



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

ANÁLISIS DE CONSTRUCTIBILIDAD Y PUNTOS CRÍTICOS DEL USO DE TBM EN
MINERÍA DE BLOCK CAVING

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUSTAVO ALFONSO PENROZ PENROZ

PROFESOR GUÍA:
LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PIERRE NANCEL-PENARD
JUAN CARLOS POZO ROJAS
NELSON MORALES VARELA

SANTIAGO DE CHILE
2022

Resumen

La TBM asoma como una alternativa cada vez más viable para reemplazar a los métodos de excavación convencionales, como perforación y tronadura, como la principal metodología de construcción de los niveles de producción y hundimiento en minería subterránea. Sus altas velocidades de avance la hacen sumamente atractiva para los proyectos mineros, pero tiene sus limitaciones: es una herramienta poco versátil desde la movilidad. Gran costo y tiempo de adquisición y meses de montaje, si bien son propias de este método, no son mayores problemas para la industria, pero sus grandes radios de giro la han posicionado históricamente más para túneles auxiliares y de ventilación que para la construcción de los niveles de extracción del material.

El objetivo del estudio es implementar herramientas de decisión para la construcción de infraestructura, en particular niveles de producción y hundimiento, de minería subterránea mediante el uso de TBM. Específicamente, evaluar escenarios constructivos para utilizar TBM, y PyT en caso de que se requiera, basado en criterios de costos. Para esto, se debe encontrar un programa, idealmente diseñado para el rubro de la minería, donde ejecutar un modelo que realice dicha evaluación.

Se genera un algoritmo que toma como input un archivo de actividades, uno de precedencias y un conjunto de restricciones, y entrega una Carta Gantt con la secuencia constructiva por periodo. El algoritmo está diseñado en un software de planificación de proyectos mineros, UDESS, el que agenda las actividades para que maximice el VAN, dejando las acciones más caras para el final, acelerando la construcción de aquellas que dan mayor beneficio.

El resultado del trabajo es una metodología para resolver cualquier nivel de producción o hundimiento con forma de un romboide, y otra de una geometría escalonada. Ambas metodologías juntas pueden resolver prácticamente cualquier layout de nivel de extracción, por lo que lo obtenido es una estrategia general para encontrar una ruta, si bien no óptima, ya que el problema de optimización no considera todos los caminos posibles, que al menos siga los criterios de una construcción de bajo costo. Algunos puntos críticos son que las posibilidades de puntos de inicio para ambos escenarios están sumamente acotadas, y son fácilmente identificables con la metodología utilizada; y que dependiendo el que se elija, solo hay dos direcciones que se pueden seguir.

Si bien el resultado encontrado no es el óptimo (se propone una metodología para encontrarlo en las Conclusiones), el presente trabajo es un avance hacia la implementación total de TBM en la construcción de infraestructura de minería subterránea, acelerando el proceso constructivo y con ello, el tiempo de puesta en marcha de la extracción de la mina, valores clave en la toma de decisiones de los proyectos mineros.

Abstract

TBM looks like an increasingly viable alternative to replace conventional excavation methods, such as Drill and Blast, as the main construction methodology for production and undercut levels in underground mining. Its high speed rates makes it extremely attractive for mining projects, but it has its limitations: it is not a versatile tool when it comes to mobility. Great cost and acquisition time and months of assembly, although they are typical of this method, are not major problems for the industry, but its large turning radius have historically positioned it more for auxiliary and ventilation tunnels than for the construction of material extraction levels.

The objective of the study is to implement decision tools for the construction of infrastructure, in particular production and undercut levels, of underground mining through the use of TBM. Specifically, evaluate construction scenarios to use TBM, and D&B if required, based on cost criteria. For this, a program must be found, ideally designed for the mining sector, where a model that performs that evaluation can be executed.

A generated algorithm that takes as input an activity file, a precedence file and a set of restrictions, and delivers a Gantt Chart with the construction sequence per period. The algorithm is designed in a mining project planning software, UDESS, which schedules the activities to maximize the NPV, leaving the most expensive actions for last, accelerating the construction of those that give the greatest benefit.

The result of the work is a methodology to solve any production or undercut level in the shape of a rhomboid, and another with a staggered geometry. Both methodologies together can solve practically any extraction level layout, so what is obtained is a general strategy to find a route, although not optimal, since the optimization problem does not consider all possible paths, which at least follows the low-cost construction criteria. Some critical points are that the possibilities of starting points for both scenarios are extremely limited, and are easily identifiable with the methodology used; and that depending on which one is chosen, there are only two directions that can be followed.

Although the result found is not optimal (a methodology to find it is proposed in the Conclusions), the present work is an advance towards the total implementation of TBM in the construction of underground mining infrastructure, accelerating the construction process and with it, the start-up time of the extraction of the mine, key values in the decision-making of mining projects.

*A mis papás,
que han dado todo
porque esto sea posible*

Agradecimientos

A mi Tata y a mi Tío Pa, quienes de pequeño me entregaron siempre todo su cariño y me inculcaron valores que he tenido durante toda mi vida. Por sembrar en mi la semilla de la curiosidad por el mundo y cómo este funciona y siempre estar dispuestos a ser más que mi familia, amigos para mí cuando era un niño. Quiero agradecerles su presencia y sabiduría, las que me han acompañado muchos años después de sus partidas, y que aunque me gustaría que pudieran estar en este momento conmigo, sé que, donde sea que se encuentren, están orgullosos de que haya logrado finalizar mi carrera universitaria como Ingeniero Civil.

A mi abuela, tío, tías, primos y primas que amo, por hacer amenas las reuniones familiares y hacerme sentir que siempre he podido contar con ustedes para lo que necesite, ese apoyo me ha dado fuerza cuando los estudios se ponían cuesta arriba y a veces no habían ganas de seguir. Gracias por estar para mí, por confiar en mí y en mis capacidades y, en muchas ocasiones, hacerme sentir más capaz de lo que soy.

A mis amigos y amigas que me han acompañado en este lindo proceso, con los que hemos compartido alegrías y tristezas, y con los que nos hemos mantenido unidos en las buenas, malas y peores. Gracias por convertirse en la familia que elegí, y por ser la mejor parte de la vida universitaria. Quiero incluir en estos agradecimientos a todos quienes me han acompañado, del colegio, la facultad y de Ultimate Frisbee, el deporte que amo.

Quiero agradecer a mis papás, Gustavo y Bernardita. Por su esfuerzo para que nunca me faltara nada, por su amor incondicional, por su perdón eterno, por su paciencia, por siempre hacerme sentir que estaban orgullosos de mí y por ser las mejores personas que he conocido. Gracias a mi mamá, la persona más dedicada y trabajadora que existe, por su perfeccionismo y siempre instarme a dar más. Gracias a mi papá por su apoyo y confianza al darme siempre las libertades que he necesitado y por traspasarme su amor al deporte.

Por último, agradezco a todos los profesores que me han inculcado amor por la ingeniería, la matemática y las ciencias, de no ser por ustedes no habría elegido este camino que me ha hecho tan feliz. Gracias a quienes se toman la docencia como un arte y no como un trabajo, y han puesto pasión en sus clases, apuntes y correos. Especialmente, quiero darle las gracias a mi profesor Luis Felipe Orellana por incluirme en el mundo de la minería y darme la posibilidad de hacer esta memoria con él; y a Pierre Nancel-Penard y Diego Mancilla, tremendos profesionales que dedicaron su tiempo y conocimientos a ayudarme durante el año.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	4
1.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Alcances	4
1.4. Estructura de la memoria	5
2. Antecedentes del trabajo	6
2.1. Excavación subterránea, método de block caving	6
2.2. Método convencional	8
2.3. Excavación mecanizada, TBM	9
2.3.1. Tipos de TBM	10
2.3.2. Rendimiento de TBM	11
3. Metodología	12
3.1. Construcción de la Red	16
3.2. Descripción y cambios del software UDESS	19
3.3. Escenarios preliminares	23
3.4. Caso de estudio	24
4. Resultados	25
4.1. Caso 1	25
4.2. Caso 2	30

4.3. Caso de estudio	41
5. Discusión	49
6. Conclusión	55
6.1. Trabajo futuro	56
7. Bibliografía	58
Anexos	60

Índice de cuadros

2.1. Comparación de los proyectos que han utilizado TBM en roca dura (Herrera, 2021)	11
2.2. Rendimiento TBM	11
4.1. Actividades Caso 1 (Elaboración propia)	25
4.2. Precedencias Caso 1 (Elaboración propia)	28
4.3. Carta Gantt Caso 1 (Elaboración propia)	29
4.4. Nomenclatura actividades (Elaboración propia)	31
4.5. Ejemplo actividades Caso 2 (Elaboración propia)	34
4.6. Ejemplo precedencias Caso 2 (Elaboración propia)	36
4.7. Carta Gantt Caso 2, parte 1 (Elaboración propia)	38
4.8. Carta Gantt Caso 2, parte 2 (Elaboración propia)	39
4.9. Ejemplo actividades caso de estudio reducido (Elaboración propia)	44
4.10. Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)	44
4.11. Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)	45
4.12. Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 3 (Elaboración propia)	45
4.13. Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 4 (Elaboración propia)	46
4.14. Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 5 (Elaboración propia)	46
7.1. Actividades Caso 2, parte 1 (Elaboración propia)	63
7.2. Actividades Caso 2, parte 2 (Elaboración propia)	64
7.3. Precedencias Caso 2, parte 1 (Elaboración propia)	65

7.4. Precedencias Caso 2, parte 2 (Elaboración propia)	66
7.5. Precedencias Caso 2, parte 3 (Elaboración propia)	67
7.6. Actividades caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)	72
7.7. Actividades caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)	73
7.8. Actividades caso de estudio reducido, parte 3 (Elaboración propia)	74
7.9. Actividades caso de estudio reducido, parte 4 (Elaboración propia)	75
7.10. Actividades caso de estudio reducido, parte 5 (Elaboración propia)	76
7.11. Precedencias caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)	77
7.12. Precedencias caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)	78
7.13. Precedencias caso de estudio reducido, parte 3 (Elaboración propia)	79
7.14. Precedencias caso de estudio reducido, parte 4 (Elaboración propia)	80
7.15. Precedencias caso de estudio reducido, parte 5 (Elaboración propia)	81
7.16. Precedencias caso de estudio reducido, parte 6 (Elaboración propia)	82
7.17. Precedencias caso de estudio reducido, parte 7 (Elaboración propia)	83
7.18. Precedencias caso de estudio reducido, parte 8 (Elaboración propia)	84

Índice de figuras

1.1. Producción de cobre según tipo de yacimiento (Consejo Minero, 2021)	1
1.2. Perforación y Tronadura (IDMining, 2015)	2
1.3. Máquina Tuneladora, TBM (Tunneltalk, 2018)	3
1.4. Esquema nivel de producción (Elaboración propia)	3
2.1. Maquinaria de extracción LHD (Catálogo CAT)	7
2.2. Esquema de explotación mediante Block Caving (Gómez & Labbé, 2019)	7
2.3. Sección típica nivel de producción (Flores y Catalán, 2018)	8
2.4. Tiempo gastado por actividad del ciclo de PyT [%] (Pozo, 2021)	9
2.5. Tipos de TBM (Zheng et al, 2016)	10
3.1. Metodología de la memoria (Elaboración propia)	12
3.2. Caso 1. 3x3 (Elaboración propia)	14
3.3. Caso 2. 4x4 (Elaboración propia)	14
3.4. Caso de estudio (Elaboración propia)	15
3.5. Caso de estudio reducido (Elaboración propia)	15
3.6. Fragmento Nivel de Producción (Valenzuela, 2017)	16
3.7. Nivel de Producción Típico (Rojas et al, 2003)	17
3.8. Detalle Nivel de Producción Típico (Rojas et al, 2003)	17
3.9. Macrobloc Chuquicamata (Flores y Catalán, 2018)	18
3.10. Nivel de producción de referencia (Elaboración propia)	18
3.11. Ejemplo de archivo de actividades en UDESS (Elaboración propia)	19

3.12. Ejemplo de horizonte de periodos en UDESS (Elaboración propia)	20
3.13. Ejemplo de precedencias en UDESS (Elaboración propia)	21
3.14. Escenario preliminar 1 (Elaboración propia)	23
3.15. Escenario preliminar 2 (Elaboración propia)	23
3.16. Caso de estudio reducido con tramos (Elaboración propia)	24
4.1. Punto de inicio no factible (Elaboración propia)	26
4.2. Puntos de inicio factibles (Elaboración propia)	27
4.3. Demostración de factibilidad el punto "Inicio 1" (Elaboración propia)	27
4.4. Secuencia constructiva Caso 1 (Elaboración propia)	30
4.5. Imagen nomenclatura actividades (Elaboración propia)	31
4.6. Ejemplo actividades versión 2 (Elaboración propia)	32
4.7. Ejemplo 2 actividades versión 2 (Elaboración propia)	33
4.8. Ejemplo 3 actividades versión 2 (Elaboración propia)	33
4.9. Ejemplo sucesoras (Elaboración propia)	35
4.10. Ejemplo sucesoras versión 2 (Elaboración propia)	35
4.11. Ejemplo FAC, camino 1 (Elaboración propia)	37
4.12. Ejemplo FAC, camino 2 (Elaboración propia)	37
4.13. Secuencia constructiva Caso 2 (Elaboración propia)	40
4.14. Factibilidad de arcos caso de estudio (Elaboración propia)	41
4.15. Caso de estudio separado por zonas (Elaboración propia)	42
4.16. Zonas caso de estudio reducido (Elaboración propia)	43
4.17. Secuencia constructiva caso de estudio reducido (Elaboración propia)	47
4.18. Solución caso de estudio (Elaboración propia)	48
5.1. Comparación de la secuencia constructiva de dos escenarios (Elaboración propia)	50
5.2. Ejemplo del funcionamiento de actividades v2 (Elaboración propia)	52
5.3. Comparación entre el layout completo y un macrobloque	53

6.1. Caso de estudio propuesto (Elaboración propia)	56
6.2. Flujo caso de estudio propuesto (Elaboración propia)	57
7.1. Código AIC Caso 2 (Elaboración propia)	68
7.2. Código FAC Caso 2, parte 1 (Elaboración propia)	69
7.3. Código FAC Caso 2, parte 2 (Elaboración propia)	70
7.4. Código FAC Caso 2, parte 3 (Elaboración propia)	71
7.5. Código AIC caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)	85
7.6. Código AIC caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)	86
7.7. Código FAC caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)	87
7.8. Código FAC caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)	88
7.9. Código FAC caso de estudio reducido, parte 3 (Elaboración propia)	89
7.10. Código FAC caso de estudio reducido, parte 4 (Elaboración propia)	90
7.11. Código FAC caso de estudio reducido, parte 5 (Elaboración propia)	91
7.12. Código FAC caso de estudio reducido, parte 6 (Elaboración propia)	92
7.13. Código FAC caso de estudio reducido, parte 7 (Elaboración propia)	93
7.14. Código FAC caso de estudio reducido, parte 8 (Elaboración propia)	94
7.15. Código FAC caso de estudio reducido, parte 9 (Elaboración propia)	95
7.16. Código FAC caso de estudio reducido, parte 10 (Elaboración propia)	96
7.17. Código FAC caso de estudio reducido, parte 11 (Elaboración propia)	97

Capítulo 1

Introducción

La minería es una de las principales actividades económicas en Chile. En especial, la minería del cobre, la que equivale al 20% del PIB del país. Esto no es solo a nivel nacional, Chile lidera la producción de cobre a nivel mundial con un 28%, seguido por Perú y China con 12% y 8%, respectivamente. La industria minera ha ido lentamente transicionando de yacimientos de rajo abierto, a subterráneos; aumentando la existencia de estos últimos de 13% entre 2003 y 2005, a un 20% en 2021 (ver figura 1.1). Quizá el ejemplo más representativo de esto es Chuquicamata, la que tras ser por alrededor de 100 años la mina a rajo abierto más grande del mundo, a partir del año 2019 pasó a ser subterránea, dando directrices acerca de cual será el futuro de la industria en las próximas décadas, esto debido a que los recursos en superficie se van agotando y haciéndose necesario adaptarse e ir en busca de otras opciones.

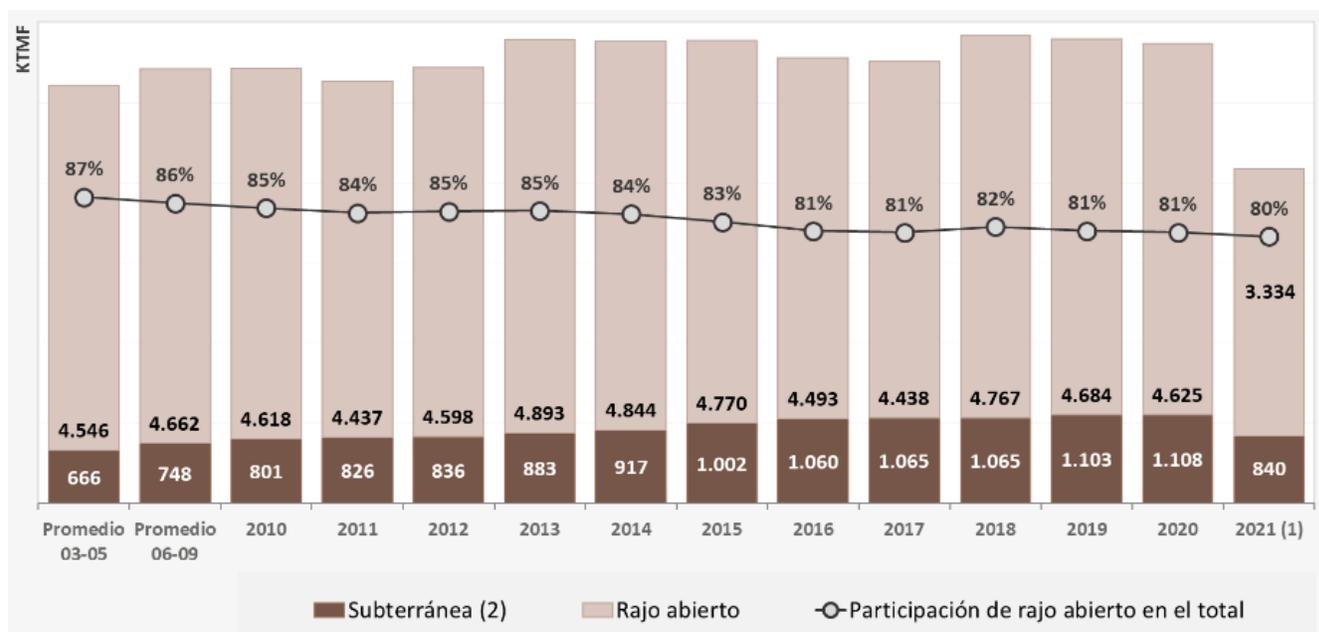


Figura 1.1: Producción de cobre según tipo de yacimiento (Consejo Minero, 2021)

Debido a la importancia de la industria en el desarrollo del país, se deben enfocar los esfuerzos en que cada fase sea lo más eficiente posible, en particular, el periodo previo a la explotación de material, dado que durante este tiempo el mandante está invirtiendo grandes sumas de dinero y no está recibiendo utilidades. Actualmente, el método de excavación de los túneles es el tradicional, mediante la operación unitaria de perforación y tronadura (PyT) (ver figura 1.2). La PyT consiste en taladrar la roca para luego ejecutar una detonación controlada, con el objetivo de fracturarla. Este procedimiento tiene muchas cualidades, es versátil, rápido de adquirir, permite varios frentes de trabajo, entre otras (Pozo, 2021). Sin embargo, las velocidades de avance son bajas, debido a que los procesos de perforación, tronadura, retirada de la marina y colocación del soporte primario, son lentos y no pueden ser realizados de manera simultánea. El rendimiento de un equipo PyT es de entre 4 y 9 m/día.



