

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor patrocinante

Sr. Rene Gómez P.

DISEÑO DE NIVEL DE PRODUCCIÓN ALTERNATIVO EN BLOCK/PANEL CAVING



KAREN TATIANA SÁEZ GARRIDO

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniera Civil de Minas

16 de diciembre, 2019



A la memoria de Humberto Garrido Aguilar – septiembre 2019 (Q.E.P.D)

RESUMEN

A nivel mundial, la minería subterránea consta de variados diseños para los niveles de producción, algunos ejemplos son la malla tipo Teniente, la malla tipo *Herringbone* o Espina de pescado, la malla Cuadrada y las variaciones de estas. El diseño de estas se basa en una serie de variables mineras del *caving* como, el tamaño de las galerías, las dimensiones de los equipos de trabajo y la estabilidad de las galerías, con el objetivo de maximizar la extracción, manteniendo la estabilidad del nivel.

El presente estudio considera una alternativa en el diseño de la malla de extracción del nivel de producción, con la hipótesis de obtener un aumento de la producción diaria, debido a mejoras en las maniobras de los equipos LHD y con ello una reducción de los tiempos de ciclo. Se considera un caso base, la Mina RENO de la División El Teniente de CODELCO, que tiene una Malla de 15 x 17.32 m², cuyas galerías de producción y zanjas tienen dimensiones de 4.3 x 3.6 m², en las que, se utilizan equipos LHD de 7 yd³ modelo CAT R1600H y se extraen 3000 toneladas por día por calle producción en promedio. Este escenario base fue comparado con otros tres tipos de mallas, que conservarán las dimensiones antes mencionadas. En el primer caso se utiliza una malla *Herringbone*. En el segundo caso se emplea una malla tipo Teniente con desquinche en sus pilares. Por último, en el tercer caso se trabaja con una malla Cuadrada con desquinche en sus pilares. Estos dos últimos casos son mallas propuestas dentro del estudio.

El análisis se realiza a través de simulaciones de eventos discretos utilizando el *software* Arena. Se simula el escenario base para calibrar el modelo considerando la condición de una calle de producción, y posterior a esto se hacen las simulaciones de los otros tres escenarios. Al final de cada simulación se hace la entrega de un informe que identifica el LHD que está trabajando, el punto de extracción en el cual trabajó, el número de ciclo, el tiempo de ciclo, el tonelaje extraído en este ciclo, el tonelaje acumulado, el número de colgaduras y el tonelaje en el pique.

En base a estos informes entregados se comparan las alternativas y obteniendo que la malla Espina de pescado no presenta significantes mejoras. Por otro lado, las mallas propuestas (tipo Teniente desquinchada y Cuadrada desquinchada) presentan un aumento entre 33% a 39% de la producción y una disminución de un 23% a 25% en el tiempo de ciclo con respecto al escenario base. Debido a esto se comprueba que la variación del tipo de malla maximiza la producción y a su vez minimiza el tiempo de ciclo, lo que verifica la hipótesis del estudio.

ABSTRACT

Globally, in underground mining there are varied design of production levels for mineral extraction. Some examples are the Teniente layout, the Herringbone layout, the square layout and their variations. The design is based on several caving variables, for example, the size of the galleries, the dimensions of the equipment, the stability of the galleries, with the aim of maximizing the extraction, maintaining the stability of the level.

The present study considers an alternative mine layout of the production level, with the hypothesis of increasing of the daily production, due to improvements in the maneuvers of the LHD equipment and reduction of the cycle times. A base case is considered, the RENO Mine of the El Teniente Division of CODELCO, which has a layout of 15 x 17.32 m², whose production galleries and cross cuts have the dimensions of 4.3 x 3.6 m², in which LHD CAT R1600H of 7 yd³ model equipment is used and 3000 tons per day on average are extracted per street production. This scenario was compared with three other layouts, which will retain the aforementioned dimensions. In the first case a Herringbone layout is used. Then, in the second case, a Teniente layout is used with a cutout in the pillars. Finally, in the third case we work with a square layout with a cutout in the pillars. These last two designs are proposed layouts within the study.

The analysis is carried out through simulations of discrete events using the Arena software. The base scenario is simulated to be calibrated considering a production street, and after this, the simulations of the other three scenarios are made. At the end of each simulation a report is made that identifies the LHD you are working on, the extraction point on which I work, the cycle number, the cycle time, the tonnage extracted in this cycle, the accumulated tonnage, the number of hangings and the tonnage in the pique.

Based on these reports, the alternatives are compared and it is obtained that the herringbone layout does not show significant improvements. On the other hand, the proposed layouts (Teniente layout with a cutout in the pillars and Square layout with a cutout in the pillars) show between 33% to 39% increase in production and a 23% to 25% decrease in the cycle time with respect to the baseline scenario. Due to this it is verified that the variation of the layout maximizes the production and in turn minimizes the cycle time, which verifies the hypothesis of the study.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	2
2.	MARCO TEÓRICO	4
2.1	Historia <i>Block/Panel Caving</i>	4
2.1.1	Estrategias de hundimiento.....	5
2.1.1.1	Hundimiento Convencional	6
2.1.1.2	Hundimiento Previo	6
2.1.1.3	Hundimiento Avanzado	7
2.1.2	Análisis comparativo o <i>Benchmarking</i>	8
2.2	Malla de extracción	11
2.2.1	Diseño de malla de extracción.....	12
2.3	Carguío y transporte del nivel de producción en minería subterránea.....	19
2.3.1	Carguío	19
2.4	Simulación de procesos unitarios.....	21
2.4.1	Modelo Estocástico	22
2.4.2	Eventos Discretos	22
2.4.3	Software Arena.....	22
2.4.4	Simulación - Casos de estudio	23
2.4.4.1	“The use of ARENA Simulation to estimate Drawpoint Construction Rate, Production Rate and Costs for the Hugo North Lift 1 Panel Cave” [29].....	24
2.4.4.2	“Application of simulation to improved planning at Esmeralda, El Teniente Mine, Chile” [30]	24
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	25
3.1	Metodología general	25
3.2	Modelo conceptual	26
3.3	Parámetros y variables de entrada.....	28
3.4	Parámetros y variables de salida.....	29

3.5	Escenarios a estudiar.....	30
3.5.1	Malla Teniente.....	31
3.5.2	Malla <i>Herrigbone</i>	32
3.5.3	Malla Teniente desquinchada.....	34
3.5.4	Malla cuadrada desquinchada.....	36
3.6	Condiciones experimentales para la simulación	38
3.7	Plan Experimental	40
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	42
4.1	Calibración de las simulaciones.....	42
4.2	Resultados mallas de extracción	43
4.3	Análisis de resultados y discusiones	45
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
5.1	Conclusiones.....	48
5.2	Recomendaciones	49
6.	BIBLIOGRAFÍA	50
7.	ANEXOS	52



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de explotación de <i>Block/Panel caving</i> vista isométrica [1]	5
Figura 2. Esquema de construcción de Hundimiento Convencional [4].....	6
Figura 3. Esquema de construcción de Hundimiento previo [4].....	7
Figura 4. Esquema de construcción de Hundimiento avanzado [4].....	8
Figura 5. Principales dimensiones de una malla Teniente vista en planta	12
Figura 6. Abaco de Laubscher, determina el diámetro de la zona de flujo aislada y espaciamiento entre puntos de extracción [20].....	13
Figura 7. Curva de Laubscher que determina la altura de interacción entre zonas de flujo de puntos de extracción contiguos [20]	13
Figura 8. Configuración de los elipsoides vista en planta [21]	14
Figura 9. Malla tipo espina de pescado vista en planta.....	15
Figura 10. Malla tipo Teniente vista en planta	16
Figura 11. Malla tipo cuadrada vista en planta	17
Figura 12. Equipo LHD [23].....	20
Figura 13. Esquema de la metodología general de la investigación.....	25
Figura 14. Esquema del modelo conceptual.....	28
Figura 15. Malla Teniente vista en planta	31
Figura 16. Esquema del sentido de avance del LHD en la malla Teniente vista en planta....	32
Figura 17. Malla Herrigbone vista en planta	33
Figura 18. Sentido de avance de la malla espina de pescado vista en planta	33
Figura 19. LHD entrando a la zanja en la malla Teniente desquinchada vista en planta	34
Figura 20. Malla Teniente desquinchada vista en planta	35
Figura 21. Esquema del sentido de avance del LHD en la Malla Teniente de quinchada vista en planta.....	36
Figura 22. LHD entrando a la zanja en la malla cuadrada desquinchada	37
Figura 23. Malla cuadrada con desquinche vista en planta	37
Figura 24. Esquema del sentido de avance del LHD en malla cuadrada desquinchada vista en planta.....	38
Figura 25. Esquema del plan experimental de la investigación	41
Figura 26. Gráfico del tonelaje extraído por día según cada escenario.....	43
Figura 27. Gráfico del tiempo de ciclo promedio según cada escenario.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Benchmarking mundial en Minas de Caving [7-19].....	9
Tabla 2. Tipos de Mallas, ventajas y desventajas [18, 20-21].....	18
Tabla 3. Ventajas y desventajas de la simulación en computadora [25].....	21
Tabla 4. Intervalos de confianza para las variables según el caso base	42
Tabla 5. Resumen de los resultados de cada variable en estudio	45
Tabla 6. Variación porcentual de cada variable en estudio con respecto a la malla teniente	47



ÍNDICE DE ANEXOS.

ANEXO A. Equipo LHD CAT R1600H.....	52
ANEXO B. Capacidad bucket.....	56
ANEXO C. Distancias recorridas.....	57
ANEXO D. Informe de Excel – Arena.....	61
ANEXO E. Cálculo del desquinche	62
ANEXO F. Simulador Arena	64
ANEXO G. Detalles estadísticos del escenario base	67
ANEXO H. Horas efectivas por turno	69
ANEXO I. Probabilidad de extracción	70



NOMENCLATURA

PE: Punto de Extracción.

TTE: Malla Teniente.

TTE DES: Malla Teniente desquinchada.

CUA DES: Malla Cuadrada desquinchada.

ES PES: Malla Espina de Pescado.

LHD: *Load Haul Dump*.

TPD: Toneladas por día.



1. INTRODUCCIÓN

La explotación de un yacimiento subterráneo utilizando la metodología de *caving* requiere la construcción de una serie de niveles, entre ellos un nivel de producción, el cual se compone de galerías denominadas calles de producción y zanjas. La disposición espacial entre estas labores conforma la malla de extracción. Las principales operaciones unitarias realizadas en esta son el carguío y transporte del mineral. El diseño de la malla de extracción es clave para maximizar los beneficios del yacimiento manteniendo como foco la productividad y estabilidad de la mina.

La metodología de *caving* es un método masivo de explotación, donde el cuerpo mineralizado se hunde naturalmente por gravedad tras iniciar el quiebre del macizo rocoso por una abertura desde el nivel de hundimiento. Existen distintos métodos de hundimiento tales como *Block* y *Panel caving*, que se explotan de un mismo nivel por periodo; pero también existen variantes que se explotan por distintos niveles. Se han incorporado otras variantes del método, esto para poder hacer frente a las distintas dificultades que han ido surgiendo con el paso de los años, como la disminución de las leyes, la profundización de los yacimientos y el aumento de la calidad haciendo más dificultoso su quiebre.

El concepto de malla de extracción es la distribución de los puntos de extracción que se les incorpora el trazado de las calles de producción y zanjas. Existen distintos tipos de malla, por ejemplo, malla Teniente y malla Espina de pescado. El realizar un *benchmarking* permite conocer las distintas mallas de extracción utilizadas en la operación, pero ¿será realmente la configuración óptima y la disposición apropiada de la malla de extracción la que se implementa en cada mina? Utilizando las mallas más conocidas e implementando alternativas de mallas de extracción se espera maximizar la productividad del nivel de producción.

Objetivo general

Esta investigación presenta una comparación de diseños actuales y diseños alternativos de mallas de extracción de una mina *Block/Panel caving*, con el objetivo de aumentar el desempeño de la productividad del nivel de producción.

Objetivos específicos

- Identificar el diseño de las mallas de extracción más utilizados.
- Realizar una variación a los diseños de malla de extracción actuales para presentar alternativas.
- Determinar un caso base.
- Utilizar las condiciones (características, dimensiones y equipos) del escenario base para recrearlo y calibrar un modelo de simulación.
- Mantener las condiciones calibradas del escenario base para las otras mallas usadas en la investigación.
- Producir una mejora en el desempeño de la productividad de los diseños alternativos con respecto al caso basado en la realidad.
- Seleccionar la malla de extracción que presente el mejor desempeño productivo.



2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo describe el método de explotación subterráneo *Block/Panel caving*, sus variantes de socavación y el diseño de mallas de extracción. Además, de los fundamentos de simulación en computadora con el uso del software Arena, el cual posteriormente comparará diferentes mallas de extracción desde el punto de vista de su producción.

2.1 Historia *Block/Panel Caving*

Se puede decir que gran parte de la minería de *caving* tiene sus orígenes en la minería chilena, esto debido a las condiciones de los yacimientos en Chile y a los bajos costos de este método; lo que permitió a la minería de *caving* ir ganando terreno en la explotación minera subterránea en Chile y evolucionando de distintas formas.

Existen distintos métodos de hundimiento tales como *Block* y *Panel caving*, que se explotan de un mismo nivel por periodo; pero también existen variantes que se explotan por distintos niveles (a diferentes cotas) como lo es el *Front Caving*, *Sublevel Caving* y *Inclined Caving*. En el último tiempo se han incorporado otras variantes, como Minería Continua y Macro Bloques, esto para poder hacer frente a las distintas dificultades que han ido surgiendo con el paso de los años, como la profundización de los yacimientos, el aumento de la calidad de roca haciendo más difícil el quiebre y las menores leyes [1].

El método de *Block caving* es un método subterráneo masivo de explotación, a través del cual el cuerpo mineralizado se hunde naturalmente tras iniciar el quiebre del macizo rocoso por una abertura desde el nivel de hundimiento. La explotación en *Block caving* es discreta, por bloques o áreas productivas, donde la fractura del macizo rocoso se genera por la gravedad en conjunto con los esfuerzos internos de la roca generando fragmentos manejables que pasarán a través de puntos de extracción para ser extraídos por un equipo de carga, comúnmente LHD [2].

El método de *Panel caving* es una variante del *Block caving* que funciona con el mismo mecanismo de colapso inducido, abriendo un área en la base de la mineralización, pero se diferencia en el hundimiento que se realiza ya que es continuo, de manera progresiva se van incorporando paneles.

En la Figura 1 se observa un esquema de los métodos descritos anteriormente donde se pueden identificar los diferentes niveles que se necesitan en la implementación del método.

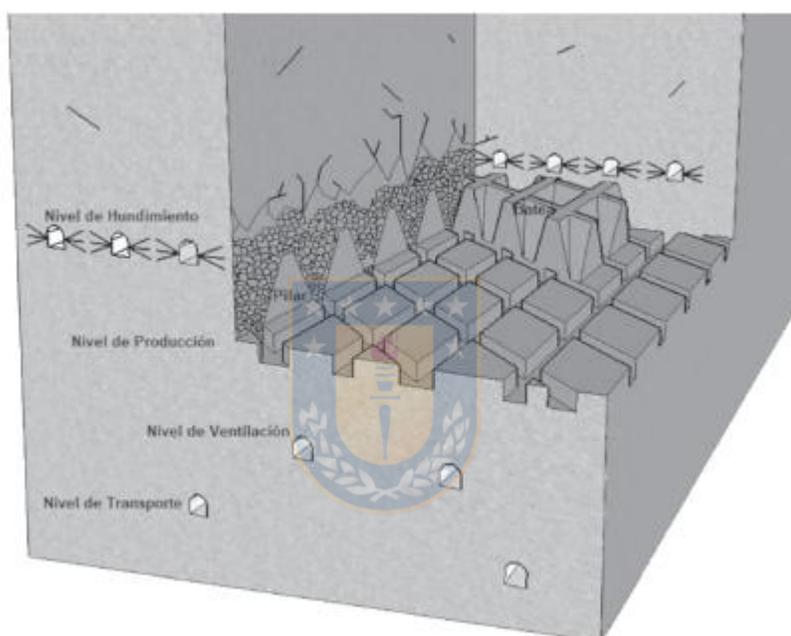


Figura 1. Esquema de explotación de *Block/Panel caving* vista isométrica [1]

2.1.1 Estrategias de hundimiento

Para métodos de *caving* también existen diferencias según el hundimiento efectuado, lo que diferencia la posición del frente de este con el frente de extracción, esto dependiendo de la secuencia de construcción de las labores productivas.

2.1.1.1 Hundimiento Convencional

El esquema de las labores es presentado en la Figura 2 y su secuencia es detallada a continuación [3]:

1. Desarrollo labores adelantadas con respecto al frente de hundimiento en niveles de producción y de hundimiento.
2. Preparación de bateas de extracción.
3. Tronadura en el nivel de hundimiento, avanzando con el frente hacia las bateas abiertas.
4. Inicio de la extracción.

Como se aprecia en la Figura 2, en este tipo de hundimiento casi no hay diferencia entre el frente de extracción y el frente de hundimiento, limitado por la última línea de bateas incorporadas a producción. Por la secuencia de construcción, las labores del nivel de producción se ven sometidas a la zona de altos esfuerzos inducidos (*Abutment Stress*). Esto genera impacto en el pilar corona del nivel de producción [1].



Figura 2. Esquema de construcción de Hundimiento Convencional [4]

2.1.1.2 Hundimiento Previo

Se considera el uso de excavaciones de protección, que, mediante la generación de sombras de esfuerzos, podrían disminuir el riesgo de ocurrencia de inestabilidades geotécnicas asociadas a concentraciones de esfuerzos. La socavación del bloque estaría adelantada respecto a la preparación de las labores en el nivel de producción [5]. A diferencia del hundimiento convencional,

y como se muestra en la Figura 3, en esta estrategia la secuencia constructiva de labores es la siguiente [3]:

1. Preparación de labores en el nivel de hundimiento.
2. Voladura de socavación en el nivel de hundimiento avanzando con el frente de socavación hasta alcanzar una cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
3. Preparación de labores en el nivel de producción.
4. Apertura de bateas bajo área socavada.
5. Inicio de la extracción.

La principal característica del método, es que el desarrollo de todas las labores del nivel de producción es bajo un área completamente socavada, hasta una distancia de seguridad por detrás del frente de socavación. De este modo, la concentración de esfuerzos que se forma es por delante y hacia abajo de dicho frente tiene un efecto mucho menor sobre las instalaciones del nivel de producción [1], tal como se aprecia en la Figura 3.

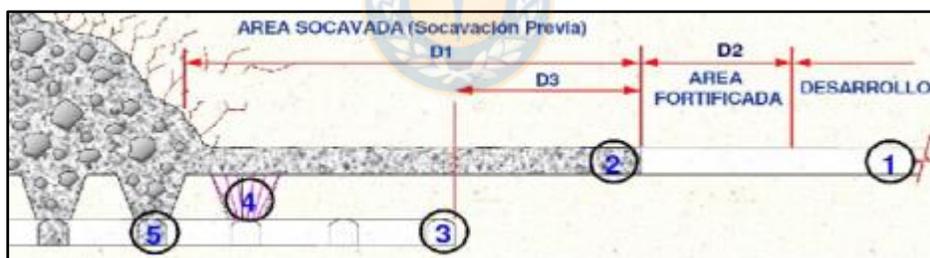


Figura 3. Esquema de construcción de Hundimiento previo [4]

2.1.1.3 Hundimiento Avanzado

En este método, la socavación en el nivel de hundimiento se realiza sobre un nivel de producción parcialmente desarrollado [6]. La secuencia constructiva de labores se detalla a continuación y se aprecian en la Figura 4 [3]:

1. Desarrollo de las labores del nivel de hundimiento, y algunas del nivel de producción (calles de producción).
2. Voladura de socavación en el nivel de hundimiento, avanzando con el frente de socavación hasta alcanzar una cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
3. Se desarrollan las restantes labores del nivel de producción en el sector bajo el área socavada.
4. Se realiza la apertura de las bateas.
5. Se inicia la extracción.

