2	2	2
Interferencia con resto de operaciones	2	3	3	2	3	3	3	2	3	2	3	2	3	2	3	3
Compatibilidad con diseño de minería continua	1	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	3	3	2	3	3
PROMEDIO	2,5	2,4	2,4	2,5	2,8	2,7	2,4	2,2	3,0	2,3	2,6	2,3	2,5	2,2	2,8	2,8

Evaluación 3

MATRIZ DE DECISIÓN	Jumbo descolgado r	Cono con tarugo	Cáncamo izaje	Perforación con agua	Cono adherente	Fijación por vacío	Pistola de clavos	Plasma	Bolsas expansivas	Cono con brazo desechable	Globo elevadizo	Carga hueca	Cargas propulsadas	Cañón de agua	Punzador mecánico	Punzador hidráulico
Riesgo para personal	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	3	5	3	4	5	5
Riesgo para sistema	1	4	4	4	5	5	5	1	5	5	2	5	1	4	1	3
Uso de tecnologías de apoyo	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	3	3	2	2
Eficiencia	4	4	3	4	3	1	3	4	1	3	1	2	1	3	2	1
Costos	1	2	3	2	3	3	3	1	3	3	3	2	2	4	4	4
Automatización	4	4	3	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4
Nivel de desarrollo	3	2	2	2	3	1	2	1	1	2	1	1	3	3	1	1
Rango de aplicación	2	3	3	3	3	3	3	2	1	3	2	2	3	2	1	1
Simplicidad de operación	1	2	2	1	4	4	3	1	3	3	2	4	4	5	4	4
Interferencia con resto de operaciones	2	2	2	2	4	4	2	1	4	3	3	4	2	4	4	2
Compatibilidad con diseño de minería continua	1	4	4	3	4	4	3	1	4	3	2	4	2	4	4	4
PROMEDIO	2,3	3,1	2,9	2,8	3,6	3,3	3,1	2,0	2,9	3,2	2,2	3,2	2,5	3,6	2,9	2,8

Evaluación 4

MATRIZ DE DECISIÓN	Jumbo descolgado	Cono con tarugo	Cáncamo izaje	Perforación con agua	Cono adherente	Fijación por vacío	Pistola de clavos	Plasma	Bolsas expansivas	Cono con brazo desechable	Globo elevadizo	Carga hueca	Cargas propulsadas	Cañón de agua	Punzador mecánico	Punzador hidráulico
Riesgo para personal	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2	5	2	5	5	5
Riesgo para sistema	1	5	5	5	5	5	5	1	5	5	2	5	2	5	5	5
Uso de tecnologías de apoyo	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Eficiencia	5	3	1	5	3	2	3	5	2	2	1	3	1	3	3	3
Costos	5	5	5	1	5	2	4	3	4	2	3	5	3	5	5	5
Automatización	4	4	3	5	5	5	5	5	5	2	3	5	3	5	5	5
Nivel de desarrollo	2	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2	3	2	3	3	3
Rango de aplicación	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	3	5	3	3	3	3
Simplicidad de operación	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	3	5	5	5
Interferencia con resto de operaciones	1	3	3	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	5	5	5
Compatibilidad con diseño de minería continua	1	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
PROMEDIO	3,1	4,1	3,8	4,3	4,6	4,1	4,4	4,1	4,1	3,8	3,0	4,6	3,0	4,5	4,5	4,5

Evaluación 5

MATRIZ DE DECISIÓN	Jumbo	Cono con	Cáncamo	Perforación	Cono	Fijación por	Pistola de	Plasma	Bolsas	Cono con	Globo	Carga hueca	Cargas	Cañón de	Punzador	Punzador
	descolgador	tarugo	izaje	con agua	adherente	vacio	clavos		expansivas	brazo desechable	elevadizo		propulsadas	agua	mecánico	hidráulico
Riesgo para personal	5	4	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	2	4	4	4
Riesgo para sistema	4	4	3	3	3	3	4	4	3	4	3	4	2	3	4	4
Uso de tecnologías de apoyo	5	2	2	2	4	4	4	2	3	3	4	2	2	4	2	2
Eficiencia	4	3	2	3	3	3	4	3	2	3	3	3	4	4	2	2
Costos	3	3	3	2	3	3	3	2	3	2	3	2	2	2	2	2
Automatización	4	3	3	2	3	3	4	4	3	4	3	4	4	3	4	4
Nivel de desarrollo	4	2	2	2	4	4	3	1	3	3	4	3	2	3	2	2
Rango de aplicación	4	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
Simplicidad de operación	4	4	2	2	3	3	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2
Interferencia con resto de operaciones	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
Compatibilidad con diseño de minería continua	1	2	2	4	3	2	3	2	3	2	3	2	1	1	3	3
PROMEDIO	40	32	27	28	35	34	37	30	32	33	35	29	25	30	29	29