Figura 1.2: Perforación y Tronadura (IDMining, 2015)

La alternativa para solucionar las bajas velocidades de avance en la construcción de túneles es la excavación mecanizada, donde las principales opciones son TBM, por sus iniciales en inglés, Tunnel Boring Machine (ver figura 1.3). Este tipo de maquinaria es ampliamente utilizada para excavación de suelo, pero aún no ha sido implementada en minería en Chile. En un comienzo, se ha propuesto como candidata para la construcción de túneles de ventilación, secundarios, mas no ha sido considerada para niveles de producción y hundimiento. Esto se debe, principalmente, a los amplios radios de giro que la caracterizan, y al hecho de que estos niveles tienen forma de red, con dimensiones del orden de 15 a 40 metros por tramo. El rendimiento de TBM puede variar desde 8 a 45 m/día, dependiendo del tipo de tunelera, las condiciones del terreno y la ruta que siga (Rodríguez, 2020) (Herrera, 2021).



Figura 1.3: Máquina Tuneladora, TBM (Tunneltalk, 2018)

En la presente memoria, se diseña una estrategia constructiva que busca minimizar costos de excavación de un nivel de producción, los que se sabe que dependen de distintos factores, entre los que destacan las características geotécnicas y geomecánicas de la roca, del largo del túnel, en particular de los tramos que lo componen, y de los ángulos de giro, donde a peor calidad de la roca y ángulos más cerrados, el proyecto será más caro.

A continuación, se muestra un esquema de la planta de un nivel de producción de referencia, con el único objetivo de ilustrar la forma que suelen tener, con túneles diagonales y horizontales (ver figura 1.4).

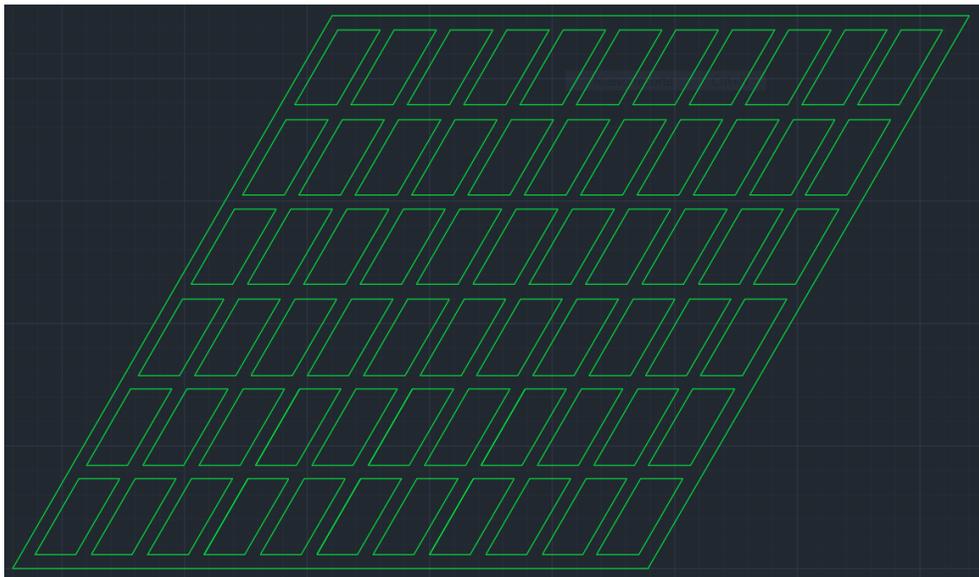


Figura 1.4: Esquema nivel de producción (Elaboración propia)

Dado que las propiedades geotécnicas del terreno, y la forma y distribución de la red son datos, lo que se busca diseñar es un modelo que optimice la ruta, de modo que el costo de excavar el nivel de producción sea el mínimo; considerando las características de cada tramo.

1.1. Objetivo General

Desarrollo, evaluación e implementación de herramientas de decisión para la construcción de infraestructura de minería subterránea mediante el uso de TBM.

1.2. Objetivos Específicos

- Evaluar escenarios constructivos para utilizar TBM, PyT o ambas, en un nivel de producción de minería masiva de block/panel caving, basado en criterios de costos.
- Desarrollar una herramienta que tome características geológicas, constructivas y de gestión, y entregue la mejor ruta, o una que se le asemeje lo suficiente.
- Implementar en el software UDESS, la toma de decisiones para el método constructivo mecanizado.

1.3. Alcances

La memoria se limita a tomar un nivel de producción genérico de una mina de block/panel caving, donde la construcción de los tramos tiene un costo arbitrario. Es decir, en la práctica ese costo está asociado, entre otras cosas, a las características geotécnicas del problema, pero para efectos de la investigación, el valor del costo de cada tramo es un dato.

Las restricciones del problema son las siguientes:

- La red tiene ángulos de 60° y 120° .
- Los ángulos de 60° no se pueden construir.
- La TBM no puede volver a pasar por un tramo construido.
- Se permite el retroceso.

Debido a las condiciones anteriormente descritas, se deben proponer geometrías de nivel de producción con leves variaciones.

1.4. Estructura de la memoria

El presente estudio, se basa en seis capítulos ordenados de manera lógica para cumplir con los objetivos propuestos.

- Capítulo 1: Se introduce el tema de la memoria, además de presentar los objetivos que se busca alcanzar, y los alcances de la investigación.
- Capítulo 2: A modo de contextualización del estado actual del problema, se muestran antecedentes, documentos acerca del uso de tuneladoras en minería, modelos de rendimiento en roca dura y estudios a nivel nacional e internacional acerca de la aplicabilidad de TBM en escenarios atingentes.
- Capítulo 3: Se detalla la metodología. Se describen los pasos que fueron realizados a lo largo de la investigación, hasta llegar al resultado final.
- Capítulo 4: Se muestran los resultados obtenidos del modelo diseñado y los costos estimados para los casos propuestos.
- Capítulo 5: Se analizan los resultados, principalmente las ventajas y limitaciones del método elegido. Se discute acerca de la respuesta a la pregunta inicial, ¿Es posible construir niveles de producción en minería de macroblock caving mediante TBM? En este capítulo también se hace referencia a los puntos críticos a considerar a la hora de tomar decisiones constructivas.
- Capítulo 6: Se presentan las conclusiones del estudio y recomendaciones para el futuro en esta materia. Se proponen directrices a seguir adelante con esta investigación.
- Bibliografía: Se entregan las referencias bibliográficas citadas en formato APA.
- Anexo: Finalmente, se adjunta un anexo para todos los pasos intermedios hasta llegar a la obtención del modelo final.

Capítulo 2

Antecedentes del trabajo

En el presente capítulo se realiza una revisión de los antecedentes bibliográficos que sustentan este trabajo de investigación. Existe mucha literatura con respecto a TBM, la mayoría está enfocada en suelo, no en roca; en particular, no hay mucha experiencia en minería subterránea. Sin embargo, se encuentran disponibles modelos predictivos de rendimiento teóricos y resultados empíricos, costos de este método en distintos ambientes y tipos de roca, incluyendo métodos de puntuación y penalización por desempeño dependiendo del entorno. Indicadores y parámetros de excavabilidad de las rocas. La herramienta DAT, Decision Aids for Tunneling, una forma de calcular el tiempo de construcción y costo de proyectos de túneles. Existen muchos estudios sobre alternativas a las Tunnel Boring Machines, como puede ser el método de perforación y tronadura. Se encuentran disponibles planos y documentos de proyectos anteriores. Sin embargo, los antecedentes incluidos en esta sección son los estrictamente necesarios para la comprensión del mismo, por lo que los tópicos que se alejan del objetivo de la memoria son meramente mencionados, mas no profundizados.

2.1. Excavación subterránea, método de block caving

La minería de caving es una excelente alternativa para la industria en Chile, debido a las condiciones de los yacimientos del país y a los bajos costos y altos ritmos de producción propios de este método. (Sáez, 2019). Las desventajas son la alta inversión inicial y lo poco flexibles al cambio que son los diseños una vez se comienza a construir.

Existen varios métodos de hundimiento, lo más comunes son Block y Panel Caving, en los que se explota el yacimiento a una misma cota; a diferencia de Front Caving, Sublevel Caving e Inclined Caving, en los cuales se explota simultáneamente a distintas cotas a través de subniveles. (Gómez & Labbé, 2019).

En particular, el Block Caving es un método en el cual el cuerpo mineralizado se hunde naturalmente tras iniciar el quiebre del macizo rocoso desde un nivel de hundimiento. El procedimiento consiste en utilizar la gravedad y los esfuerzos internos de la roca para lograr que el macizo se fracture en fragmentos, los que pasarán por los puntos de extracción de

manera discreta, como bloques, para finalmente ser recogidos por una LHD como la de la figura 2.1



Figura 2.1: Maquinaria de extracción LHD (Catálogo CAT)

A continuación, se muestra la figura 2.2, un esquema de la explotación mediante el método de Block Caving.

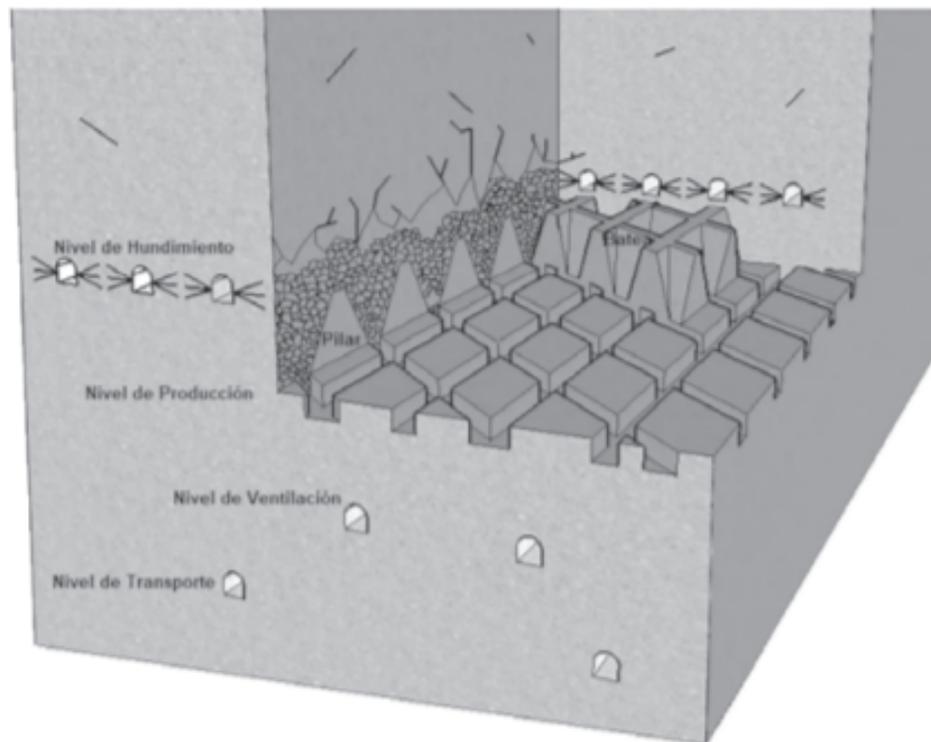


Figura 2.2: Esquema de explotación mediante Block Caving (Gómez & Labbé, 2019)

2.2. Método convencional

Se conoce como método convencional a una construcción de obra subterránea de cualquier geometría, con un proceso de construcción cíclico de excavación, transporte de marinas e instalación de elementos de soporte primario como marcos, pernos de anclaje u hormigón proyectado o in situ. Una condición importante para esta definición es que la excavación sea por perforación y tronadura o cualquier método que no implique maquinaria TBM a frente compleja. (ITA, 2009).

El método de perforación y tronadura tiene muchas ventajas, es aplicable en terrenos difíciles, en roca dura, en lugares de difícil acceso. Cuenta con una gran variedad de secciones geométricas y de distintas dimensiones, un ejemplo de sección es el arco de punto medio (ver figura 2.3), especialmente utilizada en niveles de producción minera. El área de estas secciones es sumamente variable, y puede ir desde los 5 m^2 hasta los 200 m^2 . Es versátil en ambientes hostiles para la construcción, como bajo infiltración de agua a altas presiones. (Pozo, 2021)

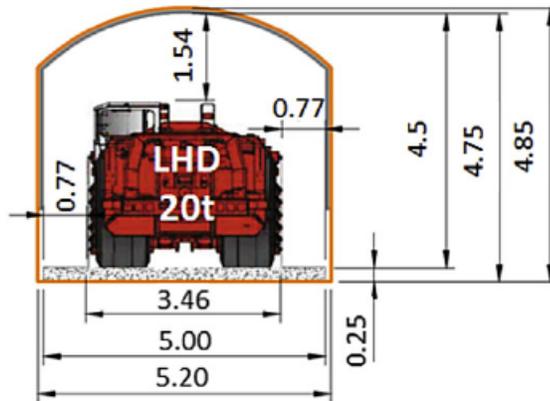


Figura 2.3: Sección típica nivel de producción (Flores y Catalán, 2018)

El objetivo como en todo proyecto es minimizar costos, y en este caso particular, en que el 70 % de los costos están asociados al tiempo, la velocidad de avance juega un papel muy importante. Los rendimientos típicos de una construcción a una frente, varían desde 1 m/día hasta 9 m/día aproximadamente, en condiciones donde el macizo rocoso tiene $GSI > 30$ (Pozo, 2021).

El GSI, o Índice de Resistencia Geológica, es un método de clasificación con una base cualitativa según evaluación visual de las propiedades de la roca intacta. Las características evaluadas son, principalmente, meteorización de las rocas, su historia geológica y condiciones de formación, estado de fracturación presente en ellas así como la disposición de las juntas o discontinuidades. A pesar de que la apreciación de las discontinuidades es cualitativa, el índice es un parámetro que va entre 1 y 100, donde a mayor puntaje, la roca está menos dañada, meteorizada o fracturada.

A continuación se presenta un gráfico con la distribución de tiempo ocupado en cada fase constructiva de un túnel de sección transversal de 72 m^2 , donde todo el ciclo tomó un total

de 11,5 horas.

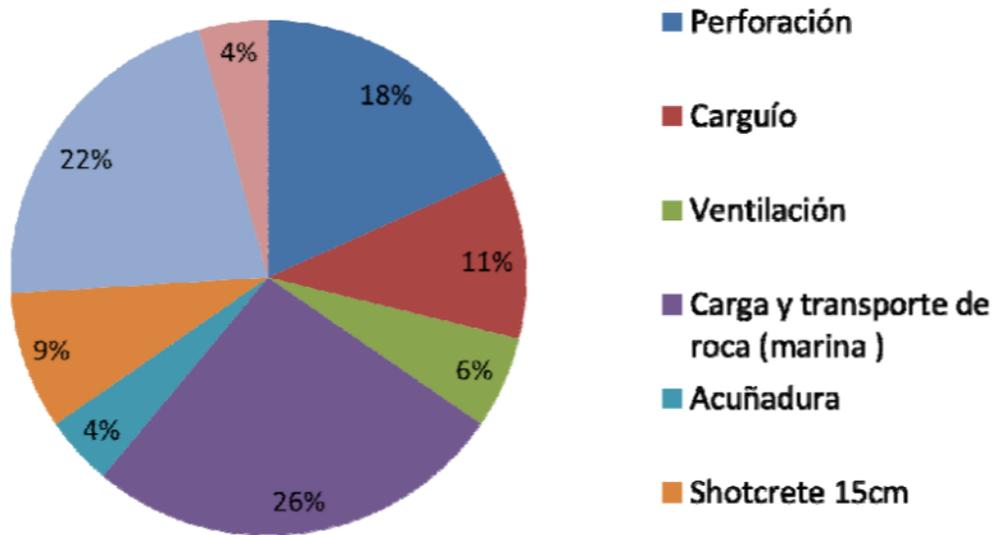


Figura 2.4: Tiempo gastado por actividad del ciclo de PyT [%] (Pozo, 2021)

Stewart et al. (2006) agrupa estas actividades en tres grupos, donde el primero consiste en perforación, carguío, tronadura y ventilación, el segundo en la carga y transporte de la marina, y el tercero el soporte primario (en este caso shotcrete). Los autores realizaron una simulación y llegaron a la conclusión de que incluso si la industria evolucionara tecnológicamente que fuesen capaces de realizarse los tres grupos de manera simultánea, la máxima expectativa de rendimiento posible sería de 19 m/día . Notar que en esta publicación se consideran tiempos de avance de entre 4 m/día hasta 9 m/día como valores típicos.

2.3. Excavación mecanizada, TBM

La excavación mecanizada es la alternativa al método convencional. Dentro de ella se enmarcan las máquinas rozadoras, las excavadoras y las tuneladoras, siendo este último el método más utilizado en roca dura. Se diferencian del resto de excavadoras mecánicas principalmente en que excavan toda la sección a la vez, no por secciones o de manera puntual como sus pares. Dentro de las tuneladoras existen varios tipos, para distintos propósitos y requerimientos del terreno.

2.3.1. Tipos de TBM

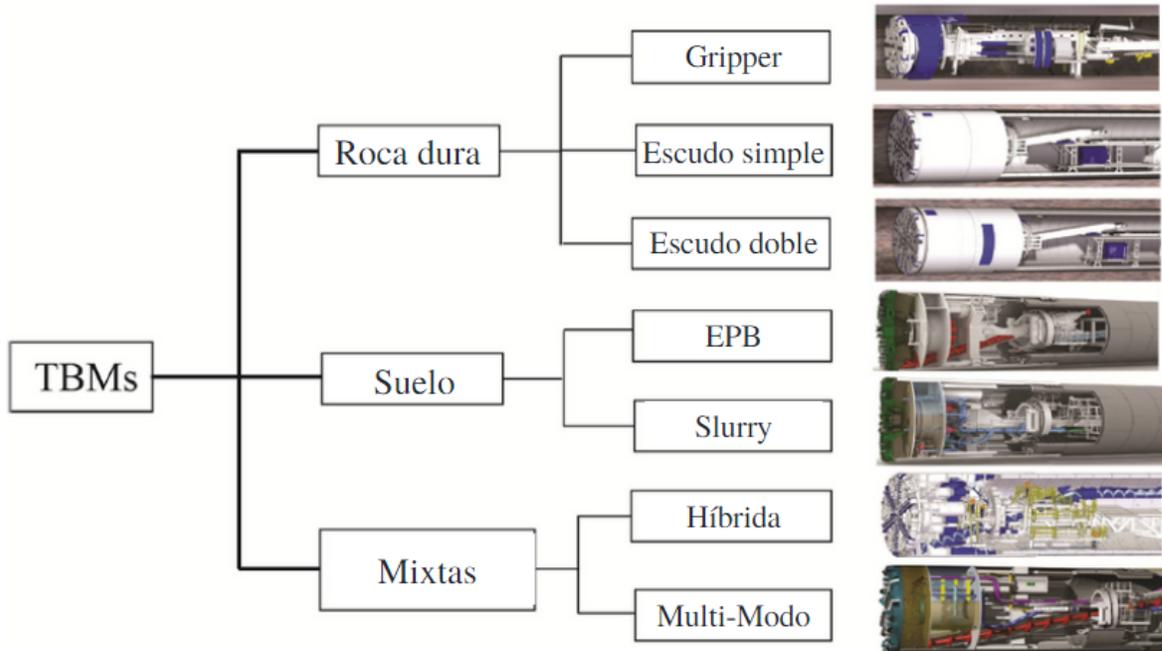


Figura 2.5: Tipos de TBM (Zheng et al, 2016)

Dadas las condiciones del problema que se va a desarrollar, no se profundiza en el diseño de las TBMs para suelo -como las EPB, diseñadas para suelos con presión de agua en la frente y las Slurry, para suelo barroso- ni las mixtas -ya sean Híbridas o Multi Modo-. Sino en las TBMs diseñadas para roca dura, Gripper, Escudo simple y Escudo doble. La primera, también conocida como TBM desnuda, diseñada para roca muy dura, fractura la roca gracias a dos fuerzas. En primer lugar, la fuerza de roce que ejercen los discos que se encuentran en al cabeza de la maquinaria sobre la frente del túnel, en segundo lugar, el empuje efectuado gracias a los "grippers", unas zapatas que se adhieren a a las paredes del túnel para que al ejercer el empuje, la tunelera se quede estática en lugar de retroceder. (Pozo, 2021).