Las bateas son preparadas en una zona relajada desde el punto de vista geotécnico (Figura 4 [4]).

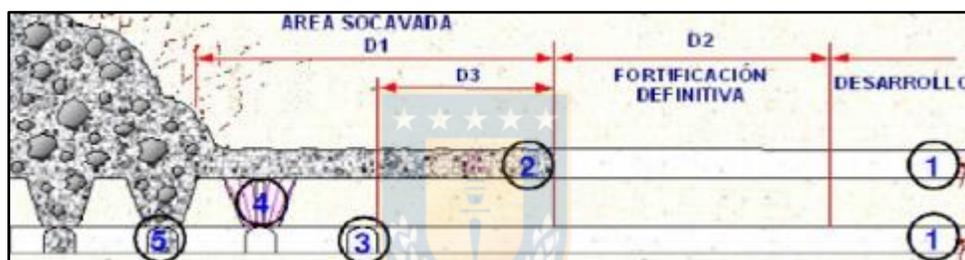


Figura 4. Esquema de construcción de Hundimiento avanzado [4]

Según varios estudios realizados el método de hundimiento que tiene menores repercusiones en el daño del nivel de producción es el método de socavación previa, debido a que a mayores profundidades los esfuerzos no estarían afectándose sobre el nivel de producción.

2.1.2 Análisis comparativo o *Benchmarking*

En la Tabla 1 se adjunta un *benchmarking* de operaciones de *Block* y *Panel caving* a nivel mundial [7-19] en donde se encuentran los estados de las minas especificadas, su ubicación, detalles del diseño y características del yacimiento. Se realiza este análisis comparativo con el objetivo de conocer que tipo de malla de extracción son las mas utilizadas a nivel mundial en minería de *caving*.

Tabla 1. Benchmarking mundial en Minas de Caving [7-19]

Nombre Mina	País	Empresa	Tipo de Malla	Dimensiones Malla [m ²]	Galería [m ²]	Tipo Roca	Profundidad	Tipo caving	Mineral
Andina	Chile	Codelco	Teniente - Espina de Pescado	13x13-15	4x3.6	RMR = 41- 70	3236 msnm	Panel convencional	Cobre
Argyle	Australia	Rio Tinto	Espina de Pescado	15x16	-	UCS = 120-50 MPa	1 km a superficie	Block avanzado	Diamante
Cadia East	Australia	Newcrest	Teniente	16x20	-	UCS = 133 MPa promedio	1475 m a superficie	Panel convencional; Socavación alta	Oro - Cobre
El Teniente	Chile	Codelco	Teniente	15x15	4.3x3.6	RMR = 41 - 85	1800 msnm	Panel convencional	Cobre
Finsch	Sud Africa	De Beers	Teniente-Espina de Pescado	15x15	4.6x4.8	UCS = 40-60 MPa	830 m a superficie	Block avanzado	Diamante
Freeport DOZ	Indonesia	Freeport	Teniente - Espina de Pescado	15x17.3	4x3	UCS= 22 MPa promedio	3120 msnm	Panel	Cobre
Henderson	USA	Freeport	Espina de Pescado	15.25x17.1	4.3x4.3	UCS = 100 - 2175 MPa	3170 msnm	Panel	Molibdeno
Koffiefontein	Sud Africa	De Beers	Espina de Pescado	Túneles horizontales a 15 m	4x4.2	UCS=50 MPa	720 m a superficie	Block	Diamante

Nombre Mina	País	Empresa	Tipo de Malla	Dimensiones Malla [m ²]	Galería [m ²]	Tipo Roca	Profundidad	Tipo caving	Mineral
Northparkes	Australia	Rio Tinto	Espina de Pescado	18x15	-	RMR= 41-64	-	Panel avanzado	Cobre - oro
Palabora	Sud Africa	Rio Tinto	Espina de Pescado	17x17	4x4	UCS = 320 - 120 MPa RMR= 48 -76	1200 m a superficie	Block	Cobre
Premier Diamond (Culligan)	Sud Africa	Petra diamonds	Espina de pescado	15x15-18	3.6x3.8 4.2x4.2	UCS=50-400 MPa	630-732 m a superficie	Panel	Diamante
Ridgeway Deeps	Australia	Newcrest	Espina de Pescado	15x18	4.6x4.7	UCS=99 - 121 MPa	4786 msnm	Block avanzado	Oro
Salvador	Chile	Codelco	Espina de pescado	12x12.5	4.3x3.8	RMR = 70 - 85	700 m a superficie	Panel	Cobre
Tongkuangyu	China	-	Espina de pescado	15x15	4.2x3.4	UCS=60 – 220 MPa	690 msnm	Block	Cobre

La minería de *caving* ha tenido bastante éxito a nivel mundial, debido a su productividad, bajos costos y por la profundidad de los yacimientos que provoca el traspaso de una mina a Cielo Abierto a una mina Subterránea. Pero, aún existen variados retos, relacionados a lo siguiente [20]:

1. Caving forzado.
2. Pre-acondicionamiento.
3. Altura de socavación inicial.
4. Fragmentación.
5. Actividad sísmica y colapsos en roca competente.
6. Control de extracción.
7. Tasa de hundimiento.

Estos puntos deben ser estudiados pero su objetivo final se debe basar en la producción, las soluciones que se plantean a estos temas deben estar en pro de la maximización de producción diaria de una mina.



2.2 Malla de extracción

El concepto de malla de extracción es la distribución de los puntos de extracción que se les incorpora el trazado de las calles de producción y calles zanjadas. El dimensionamiento de la malla (Figura 5) queda definido con:

1. La distancia entre calles perpendicular a las calles ($D_{c\perp c}$).
2. La distancia entre zanjadas paralela a las calles ($D_{z//c}$).
3. El ángulo calle/zanja (β).
4. El ancho de las calles (a).

Una vez determinado el diseño de la malla de extracción a utilizar, se realiza el proceso de operativización de esta, que consiste en ajustar la malla, considerando la geometría del equipo LHD

a utilizar [20]. Pero, hay autores que proponen no realizar el proceso de operativización ya que el equipo se debe adaptar a la malla.

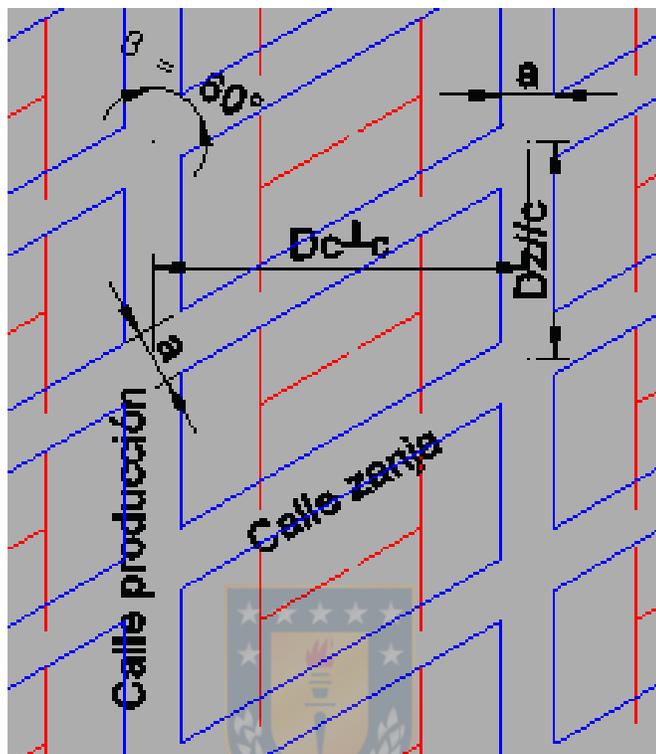


Figura 5. Principales dimensiones de una malla Teniente vista en planta

2.2.1 Diseño de malla de extracción

Para el diseño de una malla se deben partir con ciertos parámetros que determinarán las dimensiones de la malla. Primero, conocer la clasificación del macizo y el ancho del punto de extracción para utilizar el Abaco de Laubscher (Figura 6) que entrega el espaciamiento teórico máximo y mínimo entre puntos de extracción para asegurar la interacción de las zonas de flujo de los puntos de extracción. Posteriormente con la curva de Laubscher (Figura 7) determinar la altura de interacción (Hz). Estos son parámetros que se basan principalmente en la hundibilidad, la fragmentación, el diseño de extracción, el espaciamiento y la secuencia de extracción del método de hundimiento planteado por Laubscher [20].

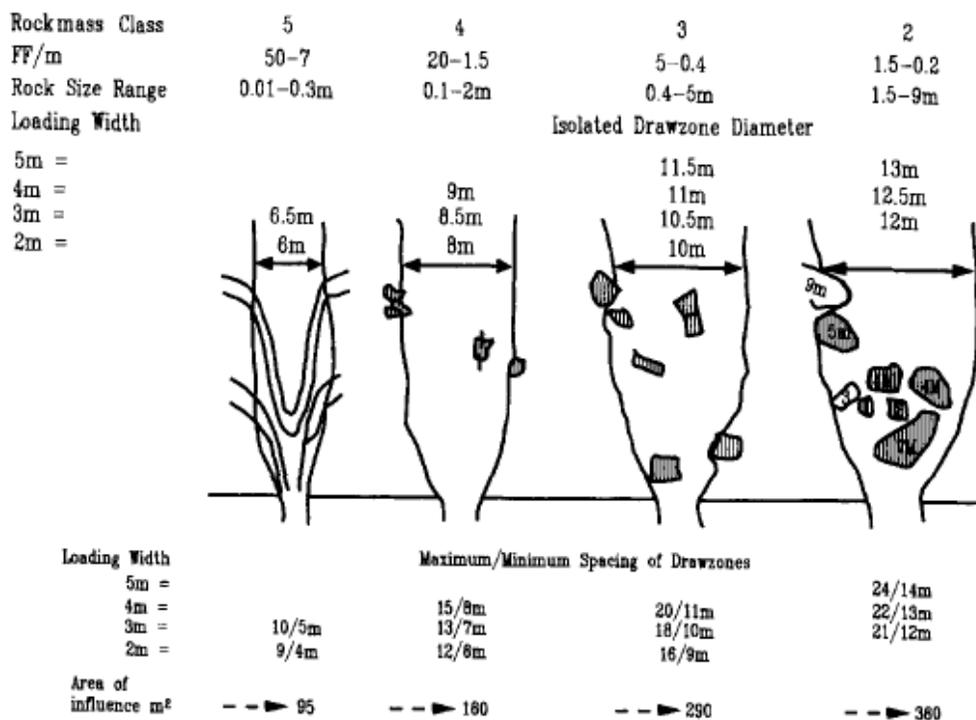


Figura 6. Abaco de Laubscher, determina el diámetro de la zona de flujo aislada y espaciamento entre puntos de extracción [20]

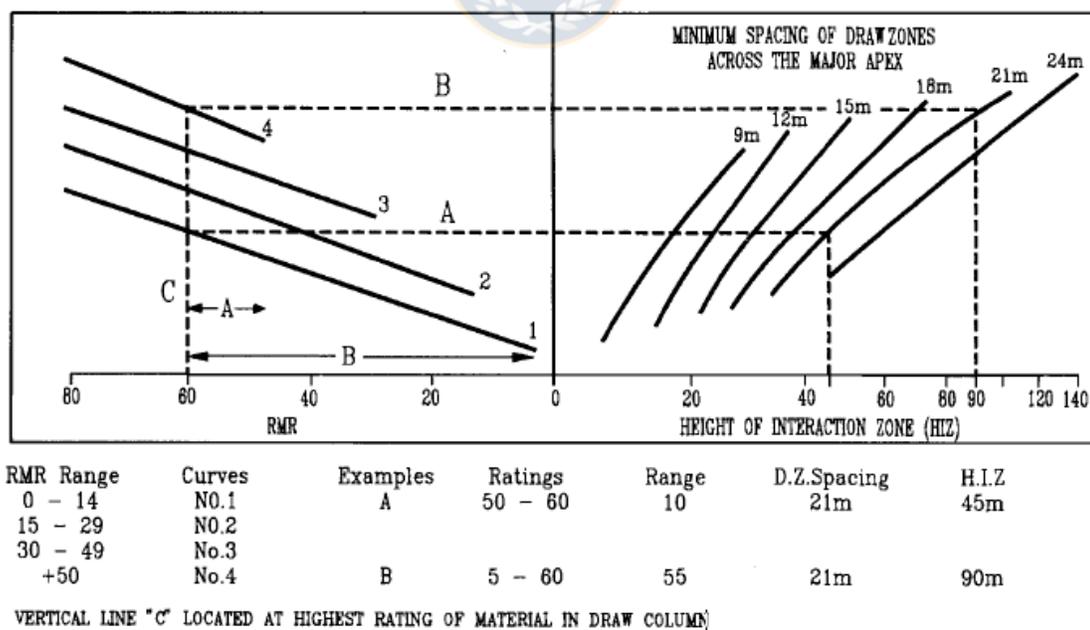
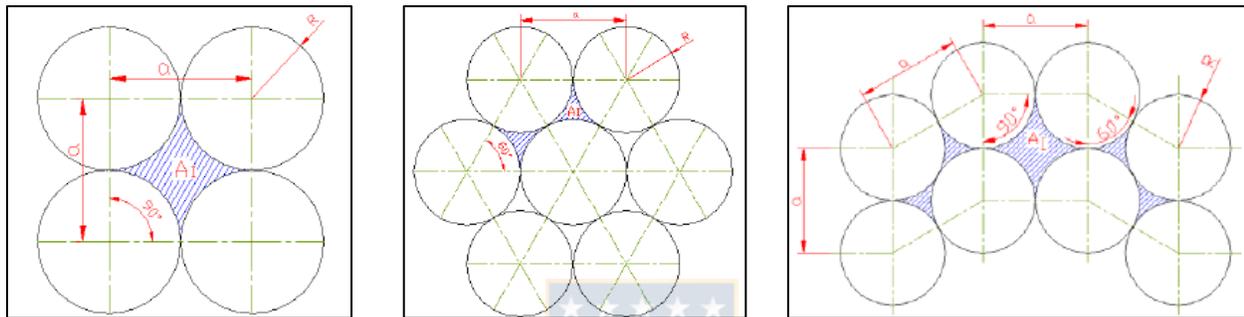


Figura 7. Curva de Laubscher que determina la altura de interacción entre zonas de flujo de puntos de extracción contiguos [20]

Posteriormente, se determina la distribución de los elipsoides en el nivel de producción que determinará el tipo de malla de extracción. Los elipsoides tienen formas básicas de disposición, según su disposición espacial desde la vista en planta de elipsoides de extracción [21]:

- Configuración cuadrada (Figura 8 (a))
- Configuración triangular (Figura 8 (b))
- Configuración mixta (Figura 8 (c)).



(a) Configuración cuadrada

(b) Configuración triangular

(c) Configuración mixtra

Figura 8. Configuración de los elipsoides vista en planta [21]

Pero, independiente a esta disposición se pueden distribuir [21] en elipsoides:

- Separados
- Tangentes
- Traslapados
- O combinaciones de los anteriores.

Esto permite encontrar variadas configuraciones de puntos de extracción, según la disposición de los elipsoides, y estas son comparadas debido a sus criterios geométricos: Densidad, ángulo entre ejes, área de diseño, sustentación (% interacción), anisotropía y distorsión [21].

Existen distintos tipos de mallas de extracción para utilizar en un método de *Block/Panel caving* y una vez determinada la distribución geométrica de los elipsoides de extracción se puede determinar qué tipo de malla de extracción puede optar como diseño minero.

La malla tipo espina de pescado como se ve en la Figura 9, consiste en una configuración mixta de elipsoides de extracción. Existen algunos casos de aplicación de esta malla en la mina El Teniente (Ten-4 Regimiento).

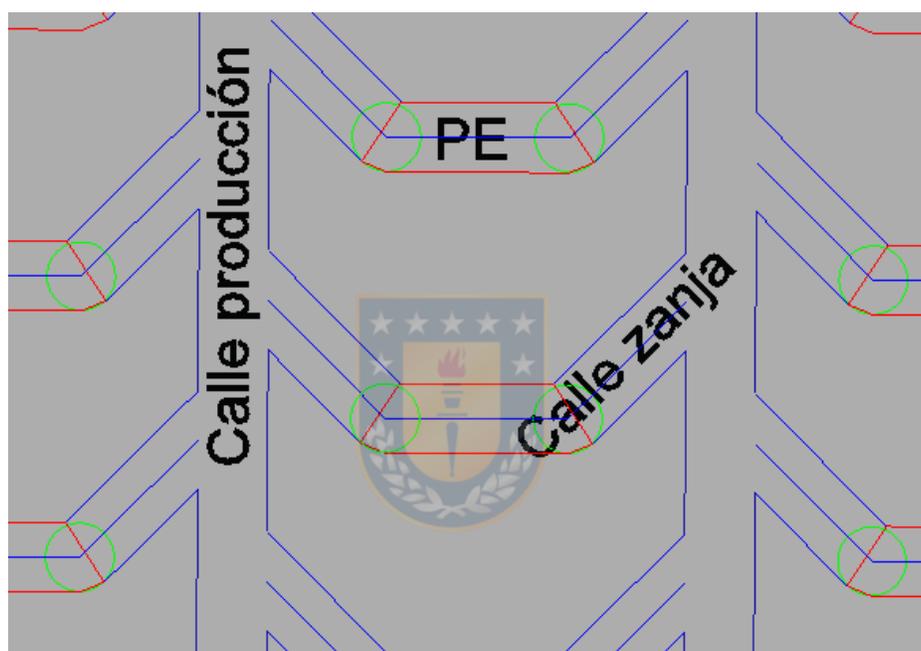


Figura 9. Malla tipo espina de pescado vista en planta

En la Figura 10 se observa la malla tipo Teniente la cual tiene una configuración triangular de elipsoides de extracción, es de las configuraciones más utilizadas en el método *caving*. Y este tipo de malla ha dado muy buenos resultados operacionales, de ahí que su aplicación se extendiera a casi todos los sectores en la Mina El Teniente.

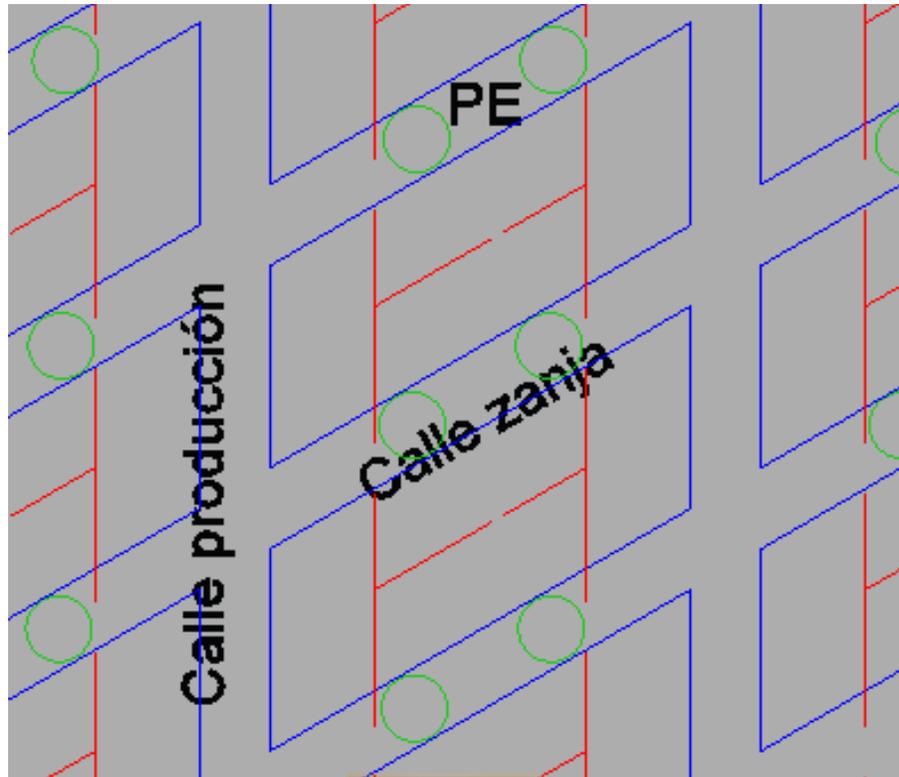


Figura 10. Malla tipo Teniente vista en planta

La Figura 11 presenta una configuración cuadrangular de elipsoides de extracción que corresponde a una malla tipo cuadrada. No se conocen experiencias prácticas de esta malla en el método *caving*.