Matriz Total con Puntuación Relativa de Prioridad

MATRIZ DE DECISIÓN	Jumbo	Cono con	Cáncamo	Perforación	Cono	Fijación por	Pistola de	Plasma	Bolsas	Cono con	Globo	Carga	Cargas	Cañón de	Punzador	Punzador
	descolgado	tarugo	izaje	con agua	adherente	vacio	clavos		expansivas	brazo desechable	elevadizo	hueca	propulsada	agua	mecánico	hidráulico
Riesgo para personal	4	4,2	3,8	4,2	4	4	4	3,8	4	4	3,2	3,8	2	3,6	4,2	4,2
Riesgo para sistema	1,8	4	3,8	3,6	4,2	4,2	4,2	2,4	4	4	2,4	4	1,6	3,4	3,4	3,8
Uso de tecnologías de apoyo	2,8	2,6	2,8	2,2	3,2	3,2	3,2	2	3	2,8	3,6	2,6	3	3,2	2,8	2,6
Eficiencia	4,4	3,8	3	3,8	3,6	3	3,8	4,2	2,2	3,4	2,4	3,2	2,6	3,4	2,8	2,6
Costos	2,2	3,4	3,6	1,6	3,6	2,8	3,4	2	3,2	2,2	3	2,6	2,4	3	3,2	3
Automatización	4	3,4	3	3,8	3,6	3,6	3,8	4,2	3,4	3	2,8	4	3,6	3,8	3,8	3,8
Nivel de desarrollo	3,4	2	2	2,2	3,4	2,2	2	1,6	2,4	2	2,6	2,4	2,8	3,2	2,6	2,6
Rango de aplicación	3,2	3	3	3,4	3,6	3,6	3,4	3,2	2,6	3,4	2,8	3	3,2	2,4	2,2	2,2
Simplicidad de operación	2,4	3,4	3	2,6	3,8	3,8	3,2	2,6	3,4	3,2	3	3,4	2,8	3,6	3,2	3,2
Interferencia con resto de operaciones	2	3,2	3,2	3	3,8	3,8	3,6	2,8	3,6	3,4	3,6	3,4	2,8	3	3,4	3
Compatibilidad con diseño de minería continua	1	3,2	3,2	2,8	3,6	3,4	3,4	2,2	3,4	3,2	3,4	3,4	2,8	2,8	3,4	3,4
Total	2,8	3,3	3,1	3,0	3,7	3,4	3,5	2,8	3,2	3,1	3,0	3,3	2,7	3,2	3,2	3,1

Matriz Total con Puntuación Relativa Equivalente de Descarte

MATRIZ DE DECISIÓN	Jumbo descolgado r	Cono con tarugo	Cáncamo izaje	Perforación con agua	Cono adherente	Fijación por vacío	Pistola de clavos	Plasma	Bolsas expansivas	Cono con brazo desechable	Globo elevadizo	Carga hueca	Cargas propulsadas	Cañón de agua	Punzador mecánico	Punzador hidráulico
Riesgo para personal	0,6	0,6	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,6	0,6	0,2	0,4	-0,8	0,4	0,6	0,6
Riesgo para sistema	-0,6	0,6	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	-0,2	0,6	0,6	-0,6	0,6	-1	0,2	0,4	0,6
Uso de tecnologías de apoyo	-0,2	-0,6	-0,4	-0,6	0	0	0	-0,6	-0,2	-0,4	0,2	-0,4	0	0,2	-0,4	-0,6
Eficiencia	1	0,6	0	0,6	0,4	0	0,6	0,8	-0,6	0,2	-0,2	0,2	0	0,4	-0,2	-0,2
Costos	-0,4	0	0,2	-1	0,2	-0,2	0,2	-0,6	0,2	-0,6	0	-0,4	-0,6	0	0,2	0
Automatización	1	0,4	0	0,6	0,4	0,4	0,6	1	0,2	0	-0,2	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
Nivel de desarrollo	0,2	-0,8	-0,8	-0,6	0,4	-0,4	-0,8	-0,8	-0,2	-0,6	-0,2	-0,4	-0,4	0	-0,4	-0,4
Rango de aplicación	0	-0,2	-0,2	0,2	0,4	0,4	0,2	0	-0,2	0,2	-0,2	-0,2	0	-0,6	-0,6	-0,6
Simplicidad de operación	-0,4	0,2	-0,2	-0,4	0,6	0,6	0	-0,4	0,2	0	0	0,2	-0,2	0,2	0	0
Interferencia con resto de operaciones	-0,8	0	0	-0,2	0,6	0,6	0,2	-0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	-0,2	-0,2	0,2	-0,2
Compatibilidad con diseño de minería continua	-1	0,2	0,2	0	0,4	0,2	0,2	-0,6	0,2	0	0,2	0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,2
Total	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,4	0,3	0,2	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	-0,3	0,1	0,1	0,0