Las tuneleras de escudo simple están diseñadas para macizos rocosos duros hasta suelo estable. No están desnudas, sino protegidas por el escudos, debido a que en estos ambientes se corre el riesgo de desprendimientos de roca. A diferencia de las gripper, las tuneleras de escudo simple colocan anillos de revestimiento prefabricados, los que una vez colocados, impiden que continúen los desprendimientos de roca.

Las tuneleras de escudo doble pueden actuar como cualquiera de las dos mencionadas anteriormente, cuando la roca es muy dura, utilizan los grippers para avanzar y van dejando los anillos de revestimiento a medida que avanzan. Cuando pasan por una zona donde la roca no es tan dura, actúa como una escudo simple. (Bilgin et al, 2013).

2.3.2. Rendimiento de TBM

Estudios recientes de Herrera (2021), resumen los datos de rendimiento de seis proyectos en los que se ha utilizado TBM en la tabla 2.1, a partir de la información recopilada de San Manuel y Stillwater por (Cigla et al, 2001), El Teniente y Los Bronces (Barioffi et al, 2011), San Gotardo (Herrenknecht, 2010) y Alto Maipo (Robbins, 2020).

Tabla 2.1: Comparación de los proyectos que han utilizado TBM en roca dura (Herrera, 2021)

Parámetro	San Manuel	Stillwater	El Teniente	Los Bronces	San Gotardo	Alto Maipo
Diámetro túnel [m]	4,6	4,6	4,6	4,5	9 9,5	4,1 4,5 6,9
Largo túnel [km]	10,5	5,6	10	8	57	40
UCS [MPa]	150-180	60-190	200	72-200	90-200	70-180
Profundidad [m]	2500	1000	1200	1000	3000	800
Tipo de TBM	Gripper	Gripper	Gripper	D. Escudo	Gripper	D/S. Escudo
Rendimiento máximo [m/día]	44,5	20	12	35	18	33
Rendimiento promedio [m/día]	22,6	13	9,5	12	10	10

De la tabla 2.1, Herrera (2021) interpreta que TBM es un buen método en condiciones desfavorables, debido a que tuvo rendimientos positivos para la industria al ser aplicado en proyectos como San Manuel y San Gotardo, cuyas condiciones incluían rocas duras y terrenos a gran profundidad, es decir, con macizos sometidos a altas presiones; siendo este último proyecto el de mayor longitud de excavación de los estudiados.

Lo anterior, sumado a datos que se resumen en la siguiente tabla indica el rendimiento de la TBM consideradas en el presente trabajo. Estos datos corresponden a juicio experto y son solo referenciales.

Tabla 2.2: Rendimiento TBM

Tipo de arco	Rendimiento [m/día]
Recta	22
Curva	12
Retroceso	50
Cruces	20

Notar que la velocidad de avance en línea recta es aproximadamente la mitad de la de retroceso, $\frac{22}{50} = 0,44 \approx 0,5$, y aproximadamente el doble que la velocidad de avance en curva, $\frac{22}{12} = 1,83 \approx 2$.

Capítulo 3

Metodología

El primer paso del trabajo de título es la revisión de los antecedentes del trabajo, descrita en el capítulo anterior, a modo de resumen, se estudian algunos valores establecidos en la literatura para el rendimiento de perforación y tronadura, tanto como de TBM, se indaga acerca del concepto de Decision Aids for Tunneling (DAT) de los trabajos de Sinfield & Einstein (1996), Min (2003), Min et al. (2003) y Harran (2018), un instrumento que entrega directrices constructivas y asiste en la toma de decisiones, basado en simulaciones y herramientas estadísticas; además de su aplicación en ejemplos concretos. Se revisa literatura sobre los métodos constructivos existentes. Finalmente, se estudia el desempeño de tuneladoras en ambientes similares a las de un nivel de producción de macroblock caving, es decir, roca dura o en bloques. (Stewart et al. 2006).

Dicho lo anterior, la metodología aplicada para el desarrollo de este trabajo se divide en cuatro partes (ver figura 3.1).

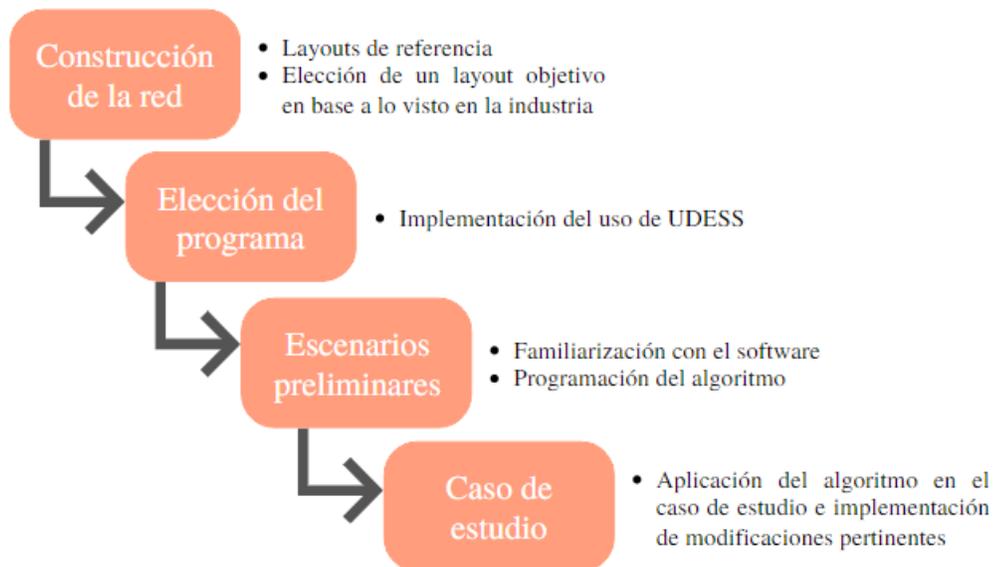


Figura 3.1: Metodología de la memoria (Elaboración propia)

Trabajo previo

Se procede a diseñar una red, un layout genérico de un nivel de producción de macro-block caving, sobre el que hacer las pruebas. Luego, comienza la indagación para encontrar una herramienta computacional sobre la cual montar el algoritmo, idealmente enfocada en minería, por lo que se realizan capacitaciones de dos softwares. El primero es Promine, una extensión de AutoCad donde se crean modelos 3D que permiten visualizar el diseño del nivel de producción de mejor manera. Durante la capacitación, tratan temas de agendamiento, mas estos están enfocados sobretodo a PyT y no convergen con los objetivos de la memoria.

Finalmente, se toma la decisión de trabajar con un software de agendamiento minero desarrollado por el Laboratorio DELPHOS, con el apoyo de ingenieros del AMTC. UDESS toma como input un archivo de actividades, uno de precedencias entre ellas, las restricciones que sea necesario agregar al problema, y encuentra una solución factible de agendamiento óptimo de estas actividades en periodos de tiempo previamente definidos. La mayor parte del estudio se basó en ensayo y error en la aplicación y adaptación de UDESS para optimizar el diseño de uso de TBM.

Trabajo de título

En una fase inicial, se realiza un problema de 3x3 calles, como el descrito en la figura 3.2, para luego pasar a uno de 4x4, como el de la figura 3.3. Una vez estuvo calibrado el modelo, se pasa al caso de estudio, una red ligeramente irregular, inspirada en un nivel de producción real, de 13 calles verticales en su punto más grande y 7 horizontales, esto se presenta en la figura 3.4. Dado que no es posible construir toda la red dada con el modelo implementado, se proponen dos opciones. La primera es un cambio del layout, y la segunda es la construcción del nivel de producción en dos fases. Para ambas alternativas, el problema a resolver se puede modelar como en la figura 3.5, donde si bien el tamaño de la red varía dependiendo de que opción se elija, el algoritmo es el mismo y las soluciones son análogas.



Figura 3.2: Caso 1. 3x3 (Elaboración propia)

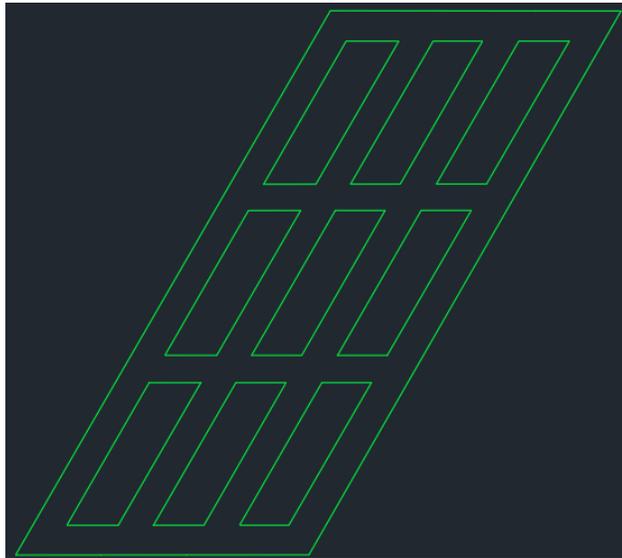


Figura 3.3: Caso 2. 4x4 (Elaboración propia)

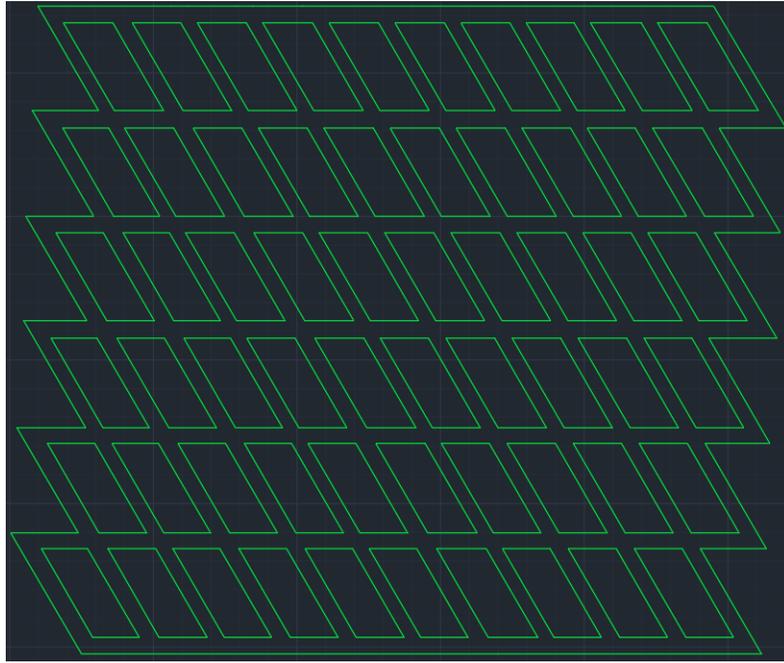


Figura 3.4: Caso de estudio (Elaboración propia)

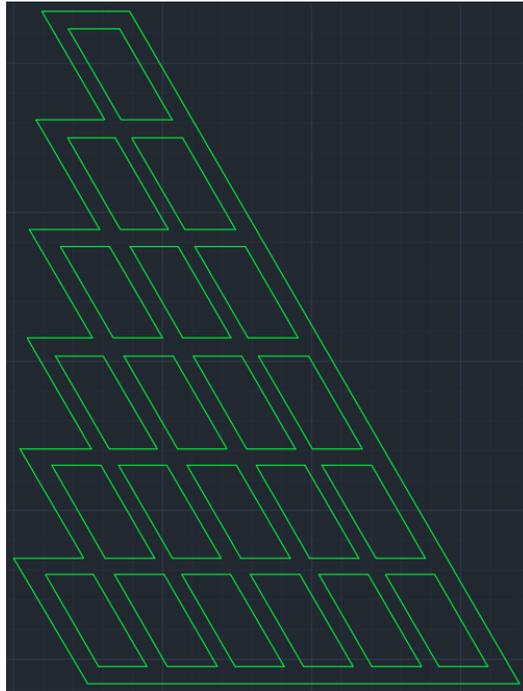


Figura 3.5: Caso de estudio reducido (Elaboración propia)

3.1. Construcción de la Red

Se busca en la literatura formas y propuestas de niveles de producción de manera que el diseño de layout que se va a utilizar para confeccionar el algoritmo sea lo más cercano posible a la realidad. La geometría de cada nivel de producción cambia con el proyecto, la geología y la distribución del mineral, pero en prácticamente todos los encontrados, el patrón que se sigue es similar. A continuación se presentan algunos de ellos (ver figuras 3.6 a 3.9).

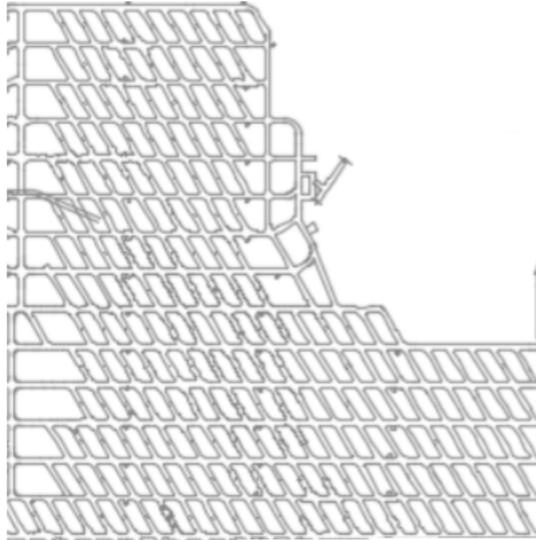


Figura 3.6: Fragmento Nivel de Producción (Valenzuela, 2017)

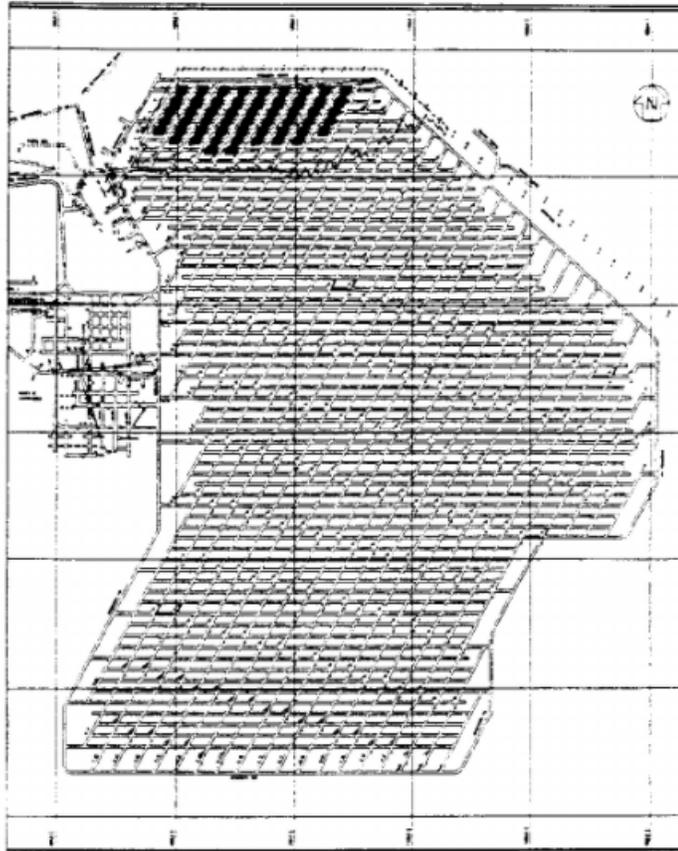


Figura 3.7: Nivel de Producción Típico (Rojas et al, 2003)

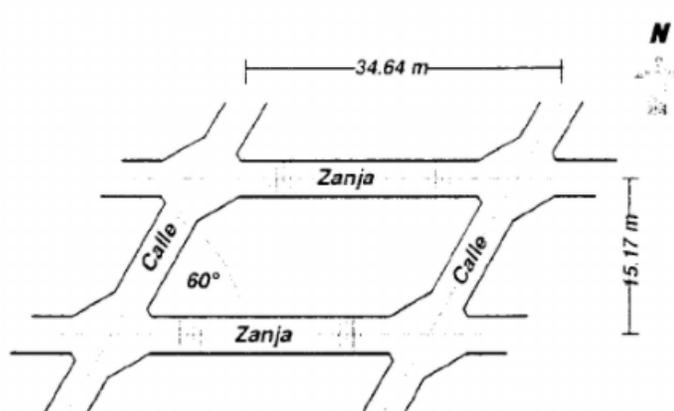


Figura 3.8: Detalle Nivel de Producción Típico (Rojas et al, 2003)

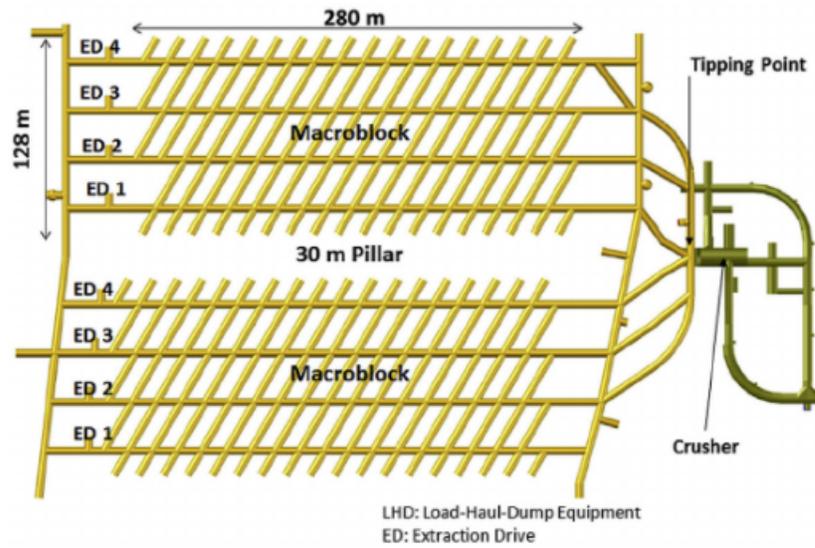


Figura 3.9: Macroblock Chuquicamata (Flores y Catalán, 2018)

Si bien las dimensiones son meramente referenciales, todas coinciden en orden de magnitud, dejando ángulos de aproximadamente 60° y 120° entre las diagonales y las horizontales, las que tienen una longitud de entre 15 y 40 metros. Dado esto, se propone un layout de referencia con ángulos de 60° y 120° , como el de la figura 3.10.

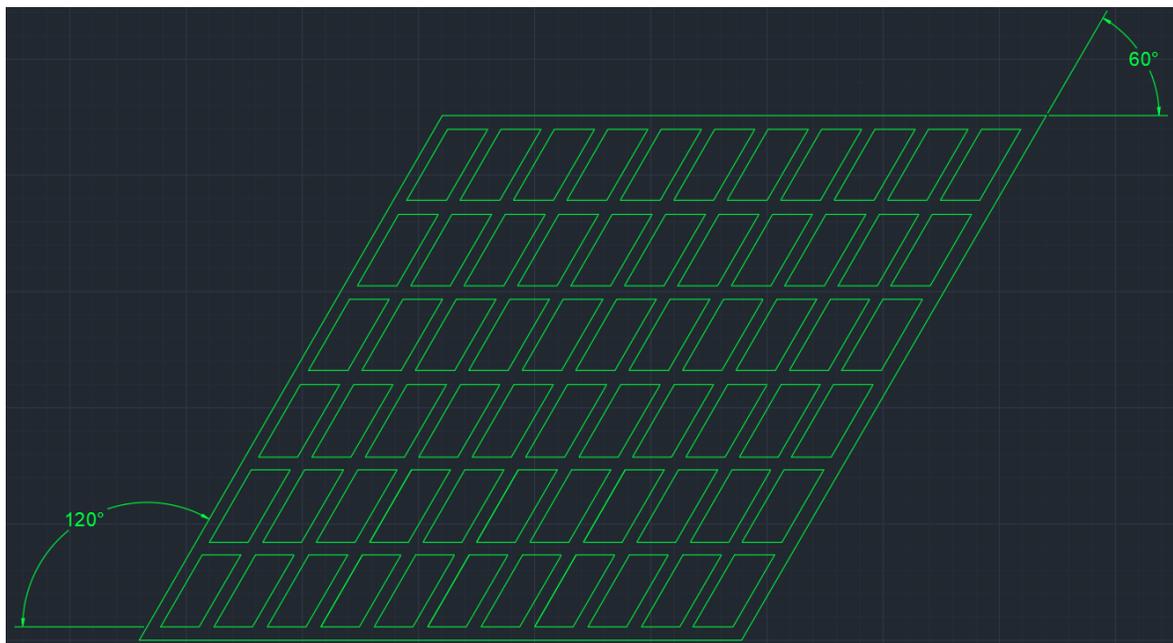


Figura 3.10: Nivel de producción de referencia (Elaboración propia)

3.2. Descripción y cambios del software UDESS

El software UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler) es un programa de planificación y agendamiento que tiene como objetivo, a partir de actividades, precedencias y restricciones, entregar un archivo tipo carta Gantt con el orden y porcentaje de avance de cada actividad en cada periodo del horizonte. Está diseñado con programación matemática, lo que abre un abanico de posibilidades para resolver problemas de construcción y producción para métodos Block/Panel Caving en minería subterránea selectiva. El método usado por UDESS para resolver este modelo matemático es uno de Branch and Cut implementado en la librería del software comercial GUROBI, el cual está descrito en el artículo de Nancel-Penard et al. (2020).