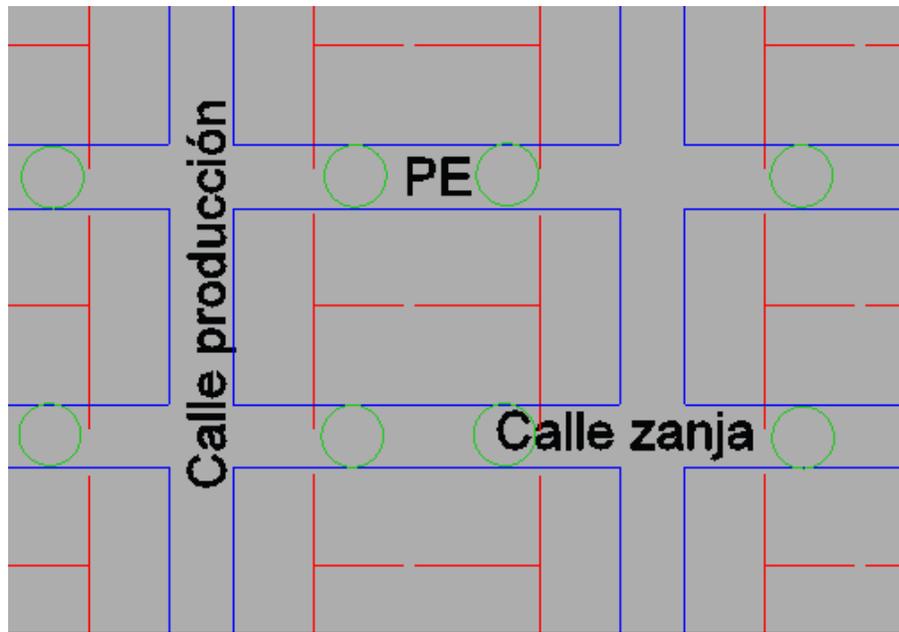


Figura 11. Malla tipo cuadrada vista en planta

Las mallas especificadas anteriormente presentan ventajas y desventajas de utilización las que se encuentran en la Tabla 2 [18, 20-21].



Tabla 2. Tipos de Mallas, ventajas y desventajas [18, 20-21]

Tipo de Malla	Ventajas	Desventajas
Espina de Pescado (Figura 9)	<p>Se aumenta separación entre galerías y estocadas.</p> <p>Punto de extracción simple o doble.</p> <p>Ampliamente utilizada en minas que se explotan por el método <i>Caving</i>.</p> <p>Dada su geometría tiene menores pérdidas de caudal.</p>	<p>Espaciamiento Excesivo en sentido transversal.</p> <p>Poco espaciamiento en sentido longitudinal.</p> <p>No se cumple condición de equidistancia.</p> <p>Longitud de estocada no alcanza a dar cabida a los cargadores, lo que afecta la vida útil de las palas.</p>
Teniente (Figura 10)	<p>Estocadas de carguío frente a frente en sentido opuesto</p> <p>Puntos de extracción dobles</p> <p>Simpleza del diseño</p> <p>Ampliamente utilizada en minas del método <i>Caving</i>.</p> <p>El grado de mecanización con usos del LHD, el ángulo calle/zanja de esta es adecuado para la operación del LHD.</p> <p>Dos direcciones de galerías</p>	<p>No equidistante</p> <p>Se sacrifica un poco el rendimiento de los equipos en beneficio de su vida útil.</p>
Cuadrada (Figura 11)	<p>Dada la geometría de la malla cuadrada donde el pilar central tiene una sección rectangular, se esperaría un factor de seguridad mayor que en las otras mallas.</p>	<p>No existen experiencias de aplicación de la malla cuadrada en <i>Panel Caving</i>, solo hay estudios de Ingeniería Conceptual.</p> <p>En el método <i>Block Caving</i>, esta malla ha sido la base de diseño de este método.</p> <p>Esta malla no es conveniente aplicarla al método <i>Panel Caving</i>.</p>

Se requiere de condiciones bases para la implementación de estas mallas. En primer lugar, ser lo suficientemente estrecha de modo que los volúmenes en movimiento se intercepten a una altura adecuada evitando pérdidas de mineral y una dilución prematura [21]. En segundo lugar, ser lo suficientemente amplia de modo de maximizar el área de sustentación del nivel, permitiendo una operación eficiente de los equipos cargadores y minimizar el costo de desarrollo [21]. Y finalmente, ser equidistante, es decir, las distancias entre puntos de extracción contiguos deben ser iguales cualquiera sea la dirección considerada.

2.3 Carguío y transporte del nivel de producción en minería subterránea

Las minas subterráneas cuentan con varios niveles para funcionar adecuadamente, como lo son el nivel de ventilación, el nivel de producción, el nivel de hundimiento, el nivel de transporte principal que llega a superficie y en algunos casos un nivel de transporte intermedio para movilizar el material dentro de la mina a distintos niveles. Pero por efectos del estudio, este se centra en la implementación del nivel de producción, el cual cuenta con los procesos unitarios de carguío y transporte de material.



2.3.1 Carguío

Los equipos de carguío realizan la labor de cargar el material desde la frente de trabajo hacia un equipo de transporte que lleva el material a un determinado destino. Algunos de ellos son palas, cargadores o equipos de flujo continuo.

2.3.2 Transporte

Los equipos de transporte tienen por principal función desplazar el material extraído por el equipo de carguío hacia un punto de destino definido por el plan minero. Por ejemplo, trenes, camiones, correa transportadora o panzer.

Finalmente, se pueden definir los equipos mixtos, que pueden realizar el carguío y transporte del mineral en una sola operación. El equipo que corresponde a esta categoría es el *Load Haul Dump* (LHD), una pala de bajo perfil para minería subterránea como se observa en la Figura 12, que tiene autonomía para realizar eficientemente traslados de 29 hasta 300 metros de material [22], su rendimiento es decreciente en función de la distancia recorrida.



Figura 12. Equipo LHD [23]

El LHD puede cargar camiones de bajo perfil y camiones convencionales, también descargar sobre piques de traspaso o sobre suelo. Estos equipos cargan, acarrear o transportan y vacían el mineral de forma discreta, lo que significa que tiene un tiempo de ciclo asociado a cada operación. Los tiempos asociados al ciclo de un LHD son los siguientes:

1. Tiempo de carga.
2. Tiempo de descarga.
3. Tiempo maniobras (Posicionamiento en el PE y pique de traspaso).
4. Tiempo de viaje del equipo cargado.
5. Tiempo de viaje del equipo vacío.

2.4 Simulación de procesos unitarios

La simulación es la imitación de un proceso o sistema de la vida real en el tiempo y está implica la generación y observación de una historia artificial para sacar conclusiones relativas a las características del sistema real que se está presentando [24]. Se estudian a través de evaluaciones numéricas usando *softwares* que permiten realizar simulaciones. A pesar de que esta no es la única herramienta para estudiar un modelo, con frecuencia es la más elegida. Esto se debe a que el modelo de simulación se puede permitir una gran complejidad para representar el sistema con exactitud. El desarrollo que se ha producido en estas tecnologías de simulaciones por medio de *softwares* puede ser considerado un trampolín para otras industrias, pero existen ciertas ventajas y desventajas que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de la simulación en computadora [25]

Ventajas	Desventajas
Elección correcta	El modelo construido requiere entrenamiento especial
Comprensión y extensión de tiempo	Los resultados de la simulación pueden ser difíciles de interpretar
Entiende por que	El modelamiento y el análisis pueden consumir tiempo y ser caro
Explore posibilidades	La simulación puede usarse inapropiadamente
Diagnóstico de problemas	
Identificación de restricciones	
Desarrollando comprensión	
Visualizando el plan	
Construyendo consenso	
Prepare el cambio	
Invierta sabiamente	
Especifique los requerimientos	

Existen distintos tipos de simulación que se pueden utilizar, pero si se habla de un proceso minero, se utilizan modelos estocásticos de eventos discretos.

2.4.1 Modelo Estocástico

Un modelo es estocástico cuando una o más de sus variables de entrada es aleatoria. Las variables del modelo calculadas a partir de variables aleatorias también son aleatorias. Por ello, la evolución de este tipo de sistemas debe estudiarse en términos probabilísticos [26].

2.4.2 Eventos Discretos

La simulación de eventos discretos se basa en el uso de ecuaciones matemáticas y estadísticas. Consiste en relacionar los distintos eventos que pueden cambiar el estado del sistema por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas [27].

Las variables del modelo cambian únicamente en determinados instantes de tiempo y en el caso de eventos discretos no existe restricción, el tiempo que transcurre entre eventos consecutivos puede ser cualquiera [26].

2.4.3 Software Arena

Arena es un sistema que provee un entorno de trabajo integrado para construir modelos de simulación de una amplia variedad de campos; integra, en un ambiente fácilmente comprensible, todas las funciones necesarias para el desarrollo de una simulación exitosa. Es necesario basarse en los fundamentos de la simulación, que son especificados a continuación [28]:

- **Entidades:** Puede ser un objeto o persona que se mueve a través de un sistema y que causa cambios en las variables de respuesta.

- **Recurso:** Es un elemento estacionario que puede ser ocupado por una entidad. Los recursos se emplean cuando se requiere representar actividades claves del sistema que restringen el flujo de entidades.
- **Atributo:** Es una característica propia de cada entidad y se pueden definir tantos atributos como lo requiera el usuario para el modelamiento del sistema en estudio.
- **Variables:** Representan características del sistema, de carácter global. Pueden ser predeterminadas por el programa o definidas por el usuario.
- **Sistema:** Es un conjunto de componentes interrelacionadas que, en una forma organizada, recibe entradas y las procesa y emite salidas para obtener una meta común.
- **Modelo:** Es una representación de la realidad que se desarrolla con el propósito de estudiarla. En la mayoría de los análisis no es necesario considerar todos los detalles; de tal manera, el modelo no sólo es un sustituto de la realidad, sino también una ejemplificación de ella.
- **Evento:** Es la ocurrencia que cambia el estado del sistema.

2.4.4 Simulación - Casos de estudio

Existen varios casos de estudio que se basan en simulaciones de procesos mineros para plantear llevar a cabo las investigaciones y obtener resultados, a continuación, se presentan dos ejemplos:

2.4.4.1 “The use of ARENA Simulation to estimate Drawpoint Construction Rate, Production Rate and Costs for the Hugo North Lift 1 Panel Cave” [29]

Este primer ejemplo, es un caso de estudio que fue presentado en la conferencia MassMin 2012, y describe a la simulación como una parte clave e integral de la planificación minera para el estudio de factibilidad de Oyu Tolgoi. La simulación brinda la confianza de que la mina podrá operar según lo planeado. Lo que permite al equipo de diseño de la mina evaluar los rangos de resultados como casos sensibles para que los aspectos críticos del diseño de la mina y de la producción puedan enfocarse en los elementos que impactan la tasa de producción y la tasa de construcción del punto de extracción. Las ejecuciones de simulación pueden tener resultados inesperados y, si se dedica tiempo a comprender los resultados, se pueden realizar mejoras significativas en el diseño de la mina y las estrategias operativas. La comprensión de los resultados permite la experimentación en forma de estudios para optimizar el diseño de la mina y las estrategias operativas. Ayudando a comprender qué factores impulsan el *ramp up*, la tasa de producción y otros indicadores clave de rendimiento para que la operación centre el trabajo en las áreas que generan valor. El uso de esta simulación puede extenderse desde la fase de estudio a la construcción y operación, introduciendo tiempos de actividad medidos para predecir los físicos y los costos de construcción, desarrollo y producción a lo largo de la vida útil de la mina.



2.4.4.2 “Application of simulation to improved planning at Esmeralda, El Teniente Mine, Chile” [30]

El segundo ejemplo, es un caso de estudio que fue presentado en la conferencia MassMin 2004, que demuestra a través del uso de la simulación cómo se puede maximizar la utilización del área de producción disponible. Teniendo en consideración las restricciones de geomecánica impuestas sobre el diseño de la mina, la planificación y secuencia de las operaciones de desarrollo y construcción en los niveles de producción y socavación. La simulación ofrece la oportunidad de explorar fácilmente muchas posibilidades de planificación diferentes en muy poco tiempo. Se consideraron tres alternativas a simular, pero la conclusión general del estudio de simulación destaca que es posible aumentar la utilización real del nivel de producción del 65 al 80 por ciento. Al hacerlo, se puede obtener la misma producción de un área más pequeña o una producción más alta de la misma área.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Este capítulo especifica la metodología de la investigación realizada que evalúa las alternativas de mallas de extracción en el nivel de producción de una mina tipo *Block/Panel caving*. Esta incorpora las simulaciones de cuatro mallas distintas de extracción. Las cuáles son evaluadas y modeladas por un enfoque de obtener la productividad de cada malla en el *Software Arena*.

3.1 Metodología general

La metodología de este estudio se basa en el cumplimiento de una serie de etapas que se identifican a continuación:



Figura 13. Esquema de la metodología general de la investigación

En la Figura 13 se observa un esquema que permite interpretar la metodología que se utilizó para el estudio. En base al resumen detallado en Tabla 1 se identifican las mallas más utilizadas a nivel mundial para incorporar ese tipo de malla a la investigación. Luego, se incorpora nuevos

diseños de mallas que son propuestas como objeto de este estudio. Se construye un caso base teniendo en cuenta la información que fue recopilada para utilizarla como parámetros de entrada de la simulación base. Posteriormente, se realiza el modelo conceptual que permite representar los procesos que se deben modelar y recrear del escenario considerado como caso base. Antes de comenzar con la simulación es necesario preparar los datos, definiendo la asignación de variables durante la simulación y las condiciones del modelo. Luego, realizar un modelo inicial a modo de calibrar lo que se va a realizar y confirmar que está realizando los eventos. Finalmente, se procede a realizar las simulaciones de todas las mallas en estudio que finalmente permiten comparar los resultados entre cada escenario y el caso base, logrando resultados realistas ya que fue calibrado y entregar recomendaciones de la investigación.

3.2 Modelo conceptual

El modelo conceptual es la representación de un sistema que sirve como un plano para saber los procesos que se modelarán, menciona el objetivo que se busca y entrega los límites que tiene. Este modelo debe contener un nivel de detalle suficiente que sirva como guía de construcción del modelo computacional.



- **Objetivo**

Calcular la productividad de una calle de producción para la malla utilizada en base a la Mina RENO, para luego utilizar este modelo y replicar en las otras mallas que están bajo estudio, para posteriormente comparar sus producciones.

- **Alcance**

- El modelo solo toma en consideración parámetros que afecten la productividad de la calle en estudio, como lo son las horas efectivas de trabajo, las maniobras de los equipos y la formación de colgaduras en los puntos de extracción.
- Queda fuera del modelo las condiciones de estabilidad.

- Queda fuera del estudio la evaluación económica para las mallas propuestas.
- Se trabaja solo con datos obtenidos directamente desde la faena, Mina RENO.
- El pique de traspaso no presenta interferencias dentro del modelo.

- **Elementos principales**

- Lugares principales: Son los lugares que pueden repercutir en el rendimiento de la producción. Como lo son la calle producción, las calles zanjas, los puntos de extracción y los piques de traspaso.
- Equipos: El modelo considera el uso de un LHD, del cual se necesita conocer la capacidad del balde de la pala y la velocidad del equipo. Características que repercuten directamente en la tasa de producción.
- Actividades de la producción: Operaciones unitarias o maniobras que constituyen el tiempo de ciclo.

1. Operación de cargar la pala.
2. Transporte desde el punto de extracción al pique de traspaso.
3. Operación de descargar la pala en el pique de traspaso.
4. Transporte desde el pique de traspaso al nuevo punto de extracción asignado.
5. Maniobras del equipo.

- **Layout**

El *layout* determina el movimiento del equipo, la distancia que recorre y los tiempos de traslado. Por esto es importante conocer el tipo de malla, las dimensiones de esta y la disposición de los lugares principales.

También se puede representar el modelo conceptual en un esquema que apoye a representar lo que se busca simular, como se observa en la Figura 14.

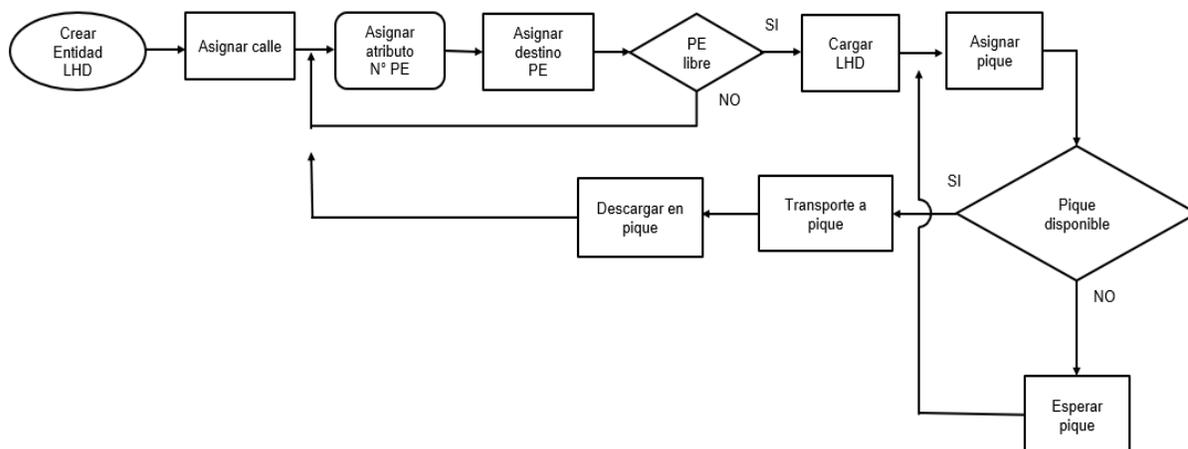


Figura 14. Esquema del modelo conceptual

3.3 Parámetros y variables de entrada

Para comenzar el diseño de la simulación es necesario tener claro una serie de parámetros iniciales, ya sean fijos o variables a lo largo del modelo, para poder desarrollar la investigación, estos parámetros están condicionados al escenario base, la “Mina Reservas Norte (RENO) – División El Teniente - CODELCO”.

3.3.1 Malla de Extracción

La malla utilizada en la Mina Reservas Norte (RENO) es tipo Teniente tiene una dimensión de 15 x 17.32 [m²] y cuenta con galerías de sección 4.3 x 3.6 [m²] [31].

3.3.2 Equipo LHD

El uso de estos equipos es fundamental para los procesos de carguío y transporte, llevando el mineral desde un punto de extracción hacia un pique de traspaso. Debido al escenario base de esta investigación se utilizará un LHD CAT R1600H de 7 yd³ [22, 32-33], equipo que actualmente se utiliza en el escenario base. Los detalles de este equipo se entregan en el ANEXO A.