10.ANEXO 2: CALIFICACIÓN MATRIZ PONDERADORES ABSOLUTOS

	Cono adherente	Pistola de clavos	Fijación por vacío	Cono con tarugo	Carga hueca	Cañón de agua	Bolsas expansivas	Punzador mecánico	Cono con brazo desechable	Cono con coligüe
Disminuye riesgo para personal	10	10	10	10	10	2	10	10	8	1
Disminuye riesgo para sistema	8	6	8	3	8	1	8	6	10	10
Menor uso de tecnologías de apoyo	7	5	5	3	7	8	7	10	10	10
Mayor eficiencia	8	7	8	7	7	7	7	6	8	7
Menor Costos	7	6	6	6	5	8	9	6	4	9
Alto grado de automatización	10	7	10	7	10	5	10	10	7	1
Alto nivel de desarrollo	7	3	1	3	5	10	7	3	7	10
mayor rango de aplicación	10	10	10	10	10	5	10	10	10	6
Simplicidad de operación	10	8	10	8	8	6	8	10	8	6
Menor interferencia con resto de operaciones	7	7	7	7	7	6	7	10	7	7
Compatibilidad con diseño de minería continua	10	4	10	4	10	6	2	10	2	2

promedio ponderado	Cono adherente	Pistola de clavos	Fijación por vacío	Cono con tarugo	Carga hueca	Cañón de agua	Bolsas expansivas	Punzador mecánico	Cono con brazo desechable	Cono con coligüe
Disminuye riesgo para personal	100	100	100	100	100	20	100	100	80	10
Disminuye riesgo para sistema	60	30	60	22,5	60	7,5	60	45	75	75
Menor uso de tecnologías de apoyo	7	5	5	3	7	8	7	10	10	10
Mayor eficiencia	24	35	24	21	21	21	21	18	24	21
Menor Costos	18,2	30	15,6	15,6	13	20,8	23,4	15,6	10,4	23,4
Alto grado de automatización	50	35	50	35	50	25	50	50	35	5
Alto nivel de desarrollo	7	3	1	3	5	10	7	3	7	10
mayor rango de aplicación	30	10	30	30	30	15	30	30	30	18
Simplicidad de operación	26	40	26	20,8	20,8	15,6	20,8	26	20,8	15,6
Menor interferencia con resto de operaciones	21	7	21	21	21	18	21	30	21	21
Compatibilidad con diseño de minería continua	30	4	30	12	30	18	6	30	6	6
TOTAL	373,2	299	362,6	283,9	357,8	178,9	346,2	357,6	319,2	215

	EVALUADOR1	EVALUADOR2	PROMEDIO
Riesgo para el personal	10	10	10
riesgo para el sistema	5	10	7,5
Uso de tecnologías de apoyo	1	1	1
Eficiencia	5	1	3
Costos	5	0,2	2,6
Automatización	5	5	5
Nivel de desarrollo	1	1	1
Rango de aplicación	1	5	3
Simpleza en la operación	5	0,2	2,6
Nivel interferencia	1	5	3
Compatibilidad con sistema automatizados	1	5	3

Promedio Ponderado	TOTAL
Cono adherente	373,2
Fijación por vacío	362,6
Carga hueca	357,8
Punzador mecánico	357,6
Bolsas expansivas	346,2
Cono con brazo desechable	319,2
Pistola de clavos	299
Cono con tarugo	283,9
Cono con coligüe	215
Cañón de agua	178,9