UDESS funciona con varios inputs. El primero es un archivo de actividades que debe tener como mínimo una columna con el nombre de las actividades (ID), otra con el costo, o ingreso, que trae cada una de ellas (ING) y otra columna con la tasa máxima realizable por mes de cada actividad (MAX RATE). En caso de este proyecto, se agregó otra variable a este archivo, el largo en metros construidos con cada actividad (LARGO). Un ejemplo de lo anterior, una vez incluido en la interfaz del software es el de la figura 3.11.

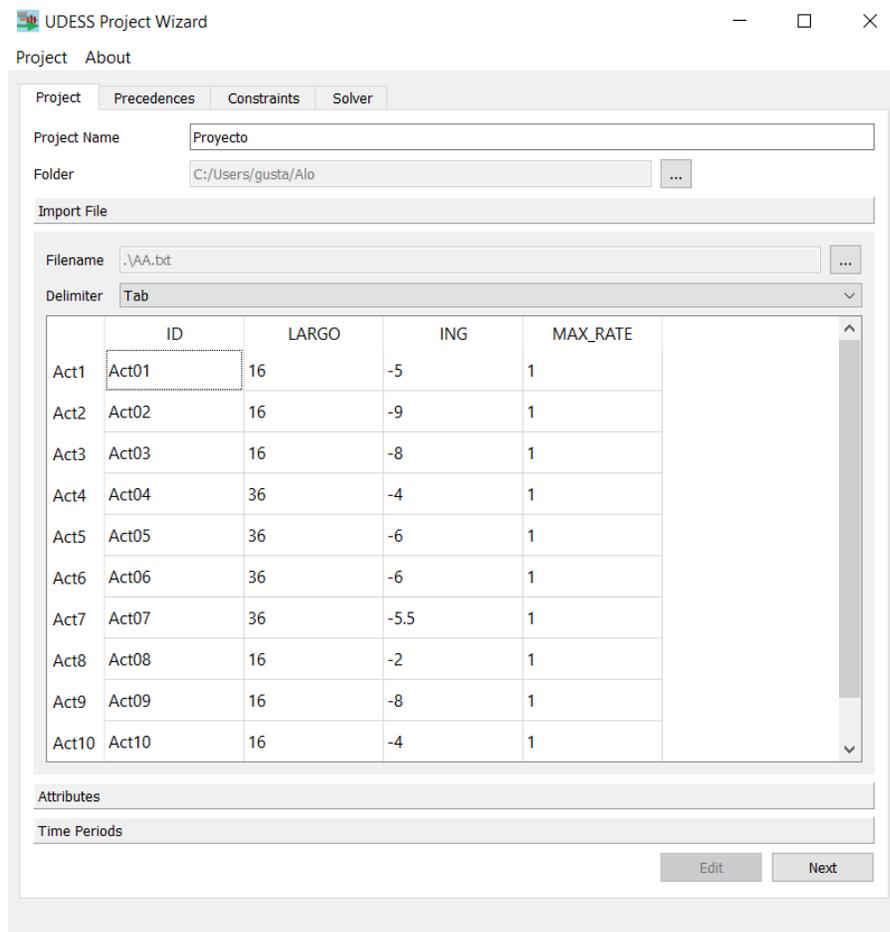


Figura 3.11: Ejemplo de archivo de actividades en UDESS (Elaboración propia)

Lo siguiente es definir el horizonte de tiempo que se va a considerar en el proyecto (ver figura 3.12). Esto toma importancia cuando se asignan algunas restricciones, como una que limita el avance de las actividades por periodo, por lo que es imprescindible tomar una cantidad de periodos que asegure, por lo menos, que se pueda terminar el proyecto en el horizonte dado. Cada periodo representa por defecto un mes, por eso en la columna "Months" hay un "1", pero esto se puede cambiar a, por ejemplo, semanas, si en dicha columna se elige "0.25", ya que cada periodo constaría de un cuarto de mes, es decir, una semana. En la columna de la derecha, se selecciona la tasa de descuento para cada periodo.

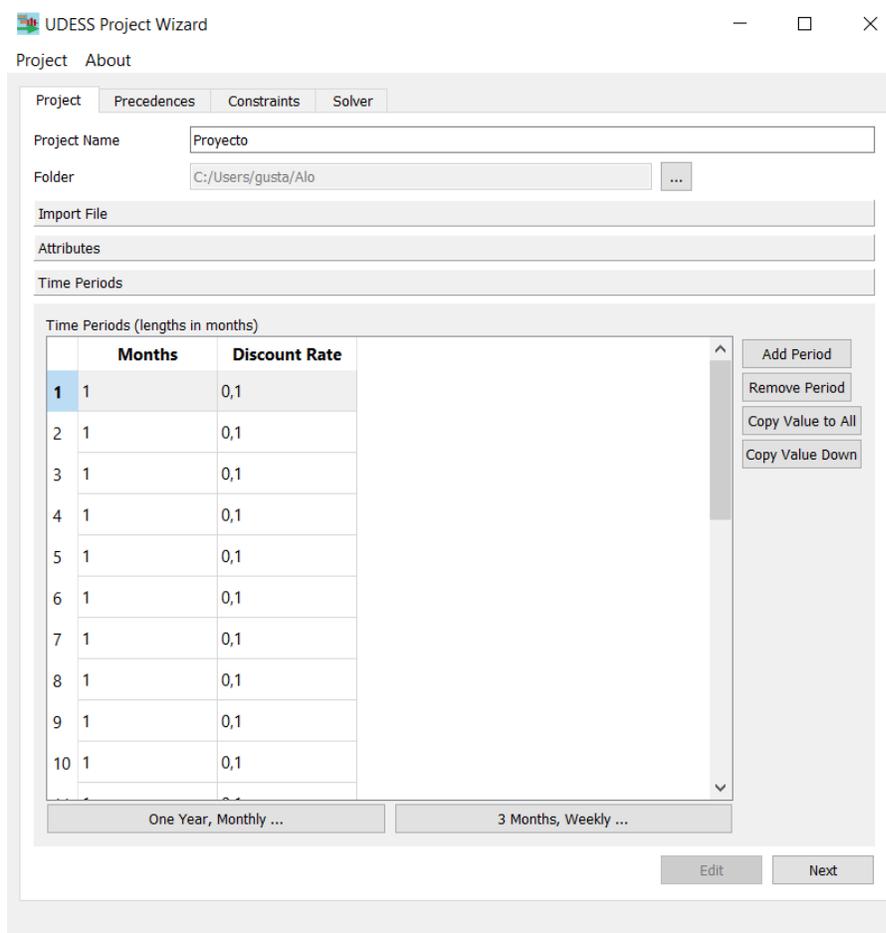


Figura 3.12: Ejemplo de horizonte de periodos en UDESS (Elaboración propia)

El siguiente input es un archivo de precedencias, en este se indica cuáles son las actividades mínimas necesarias, para que la siguiente acción sea realizada. Las precedencias pueden ser del tipo "o", donde al menos una de las predecesoras se debe completar para que la sucesora comience; o del tipo "y", donde todas las predecesoras son necesarias para iniciar la sucesora. El software (ver figura 3.13) requiere que en este archivo, además de las actividades predecesoras (predecessor) y sucesoras (successor), se incluya una columna "group", la cual incluye un número natural distinto para cada precedencia del tipo "o", y un "0" para cada una del tipo "y".

En la figura 3.13, se muestran precedencias de ambos tipos, por ejemplo "Act05" tiene

un solo predecesor, "Act03". "Act09" tiene tres predecesores, "Act11", "Act12" y "Act08". Estos son del tipo "o", a diferencia de "Act15", quien tiene a todas las actividades desde "Act01" hasta "Act14" como precedencias del tipo "y", lo que significa que es la última de todas las acciones a realizar, ya que se deben completar todas las actividades citadas antes de que se pueda construir "Act15".

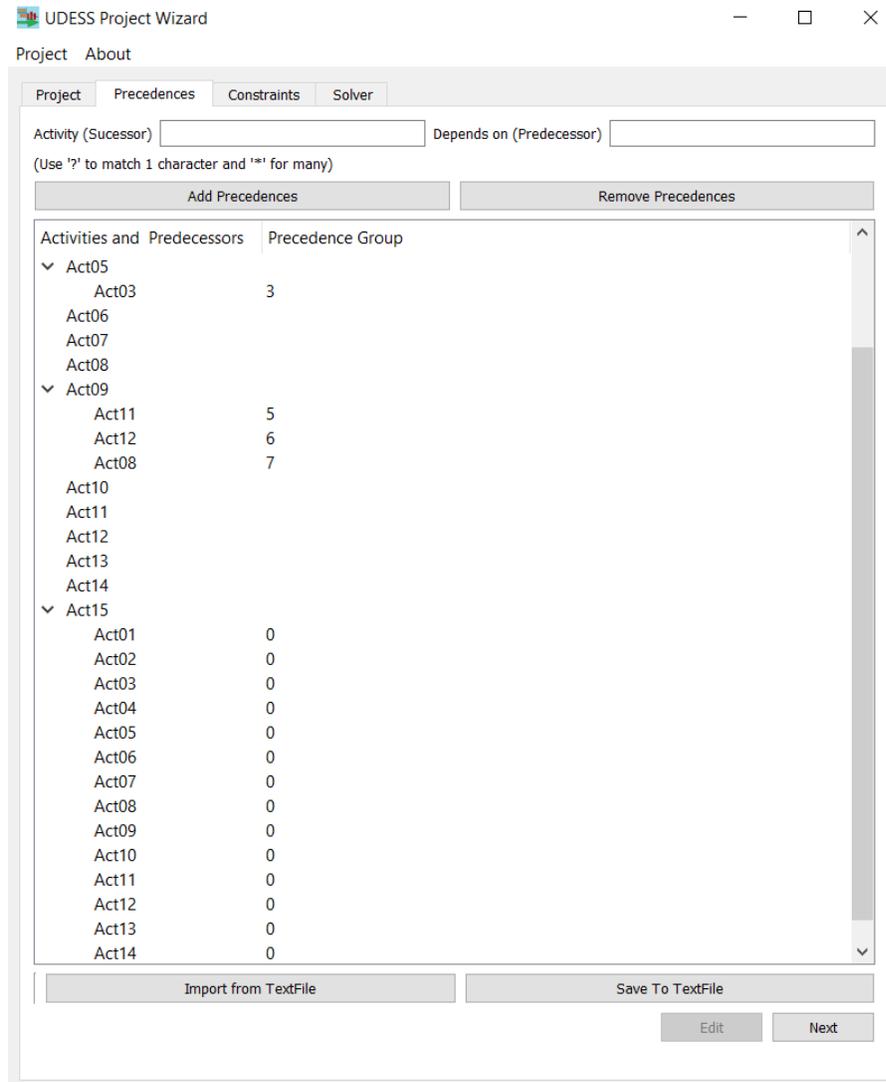


Figura 3.13: Ejemplo de precedencias en UDESS (Elaboración propia)

Finalmente, el último input son las restricciones (Constraints) que tendrá el problema de optimización. Actualmente, el programa cuenta con nueve restricciones (ORC, SCC, MPC, RRC, AIC, SPC, DPC, FAC y LFAC), pero las utilizadas para efectos de esta memoria, y por lo tanto, las necesarias para generar el modelo, son cuatro.

- **Restricción de uso de recursos (ORC):** Limita el uso de un determinado recurso, en este caso el largo, por periodo para todas las actividades. Si se quisiera evaluar el costo real del proyecto, esta restricción debería ser la distancia máxima que es capaz de construir la tunelera de manera mensual, para las condiciones del problema.

Como el objetivo de la memoria no es encontrar el costo real, sino una estrategia de agendamiento, la ORC corresponde al largo de la actividad, de modo que se agende solo una por periodo y así, obtener el orden en el que se deben construir los tramos. Esta restricción impide que el software realice, por ejemplo, todas las actividades en el primer periodo.

- **Restricción de incompatibilidad (AIC):** Limita la capacidad de realizar dos o más actividades de manera simultánea en una ventana de tiempo dada. Se seleccionan las actividades en cuestión, se elige entre qué periodos va a estar activa la restricción y cuántas (Amount) de esas actividades se podrán realizar durante ese tiempo. Por ejemplo, si se eligen las actividades "Act01", "Act06" y "Act07" entre los periodos 3 y 8, y se escoge un "Amonut" de 1, sólo se podrá realizar una de esas tres actividades. Si por otro lado, se escoge un "Amount" de 0, ninguna de esas actividades se podrá hacer en esa ventana de tiempo.
- **Restricción de retraso (DPC):** Se escoge el tiempo máximo en que se puede finalizar una actividad luego de haberse comenzado. Si el delay es 0, quiere decir que si una actividad comenzó en un periodo, debe terminar en el mismo. Por otro lado, si el delay es 1, puede terminar, como máximo, en el periodo siguiente. Esta restricción impide que las actividades se corten, es decir que comiencen en un periodo, luego tengan avance nulo y finalicen varios periodos más adelante. Sumado a la ORC, obliga a que la TBM esté enfocada en su 100 % en una sola actividad, durante la duración de un periodo.
- **Restricción de forzado (FAC):** Fuerza que al finalizar una actividad, se deba construir una, de entre un conjunto de actividades. Si se estipula que, por ejemplo, "Act03" fuerza "Act04", "Act05" o "Act06", tras terminar "Act03", la siguiente acción en realizarse es necesariamente alguna de las tres citadas; siempre y cuando esto vaya en concordancia con las precedencias. Esto impide que la maquinaria deje caminos a medias, donde después no pueda retornar, debido a que no puede volver a pasar por un tramo ya construido.

UDESS tiene dos formas de emplearse. La primera es por la interfaz (GUI) mostrada en las capturas de pantalla adjuntadas previamente (figuras 3.11 a 3.13), como toda interfaz funciona con casillas en las que el usuario ingresa la información requerida por la GUI. Su principal ventaja es que es más intuitiva y visual de usar, mas tiene algunas limitaciones, como por ejemplo, lo engorroso que puede ser incorporar los datos de algunas restricciones. La segunda alternativa es trabajar mediante un código en Python, el cual llama un archivo .uds (el que arroja la interfaz) y donde se pueden introducir manualmente todas las características del problema que son más difíciles de ingresar a la GUI. Para el uso de los scripts, el trabajo fue guiado y asistido por los ingenieros del AMTC, Pierre Nancel-Penard y Diego Mancilla, quienes además agregaron dos restricciones a UDESS, según fue requerido a lo largo del trabajo de investigación. Estas fueron DPC y FAC, las cuales como se verá en el informe, fueron vitales para el correcto funcionamiento del programa.

Una vez presentados los archivos y datos de entrada, la metodología empleada fue la siguiente.

3.3. Escenarios preliminares

Al ser un software desconocido al comienzo del trabajo, la familiarización con este fue lo principal en la fase inicial, por lo que se eligió una red lo más pequeña posible. Dado que el problema de 2x2 era trivial, se inició por el de 3x3 de la figura 3.2. Se comenzó a trabajar con UDESS, considerando que habían 12 actividades que correspondían a los 12 tramos, como se muestra en la figura 3.14.

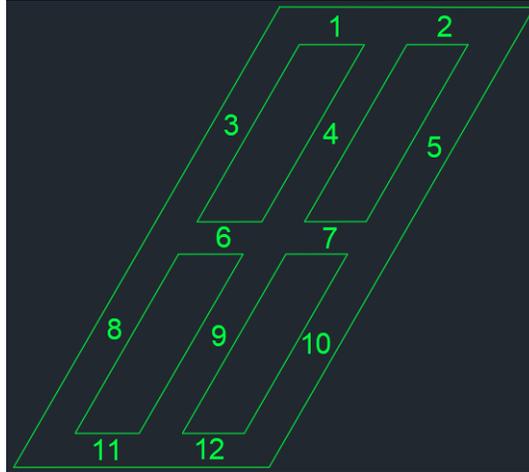


Figura 3.14: Escenario preliminar 1 (Elaboración propia)

Posteriormente, se pasó al siguiente layout de prueba, con misma geometría, pero esta vez con una fila y una columna más, de forma que quede un romboide de 4x4. Eso alargó la lista de actividades (tramos) a 24, lo que queda representado en la figura 3.15.

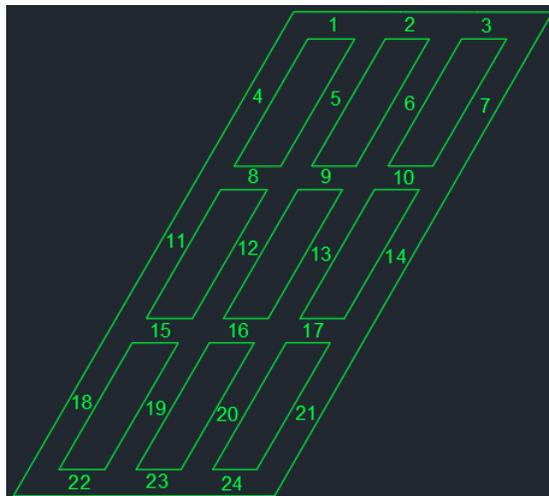


Figura 3.15: Escenario preliminar 2 (Elaboración propia)

De esta forma, se completa el modelo para romboides, esto es replicable para romboides más grandes, tanto en filas como columnas.

Para imágenes de los archivos de actividades, precedencias y restricciones aplicados en cada escenario, ir al Anexo B.

3.4. Caso de estudio

El caso de estudio es más complejo que los escenarios preliminares, no solo en cuanto al tamaño, sino en cuanto a la forma. El caso de estudio de la figura 3.4 tiene la particularidad de que no es un romboide, es decir, los extremos no terminan en una sola diagonal, sino de forma escalonada, lo que se asemeja más a los niveles de producción reales, como los de las figuras 3.7, 3.8 y 3.9.

Este layout no se puede resolver, tal como está planteado, por las razones que son mencionadas en el capítulo de Resultados. Para acercarse a la solución, es necesario desarrollar un "caso de estudio reducido", el cual permitirá que el original se pueda realizar. El caso de estudio reducido es el de la figura 3.5, y se presenta como sigue, con 54 tramos.