La capacidad del *bucket* sigue una distribución triangular que tiene como mínimo 7.77 toneladas, de moda 9.77 toneladas y máximo 11.77 toneladas. Para más detalles sobre la capacidad de la pala revisar el ANEXO B.

3.3.3 Distancias recorridas

Dependiendo de la disposición de la malla y los puntos de extracción, de los cuales se recolecta el material, varía la distancia que recorre al pique de descarga, para más detalle de cada distancia recorrida revisar el ANEXO C.

3.3.4 Tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo del equipo es variable durante la simulación dependiendo del tiempo que tome cargar y descargar la pala, la velocidad a la que trabaja el LHD, las maniobras que realice y la distancia recorrida.

Por esto, el tiempo de carga de la pala sigue una distribución triangular un mínimo de 0.33 minutos, la moda 0.58 minutos y un máximo 0.83 minutos; el tiempo de descarga de la pala también sigue una distribución triangular en la que cuenta con un mínimo de 0.25 minutos, la moda 0.33 minutos y un máximo 0.58 minutos. Para el caso del tiempo de traslados y maniobra depende de la velocidad del equipo, en conjunto con la distancia que se deba recorrer, pero se considera cuando el equipo está cargado su velocidad es de 7.2 km/h y su velocidad al ir descargado es de 10.8 km/h.

3.4 Parámetros y variables de salida

El simulador a través de las indicaciones entregadas otorga un archivo Excel, que se puede visualizar en el ANEXO D, permitiendo interpretar y registrar varios resultados. En la planilla Excel se va registrando los siguientes parámetros:

- LHD que está trabajando.
- N° Punto de extracción.
- N° de ciclos.
- Tiempo inicial del ciclo.
- Tiempo final del ciclo.
- Tiempo de ciclo.
- Tonelaje del ciclo.
- Tonelaje acumulado.
- N° de colgaduras.
- Tonelaje Pique 1.
- Tonelaje Pique 2.

Para el estudio en específico es necesario conocer el comportamiento de algunas variables de salida para cada escenario que son obtenidas por lo entregado en el Excel. Para esta simulación las variables de interés son:

- Tiempo de ciclo promedio.
- Tonelaje extraído diariamente.



3.5 Escenarios a estudiar

En base a lo investigado en el *benchmarking* de la Tabla 1, se identifican dos tipos de mallas utilizadas recurrentemente, y se proponen otras dos mallas que permiten hacer variaciones en el diseño del nivel de producción para realizar la comparación entre cuatro escenarios. Para poder diseñar estos escenarios se utilizan los *softwares AutoCAD* y *SketchUp*, que permiten representar los escenarios en estudio.

3.5.1 Malla Teniente

Este es el caso base, en la Figura 15 se puede observar una malla tipo Teniente, junto a sus características y dimensiones. Estas son en base a lo especificado en el subcapítulo anterior, como variables de entrada para el estudio.

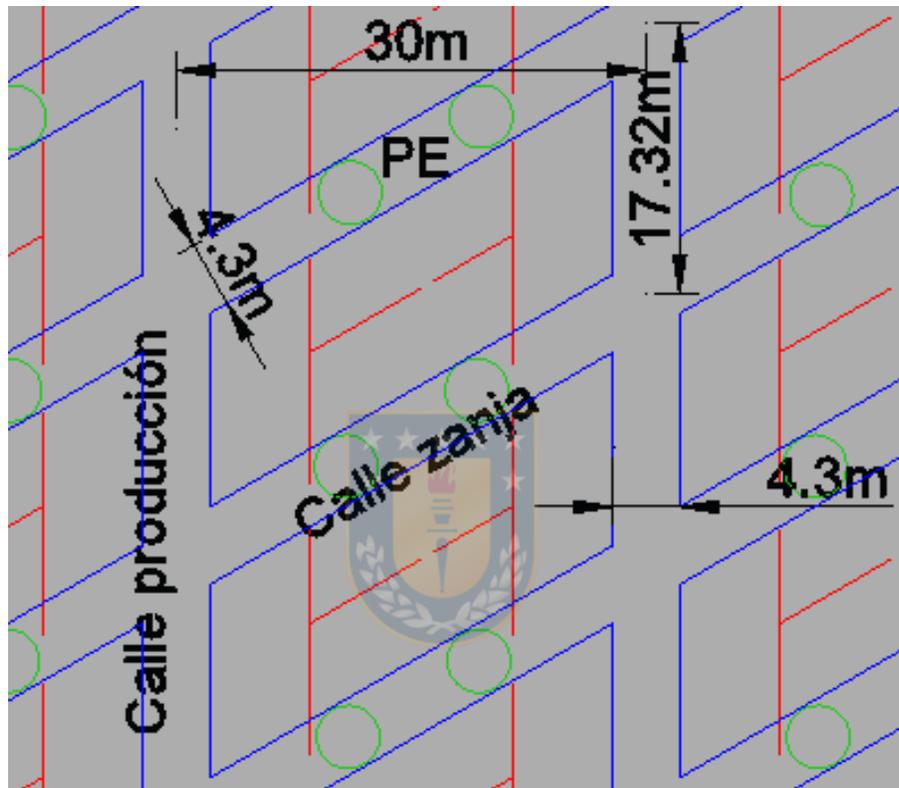


Figura 15. Malla Teniente vista en planta

Considerando la forma en que se desplaza el LHD en esta malla se observa en la Figura 16 el sentido de avance del equipo y otorga la restricción de extracción a la simulación, que dependiendo de que el LHD lleve el *bucket* por delante llevara ese sentido de avance y solo podrá proceder a la extracción de los PE en la zanja a 60° de su sentido de avance.

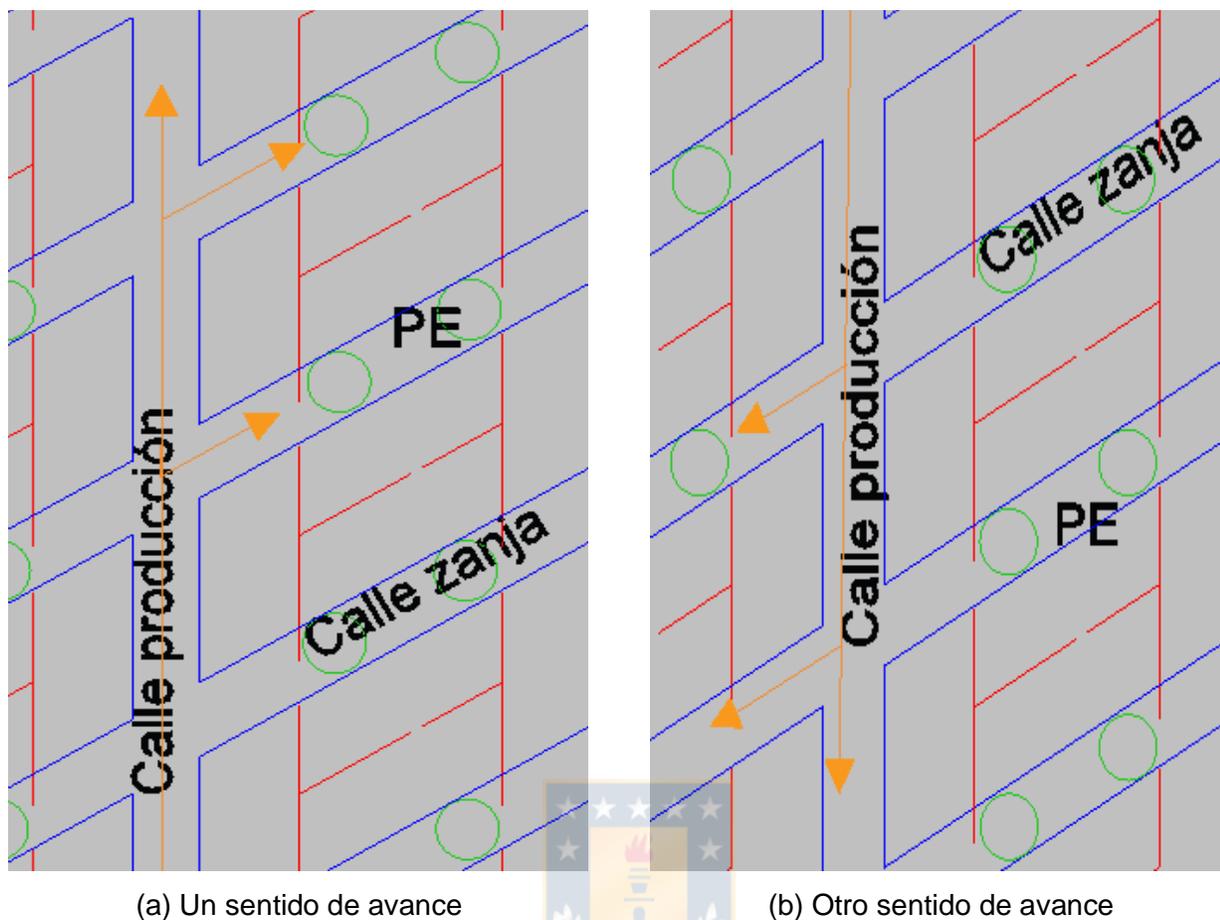


Figura 16. Esquema del sentido de avance del LHD en la malla Teniente vista en planta

3.5.2 Malla *Herrigbone*

Se trata del segundo caso estudio, una malla tipo Espina de pescado o *Herrigbone* como se observa en la Figura 17. Esta malla también está en base a los parámetros de entrada del estudio, lo que varía en este caso es la disposición de las bateas y las distancias que se recorren los LHD para acceder a los PE.

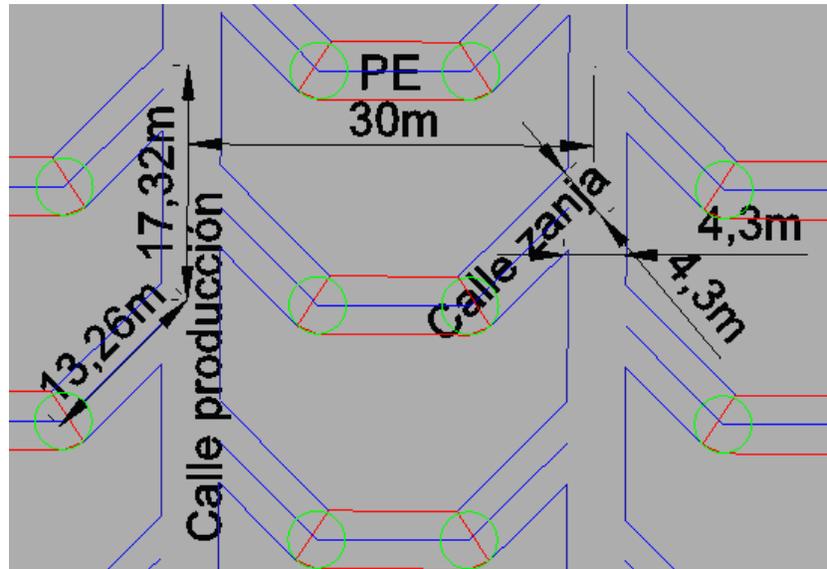


Figura 17. Malla Herrigbone vista en planta

Considerando esta malla se observa en la Figura 16 el sentido de avance del equipo y la restricción de operación a la simulación, que depende de la orientación de la calle zanja el sentido de avance del LHD.

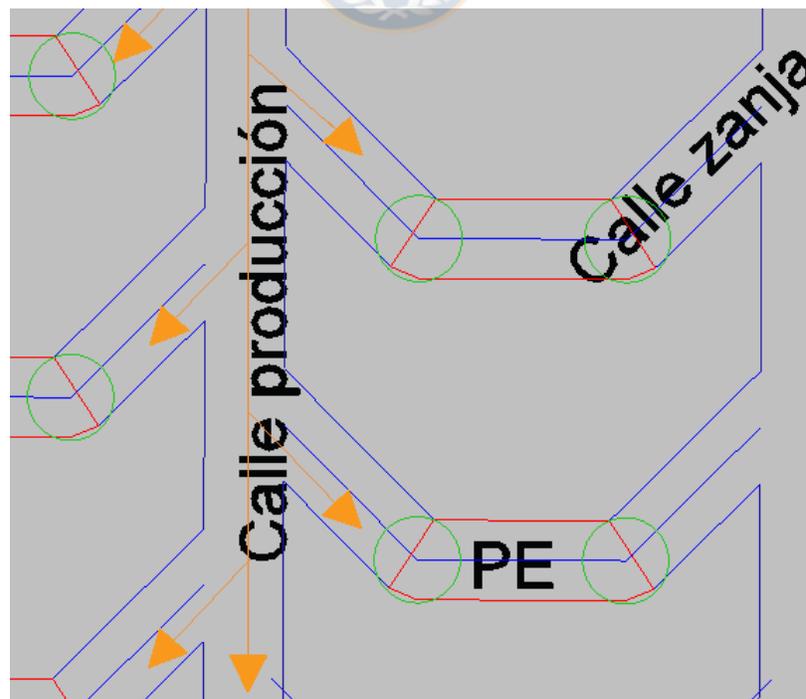
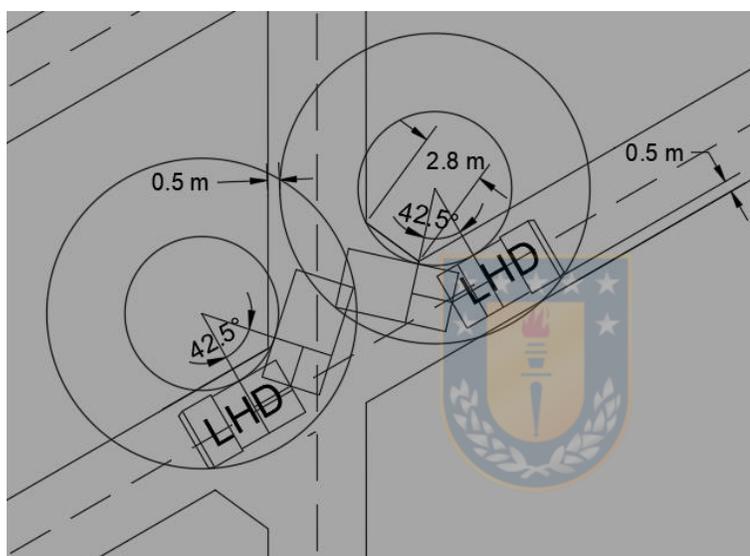


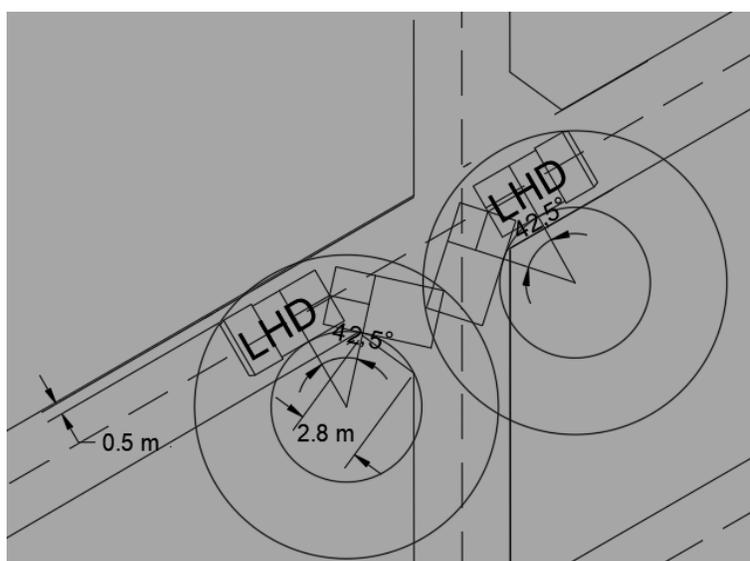
Figura 18. Sentido de avance de la malla espina de pescado vista en planta

3.5.3 Malla Teniente desquinchada

La primera alternativa se basa en la malla Teniente, pero en este caso se busca que el equipo especificado, CAT R1600H, independiente de la dirección que lleva, pueda entrar a cualquier zanja a realizar la operación de carguío, como se observa en la Figura 19, en base al radio de giro del equipo se determina el desquinche necesario para realizar la maniobra, para ver mayor detalle del cálculo del desquinche revisar el ANEXO E, obteniendo la configuración de la malla que se observa en la Figura 20 conservando las mismas dimensiones del caso base.



(a) LHD
entrando
en un
sentido



(b) LHD
entrando
en el otro
sentido

Figura 19. LHD entrando a la zanja en la malla Teniente desquinchada vista en planta

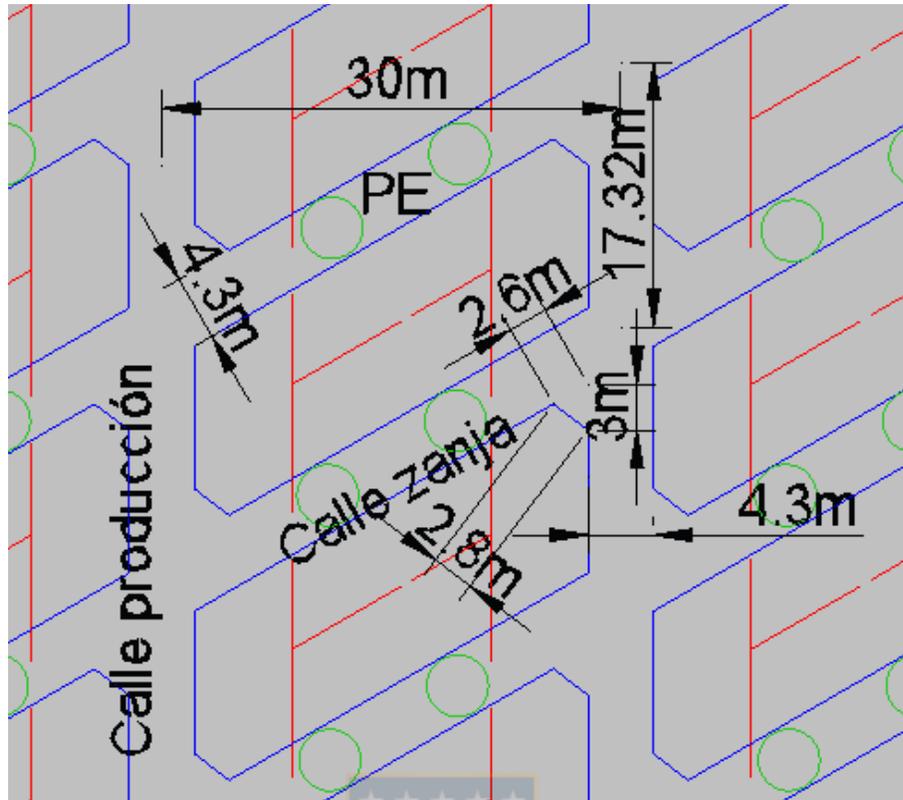
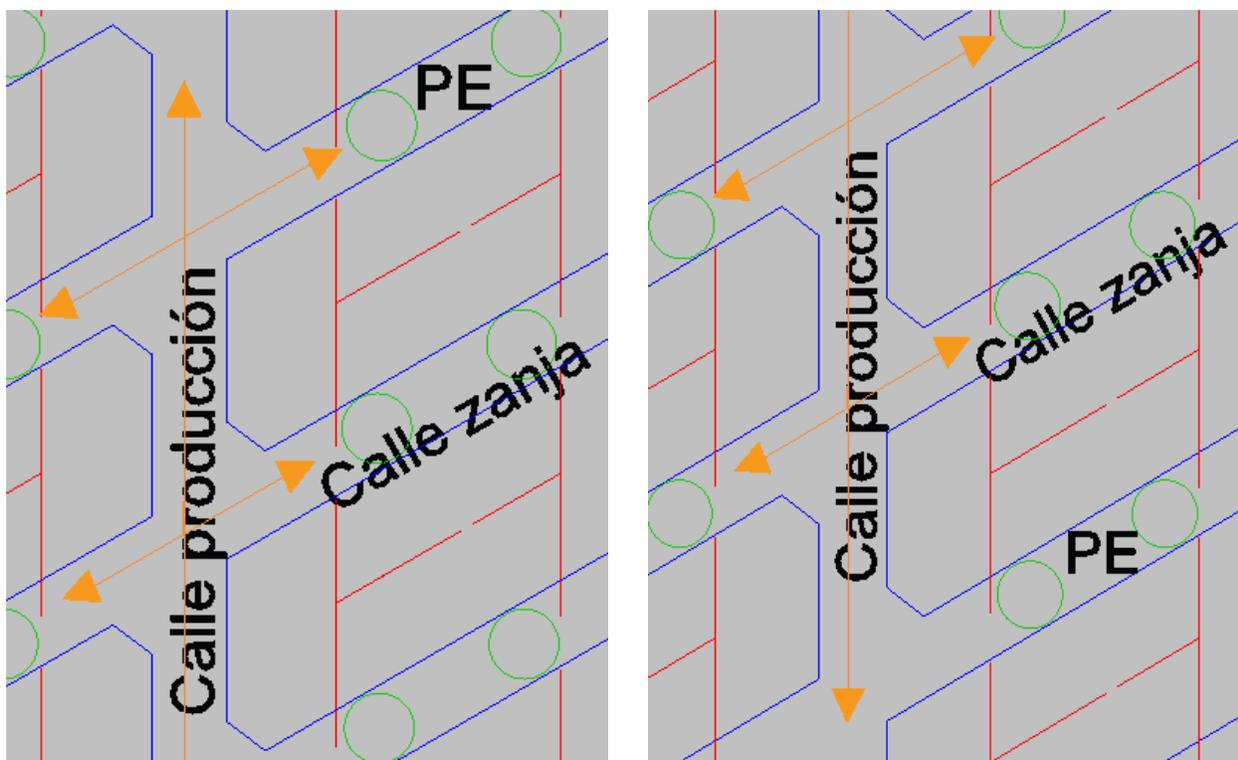


Figura 20. Malla Teniente desquinchada vista en planta

Independiente del sentido en el que se dirige el LHD, como se observa en la Figura 21, se puede extraer de cualquiera de los dos PE que hay en una calle zanja. Entonces, el sentido de avance del equipo no es restringido.



(a) Un sentido de avance

(b) Otro sentido de avance

Figura 21. Esquema del sentido de avance del LHD en la Malla Teniente de quinchada vista en planta



3.5.4 Malla cuadrada desquinchada

Para esta propuesta se procede a seleccionar la malla cuadrada que usualmente no es utilizada en niveles de producción de minería de *caving* dado a las distintas condiciones presentadas en el primer capítulo. Para este caso se propone realizar un desquinche en función del radio de giro del equipo que se está utilizando. Esto se puede observar en la Figura 22 para lograr la entrada desde la calle de producción a la calle zanja que se quiere extraer y así operativizar esta malla. Por otro lado, en la Figura 23 se aprecia cómo queda la disposición de la malla al considerar el radio de giro del equipo y las dimensiones del caso base. Para ver con más detalle cómo se calcula el desquinche de la malla ver el ANEXO E.

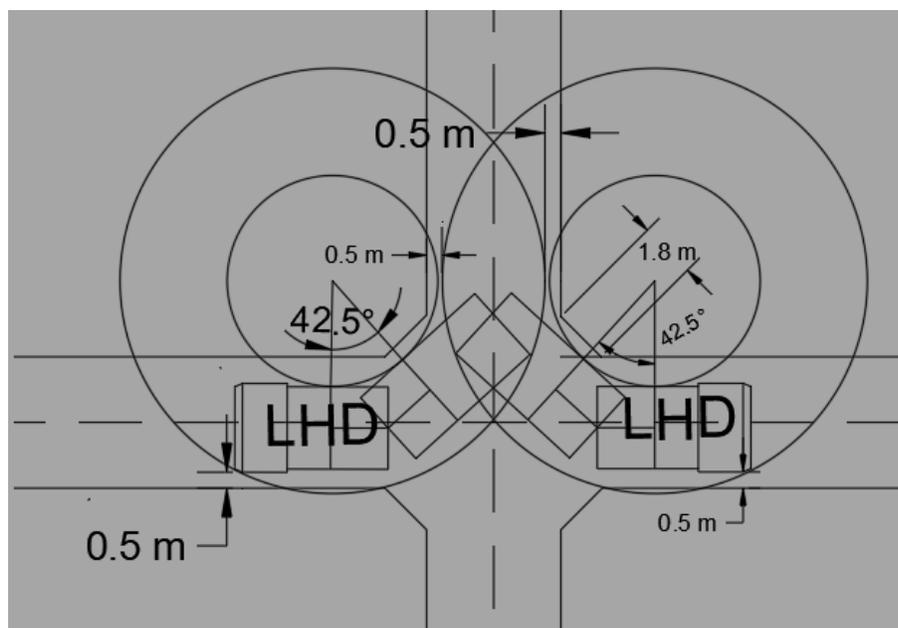


Figura 22. LHD entrando a la zanja en la malla cuadrada desquinada

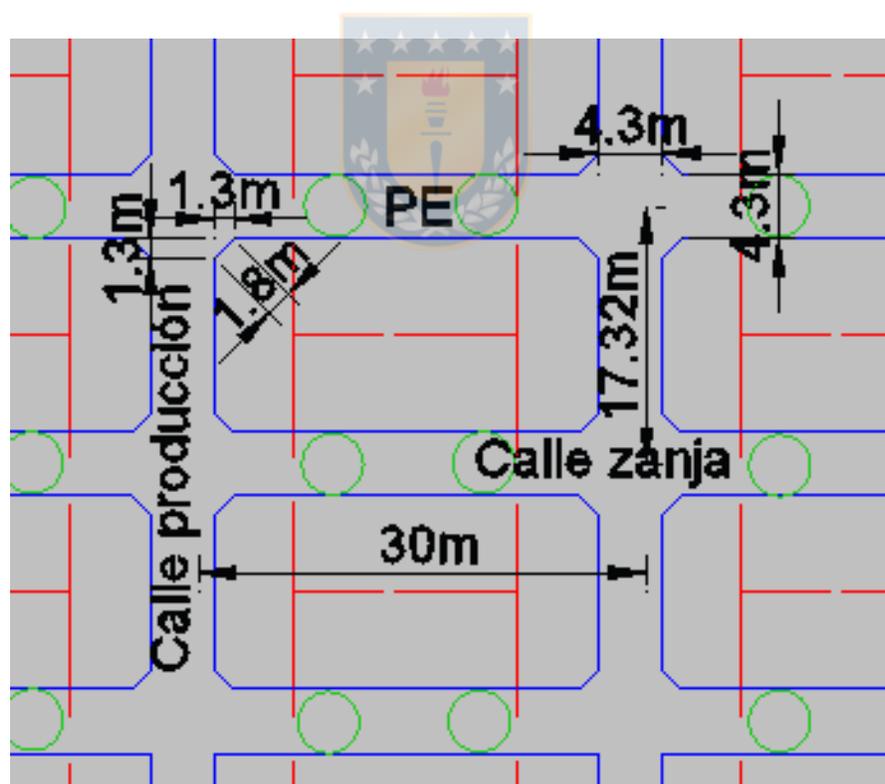


Figura 23. Malla cuadrada con desquinche vista en planta

El hecho de operativizar la malla cuadrada a través del desquinche por el equipo permite libre sentido de avance en las calles y como se observa en la Figura 24 el LHD desde la calle producción puede extraer a cualquier PE.

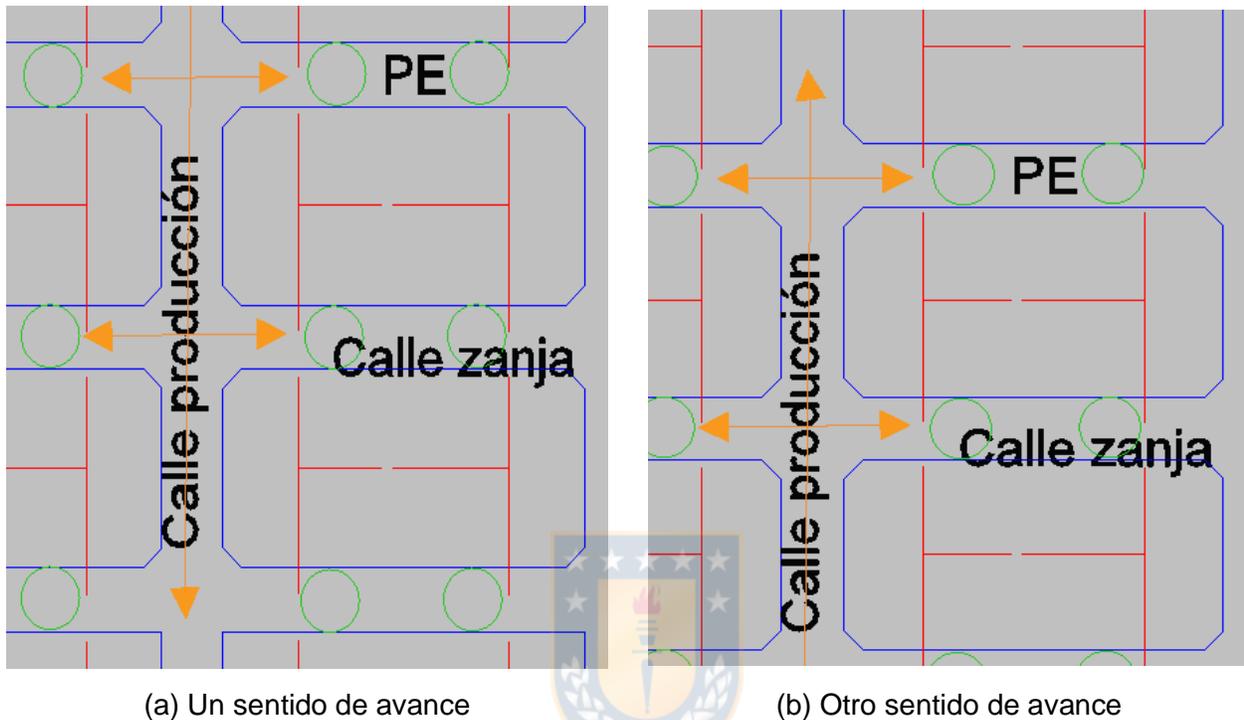


Figura 24. Esquema del sentido de avance del LHD en malla cuadrada desquinchada vista en planta

3.6 Condiciones experimentales para la simulación

Las simulaciones que se realizan deben cumplir con una serie de condiciones para que se valide en función del escenario base por lo que las condiciones experimentales están definidas como las siguientes:

- Se simula un mes efectivo de trabajo.
- Simulación de una calle completa.
 - Considerando 15 zanjas por una calle.
 - 2 piques de traspaso.
- Extracción de 3000 tpd por calle de producción

- Considerar solo horas efectivas de trabajo [33].
- 4.8 Horas efectivas del turno (Para mayor detalle revisar ANEXO H).
- 1 LHD por calle.
- Distribución triangular para la capacidad del LHD.
 - Máximo = 7.77 [ton], moda = 9.77 [ton], mínimo = 11.77 [ton]
- Distribución triangular para el tiempo de carga.
 - Máximo = 0.33 [min], moda = 0.58 [min], mínimo = 0.83 [min]
- Distribución triangular para el tiempo de descarga.
 - Máximo = 0.25 [min], moda = 0.33 [min], mínimo = 0.58 [min]
- Tiempo de maniobras y giro de equipo
- Cada 1000 toneladas extraídas de un punto de extracción, se cuelga.
- Revisar puntos colgados.
- Al alcanzar 12 puntos de extracción colgados se procede a realizar una reducción secundaria y/o descuelgue del punto de extracción.
- La operación de descuelgue sigue una distribución triangular, y máximo deja fuera de trabajo la calle por un turno en horas efectivas.
 - Máximo = 3.2 [hrs], moda = 4 [hrs], mínimo = 4.8 [hrs]
- En el pique de traspaso no se consideran interferencias.

Aparte de tener cuatro escenarios distintos en los que se realiza la simulación, se tiene dos casos para cada una de estas mallas de extracción:

1. Igual probabilidad de que el LHD vaya a cargar a cada punto de extracción independiente de su ubicación a lo largo de la calle de producción.
2. Distinta probabilidad de ir a cargar mineral de un punto de extracción dependiendo de su ubicación con respecto al pique de traspaso, mientras más cerca este del pique de traspaso el punto de extracción mayor será la probabilidad que el LHD vaya a extraer mineral de esté [32], y viceversa. Revisar el ANEXO I para ver el detalle de la probabilidad de extracción.

Estas condiciones se integran al sistema de flujo creado en la simulación en el software Arena, cabe destacar que existen pequeñas diferencias en las condiciones con respecto al tiempo de

maniobras o de giro puesto que las distintas alternativas de mallas de extracción abarcan estas diferencias. Para saber con más detalles los módulos del *software* Arena que permite realizar la simulación ver el ANEXO F.

3.7 Plan Experimental

En la Figura 25 se presenta un esquema que plantea los pasos a seguir dentro de la investigación en la fase experimental para llegar a los resultados.

En primer lugar, se definen las condiciones bajo las que se realiza la simulación experimental. Luego, se verifica que se manejen los parámetros de entrada necesarios para realizar la experimentación. En tercer lugar, se realiza una simulación, pero de menor envergadura a la que se necesita para obtener los resultados experimentales, esto a modo de confirmar que la simulación hecha está realizando todo lo necesario y especificado. Y así, el siguiente paso es construir la simulación completa para luego calibrar esta considerando que cada punto de extracción tiene la misma probabilidad que el LHD vaya a cargar material, logrando la simulación del escenario base. Posteriormente se replica esta simulación, pero ahora considerando las diferencias en las condiciones experimentales dependiendo de cada escenario. Lo siguiente es tomar en cuenta las distintas probabilidades de extracción y verificar que el caso base este calibrado bajo las condiciones experimentales para luego replicar esta simulación para los siguientes escenarios. Después, se valida estadísticamente el intervalo de confianza para el escenario base en ambos casos para la obtención de las variables en juego.

A fin de cuentas, se obtiene un conjunto de archivos Excel, de los cuales se obtiene el tiempo de ciclo promedio y la producción diaria en promedio de un mes de extracción. Finalmente, se procede al análisis de los resultados obtenidos en esta fase experimental.

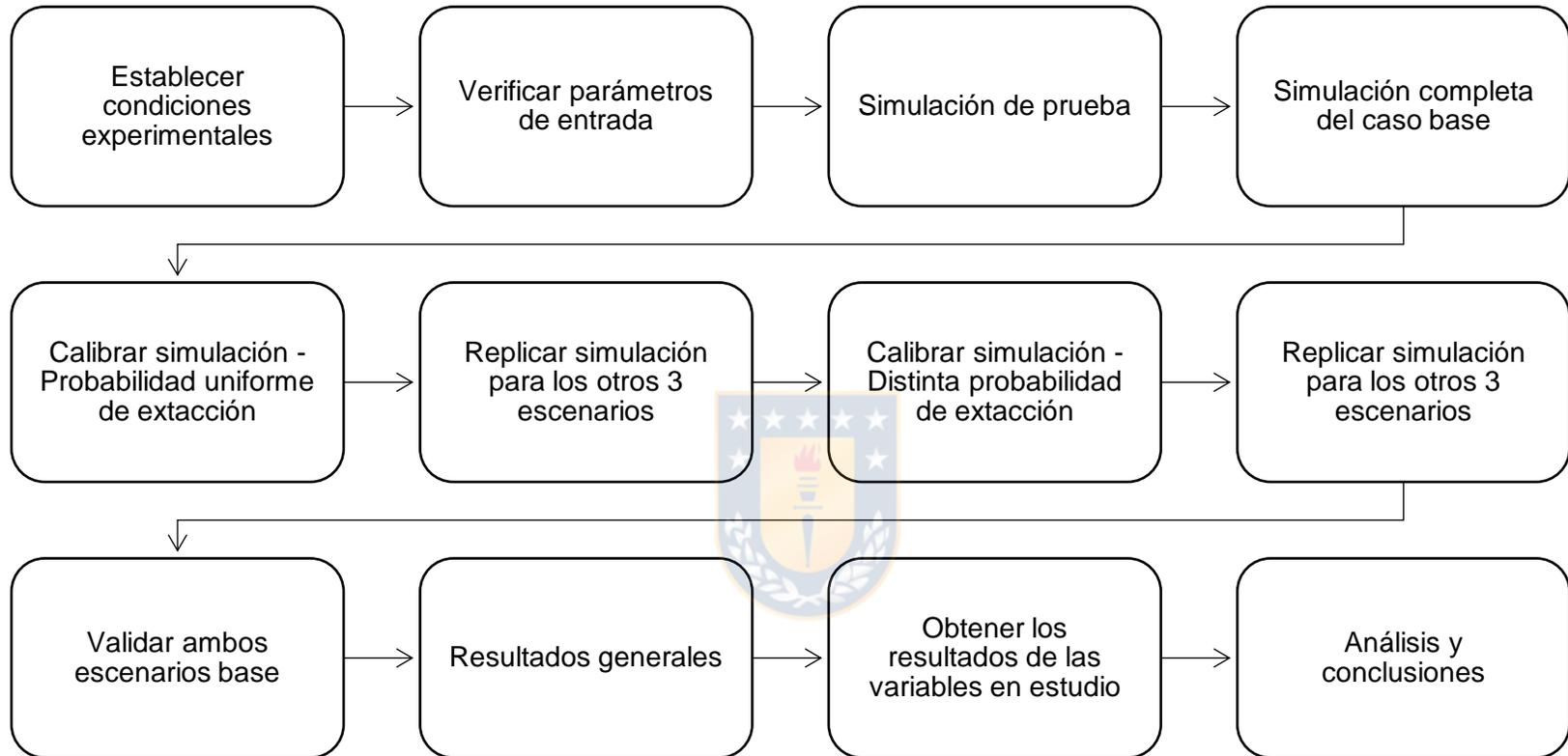


Figura 25. Esquema del plan experimental de la investigación

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados finales y discusiones del estudio realizado, los que se basan en la comparación del escenario asignado como caso base, es decir, a partir de resultados calibrados para la malla Teniente se compara con los resultados obtenidos para la malla Teniente desquinchada, la malla Cuadrada desquinchada y para la malla *Herrigbone*.

4.1 Calibración de las simulaciones

Al trabajar con simulaciones es necesario contar con un número determinado de réplicas para asegurar un intervalo de confianza [34] de la simulación. Los parámetros necesarios para el cálculo del intervalo de confianza son Alpha (α) y la desviación estándar de la muestra que depende de la variable y de la malla en estudio. El Alpha utilizado corresponde a 0.05, el tamaño de la muestra o número de las réplicas es 30 y para conocer los valores de la desviación estándar ver el ANEXO G.

Así, se puede afirmar con un 95% de confianza que los valores medios de cada variable simulada en 30 réplicas se encuentra entre los rangos especificados en la Tabla 4, que presenta el intervalo de confianza para el tiempo de ciclo promedio y la producción diaria para la malla del caso base, contemplando sus dos escenarios, el primero con equiprobabilidad de extraer un punto de extracción y el segundo con mayor probabilidad de extracción según la cercanía entre el punto de extracción y el pique de traspaso.