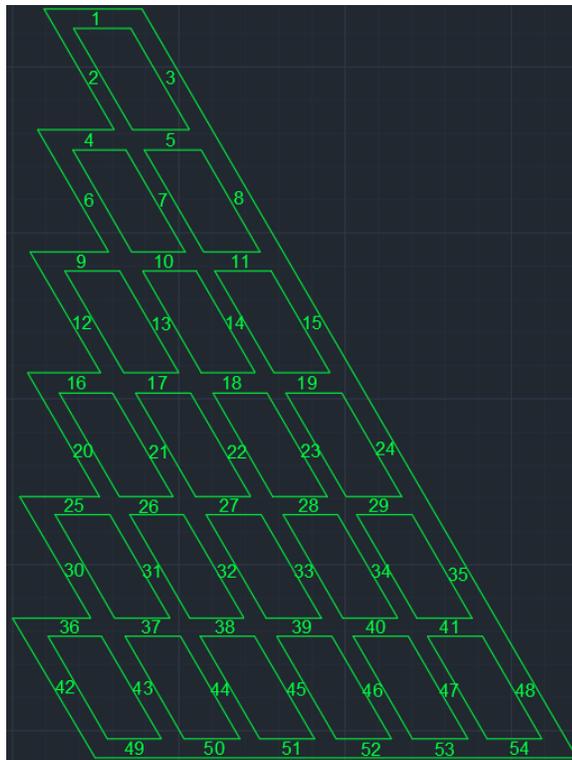


Figura 3.16: Caso de estudio reducido con tramos (Elaboración propia)

Capítulo 4

Resultados

Tal como se dijo anteriormente, los resultados de este trabajo son principalmente la Carta Gantt que arroja UDESS para cada uno de los escenarios. La Carta Gantt describe la estrategia constructiva que se debe seguir, actividad a actividad, para completar el nivel de producción de manera óptima, o en su defecto, de la mejor manera, entre una cantidad de caminos posibles.

4.1. Caso 1

Cada actividad es un tramo, los tramos horizontales tienen una longitud de 16 metros y los diagonales de 36 metros. La columna ING tiene el costo de cada tramo, el cual va de 0 a 10, negativo, ya que es un costo. La columna MAX RATE contiene solo valores unitarios, ya que la cantidad máxima de veces que se puede realizar cada tramo es uno.

Tabla 4.1: Actividades Caso 1 (Elaboración propia)

ID	LARGO [m]	ING [\$]	MAX RATE
Tramo01	16	-5	1
Tramo02	16	-9	1
Tramo03	36	-8	1
Tramo04	36	-4	1
Tramo05	36	-6	1
Tramo06	16	-6	1
Tramo07	16	-5,5	1
Tramo08	36	-2	1
Tramo09	36	-8	1
Tramo10	36	-4	1
Tramo11	16	-5	1
Tramo12	16	-3,5	1
Fin	0	1000000	1

Dado que el criterio de UDESS es agendar primero las actividades que dan mayor beneficio, e intentar dejar las más costosas para el final, siempre que las restricciones lo permitan. Como se están considerando solo costos (la columna ING es negativa), el software no haría nada, ya que ninguna actividad le genera un ingreso económico al proyecto, lo "matemáticamente óptimo" sería no construir ningún tramo. Es por esto que se añade una actividad ficticia "Fin", la que da un beneficio de \$1.000.000 y tiene como restricción que es la última actividad en ser realizada, por lo que sirve de incentivo para que el programa haga las actividades anteriores, con el objetivo de poder completar "Fin" y recibir su ingreso.

El primer resultado es que el punto de partida es crucial para la solución, de hecho, solo hay dos puntos por los que puede entrar la tunelera, las esquinas de romboide con ángulo de 60° y solo se puede mover en dos direcciones. Si se elige un punto de partida distinto a estos, por ejemplo otro vértice del romboide, como el de la figura 4.1, no es posible completar la red.

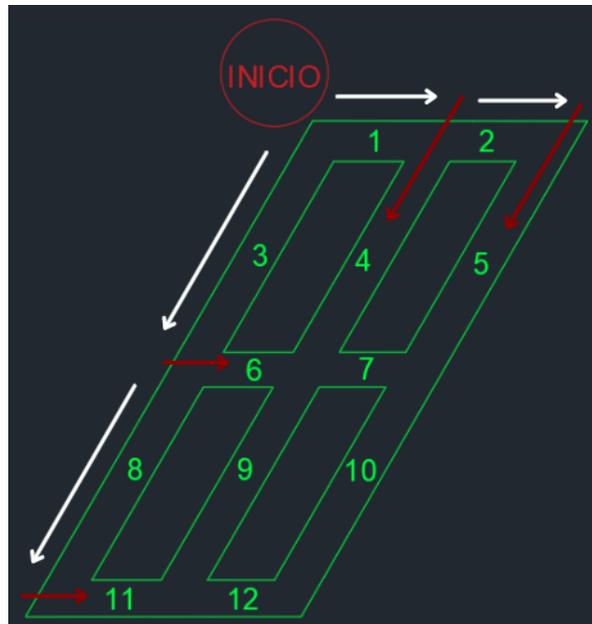


Figura 4.1: Punto de inicio no factible (Elaboración propia)

Las flechas blancas representan hacia donde se podría mover la TBM, comenzando por el punto de inicio, y las rojas, los caminos que no podría tomar debido a la restricción de que no puede hacer ángulos de 60° . Dado lo anterior, si el punto de inicio es el indicado en la figura 4.1, solo sería posible construir los tramos "Tramo01", "Tramo02", "Tramo03" y "Tramo08".

Esto lleva a la conclusión de que solo se puede comenzar a construir la red desde alguno de los puntos "Inicio 1" e "Inicio 2", y en la dirección que se indica en la figura 4.2.

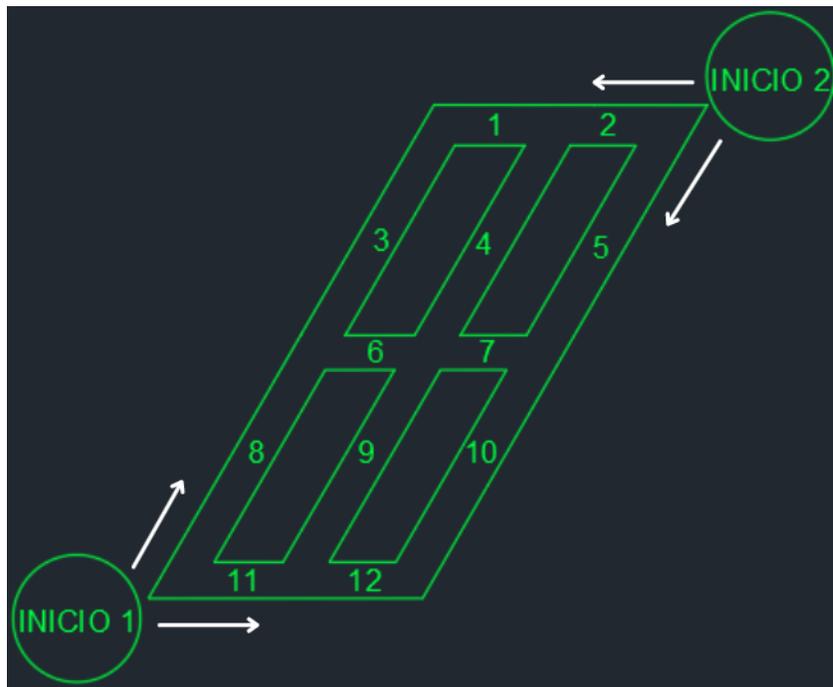


Figura 4.2: Puntos de inicio factibles (Elaboración propia)

Gracias a esta configuración, se pueden completar todos los tramos, ya que a cada vértice que se llega, permite al menos una salida, sea un ángulo de 120° o de 0° . Esto se demuestra gráficamente en la figura 4.3. Si por ejemplo tomara la decisión de comenzar por el punto "Inicio 1". Es importante recalcar que la TBM tiene la posibilidad de retroceder, por lo que se puede llegar a un punto sin salida (por ejemplo el vértice que une "Tramo02" con "Tramo05") y devolverse para continuar por otro camino.

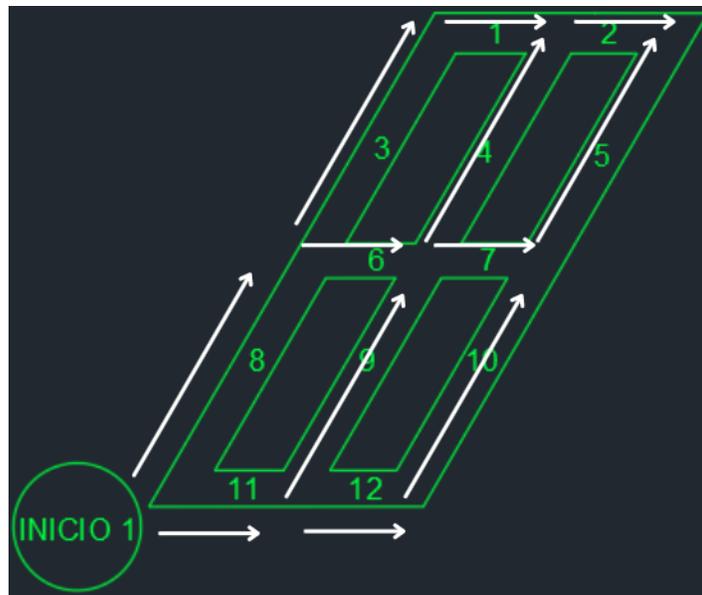


Figura 4.3: Demostración de factibilidad el punto "Inicio 1" (Elaboración propia)

Queda claro, en la figura 4.3 que si se comienza desde "Inicio 1", solo se puede ir hacia arriba y hacia la derecha, porque en cualquier vértice que se quiera ir hacia la izquierda o hacia abajo, el ángulo será de 60° y por lo tanto, no se puede completar esa curva. De aquí es trivial que es imposible comenzar a construir desde el centro de la red hacia afuera, ya que siempre será necesario ir hacia la izquierda o hacia abajo en algún momento, si se desea completar todos los tramos. Además, constructivamente no sería posible comenzar desde algún punto que no sea el perímetro del romboide.

Al ser un caso muy reducido, el archivo de precedencias es breve también, se presenta en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Precedencias Caso 1 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
Tramo01	Fin	-1
Tramo02	Fin	-1
Tramo03	Fin	-1
Tramo04	Fin	-1
Tramo05	Fin	-1
Tramo06	Fin	-1
Tramo07	Fin	-1
Tramo08	Fin	-1
Tramo09	Fin	-1
Tramo10	Fin	-1
Tramo11	Fin	-1
Tramo12	Fin	-1
Tramo11	Tramo12	1
Tramo12	Tramo10	2
Tramo10	Tramo05	3
Tramo11	Tramo09	4
Tramo09	Tramo07	5
Tramo07	Tramo05	6
Tramo09	Tramo04	7
Tramo04	Tramo02	8
Tramo08	Tramo03	9
Tramo03	Tramo01	10
Tramo01	Tramo02	11
Tramo08	Tramo06	12
Tramo06	Tramo07	13
Tramo06	Tramo04	14

Las primeras doce filas indican que la actividad "Fin" requiere que se hagan todos los tramos antes de poder ejecutarse. Las catorce últimas, representan la relación predecesor - sucesor(es) de cada actividad.

La única restricción que se aplica a este nivel es una ORC de 36 metros, de manera que se pueda hacer máximo una diagonal en un periodo, o dos horizontales.

Así, el resultado de la Carta Gantt, donde sale un "1" cuando una actividad es realizada en un periodo y "0" cuando no lo es, es el de la tabla 4.3. Se destacan con amarillo los "1" para que sean fácilmente identificables y con verde la última actividad, la que indica que todos los tramos fueron construidos.

Tabla 4.3: Carta Gantt Caso 1 (Elaboración propia)

Activity	t 1	t 2	t 3	t 4	t 5	t 6	t 7	t 8	t 9	t 10	t 11	t 12
Fin	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Tramo01	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Tramo02	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Tramo03	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Tramo04	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tramo05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Tramo06	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tramo07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Tramo08	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tramo09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Tramo10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Tramo11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Tramo12	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

El resultado de la tabla 4.3 corresponde a la secuencia, de la figura 4.4. Donde las flechas representan los tramos que se van construyendo, y los tickets, los que se han construido previamente en otras imágenes de la secuencia.

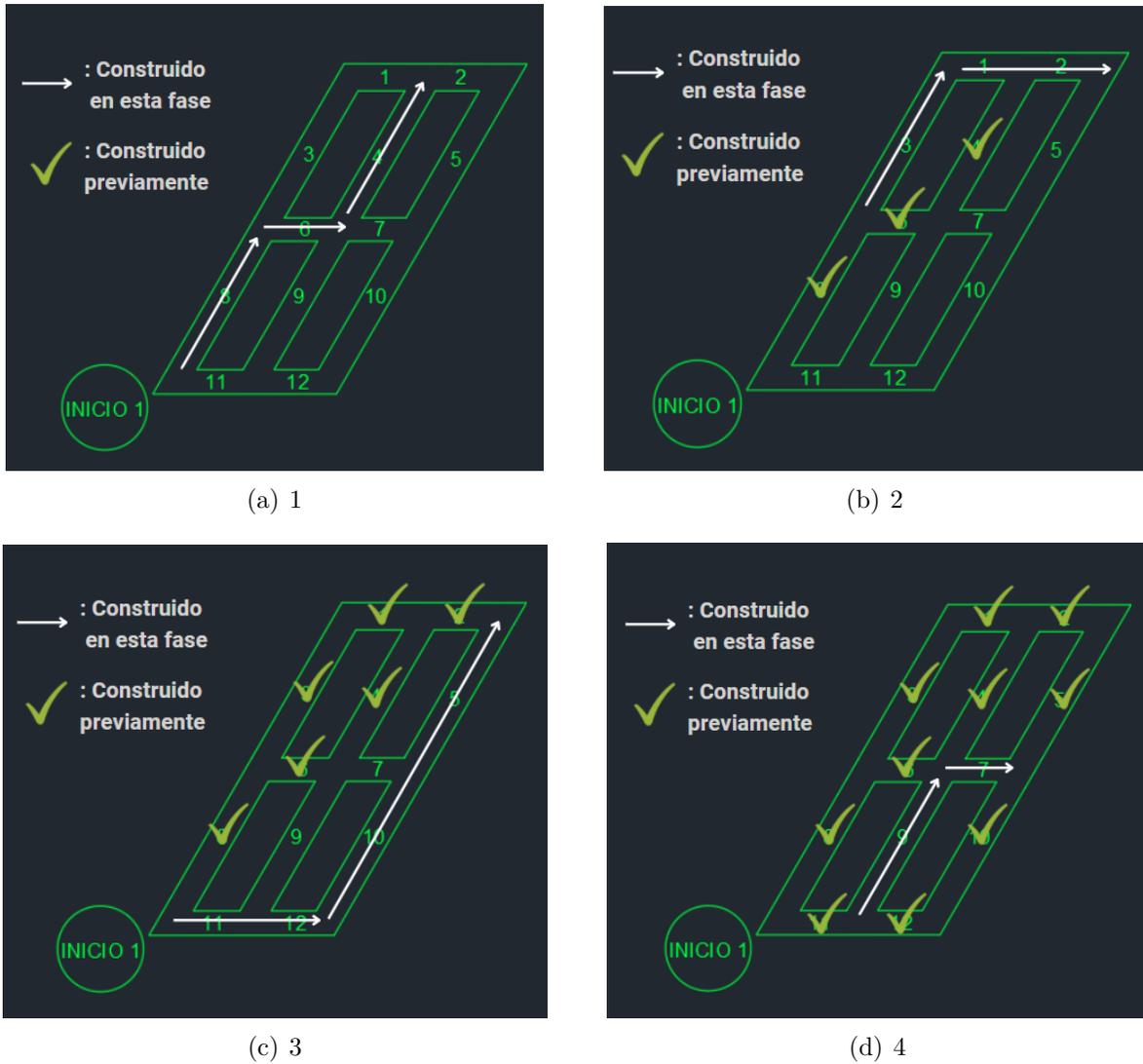


Figura 4.4: Secuencia constructiva Caso 1 (Elaboración propia)

4.2. Caso 2

Si bien se obtiene una respuesta para el Caso 1, este es demasiado acotado, no se alcanza a desarrollar por completo el algoritmo. De hecho, al aplicarlo al Caso 2, se dan inconsistencias, por lo que hay que hacerle algunos cambios estructurales al modelo. El principal es cambiar la concepción de las actividades, dejando estas de ser tramos y comenzando a ser arcos entre dos tramos. Esto permite diferenciar los arcos rectos de los que impliquen un giro de 120° (curvos), que es a fin de cuentas, uno de los elementos más importantes en el rendimiento de las tuneleras. Con el sistema de tramos, no es posible castigar con un mayor costo un arco de curva, por lo que no hay una tendencia marcada a minimizar las curvas y por lo tanto, priorizar los arcos rectos.

La nomenclatura, entonces, se compone de una primera R o C, dependiendo de si es recta o curva, seguida de cuatro números, donde los dos primeros son el número del primer tramo, y el tercero y cuarto, el número del segundo tramo. A excepción de los arcos que comienzan el punto de inicio, los que se denotan con una I y luego el tramo que le sigue. Algunos ejemplos en la tabla 4.4, apoyados por la figura 4.5.

Tabla 4.4: Nomenclatura actividades (Elaboración propia)

	Recta (R) o Curva (C)	Primer tramo	Segundo tramo	v2 (si aplica)	Resultado
Ejemplo 1	C	17	14		C1714
Ejemplo 2	R	11	04	v2	R1104v2
Ejemplo 3		I	22		I22

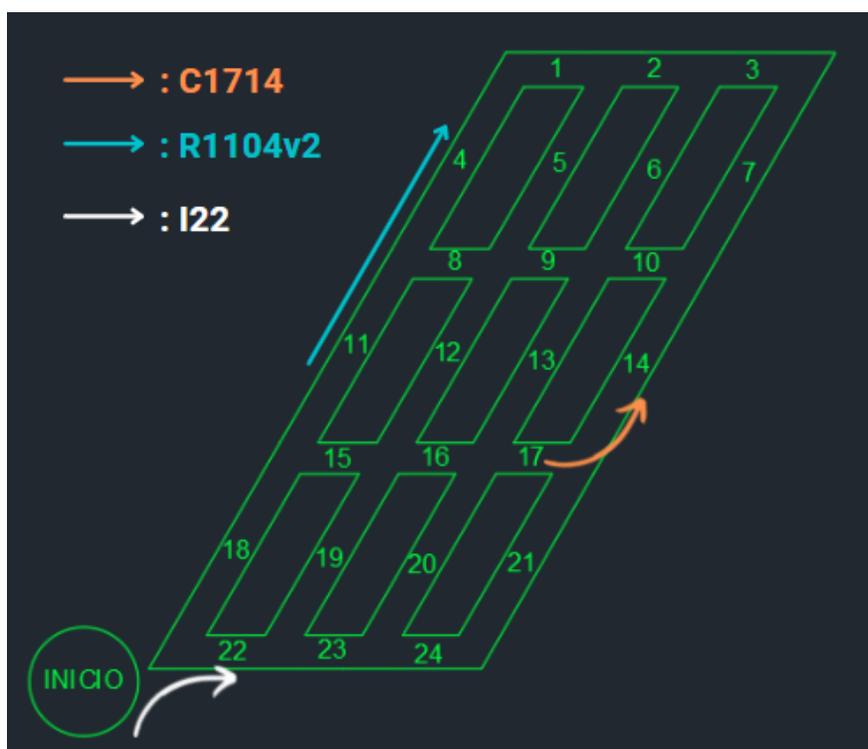


Figura 4.5: Imagen nomenclatura actividades (Elaboración propia)

Además, el hecho de aumentar el tamaño del layout, genera que el retroceso se vuelva evidentemente importante, ya que desde prácticamente cualquier punto es posible devolverse uno, dos, tres arcos, o los que sean necesarios para continuar con la construcción donde UDESS considere que es la mejor opción. A mayor tamaño, más soluciones posibles y es más probable que haya inconsistencias si no se hace meticulosamente.