Tabla 4. Intervalos de confianza para las variables según el caso base

Probabilidad	Malla	Intervalo de confianza del tiempo de ciclo promedio [min]		Intervalo de confianza de la producción diaria [Ton]	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Igual	Teniente	2.51	2.52	3017.1	3030.3
Distinta	Teniente	2.46	2.47	3019.4	3043.2

Teniendo calibrado el escenario base, ya que su producción concuerda con la condición experimental de 3000 [tpd] en promedio, se procede a realizar las simulaciones de los otros escenarios, lo que permite presentar los resultados finales de la investigación utilizando la media de la muestra para el tiempo de ciclo promedio y la media de la muestra para la producción diaria.

4.2 Resultados mallas de extracción

En la Figura 26 se encuentra el gráfico que resume los resultados para la primera variable, la producción en toneladas extraídas por día, considerando las cuatro mallas, dos probabilidades para cada una.

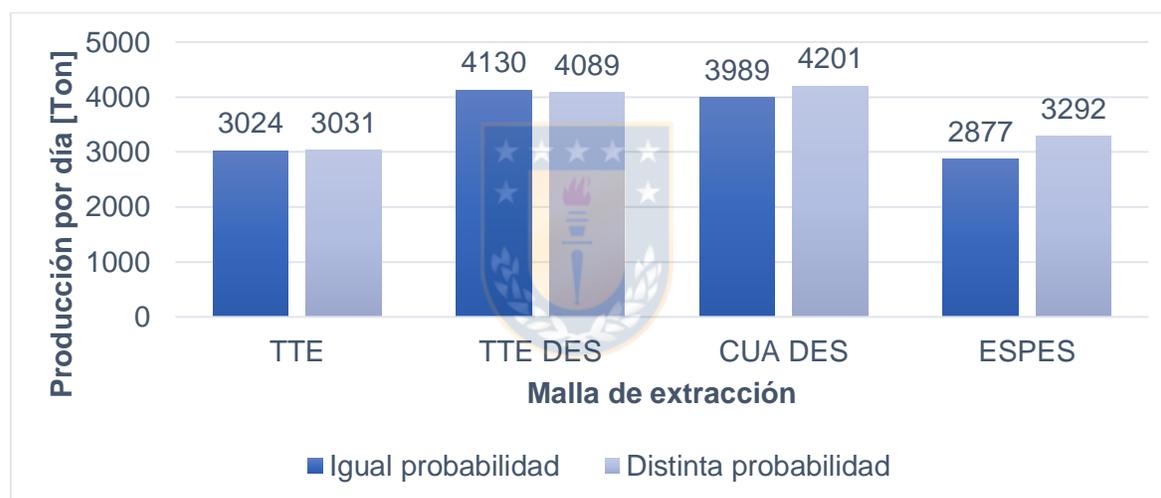


Figura 26. Gráfico del tonelaje extraído por día según cada escenario

En la Figura 26, se exponen los resultados de cada escenario en función de la producción diaria donde los resultados de la comparación entre ambos escenarios de una malla presentan variaciones mayores en la malla CUA DES y ES PES. Al realizar la comparación con las otras mallas de extracción, para el caso de la malla TTE DES se produce un aumento en la producción aproximado del 35%. En el caso de la malla CUA DES genera un aumento de producción respecto al caso base del 33% aproximadamente. Por último, la malla ES PES no presenta mejoras significativas respecto al caso base.

La Figura 27 muestra el gráfico que resume los resultados para la segunda variable, el tiempo de ciclo promedio en minutos, considerando las cuatro mallas y los dos escenarios de probabilidad.

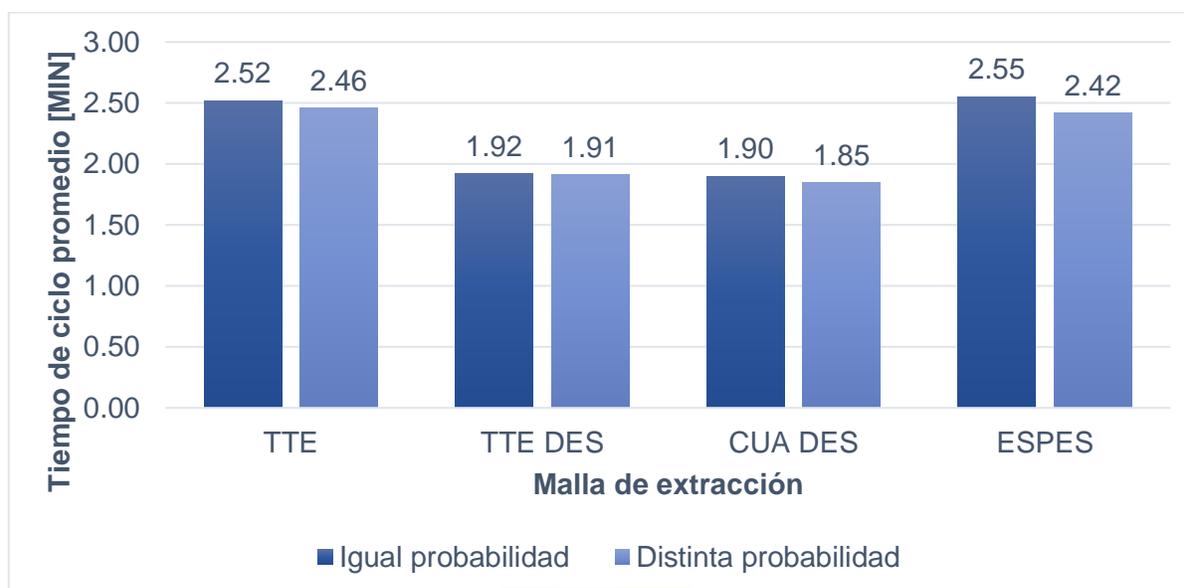


Figura 27. Gráfico del tiempo de ciclo promedio según cada escenario

En la Figura 27 se presenta el tiempo de ciclo promedio de cada malla. Teniendo en cuenta que cada malla cuenta con dos escenarios, destacando que entre escenarios de una malla hay variaciones, pero las diferencias son mayores para la malla CUA DES y ES PES. Ahora, considerando la comparación de un caso y caso base, la malla TTE. Al implementar la malla TTE DES y hacer la comparación se observa una reducción del 23% aproximado en el tiempo de ciclo promedio. La segunda comparación es con la malla CUA DES que presenta la disminución del tiempo de ciclo promedio en un 21% aproximado. En cambio, al comparar con la malla ES PES los valores son semejantes.

Resumiendo lo mostrado en las dos figuras anteriores la Tabla 5 detalla las variables graficadas y sus resultados.

Tabla 5. Resumen de los resultados de cada variable en estudio

Malla	Misma probabilidad de extracción		Distinta probabilidad de extracción	
	Tiempo de ciclo promedio [Min]	Producción por día [Ton]	Tiempo de ciclo promedio [Min]	Producción por día [Ton]
Teniente	2.52	3024	2.46	3031
Teniente Desquinchada	1.92	4130	1.91	4089
Cuadrada Desquinchada	1.88	3989	1.85	4201
<i>Herrigbone</i>	2.57	2877	2.42	3292

La Tabla 5 especifica los resultados obtenidos del tiempo de ciclo promedio y la producción diaria para cada malla bajo estudio, separando en dos escenarios distintos tener la misma probabilidad de extracción o distinta probabilidad de extracción.

4.3 Análisis de resultados y discusiones

En primer lugar, analizando el mismo escenario, ya sea de igual probabilidad o de distinta probabilidad, para distintas mallas de extracción se observa lo siguiente:

Se presenta para la primera comparación un aumento de la producción diaria y una disminución del tiempo de ciclo de la Malla TTE DES respecto a la Malla TTE que se debe a la facilidad de circulación del LHD ya que se puede acceder a la calle zanja desde cualquier sentido de la calle por la facilidad en el avance permitiendo reducir tiempos de maniobras para acceder al PE y logrando realizar más ciclos lo que significa un aumento en la producción diaria. Para el segundo caso, de la Malla CUA DES respecto a la Malla TTE, ocurre algo muy similar puesto que el desquinche por el equipo en uso permite la circulación del LHD en la calle y sin restricción de avance. Y el último caso, la Malla ES PES respecto a la Malla TTE no presenta significantes mejoras, esto se debe a que la circulación dentro de la malla permite el ingreso a la zanja en un único sentido de

avance y las distancias recorridas son mayores lo que genera menor productividad disminuyendo los ciclos de trabajo.

Por último, se analiza la variación entre los escenarios de igual probabilidad y distinta probabilidad de extracción para cada malla en particular. Llama la atención lo que ocurre entre los escenarios, que se responde al analizar de forma detallada lo que sucede entre ellos. Al extraer de forma más seguida los puntos más cercanos al pique de traspaso se alcanza el criterio para realizar reducción secundaria o descolar los puntos de extracción de forma más rápida, es decir, con un tonelaje acumulado menor. Esto debido a que se extrae más de ciertos PE y estos se cuelgan más rápido, lo que ocurre durante toda la simulación en el escenario de distinta probabilidad de extracción. Lo que conlleva a tener más interferencias entre los ciclos.

Para los casos de la malla TTE y TTE DES la producción y el tiempo de ciclo no se ven mayormente afectados debido a que estas interferencias no generan una gran diferencia en el número de ciclos que se realizan entre los distintos escenarios de probabilidad ya que en un momento la operación cuenta con los PE de mayor probabilidad de extracción fuera de servicio porque está pendiente la reducción secundaria o descuelgue y sigue extrayendo de los PE con menor probabilidad de extracción que se encuentran más lejos del pique de traspaso llegando a una similitud del tonelaje acumulado con el otro escenario ya que al extraer PE más lejanos se realizan menos ciclos de trabajo y estos son ciclos son más largos, generando equilibrio entre los resultados de ambos escenarios de probabilidad.

En los casos de la malla CUA DES y ES PES ocurre lo mismo mencionado para los dos casos anteriores, en un momento la operación cuenta con los PE de mayor probabilidad de extracción con la reducción secundaria o descuelgue pendiente y sigue extrayendo de los PE con menor probabilidad de extracción que se encuentran más lejos del pique de traspaso. Sin embargo, hay una variación más significativa en los resultados para estas mallas, debido a que se realizan más ciclos de trabajo entre escenarios porque el diseño de estas mallas permite reducir las maniobras del equipo con respecto a la Malla TTE y TTE DES, lo que se traduce en la disminución del tiempo de ciclo y una mejora en la productividad. Y en particular se presenta esta ventaja que genera la diferencia por sobre los otros casos.

A modo de resumir lo explicado anteriormente, la Tabla 6 indica la variación porcentual del tiempo de ciclo promedio y de la producción diaria en el escenario de igual probabilidad y de distinta probabilidad de extracción con respecto al caso base.

Tabla 6. Variación porcentual de cada variable en estudio con respecto a la malla teniente

Malla	Misma probabilidad de extracción		Distinta probabilidad de extracción	
	% Tiempo ciclo promedio	% Toneladas extraídas por día	% Tiempo ciclo promedio	% Toneladas extraídas por día
Teniente Desquinchada	-0.24	0.38	-0.23	0.35
Cuadrada Desquinchada	-0.25	0.33	-0.25	0.39
<i>Herrigbone</i>	0.01	-0.04	-0.02	0.09

En la Tabla 6 se observa que, para el escenario de misma probabilidad considerando primero la malla TTE DES respecto a la malla TTE se disminuye un 24% el tiempo de ciclo y aumenta un 38% la producción diaria. En segundo lugar, la malla CUA DES respecto a la malla TTE disminuye un 25% el tiempo de ciclo y aumenta un 33% la producción diaria. En tercer lugar, la malla ES PES respecto a la malla TTE aumenta un 0.01% el tiempo de ciclo y disminuye un 0.04% la producción diaria. Y luego, para el escenario de distinta probabilidad se tiene que la malla TTE DES respecto a la malla TTE disminuye un 23% el tiempo de ciclo y aumenta un 35% la producción diaria. En segundo lugar, la malla CUA DES respecto a la malla TTE disminuye un 25% el tiempo de ciclo y aumenta un 39% la producción diaria. Finalmente, la malla ES PES respecto a la malla TTE disminuye un 0.02% el tiempo de ciclo y aumenta un 0.09% la producción diaria.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para seleccionar la malla de extracción óptima es necesario considerar que una de las principales finalidades debido a la hipótesis del estudio es obtener el mejor desempeño posible de la productividad del diseño a utilizar.

5.1 Conclusiones

Sintetizando los resultados entregados en el capítulo anterior se puede afirmar que los diseños alternativos, la malla TTE DES y la malla CUA DES, son las mejores alternativas ya que presentan una mejora, aumentando la productividad diaria y disminuyendo el tiempo de ciclo promedio con respecto al caso base, lo que impacta claramente la economía del proyecto. Pero no se puede asegurar con completa certeza cuál de las dos sea la mejor alternativa ya que en caso de querer implementar una malla CUA DES que es una variación de la malla cuadrada, la cual no cuenta con antecedentes de la implementación de este diseño en operaciones y al contar con en un nivel de producción con malla TTE ya construido y en operación es prácticamente reconstruir el nivel debido a las diferencias en las características del diseño, lo que hace inviable el cambio. Por otro lado, la modificación de una malla TTE a una malla TTE DES no se conoce la inversión que significa y si afecta otras variables como la estabilidad o recuperación del nivel de producción, pero la malla TTE DES al ser una variación de la malla Teniente genera mayor confianza en el diseño debido a la amplia utilización de este diseño en la minería de *caving*.

Si pensamos en la malla ES PES con respecto a los resultados de la malla TTE no presenta beneficios en el escenario de igual probabilidad de extracción, pero en el escenario de distinta probabilidad si significa una mejora en la productividad, pero si se consideran las características del diseño, y pensamos en una mina en plena operación claramente modificar una malla Teniente no es factible. No presentándola como una alternativa destacable.

Pero elegir cuál de las dos alternativas destacadas es más favorable, si la malla TTE DES o si la malla CUA DES, es necesario considerar las ventajas y desventajas, como el porcentaje de

aumento en la productividad y la disminución del tiempo de ciclo sin dejar de lado los detalles del diseño de cada malla. Y en conjunto a lo anterior, complementar esto con otros estudios que son recomendados a continuación y considerar también los beneficios y desventajas de estos.

Finalmente, como el objetivo del estudio se basa en comparar la productividad de distintas mallas de extracción desde el punto de vista de “toneladas por día” y “tiempo de ciclo” la malla Cuadrada desquinchada permite una mejora en la performance del equipo LHD al disminuir las maniobras. Por lo tanto, si la malla cuadrada cumple con los análisis de estabilidad de pilares versus la malla Teniente, y además, genera un beneficio en términos constructivos para la preparación minera, entonces la malla propuesta tipo Cuadrada desquinchada podría ser una buena oportunidad a considerar en nuevo sectores de Mina El Teniente y futuros proyectos subterráneos. En cuanto a la malla Teniente desquinchada, mientras no afecte la estabilidad de los pilares y a su vez del nivel de producción se presenta como una buena opción a implementar.

5.2 Recomendaciones



Para tener la convicción de cuál de las alternativas estudiadas es la mejor se recomienda complementar esta investigación con trabajos futuros como los siguientes:

- Estudios de estabilidad para las mallas de extracción utilizadas para que ayude a corroborar cual sería la mejor alternativa de diseño.
- Estudio de prefactibilidad de la preparación minera de las mallas de extracción propuestas.
- Corroborar si se puede trabajar con un equipo de mayor capacidad y cuanto modificaría el desquince de los diseños propuestos.
- Realizar esta investigación con otro escenario base u otras dimensiones de malla, para conocer el comportamiento del estudio en otros casos.
- Analizar el impacto en la interacción de las zonas de flujo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gómez R., Labbé, E. Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del Block Caving. 2019, pp. 177-194.
- [2] Flores, G. Rock mass response to the transition from open pit to underground cave mining. PhD Thesis, JKMRSC School of Engineering the University of Queensland. 2005.
- [3] Karzulovic, A. Evaluación Geotécnica Métodos de Socavación Previa y Avanzada Mina El Teniente, estudio DT – CG – 98 – 003, División El Teniente, Codelco-Chile. 1998.
- [4] VERGARA GUZMAN, Marcelo Andres. Modelo de costo basado en actividades de una mina subterránea explotada por block caving. 2015.
- [5] Rojas E., Molina R., Bonani A. y Constanzo H. The preundercut caving method at El Teniente Mine, Codelco – Chile. s.l. : Proceedings of Massmin 2000, 2000.
- [6] Trueman, R., Pierce M. y Wattimena, R. Quantifying stresses and support requirements in the undercut and production level drifts of block and panel caving mines. Rio Tinto, CODELCO, Freeport McMoRan. Phoenix : s.n., 2002.
- [7] Flores, G, Karzulovic, A and Brown, E T.,. Current practices and trends in cave mining. Santiago : Proceedings of MassMin 2004, 2004.
- [8] Catalan, A., Dunstan, G., Morgan, M., Green, S., Jorquera, M. and Thornhill, T. An “intensive” preconditioning methodology developed for the cadia east panel cave project. 6th International Conference & Exhibition on Mass Mining. Australia : NSW, 2012
- [9] CAPES, G., SHARROCK, G. and LOWTHER, R. Methodology for Understanding Drive Deformation and Damage in Variable Rock Types in a High Stress, Advanced Undercut. 2012.
- [10] Aimin, Z., and Yongxue, S. "Application of block caving system in the Tongkuangyu Copper Mine.". Australian Institute of Mining and Metallurgy. Brisbane : MassMin 2000, 2000.
- [11] AGUAYO, A., et al. LHD versus mechanized grizzly in III Panel of Andina. Santiago : MassMin 2004, 2004.
- [12] HERSANT, D. Mine design of the Argyle underground project. s.l. : En Proceedings of MassMin Conference, 2004.
- [13] BULL, G., MACSPORRAN, G. and BAIRD, C. The alternate design considered for the Argyle underground mine. s.l. : En Proceedings of MassMin Conference, 2004.
- [14] Hannweg, L, et al. Koffiefontein mine front cave - Case History. s.l. : En Proceedings of MassMin Conference, 2004. pp. 225-30.
- [15] Yuming, L and Jinfeng, Z. Tongkuangyu mine's phase 2 project. s.l. : En proceedings of MassMin, 2008. pp. 53-61.
- [16] Bullock, William A. Hustrulid and Richard L. Underground mining methods : engineering fundamentals and international case studies. Colorado : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2001. págs. 397 - 453. ISBN -87335193-2

- [17] ROSS, I. Northparkes E26 Lift 2 block cave – A case study. Lulea MassMin 2008, 2008. pp. 25-34.
- [18] CHACÓN, J. Block Caving y LHD. Reflexiones sobre mallas de extracción. 1976.
- [19] CHACON, J., GOPFERT, H. and OVALLE, A. Thirty years evolution of block caving in Chile. s.l. : Proceedings of MassMin, 2004. pp. 387-92.
- [20] LAUBSCHER, D. H. Cave mining-the state of the art. 1994, Vol. 94, pp. 279-293.
- [21] CAVIERES, P. Dimensionamiento de Mallas de extracción, Bateas recolectoras y Pilar Corona para Método Panel Caving en Roca Primaria, Mina El Teniente. Superintendencia GEOMECÁNICA, Codelco–El Teniente. Chile.
- [22] Le-feaux, Cortés. Manejo de materiales en explotaciones subterráneas. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile. 1997.
- [23] CATERPILLAR. R1600H Underground mining loader, 2015.
- [24] BANKS, J. Introduction to simulation. WSC'99, Winter Simulation Conference Proceedings.'Simulation-A Bridge to the Future'. 1999. pp. 7-13.
- [25] CASELLI GISMONDI, Hugo. Manual de simulación con Arena. Universidad nacional del santa. 2009.
- [26] ALFONSO, URQUÍA MORALEDA and CARLA, MARTÍN VILLALBA. Modelado y simulación de eventos discretos. s.l. : UNED, 2013.
- [27] CONTRERAS CARRASCO, Camila Fernanda. Simulación como herramienta para la planificación de la preparación minera en minería tipo Block/Panel Caving. 2016.
- [28] FABREGAS ARIZA, Aldo. Simulación de sistemas productivos con Arena. Universidad del Norte. 2003.
- [29] Labrecque, P., Newman, T., Dudley, J.. The use of ARENA Simulation to estimate Drawpoint construction rate, Production rate and costs for the Hugo North Lift 1 Panel cave. Ontario : MassMin 2012, 2012.
- [30] Barraza, M., Rohrer, M., Hustrulid, W.. Application of simulation to improved planning at Esmeralda, El Teniente mine, Chile. Santiago : MassMin 2004, 2004. págs. 459-466.
- [31] 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.
- [32] VERGARA, Juan. Conversación personal. Chile, 2019.
- [33] LABBE, Ernesto. Conversación personal. Chile, 2019
- [34] RUSTOM, Antonio. Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia. [ed.] Pedro Calandra B. Santiago : s.n., 2012. p. 110. ISBN: 978-956-19-0790-4.
- [35] VEGA, Pedro J. Torres. Simulación de Sistemas con el software Arena. s.l. : Fondo editorial Universidad de Lima, 2017.