Implementar un sistema de actividades de retroceso es una posibilidad, pero se opta por un archivo de actividades con una "versión 2" de cada arco. Notar que cuando se construye un tramo, hay máximo dos caminos que se pueden elegir para seguir avanzando: continuar recto, o virar. Si se decide un camino, después se puede retroceder hasta el mismo punto y construir el otro camino, o bien decidir no hacer el segundo y seguir retrocediendo, esto lo

decide UDESS. Las actividades que se realicen después de un retroceso, es decir, los "segundos caminos", toman el nombre de versión 2 (de nomenclatura v2, como se ve en la tabla 4.4). De esta forma, cada actividad tiene su estado por defecto y su "versión 2". Ver figura 4.6.

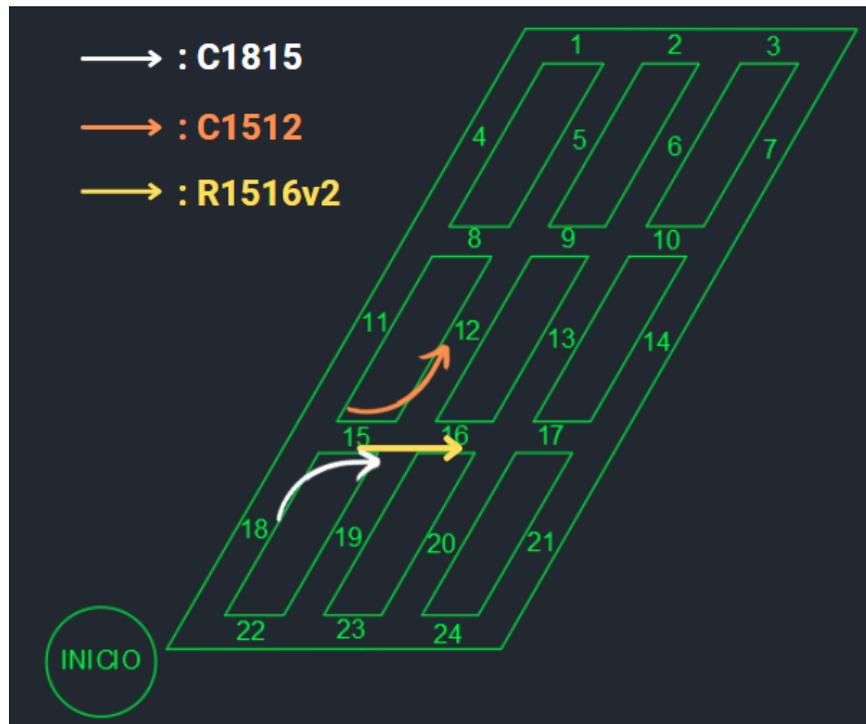


Figura 4.6: Ejemplo actividades versión 2 (Elaboración propia)

Tomando como ejemplo la figura 4.6, se construye C1815, luego hay dos opciones, C1512 o R1516. Si se elige C1512, luego cuando haya un retroceso hasta el mismo punto, no se va a realizar la actividad R1516, sino R1516v2, ya que este arco se hizo en segunda instancia. Del mismo modo, si en primera instancia se hubiera realizado R1516, cuando se vaya a construir el tramo 12, se hará mediante la actividad C1512v2.

Notar que no es necesario que se hagan todas las actividades. Por ejemplo, tomando como referencia la figura 4.7, luego de hacer R1516, podría nunca realizarse C1512v2, sino devolverse directamente hasta R1811v2 (v2 debido a que es un arco que no se construyó en primera instancia, ya que se optó por hacer C1815 primero). Es decir, UDESS tiene toda la libertad de hacer el camino que considere óptimo.

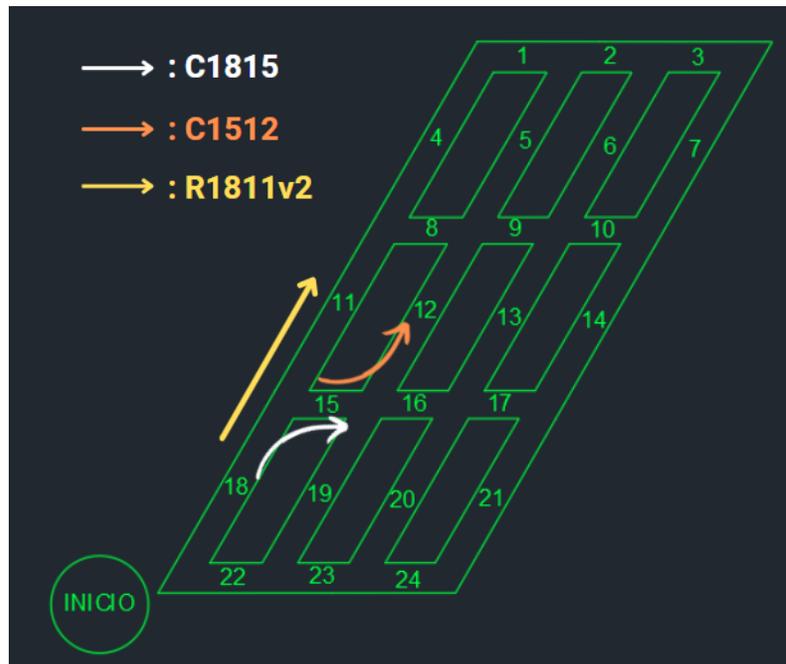


Figura 4.7: Ejemplo 2 actividades versión 2 (Elaboración propia)

Además, nótese que no se puede realizar una actividad y su v2, ya que significaría construir dos veces un mismo tramo. Por último, es importante que no todas las actividades tienen versión 2, solo aquellas que es posible construir en segunda instancia. Por ejemplo R2114 no tiene versión 2, ya que no existe la posibilidad de hacer la curva C21XX primero (ese arco no lleva a ningún tramo que se deba construir), para luego volver a hacer R2114v2. Es por esto que la actividad R2114v2 no existe, solo R2114. Ver figura 4.8.

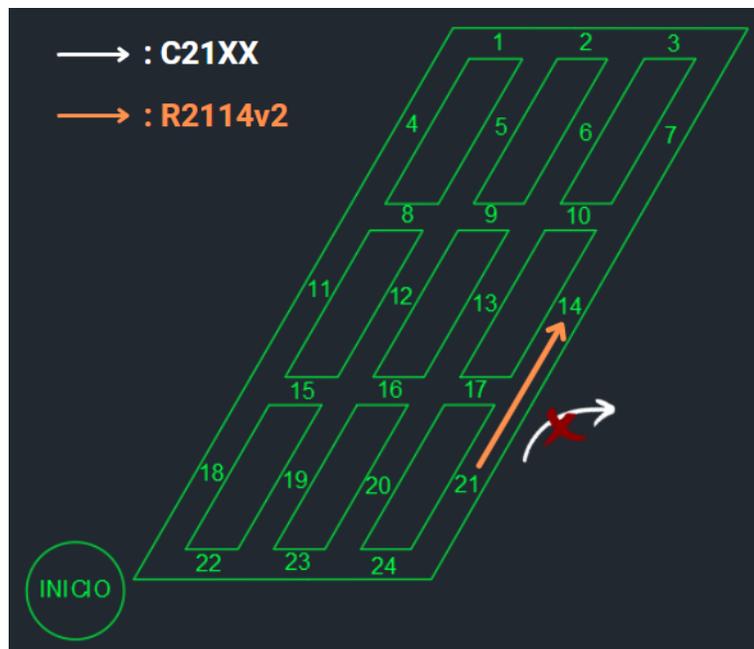


Figura 4.8: Ejemplo 3 actividades versión 2 (Elaboración propia)

Otro cambio con respecto al Caso 1 es que en la columna ING, se cambiaron los costos, negativos, por ingresos, positivos, donde una actividad más cara de construir no tendrá un costo mayor, sino un ingreso menor. Esto permite eliminar la actividad ficticia "Fin". Recordar que su única función era dar un incentivo al programa para finalizar con las actividades, ya que de haber solamente costos, UDESS no construiría nada. En este nivel se consideran únicamente costos asociados a si son curvas, con un ING de 500, o si son rectas, con un ING de 1000.

De esta forma, el archivo de actividades del Caso 2 es el de las tablas 7.1 y 7.2 del Anexo B, presentes ahí debido a su extensión. De todas formas, a continuación se presenta la tabla 4.5 a modo de ejemplo para mejor comprensión del archivo de actividades.

Tabla 4.5: Ejemplo actividades Caso 2 (Elaboración propia)

ID	LARGO [m]	ING [\$]	MAX RATE
I22	16	1000	1
I18	36	500	1
R2223	16	1000	1
R1811	36	1000	1
C2219	36	500	1
C1916	16	500	1

El criterio para asignar el ingreso es que las curvas dan la mitad de beneficio que las rectas, esto debido a que según la tabla 2.2, del capítulo Antecedentes del trabajo, la velocidad de avance en curva es la mitad que en línea recta.

Las precedencias siguen la misma lógica del primer escenario, donde cada actividad abre la puerta a las actividades que le siguen en la red. A esto hay que agregarle las precedencias con actividades v2. Un arco construido tiene como sucesor, además de los que le siguen gráficamente en el layout, el arco que se decidió no realizar inmediatamente antes. Por ejemplo, usando la figura 4.9, R1516 tiene como posibles sucesores R1617, C1613 y C1512v2. Los primeros dos son los que le siguen al arco R1516 para seguir avanzando (en naranja), y el tercero es el camino de la primera devolución (en amarillo).

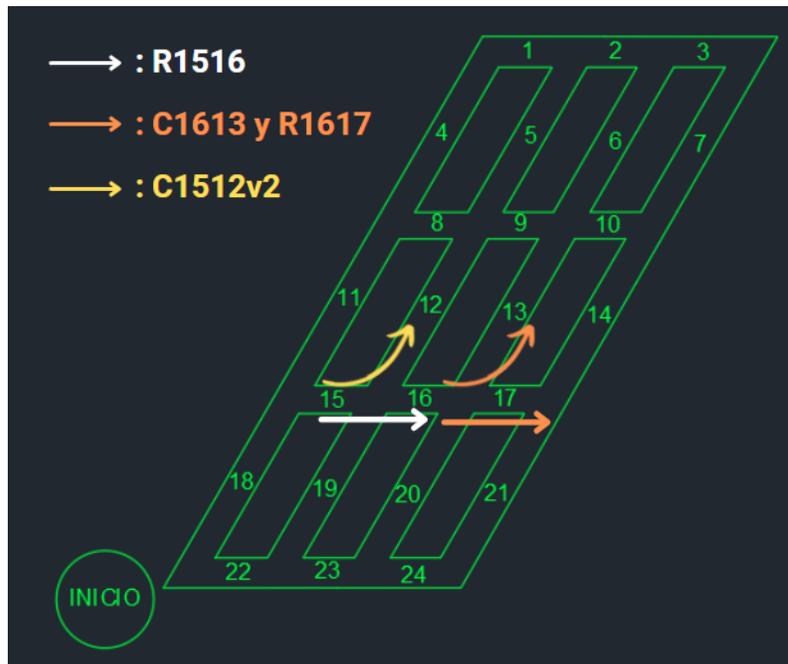


Figura 4.9: Ejemplo sucesoras (Elaboración propia)

Por su parte, las actividades v2 tienen como sucesoras las que le siguen en la red únicamente. Es decir, (ver figura 4.10), C1613v2 tiene como sucesoras R1306 y C1310. La tercera precedencia no se da, pues para que C1613v2 exista, se tiene que haber realizado previamente R1617, por lo que no se puede hacer el arco R1617v2 (recordar que son incompatibles una actividad con su versión 2).

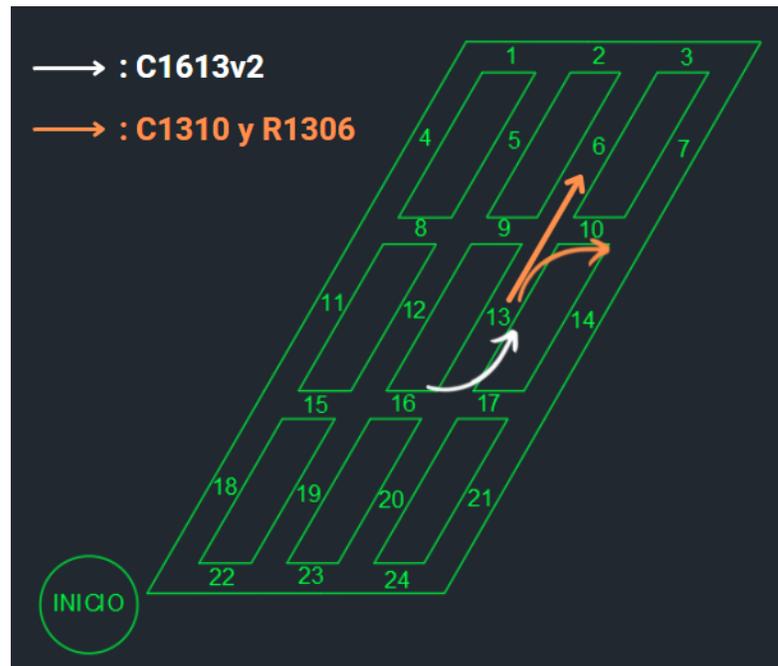


Figura 4.10: Ejemplo sucesoras versión 2 (Elaboración propia)

Por una cuestión de longitud, las tablas con las precedencias del Caso 2 son presentadas en el Anexo B (tablas 7.3 a 7.5). A continuación, se agrega la tabla 4.6, la cual muestra algunos ejemplos de las precedencias del Caso 2.

Tabla 4.6: Ejemplo precedencias Caso 2 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
I18	R1811	1
I18	C1815	13
C1916	R1617	39
C1916	C1613	41
C1916	R1912v2	99
C1916v2	R1617	76
C1916v2	C1613	78

Las restricciones aumentan considerablemente en este caso. A la ORC, que se mantiene igual en 36 metros, se le agregan restricciones de incompatibilidad (AIC) entre actividades. Para estas hay dos criterios, en primer lugar, no se puede realizar una actividad y su versión 2. Un ejemplo de esto es que los arcos C0805 y C0805v2 son incompatibles, por lo que si se realiza uno, UDESS impedirá que se haga el otro en todo el horizonte de periodos. En segundo lugar, no se puede construir ningún tramo dos veces. Por ejemplo, no se puede realizar C0805 y R1205, ya que significaría construir el tramo 05 dos veces. Al hacer las pruebas, hay algunas actividades que resultan cortadas en la Carta Gantt, por lo que se aplica la restricción de retraso (DPC), la que usa dos parámetros, UDESS_delay=0, lo que significa que toda actividad que comience en un periodo debe terminar en el mismo, y UDESS_delay2=1, es decir, que la siguiente actividad se debe comenzar a ejecutar en el periodo siguiente.

El último conjunto de restricciones usado es el de las restricciones de forzado (FAC). Se hace necesaria para imprimir continuidad a la construcción, ya que con el pasar de los arcos, el programa tiende a hacer actividades aisladas en el layout, siempre que las precedencias lo permitan. En el caso de la tunelera, no puede volver a un punto desde el que ya retrocedió, por lo que se debe forzar que la siguiente actividad sea una, dentro de un conjunto de "actividades factibles". En dicho conjunto entran todas las actividades que podrían realizarse, incluyendo todas las devoluciones viniendo desde cualquier camino. A continuación se dejan las figuras 4.11 y 4.12 a modo de explicación del procedimiento que se realizó.

Como ejemplo, acaba de finalizar la actividad C1613. Si el programa considera que es conveniente seguir avanzando, se debe forzar R1306 o C1310. Si por el contrario, decide que es mejor retroceder, se debe forzar alguna de todas las actividades a la que podría volver. Si se hubiese tomado el camino blanco de la figura 4.11 (I22, C2219, C1916, C1613), se podría retroceder un arco y construir R1617v2, dos arcos y construir R1912v2, tres arcos y construir R2223v2 o directamente tomar la otra rama desde el punto de inicio y construir I18.

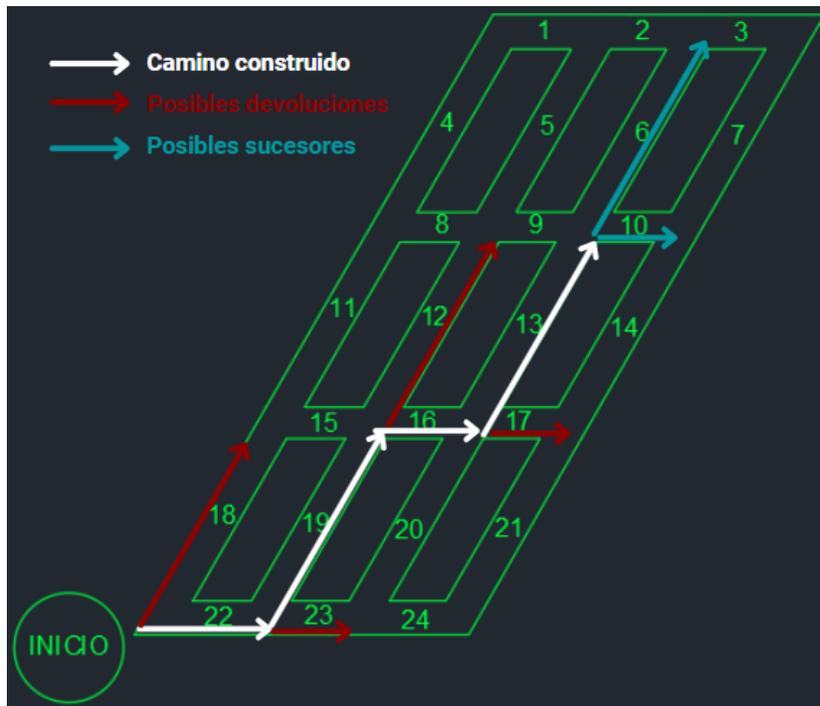


Figura 4.11: Ejemplo FAC, camino 1 (Elaboración propia)

Pero además de eso, se podría haber tomado otro camino para llegar a C1613, el de la figura 4.12 (I18, C1815, R1516, C1613), en el cual hay algunas posibilidades próximas actividades que se repiten, como R1306, C1310 y R1617v2, a las que se agregan C1512v2 y R1811v2.

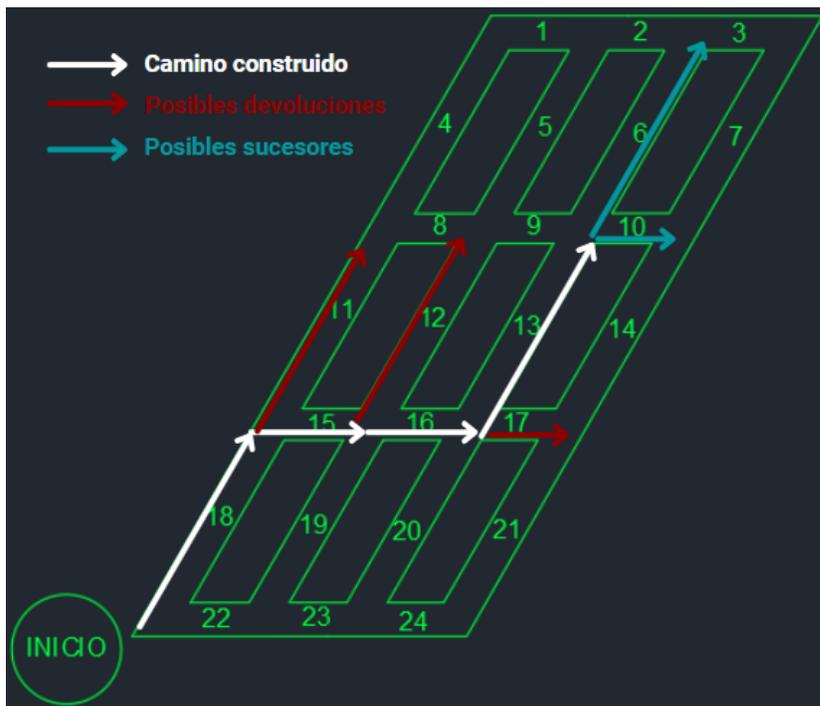


Figura 4.12: Ejemplo FAC, camino 2 (Elaboración propia)

Así, se debe forzar que tras terminar la actividad C1613, la siguiente debe ser una del conjunto (R1306, C1310, R1617v2, R1912v2, R2223v2, I18, C1512v2 y R1811v2), ya que no hay otro camino posible.

Si bien aquí se presentan algunos ejemplos de las restricciones, el detalle de cada una de ellas está en el código del programa, el que se encuentra en el Anexo B en formato de imágenes, para facilitar su comprensión, con colores e indexado correctamente.

La Carta Gantt del Caso 2 se presenta en las tablas 4.7 y 4.8. En ella se eliminó todas las actividades que no se realizaron en ningún periodo, ya que solo entorpecen su lectura. De esta forma, se realizan 24 actividades del total de 60 candidatas. Notar que la mayoría de las actividades son rectas, solo se realizan las curvas estrictamente necesarias.

Tabla 4.7: Carta Gantt Caso 2, parte 1 (Elaboración propia)

Activity	t 1	t 2	t 3	t 4	t 5	t 6	t 7	t 8	t 9	t 10	t 11	t 12
C0401	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C1108v2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C1815v2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2219v2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
C2320v2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
C2421	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
I18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R0102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R0203	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R0809	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R0910	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1205	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R1306	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R1407	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R1516	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1617	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1811	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1912	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R2013	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R2114	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
R2223	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2324	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

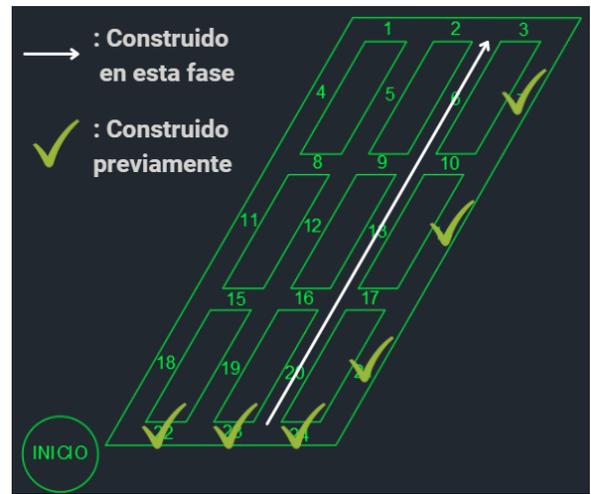
Tabla 4.8: Carta Gantt Caso 2, parte 2 (Elaboración propia)

Activity	t 13	t 14	t 15	t 16	t 17	t 18	t 19	t 20	t 21	t 22	t 23	t 24
C0401	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
C1108v2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
C1815v2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
C2219v2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2320v2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2421	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R0102	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
R0203	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R0809	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R0910	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R1104	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1205	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1306	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1407	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1516	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R1617	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R1811	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1912	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2223	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2324	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

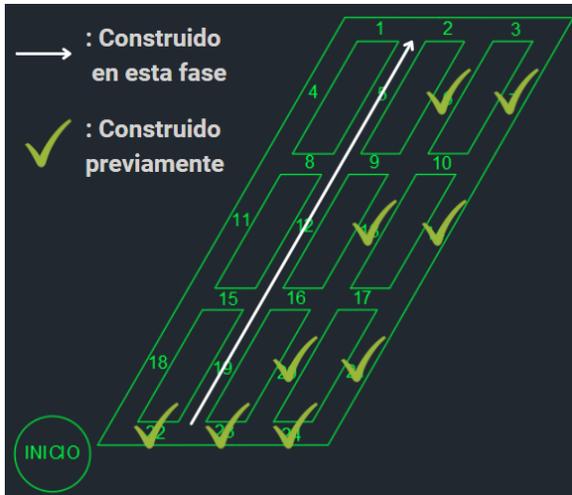
De forma análoga al primer escenario, se muestra la secuencia constructiva con 6 imágenes enmarcadas en la figura 4.13.



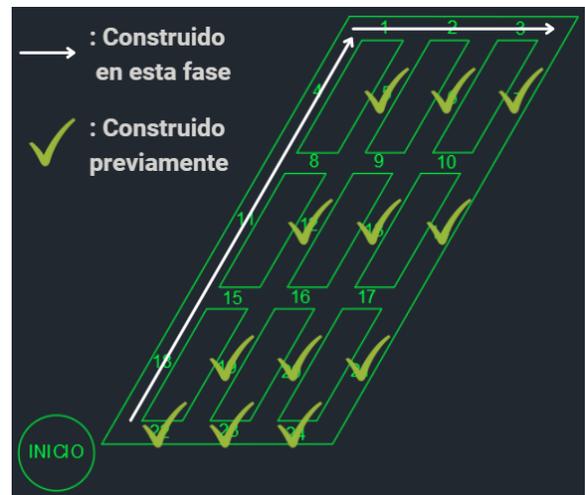
(a) 1



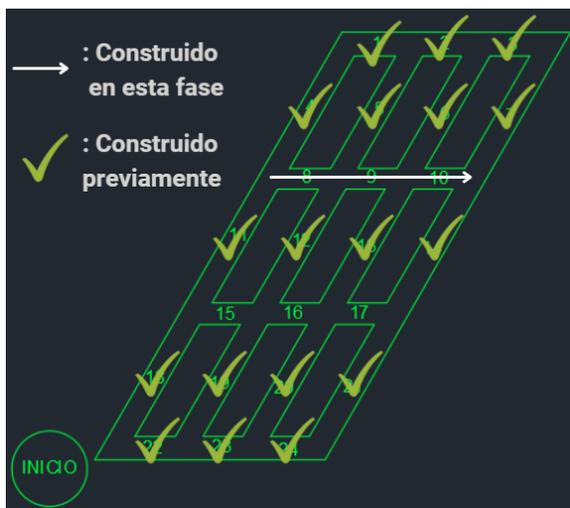
(b) 2



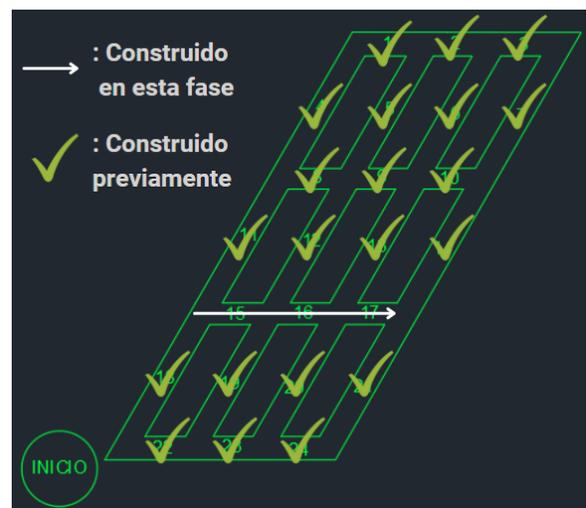
(c) 3



(d) 4



(e) 5



(f) 6

Figura 4.13: Secuencia constructiva Caso 2 (Elaboración propia)

4.3. Caso de estudio

El caso de estudio tiene una geometría más compleja, como se puede ver en la figura 3.4. Lo principal es que no es un romboide como los escenarios anteriores, por lo que el algoritmo realizado anteriormente no resuelve el problema por si solo, sino que requiere cambios. Lo primero es que constructivamente, tal como está el layout, no es posible hacer el total de la red. El punto de partida que permite recorrer mayor cantidad de arcos es el de la figura 4.14, desde el cual solo se puede avanzar hacia arriba y hacia la izquierda, recordar que los ángulos de 60° no se pueden realizar, por lo que toda la zona remarcada en rojo, sería infactible.

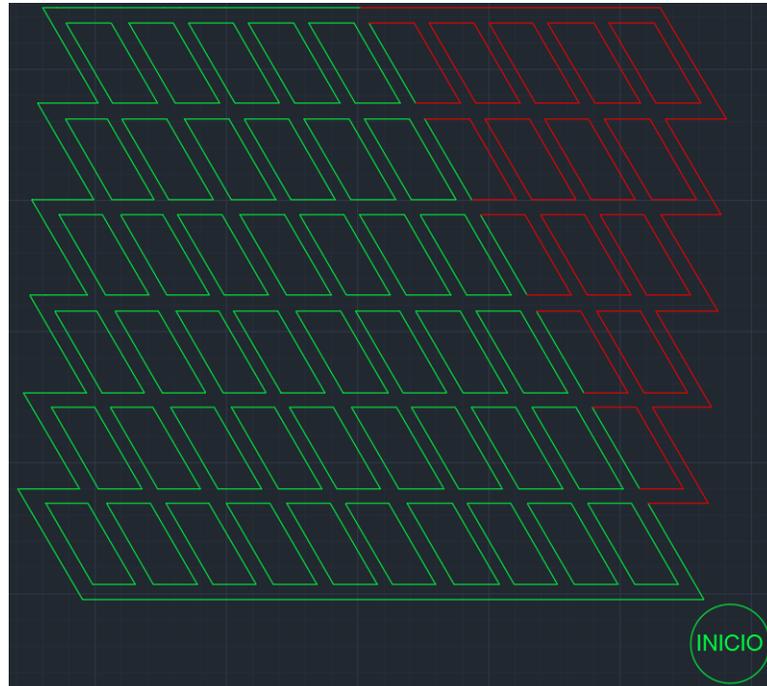


Figura 4.14: Factibilidad de arcos caso de estudio (Elaboración propia)

Debido a lo anterior, se plantean varias soluciones.

- Cambiar el layout por uno que permita la realización de todos los túneles desde un único punto de partida.
- Separar el problema por secciones y resolver cada una por separado.
- Realizar túneles auxiliares que permitan "viajar" de un punto a otro, para romper la limitación de que sólo se pueda avanzar en dos direcciones.

La primera opción es la más sencilla de ejecutar. Sin embargo, esta es una decisión más minera que constructiva, por lo que si el mandante decide mantener la configuración del nivel de producción, deja de ser viable.

La segunda alternativa tiene como fin transformar el caso de estudio, el cual no es factible según las condiciones anteriormente expuestas, en casos más pequeños que sí sea posible

resolver. Al implementarla, el caso de estudio se separaría en tres nuevos problemas, representados en la figura 4.15, con una zona central de geometría rectangular y dos zonas semejantes a los costados, con la forma de la figura 3.5.



Figura 4.15: Caso de estudio separado por zonas (Elaboración propia)

Dado que se llegó a la conclusión de que el modelo de los primeros dos escenarios es replicable para cualquier nivel de producción de geometría rectangular, lo que resta es resolver el problema asociado a las zonas de los costados, en adelante "caso de estudio reducido", el cual fue presentado en la figura 3.5

Como se ha dicho anteriormente, el que se estudia no es un problema netamente de ruta, sino que hay factores geotécnicos que juegan un rol fundamental. Existe la posibilidad de que algunos arcos tengan un valor mayor, debido a características desfavorables de la roca que se va a perforar. Incluso es posible que los estudios geomecánicos arrojen que la seguridad del proyecto se ve comprometida por el hecho de construir algunos segmentos, por lo que la mejor decisión podría ser no realizar esos arcos.

En este punto se ha decidido añadir condiciones al problema que representen estas características geotécnicas, para lo cual se definieron tres zonas: favorable, medianamente favorable y desfavorable, teniendo esta última, un cruce que no es posible construir mediante el uso de TBM. En concreto es el cruce de los tramos 22, 17, 18 y 13, por lo que los arcos C1813, C1813v2, R1817, R1817v2, C2217, C2217v2, R2213 y R2213v2 no se pueden construir. El cruce mencionado se muestra con una "X" en la figura 4.16, al igual que el esquema de las zonas.

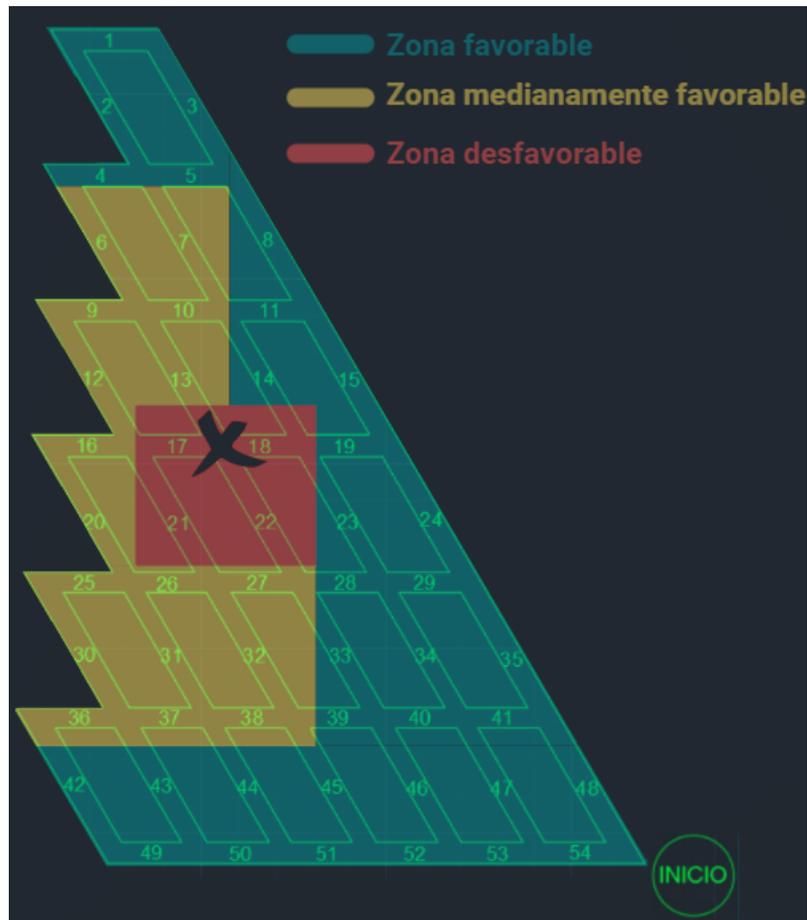


Figura 4.16: Zonas caso de estudio reducido (Elaboración propia)

La distribución de ingreso es la misma que en el Caso 2 para la zona verde, 500 para las curvas y 1000 para las rectas. Para la zona amarilla es la mitad de ingreso, es decir, 250 y 500, respectivamente; y para la roja, un cuarto, 125 y 250, respectivamente. En la práctica, un arco entra en la zona de su segundo tramo, por ejemplo, el arco R0702 está en la zona favorable, ya que su segundo tramo (02) pertenece a ella, sin importar que el primero se encuentre en otra zona.

Las tablas 7.6 a la 7.10 muestran el archivo de actividades del caso de estudio reducido, y se encuentra en el Anexo B. Sin embargo, a continuación se presenta la tabla 4.9, la que contiene algunos ejemplos de este, para facilitar la comprensión del descuento en la columna ING dependiendo de la zona en la que se encuentre la actividad. Notar el cambio de largo de los arcos, donde las diagonales tienen 33 metros de largo y los tramos horizontales, 17 metros.

Tabla 4.9: Ejemplo actividades caso de estudio reducido (Elaboración propia)

ID	LARGO [m]	ING [\$]	MAX RATE
I54	17	500	1
R4140v2	17	1000	1
C0502	33	500	1
C3932v2	33	250	1
R3120	33	500	1
C2721	33	125	1
R1918v2	17	250	1

Con respecto a las precedencias, se siguen los mismos criterios que para el Caso 2. Las tablas (7.11 a 7.18) con las precedencias del caso de estudio reducido se encuentra en el Anexo B.

Las restricciones utilizadas son las mismas que para el Caso 2, una ORC de 33 metros, equivalente al tramo más largo, en este caso los diagonales. Las AIC siguen el mismo criterio, hay incompatibilidad entre actividades que finalicen en el mismo tramo y actividades con su version 2. La DPC es igual que en el Caso 2. De la misma forma, las FAC se rigen por los mismos principios que en la fase previa, donde al finalizar un arco, se fuerza el inicio de uno de todos los arcos factibles. Los códigos de las restricciones de incompatibilidad (figura 7.5 y 7.6) y de forzado (figuras 7.7 a la 7.17) se encuentran en el Anexo B.

Tras correr el modelo, la Carta Gantt obtenida es la de las tablas 4.10 a 4.14

Tabla 4.10: Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)

Activity	t 1	t 2	t 3	t 4	t 5	t 6	t 7	t 8	t 9	t 10	t 11	t 12
C0301	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
C0805v2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
C1511v2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
I48	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R0504	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R0803	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R1009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R1110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R1508	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
R2415	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
R3524	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R4835	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.11: Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)

Activity	t 13	t 14	t 15	t 16	t 17	t 18	t 19	t 20	t 21	t 22	t 23	t 24
C1006v2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2419v2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C3529v2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
C4841v2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R1918	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2625	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R2726	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
R2827	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R2928	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
R3938	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R4039	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R4140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Tabla 4.12: Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 3 (Elaboración propia)

Activity	t 25	t 26	t 27	t 28	t 29	t 30	t 31	t 32	t 33	t 34	t 35	t 36
C5447	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
I54	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R0702	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R1407	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R2314	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
R3423	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R3736	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R3837	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R4734	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
R5251	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R5352	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R5453v2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

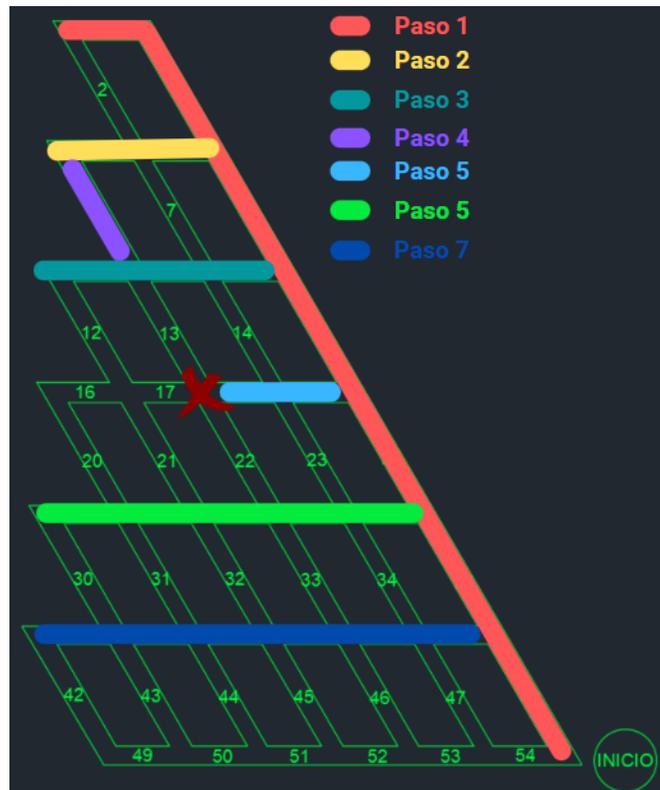
Tabla 4.13: Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 4 (Elaboración propia)

Activity	t 37	t 38	t 39	t 40	t 41	t 42	t 43	t 44	t 45	t 46	t 47	t 48
C4942	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C5043v2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
C5144v2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
C5245v2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R2112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R3120	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R3221	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R3322	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R4330	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
R4431	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
R4532	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R5049	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R5150	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

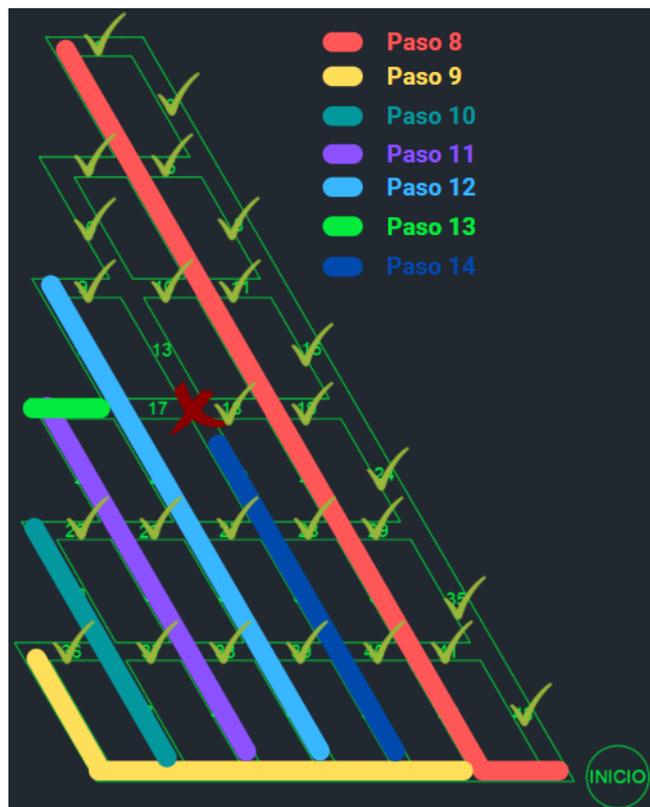
Tabla 4.14: Carta Gantt caso de estudio reducido, parte 5 (Elaboración propia)

Activity	t 49	t 50	t 51
C5346v2	1	0	0
R3322	0	0	1
R4633	0	1	0

La secuencia constructiva es la de la figura 4.17. Al tener esta vez 14 pasos la secuencia, se opta por esquematizar con colores en dos grandes partes de la secuencia, cada una con 7 pasos, los que si se siguen en orden, resulta el camino que sigue la TBM hasta completar el caso de estudio reducido.