7. ANEXOS

ANEXO A. Equipo LHD CAT R1600H

El equipo utilizado en el escenario base es el modelo CAT R1600H, como se ve en la siguiente figura, el cual tiene *bucket* para distintas capacidades, el utilizado en este caso es el de 7 yd³ lo que corresponde a 5.37 m³.



Figura A-1. Equipo LHD CAT R1600H [23]

En la siguiente figura y tablas se presentan las dimensiones equipo utilizado:

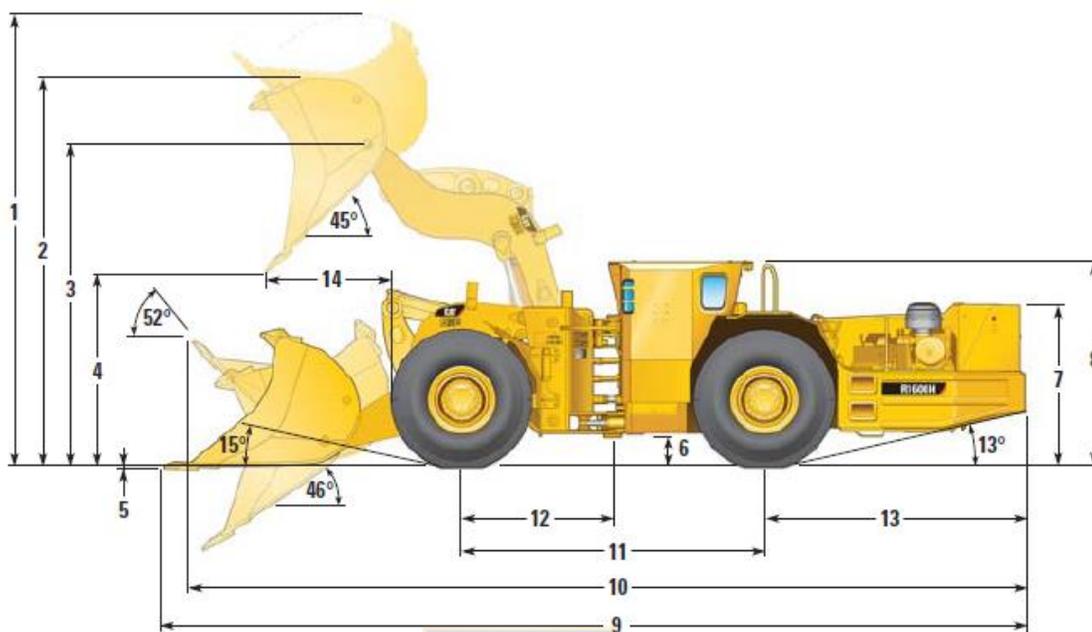


Figura A-2. Detalles para conocer las medidas por el costado del LHD [23]

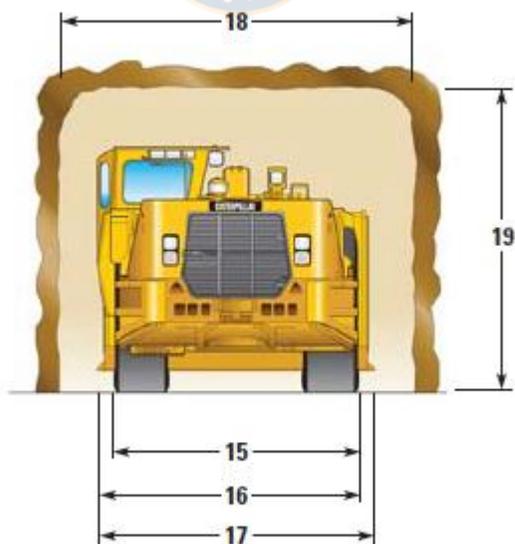


Figura A-3. Detalles para conocer las medidas por el frente del LHD [23]

Tabla A-1. Detalles para conocer las medidas del LHD [23]

	Parámetro	Medida
	Bucket capacity	5.6 m ³
	Bucket width over cutting edge	260 cm
1	Height – Bucket raised	528.2 cm
2	Height – Max dump	449.7 cm
3	Height – Max lift bucket pin	375.2 cm
4	Height – Dump clearance at max lift	204.2 cm
5	Height – Digging Depth	5.4 cm
6	Height – Ground clearance	34.4 cm
7	Height – Top of Hood	189 cm
8	Height – Top of ROPS	240 cm
9	Length – Overall (Digging)	1034.7 cm
10	Length – Overall (Tramming)	985.3 cm
11	Length – Wheelbase	353.6 cm
12	Length – Front axle to hitch	176.8 cm
13	Length – Rear axle to bumper	305.5 cm
14	Length – Reach	157.3 cm
15	Width – Overall tire	240.4 cm
16	Width – Machine without Bucket	256.7 cm
17	Width – Machine with Bucket	272.3 cm
18	Recommended Clearance Width	350 cm
19	Recommended Clearance Height	30 cm

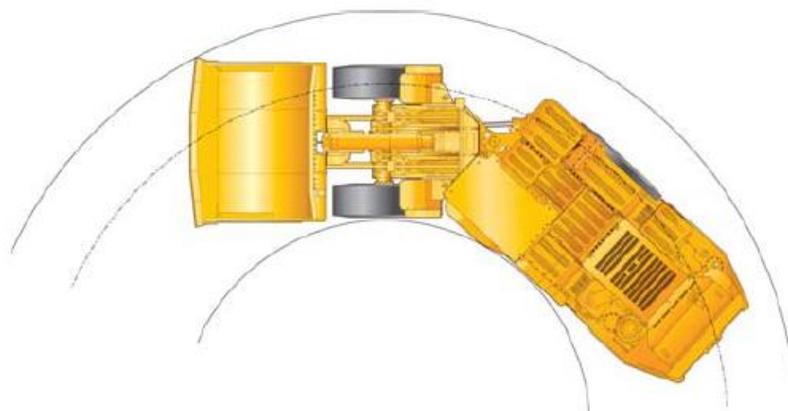


Figura A-4. Vista del giro que realiza el LHD [23]

Tabla A-2. Detalles del giro del equipo [23]

Parámetro	Medidas
Outside Clearance Radius	663.8 cm
Inner Clearance Radius	329.1 cm
Axle oscillation	10°
Articulation angle	45°

ANEXO B. Capacidad bucket

Para determinar a capacidad del *bucket* del LHD es necesario tener en consideración la densidad del material y su esponjamiento posterior a la tronadura del material. Con los datos adjuntados en la siguiente tabla y las ecuaciones correspondientes se calcula la capacidad media de la pala.

$$1.3 \text{ yd}^3 = 1 \text{ m}^3$$

$$Densidad_{esponjado} = Densidad * (1 - esponjamiento) \quad (B-1)$$

$$Capacidad \text{ real} = capacidad \text{ nominal} * densidad_{esponjada} \quad (B-2)$$

Tabla B-1. Datos del material

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Densidad material	2.6	Ton/m ³
Esponjamiento	30	%
Capacidad nominal pala	7 ó 5.37	Yd ³ ó m ³

Tabla B-2. Resultados del material

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Densidad material esponjado	1.82	Ton/m ³
Diferencia densidad	0.78	Ton/m ³
Capacidad real pala	9.77	M ³

Con los datos obtenidos y suponiendo una tolerancia de un 20%, la capacidad del *bucket* variara entre 7.77 y 11.77 ton con una moda de 9.77 ton asumiendo una distribución triangular ara la capacidad de la pala.

ANEXO C. Distancias recorridas

En primer lugar, hay que tener en consideración la dimensión de la malla de extracción y las posiciones donde se ubican los puntos de extracción y los piques, para obtener la distancia que recorre el LHD entre cada lugar específico. La dimensión de la malla es $17.32 \times 15 \text{ m}^2$, lo que quiere decir que la distancia entre calle producción es de 30 m y la distancia entre calles zanja es 17.32 m, la entrada a la zanja para llegar al punto de extracción es un recorrido de 9.4 m para la malla Teniente y cuadrada, y en la malla *herringbone* se recorre 13.26 m de la calle zanja para acceder al punto de extracción y los piques se ubican en la zanja 5 y zanja 11.

Cabe destacar que debido a las dimensiones los casos: Teniente, Teniente desquinchado y cuadrada desquinchado tienen las mismas distancias recorridas y la malla *herringbone* tendría otras distancias recorridas.



La nomenclatura utilizada para identificar los puntos de extracción y los piques es la siguiente:

Por ejemplo, PE 12, significa que es la zanja 1 en el punto de extracción de la izquierda, esto si está ubicado a la entrada de la zanja en dirección donde aumenta el número de las zanjas. Otro ejemplo, PE 131 corresponde a la zanja 13 en el punto de extracción de la derecha.

Para el caso de los piques de traspaso, en la zanja 5 se ubica el pique 1 y en la zanja 11 se ubica el pique 2.

Tabla C-1. Distancias entre distintos lugares de la calle de producción

Teniente/ Teniente desquinchada/ Cuadrada desquinchada			<i>Herrigbone</i>		
ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA [m]	ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA [m]
11	PIQUE 1	78.68	11	PIQUE 1	82.54
12	PIQUE 1	78.68	12	PIQUE 1	82.54
21	PIQUE 1	61.36	21	PIQUE 1	65.22
22	PIQUE 1	61.36	22	PIQUE 1	65.22
31	PIQUE 1	44.04	31	PIQUE 1	47.9
32	PIQUE 1	44.04	32	PIQUE 1	47.9
41	PIQUE 1	26.72	41	PIQUE 1	30.58
42	PIQUE 1	26.72	42	PIQUE 1	30.58
51	PIQUE 1	9.4	51	PIQUE 1	13.26
52	PIQUE 1	9.4	52	PIQUE 1	13.26
61	PIQUE 1	26.72	61	PIQUE 1	30.58
62	PIQUE 1	26.72	62	PIQUE 1	30.58
71	PIQUE 1	44.04	71	PIQUE 1	47.9
72	PIQUE 1	44.04	72	PIQUE 1	47.9
81	PIQUE 1	61.36	81	PIQUE 1	65.22
82	PIQUE 1	61.36	82	PIQUE 1	65.22
91	PIQUE 1	78.68	91	PIQUE 1	82.54
92	PIQUE 1	78.68	92	PIQUE 1	82.54
101	PIQUE 1	96	101	PIQUE 1	99.86
102	PIQUE 1	96	102	PIQUE 1	99.86
111	PIQUE 1	113.32	111	PIQUE 1	117.18
112	PIQUE 1	113.32	112	PIQUE 1	117.18
121	PIQUE 1	130.64	121	PIQUE 1	134.5
122	PIQUE 1	130.64	122	PIQUE 1	134.5
131	PIQUE 1	147.96	131	PIQUE 1	151.82
132	PIQUE 1	147.96	132	PIQUE 1	151.82

Teniente/ Teniente desquinchada/ Cuadrada desquinchada			<i>Herrigbone</i>		
ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA [m]	ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA [m]
141	PIQUE 1	165.28	141	PIQUE 1	169.14
142	PIQUE 1	165.28	142	PIQUE 1	169.14
151	PIQUE 1	182.6	151	PIQUE 1	186.46
152	PIQUE 1	182.6	152	PIQUE 1	186.46
11	PIQUE 2	182.6	11	PIQUE 2	186.46
12	PIQUE 2	182.6	12	PIQUE 2	186.46
21	PIQUE 2	165.28	21	PIQUE 2	169.14
22	PIQUE 2	165.28	22	PIQUE 2	169.14
31	PIQUE 2	147.96	31	PIQUE 2	151.82
32	PIQUE 2	147.96	32	PIQUE 2	151.82
41	PIQUE 2	130.64	41	PIQUE 2	134.5
42	PIQUE 2	78.68	42	PIQUE 2	134.5
51	PIQUE 2	113.32	51	PIQUE 2	117.18
52	PIQUE 2	113.32	52	PIQUE 2	117.18
61	PIQUE 2	96	61	PIQUE 2	99.86
62	PIQUE 2	96	62	PIQUE 2	99.86
71	PIQUE 2	78.68	71	PIQUE 2	82.54
72	PIQUE 2	78.68	72	PIQUE 2	82.54
81	PIQUE 2	61.36	81	PIQUE 2	65.22
82	PIQUE 2	61.36	82	PIQUE 2	65.22
91	PIQUE 2	44.04	91	PIQUE 2	47.9
92	PIQUE 2	44.04	92	PIQUE 2	47.9
101	PIQUE 2	26.72	101	PIQUE 2	30.58
102	PIQUE 2	26.72	102	PIQUE 2	30.58
111	PIQUE 2	9.4	111	PIQUE 2	13.26
112	PIQUE 2	9.4	112	PIQUE 2	13.26
121	PIQUE 2	26.72	121	PIQUE 2	30.58
122	PIQUE 2	26.72	122	PIQUE 2	30.58

Teniente/ Teniente desquinchada/ Cuadrada desquinchada			<i>Herrigbone</i>		
ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA [m]	ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA [m]
131	PIQUE 2	44.04	131	PIQUE 2	47.9
132	PIQUE 2	44.04	132	PIQUE 2	47.9
141	PIQUE 2	61.36	141	PIQUE 2	65.22
142	PIQUE 2	61.36	142	PIQUE 2	65.22
151	PIQUE 2	78.68	151	PIQUE 2	82.54
152	PIQUE 2	78.68	152	PIQUE 2	82.54



ANEXO D. Informe de Excel – Arena

A través del programa utilizado para realizar las simulaciones, Arena, se puede producir un archivo Excel que detalle las características que se especifiquen, para este caso en la siguiente figura se puede observar lo entregado por el programa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	N° LHD	PE	N° Ciclos	Tiempo Inicial	Tiempo Final	Tiempo Ciclo	Tonelaje	Tonelaje Acumulado	N° de Colgadas	TON PIQUE 1	TON PIQUE 2
2	1	101	1	0.00	2.34	2.34	8.79	8.79	0	0.00	8.79
3	1	72	2	2.34	6.04	3.70	8.80	17.59	0	8.80	8.79
4	1	102	3	6.04	7.91	1.87	9.00	26.59	0	8.80	17.79
5	1	122	4	7.91	9.46	1.55	11.62	38.21	0	8.80	29.42
6	1	102	5	9.46	10.60	1.14	9.69	47.90	0	8.80	39.11
7	1	112	6	10.60	11.70	1.11	10.28	58.18	0	8.80	49.39
8	1	22	7	11.70	14.52	2.82	8.80	66.98	0	17.59	49.39
9	1	32	8	14.52	15.99	1.47	9.42	76.40	0	27.01	49.39
10	1	72	9	15.99	18.12	2.13	9.33	85.73	0	36.35	49.39
11	1	142	10	18.12	20.69	2.57	9.97	95.71	0	36.35	59.36
12	1	31	11	20.69	24.29	3.60	10.87	106.58	0	47.22	59.36
13	1	102	12	24.29	26.95	2.65	9.22	115.80	0	47.22	68.58
14	1	112	13	26.95	27.95	1.01	9.16	124.96	0	47.22	77.74
15	1	111	14	27.95	30.31	2.36	8.50	133.45	0	47.22	86.24
16	1	52	15	30.31	33.40	3.09	10.20	143.66	0	57.42	86.24
17	1	112	16	33.40	35.09	1.68	10.99	154.65	0	57.42	97.22
18	1	102	17	35.09	36.50	1.41	9.44	164.08	0	57.42	106.66
19	1	62	18	36.50	39.14	2.64	9.99	174.08	0	57.42	116.66
20	1	31	19	39.14	42.36	3.22	9.27	183.35	0	66.69	116.66
21	1	42	20	42.36	44.96	2.60	9.32	192.66	0	76.01	116.66
22	1	102	21	44.96	46.74	1.79	10.40	203.06	0	76.01	127.06

Figura D-1. Parte del documento entregado por Excel

La fila A identifica el LHD trabajando; la fila B el punto de extracción en el que se está trabajando, su nomenclatura se explicó en el ANEXO C; la fila C el número de ciclo; la fila D y E el tiempo inicial y final; la fila F el tiempo de ciclo; la fila G el tonelaje de la pala en ese ciclo; la fila H el tonelaje acumulado; la fila I cuantifica las colgadas de los punto de extracción, la fila J y K identifican el tonelaje en cada pique de la calle.

ANEXO E. Cálculo del desquinche

Conociendo las características del equipo que se utilizara para las dimensiones de esta malla se procede a utilizar las características anexadas en la Tabla A-2 del ANEXO A donde se detalla el radio de giro del equipo, entonces para asegurar que el equipo pueda maniobrar a la entrada de cada zanja se procede a verificar a través de un *software* de diseño "SketchUp" que el equipo logre realizar la maniobra de giro para ingresar a la zanja, por lo que si este no logra ingresar según el radio de giro del equipo se procede a determinar la cantidad de material que es necesario quitar del pilar zanja para que el equipo logre realizar la maniobra e ingrese al punto de extracción.

Se destaca el hecho de que el desquinche realizado presenta una propuesta alternativa en la malla de extracción original, se busca implementar para el caso de la malla Teniente y para la malla cuadrada con el fin de generar mayor operatividad en la malla y permitir más maniobras del equipo LHD dentro de las calles.

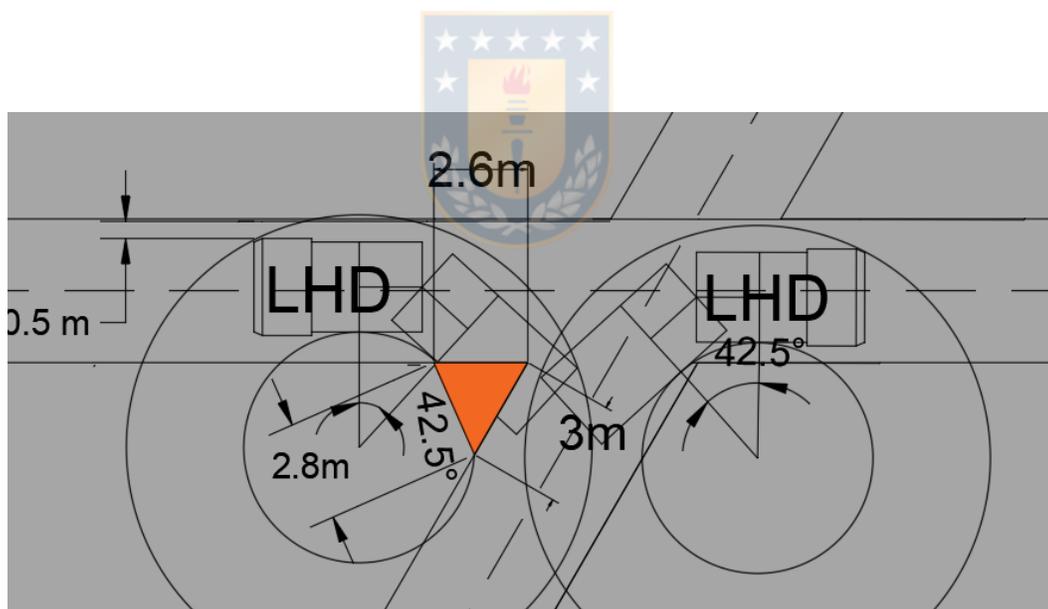


Figura E-1. Verificación del material a quitar del pilar según el giro del LHD en la malla Teniente en un sentido

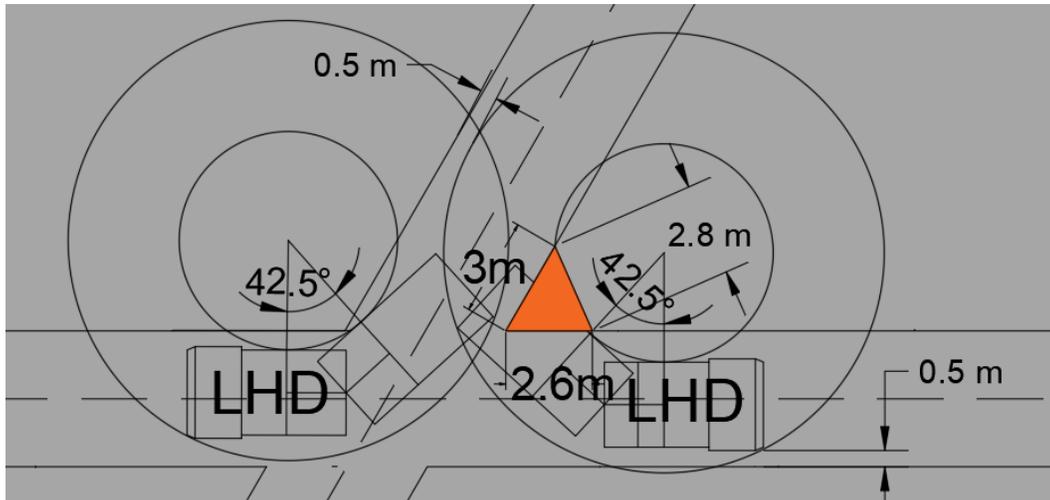


Figura E-2. Verificación del material a quitar del pilar según el giro del LHD en la malla Teniente en el otro sentido

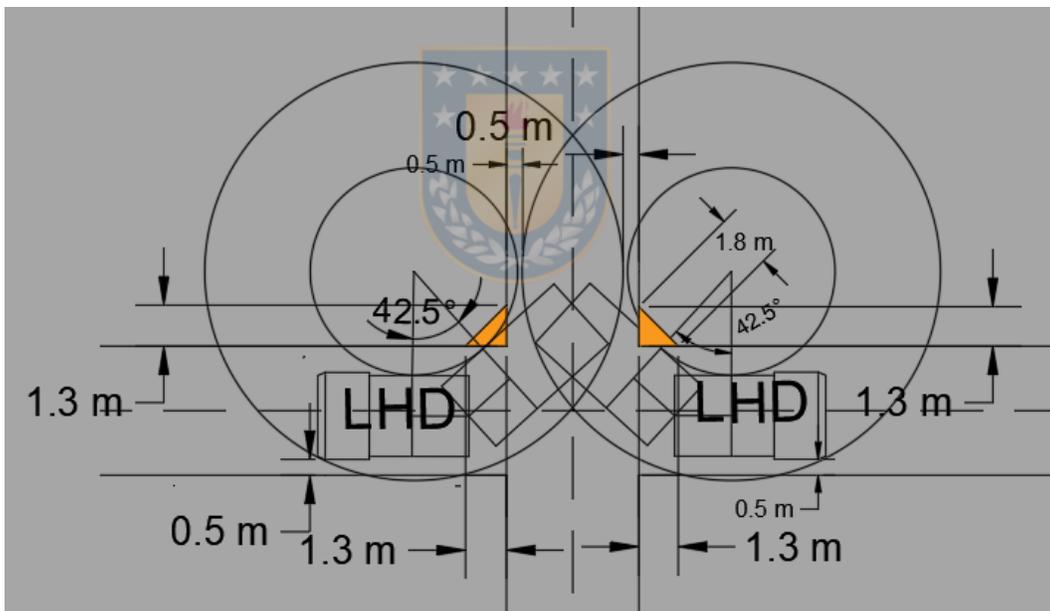


Figura E-3. Verificación del material a quitar del pilar según el giro del LHD en la malla cuadrada

ANEXO F. Simulador Arena

El *software* Arena es de simulación, lo que permite recrear procesos de la realidad, para comenzar a entender cómo funciona este programa es importante conocer la ventana del programa como se observa en la siguiente figura.

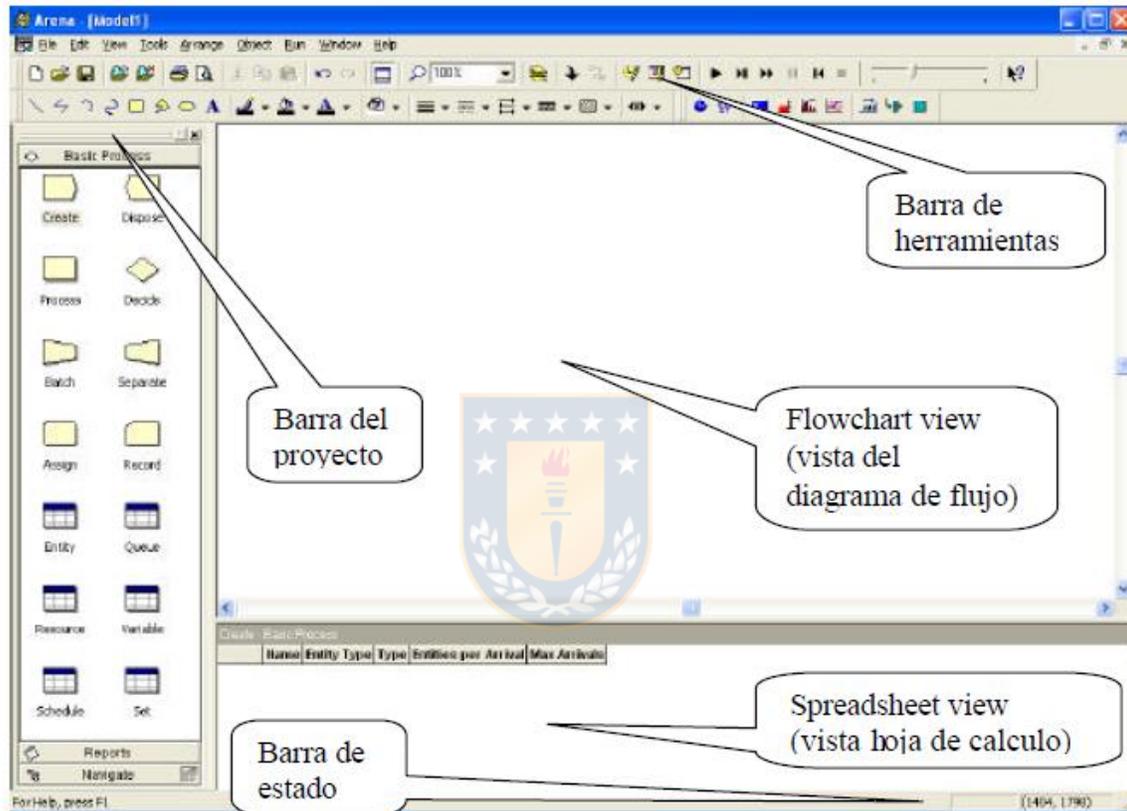


Figura F-1. Ventana de trabajo de Arena

Para términos prácticos se especifica que hacen los módulos utilizados para crear las simulaciones de la investigación. En primer lugar, se identifica que los módulos de trabajo se encuentran en la barra de proyecto y está se divide en las siguientes componentes:

- *Basic Process Panel*: Contiene los elementos básicos de construcción de modelos, estos elementos se denominan módulos.
- *Advanced Process*: Más módulos para tareas adicionales.
- *Advanced Transfer*: Opciones para mover las entidades.

En segundo lugar, se identifican los módulos utilizados en las simulaciones [35]:

- **Create:** Este módulo representa la llegada de entidades al modelo de simulación. Las entidades se crean usando una planificación o basándose en el tiempo entre llegadas. En este módulo se especifica también el tipo de entidad de que se trata. Una vez se incluye en el modelo a la derecha del símbolo aparece bajo una línea el número de entidades creadas.
- **Read write:** Este módulo se usa para leer datos de un archivo de entrada o del teclado y asignar los valores de datos a una lista de variables o atributos (u otra expresión). Este módulo también se utiliza para escribir datos en un dispositivo de salida, como la pantalla o un archivo. Al leer o escribir en un archivo, la lógica de *ReadWrite* varía según el tipo de acción de lectura o escritura realizada y según el tipo de acceso del nombre del archivo Arena (el tipo de acceso de un archivo se especifica en el módulo de archivo).
- **Process:** Este módulo corresponde a la principal forma de procesamiento en simulación. Se dispone de opciones para ocupar y liberar un recurso. El tiempo de proceso se le añade a la entidad y se puede considerar como valor añadido, valor no-añadido, transferencia, espera u otros. Una vez se introduce en el modelo, aparece un número en la parte inferior del símbolo que indica el número de entidades que actualmente están procesándose.
- **Assign:** Este módulo se usa para asignar valores nuevos a las variables, a los atributos de las entidades, tipos de entidades, figuras de las entidades, u otras variables del sistema. Se pueden hacer múltiples asignaciones con un único módulo Assign. Para añadir una nueva variable al modelo, simplemente se selecciona Add, Type: Entity, el nombre de la variable y el valor que se desea tome a partir de ese momento.
- **Decide:** Este módulo permite a los procesos tomar decisiones en el sistema. Incluye la opción de tomar decisiones basándose en una o más condiciones o basándose en una o más probabilidades. Las condiciones se pueden basar en valores de atributos, valores de variables, el tipo de entidad o una expresión. Hay dos puntos de salida del módulo Decide cuando se especifica el tipo 2-way chance o 2-way condition. Hay un punto de salida para las entidades “verdaderas” y una para las entidades “falsas”. Cuando se especifica el tipo N-way chance o condition, aparecen múltiples puntos de

salida para cada condición o probabilidad y una única salida “else”. Una vez incluido en el modelo, cerca de cada una de las ramas que salen del símbolo que representa el módulo, aparece un número. En la rama “True” corresponde al número de entidades que toman la rama de verdadero y el de la rama “False” el número de entidades que toman la rama de falso.

- **Station:** En este módulo se define una estación correspondiente a una posición física o lógica donde un procesamiento ocurre. La estación tiene un área de actividad común que es utilizado para comunicar los tiempos y costos acumulados por las entidades en esta estación. Este nombre de área de actividad es el mismo que la estación. Si un área de actividad es el mismo que la estación. Si un área de actividad padre se define, entonces también se acumula tiempos y costos de las entidades en esta estación.
- **Allocate:** Este módulo asigna un transportador a una entidad sin moverlo a la ubicación de la estación de la entidad. Luego, la entidad tiene el control del transportador para moverlo a una ubicación en particular o para detenerlo por una falla o falla. Se puede asignar una unidad transportadora particular a la entidad o se puede usar una regla de selección para determinar cuál de los transportadores se asignará a la entidad.
- **Transport:** Este módulo de transporte transfiere la entidad de control a una estación de destino. Después del retraso de tiempo requerido para el transporte, la entidad vuelve a aparecer en la simulación en el módulo de la estación. Los transportadores de ruta libre siempre se mueven al mismo destino de estación que la entidad. Los transportadores guiados se pueden mover a una ubicación de red diferente que el destino de la estación de la entidad utilizando el Tipo de destino de Tran guiado.

ANEXO G. Detalles estadísticos del escenario base

Para validar la simulación es necesario tener un intervalo de confianza que asegure los rangos donde se encuentran los datos, en este caso solo se realiza para el escenario base, en el caso de igual probabilidad de extracción de cada punto de extracción y en el caso de distinta probabilidad de extracción de cada punto de extracción, ya que son los casos simulados con condiciones reales.

Se realiza una prueba para conocer el intervalo de confianza de la media poblacional normal cuando la varianza es conocida para ambos casos buscando validar la simulación, se considera un Alpha 0.05, el número de réplicas del escenario $n=30$ y la desviación estándar que se encuentra en la siguiente tabla.

Ecuación calculo intervalo de confianza:

$$\bar{X} - Z_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (G-1)$$



Donde:

\bar{X} : media muestral

$Z_{\frac{\alpha}{2}}$: Factor que depende de alpha

σ : Desviación estándar de la muestra

n : tamaño de la muestra

μ : media poblacional

Tabla G-1. Estadística descriptiva del escenario base

TTE Igual Probabilidad				TTE Distinta Probabilidad			
Tiempo ciclo promedio		TPD		Tiempo ciclo promedio		TPD	
Media	2.52	Media	3023.7	Media	2.46	Media	3031.3
Error típico	0.00	Error típico	3.4	Error típico	0.00	Error típico	6.0
Mediana	2.52	Mediana	3021.5	Mediana	2.46	Mediana	3025.8
Desviación estándar	0.02	Desviación estándar	18.4	Desviación estándar	0.01	Desviación estándar	33.1
Varianza de la muestra	0.00	Varianza de la muestra	339.1	Varianza de la muestra	0.00	Varianza de la muestra	1097.3
Rango	0.06	Rango	64.5	Rango	0.03	Rango	112.5
Mínimo	2.48	Mínimo	2993.9	Mínimo	2.45	Mínimo	2983.8
Máximo	2.54	Máximo	3058.4	Máximo	2.47	Máximo	3096.4

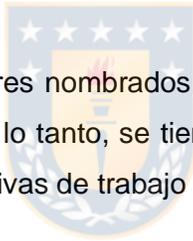


ANEXO H. Horas efectivas por turno

Considerando que la minería funciona las 24 horas del día los 7 días de la semana se asignan tres turnos de 8 horas cada uno, lo que permite completar las 24 horas de trabajo. Pero, esas 8 horas no son de trabajo efectivo, hay que tener en consideración distintos factores que acotan las horas efectivas de trabajo, como lo son:

- Horario de colación
- Cambio de turno
- Llegada a la postura de trabajo
- Interferencias mecánicas
- Falta de petróleo
- Interferencias de la operación.

Teniendo en consideración los factores nombrados, la utilización efectiva de un turno es el 60% de las horas totales de éste [33], por lo tanto, se tienen 4.8 horas efectivas de trabajo en un turno. Lo que se traduce a 14.4 horas efectivas de trabajo por un día laboral completo con 3 turnos.



ANEXO I. Probabilidad de extracción

Teniendo en cuenta que cada malla de extracción estudiada es un escenario, cada uno de estos escenarios presenta dos escenarios más. El primero es el caso de cuando existe la misma probabilidad de extraer cualquier punto de extracción independiente de su ubicación en la calle producción y el segundo caso es cuando se presenta distinta probabilidad de extracción dependiendo de la ubicación del punto de extracción con respecto al pique de traspaso.

El segundo caso se asemeja mucho más a la realidad, esto se debe a que en la faena ocurre este suceso en la operación, cuando un punto de extracción está más cerca del pique de traspaso al que va a descargar el material, el operador recurre con mayor frecuencia a estos puntos ya que así es más rápido alcanzar la meta productiva [32].

En la siguiente tabla se presentan las probabilidades de extracción para cada caso y cada punto de extracción, en función de la nomenclatura del PE explicada en el ANEXO C. Hay que tener en consideración que la ubicación del pique 1 es en la zanja 5 y el pique 2 en la zanja 11.

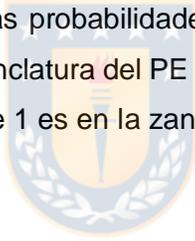


Tabla I-1. Probabilidades de extracción

PE	Probabilidad de extracción	
	Igual [%]	Distinta [%]
11	3.33	5
12	3.33	5
21	3.33	5
22	3.33	5
31	3.33	8
32	3.33	8
41	3.33	11
42	3.33	11
51	3.33	11
52	3.33	11
61	3.33	5
62	3.33	5
71	3.33	5
72	3.33	5
81	3.33	8
82	3.33	8
91	3.33	8
92	3.33	8
101	3.33	11
102	3.33	11
111	3.33	11
112	3.33	11
121	3.33	3
122	3.33	3
131	3.33	3
132	3.33	3
141	3.33	3
142	3.33	3
151	3.33	3
152	3.33	3
TOTAL	99.9	

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Diseño de nivel de producción alternativo en <i>Block/Panel caving</i> .	
Nombre Memorista: Karen Tatiana Sáez Garrido	
Modalidad	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	Prof. René Gómez P.
Calificación	
Fecha	
Prof. Roberto Fustos T.	
Ingeniero Supervisor:	
Institución:	
Comisión (Nombre y Firma)	
Prof. Asieh Hekmat	Ing. Ernesto Labbé V.
Resumen	
<p>A nivel mundial, la minería subterránea consta de variados diseños para los niveles de producción, algunos ejemplos son la malla tipo Teniente, la malla tipo <i>Herringbone</i> o Espina de pescado, la malla Cuadrada y las variaciones de estas. El diseño de estas se basa en una serie de variables mineras del <i>caving</i> como, el tamaño de las galerías, las dimensiones de los equipos de trabajo y la estabilidad de las galerías, con el objetivo de maximizar la extracción, manteniendo la estabilidad del nivel.</p> <p>El presente estudio considera una alternativa en el diseño de la malla de extracción del nivel de producción, con la hipótesis de obtener un aumento de la producción diaria, debido a mejoras</p>	

en las maniobras de los equipos LHD y con ello una reducción de los tiempos de ciclo. Se considera un caso base, la Mina RENO de la División El Teniente de CODELCO, que tiene una Malla de 15 x 17.32 m², cuyas galerías de producción y zanjas tienen dimensiones de 4.3 x 3.6 m², en las que, se utilizan equipos LHD de 7 yd³ modelo CAT R1600H y se extraen 3000 toneladas por día por calle producción en promedio. Este escenario base fue comparado con otros tres tipos de mallas, que conservarán las dimensiones antes mencionadas. En el primer caso se utiliza una malla *Herringbone*. En el segundo caso se emplea una malla tipo Teniente con desquinche en sus pilares. Por último, en el tercer caso se trabaja con una malla Cuadrada con desquinche en sus pilares. Estos dos últimos casos son mallas propuestas dentro del estudio.

El análisis se realiza a través de simulaciones de eventos discretos utilizando el *software* Arena. Se simula el escenario base para calibrar el modelo considerando la condición de una calle de producción, y posterior a esto se hacen las simulaciones de los otros tres escenarios. Al final de cada simulación se hace la entrega de un informe que identifica el LHD que está trabajando, el punto de extracción en el cual trabajó, el número de ciclo, el tiempo de ciclo, el tonelaje extraído en este ciclo, el tonelaje acumulado, el número de colgaduras y el tonelaje en el pique.

En base a estos informes entregados se comparan las alternativas y obteniendo que la malla Espina de pescado no presenta significantes mejoras. Por otro lado, las mallas propuestas (tipo Teniente desquinchada y Cuadrada desquinchada) presentan un aumento entre 33% a 39% de la producción y una disminución de un 23% a 25% en el tiempo de ciclo con respecto al escenario base. Debido a esto se comprueba que la variación del tipo de malla maximiza la producción y a su vez minimiza el tiempo de ciclo, lo que verifica la hipótesis del estudio.