(a) 1



(b) 2

Figura 4.17: Secuencia constructiva caso de estudio reducido (Elaboración propia)

Expuesto lo anterior, la figura 4.18 representa la solución propuesta. En ella, se debe llegar a los tres puntos de inicio, para resolver el problema del caso de estudio como tres problemas aislados, un romboide en el medio y dos casos de estudios reducidos a los costados. Finalmente, la secuencia constructiva seguida es la consecución de las tres zonas mencionadas, primero se realiza una, luego la tunelera retrocede por donde entró, se dirige a otro punto de inicio, realiza el camino encontrado y vuelve a salir en reversa para encaminarse hacia el tercer punto de inicio a seguir la secuencia constructiva descrita en las secciones anteriores de este capítulo.

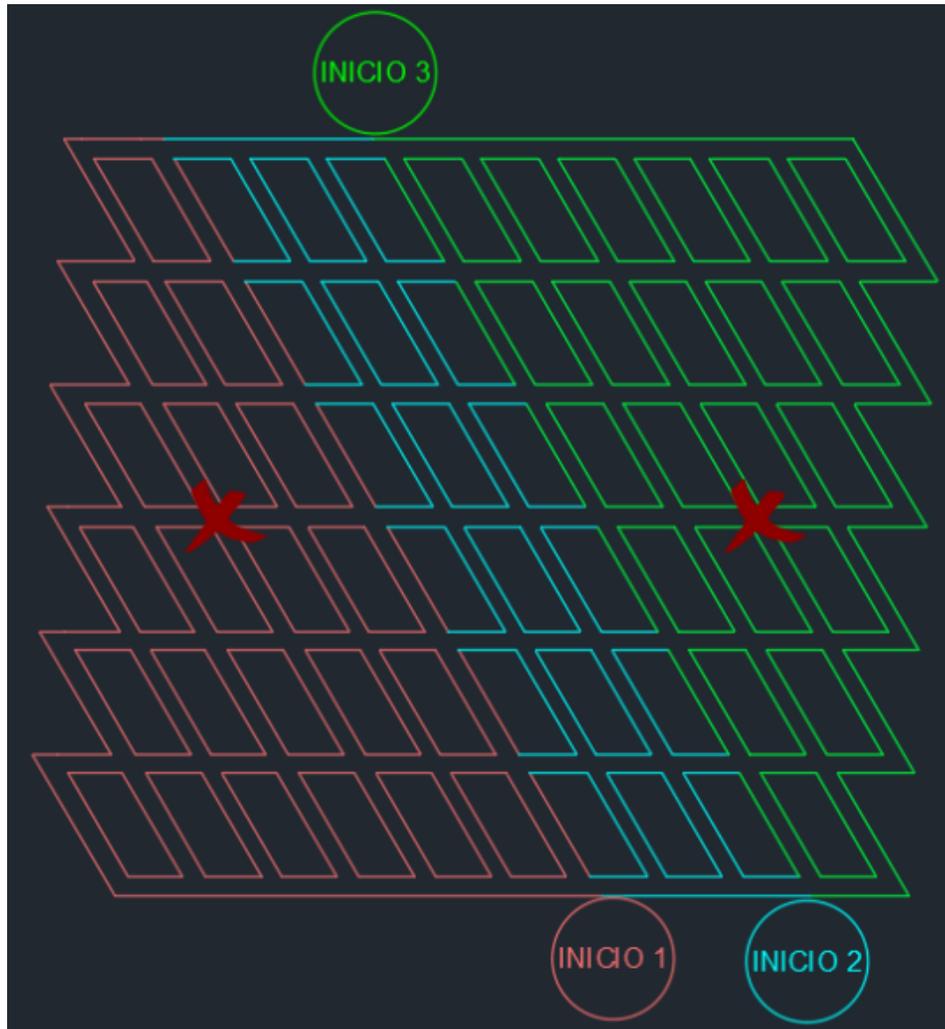


Figura 4.18: Solución caso de estudio (Elaboración propia)

Capítulo 5

Discusión

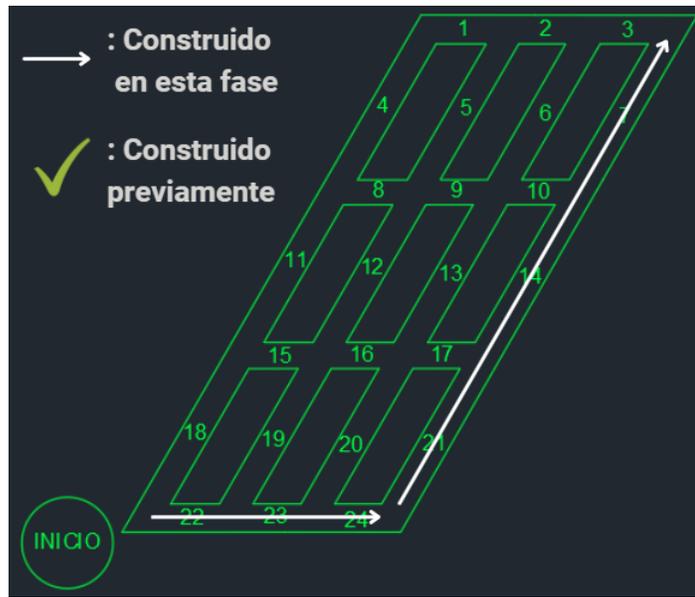
En el presente capítulo se analizan y plantean discusiones acerca de los resultados obtenidos en el capítulo anterior. En particular, se hace énfasis en los puntos críticos que hay que considerar a la hora de abordar trabajos como este, además de lineamientos para trabajar con la herramienta UDESS para la resolución de este tipo de problemas, teniendo en cuenta la experiencia adquirida a lo largo del trabajo de investigación.

El primer gran resultado son los candidatos a puntos de partida de la tunelera. El inicio es un supuesto tremendamente fuerte en un problema de ruta, ya que acota bastante la cantidad de soluciones, y el hecho de saber que existen un par de puntos por los que se puede ingresar a un nivel de producción cuando su geometría es un romboide, y tan solo un punto cuando el diseño es como el del caso de estudio reducido, hace que se cierren muchas alternativas de agendamiento. Este resultado va más allá, ya que no solo entrega lineamientos para el posicionamiento de los puntos de partida de la etapa constructiva, sino que también limita a dos las direcciones de avance. Dependiendo del punto elegido, hay únicamente dos direcciones que se pueden seguir, y la imposibilidad de virar en los sentidos opuestos también reduce las soluciones posibles.

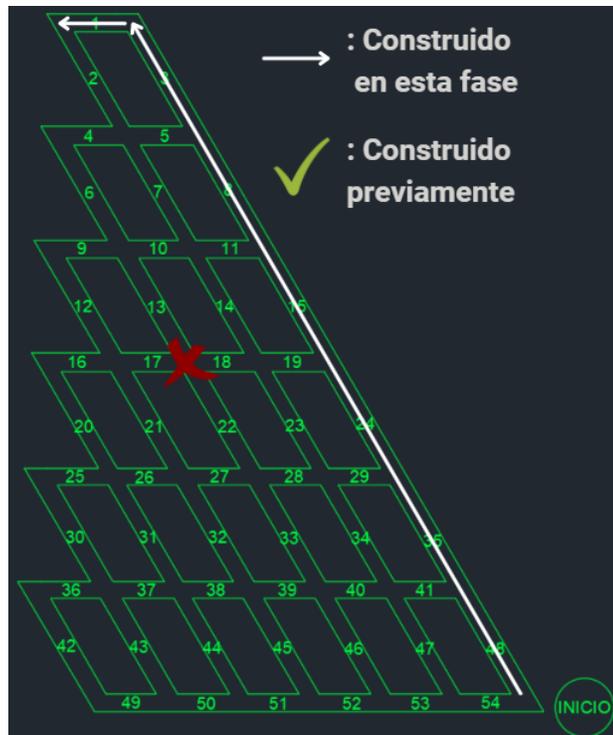
Otro resultado importante es el hecho de que las actividades no se deben concebir como tramos individuales, sino por el contrario, como arcos entre dos tramos. De esta forma se puede aplicar una mayor penalización al ingreso asociado a las curvas, que resultan ser la piedra angular del problema, ya que finalmente la mejor ruta suele ser la que menos giros tiene, debido al bajo rendimiento de construcción cuando se aplican virajes. El sistema de actividades como tramos no es capaz de identificar si se trata de una curva o una recta, ya que cada tramo es una actividad aislada de las otras, y UDESS no tiene herramientas para aplicar atributos a la unión de dos actividades, sino que estos atributos son inherentes a cada una de ellas.

Los resultados de los dos escenarios finales no solo coinciden en que se minimiza la cantidad de curvas, sino también en que se intenta maximizar el largo de los caminos. No es casualidad que, incluso cuando en el caso de estudio se tengan condiciones geotécnicas que castiguen el ingreso de algunos arcos, en los dos escenarios más desarrollados, la construcción comience con un tramo lo más largo posible, ya que es en tramos largos que se logra aprovechar las velocidades de avance de las tuneleras. La comparación del primer avance en la secuencia de

estos escenarios se presenta en la figura 5.1.



(a) Caso 2



(b) Caso de estudio reducido

Figura 5.1: Comparación de la secuencia constructiva de dos escenarios (Elaboración propia)

Con respecto al caso de estudio reducido, la carta Gantt resultó según lo esperado, la figura 4.17 a), se comporta igual que el Caso 2, avanzando recto hasta el final y luego devolviéndose calle a calle. Con la salvedad de que se ve obligado a realizar la curva C0906v2 (paso 4), ya

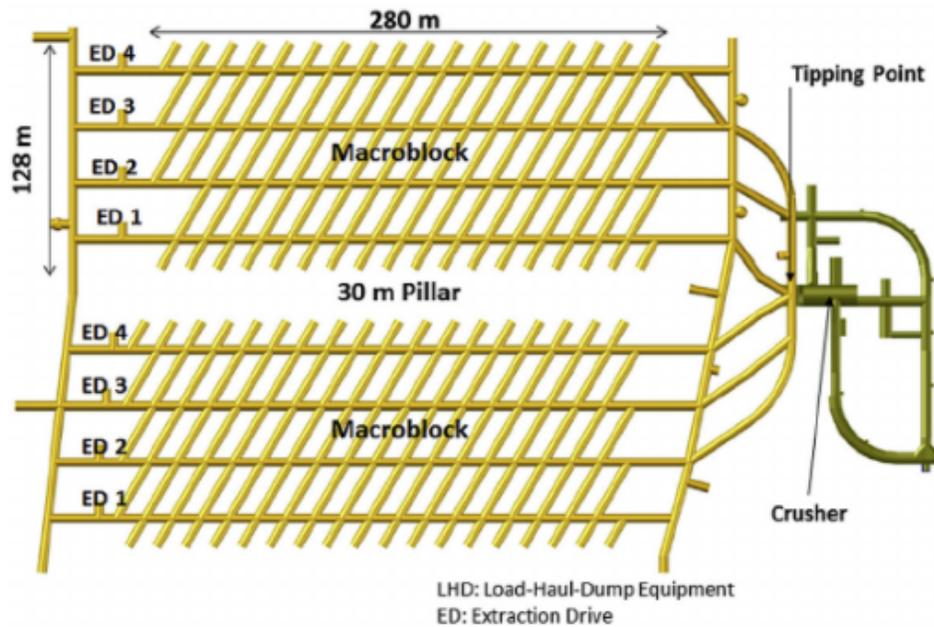
que debido a la incompatibilidad de realizar el tramo 13, la única forma por la que se puede acceder al tramo 06 es viniendo del tramo 09.

En la figura 4.17 b) sucede algo curioso, pero con sentido. En vez de seguir recto hasta el final, como se podría esperar, vira en la primera intersección, y realiza esa recta desde el tramo 47 hasta el 02 (R4734, R3423, R2314, R1407, R0702), completando el Paso 8, según la leyenda de la figura. Después vuelve para hacer el Paso 9 y comenzar a devolverse calle a calle. ¿Por qué no lo hizo como en la parte a)? ¿Por qué hizo una curva en primera instancia, en lugar de completar la recta que, se sabe, da mayores ingresos? La respuesta es por las zonas de penalización de la figura 4.16. Realiza el Paso 8 primero porque está en la zona favorable y esas actividades tienen un mayor ING que las de las zonas medianamente favorable y desfavorable. Posteriormente entra a esas zonas porque es inevitable, no hay forma de completar todos los tramos del layout sin pasar por esas zonas de penalización del ingreso, pero el modelo dejó esas actividades para el final.

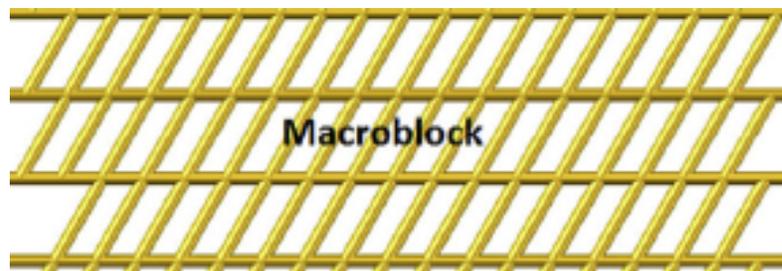
Lo anterior es prueba de que el algoritmo está funcionando correctamente, que está encontrando soluciones que, si bien pueden no ser las óptimas -en esta etapa no hay certeza de que sea la ruta más barata- resuelven el problema en concordancia con ciertas condiciones que se sabe reducen el costo de construcción. Como por ejemplo, hay una tendencia marcada por parte del algoritmo a reducir la cantidad de giros y a hacer los tramos rectos lo más largos posibles; en el caso de estudio reducido, se intenta dejar para el final las actividades más caras, siempre y cuando respeten lo dicho anteriormente acerca del número de giros.

El sistema de actividades con versión 2 ha sido implementado con éxito, es una buena forma de representar el retroceso desde cualquier punto de la red hasta un tramo anteriormente construido, con el fin de que se proceda con el siguiente arco. Esto, debido al hecho de que una actividad es incompatible con su versión 2, lo que impide que las actividades que no se realizan en primera instancia queden con precedencias abiertas y se hagan en algún momento no deseado. La versión 2 es una herramienta potente, ya que asegura que para realizarse un arco versión 2, se debe haber elegido el camino alternativo anteriormente. Esto entrega información de la ruta que se tomó para llegar al punto actual, lo que permite una libertad prácticamente absoluta del programa para decidir el mejor camino, porque tiene la certeza de los arcos que ya han sido construidos y no irá hacia algún lugar que no sea factible según las restricciones de TBM.

A modo de ejemplo de lo anterior, en la figura 5.2 (la cual es solo una imagen de apoyo, no representa ningún resultado real arrojado por el modelo) se muestra el camino de la TBM para construir el arco R3423. En el Anexo B se muestra la figura 7.11, la restricción de forzado del caso de estudio reducido, la que dice que se debe forzar una actividad entre las siguientes candidatas: C2318, R2314, C3428v2, R4140v2, R4835v2, I54, C4740v2, R5453v2, I48. De no ser por las actividades v2, que llevan un registro del camino que se siguió, se podría construir cualquiera de las candidatas mencionadas, por ejemplo, R5453, lo que sería un error. La bondad de este tipo de actividades es que no permiten que se realice R5453v2 sin haber realizado previamente C5447. Como eso no ha ocurrido, limita las candidatas a C2318, R2314, C3428v2, R4140v2, R4835v2 e I54, y elige la que mejor resultado final ofrezca.



(a) Layout completo



(b) Macro bloque estudiado

Figura 5.3: Comparación entre el layout completo y un macrobloque

Es evidente que el resultado está truncado, pero el modelo para resolver el macro bloque es necesario para encontrar una solución al layout completo.

Se diseña el caso de estudio con algunas condiciones geotécnicas supuestas, las que son arbitrarias pero probables en la práctica, sobretodo cuando los niveles de producción y hundimiento son grandes y abarcan una variedad de tipos de roca. Las zonas menos favorables, o incluso no realizables, se pueden deber a macizos rocosos blocosos, estallidos de roca, drenaje de agua, zonas de fallas, altos esfuerzos u otros fenómenos.

Al revisar la tabla 2.2, se hicieron algunos supuestos. La velocidad de avance en rectas (22 m/día) es prácticamente el doble que en curvas (12 m/día), es por eso que el ingreso de las curvas es la mitad que las rectas en los archivos de actividades. Estas velocidades de avance se deben comparar con las del método convencional, presentes en el capítulo Antecedentes del trabajo -de 4 m/día hasta 9 m/día- teniendo consciencia de que esos valores son propios de utilizar el método de PyT con una frente. En proyectos de esta envergadura, se suelen utilizar varias frentes, las que acercan los rendimientos de ambos métodos, convencional y mecanizado.

La pérdida de velocidad al atravesar un cruce es muy pequeña, por lo que se considera despreciable para el problema, aunque esto no es trivial, por lo que a continuación se explica. Se pierde aproximadamente el 10 % de la velocidad al pasar por un cruce (de 22 m/día a 20 m/día). Se toma el diámetro de dicho cruce del orden de los 6 metros. Los túneles están separados cada 17 metros (diagonales) o 33 metros (horizontales), así que si la máquina va por una horizontal, se encuentra un cruce cada 17 metros, por lo que está $\frac{6}{17} \approx \frac{1}{3}$ del tiempo en un cruce, mientras que si está avanzando por una diagonal, pasa por un cruce cada 33 metros, es decir, está $\frac{6}{33} \approx \frac{1}{5}$ del tiempo dentro de un cruce. Esto hace que, promediando, la TBM pase el 25 % del tiempo dentro de cruces. Considerando que la pérdida de velocidad es de solo el 10 %, eso se resume en una pérdida de rendimiento total del 2,5 % por motivo de cruces. Eso suponiendo que en cada tramo que recorre encuentra un túnel ya construido, lo que no es cierto, ya que cuando se comienza a construir no hay túneles que cruzar, por lo que la pérdida de rendimiento es menos aún. Además, recordar que el objetivo de este trabajo no es realizar una evaluación económica, por lo que cantidades tan pequeñas se desprecian en virtud de simplificar el problema.

Por último, notar que ninguna de las actividades incluidas en UDESS son actividades de retroceso. Este retroceso se representa mediante las actividades versión 2, las que indican que la maquinaria volvió a un lugar determinado de la ruta por el que ya había pasado y decidió continuar la construcción en otro arco; mas la devolución del equipo no es una actividad. El hecho de que no existan actividades de retroceso como tal, implica que no se le pueden asignar propiedades a dicho retroceso. Un ejemplo de ello es que en el informe nunca se menciona el tiempo que toma la tunelera en reversa, el que en la práctica, según la tabla 2.2, es aproximadamente la mitad del tiempo que demora en ir avanzando (22 m/día vs 50 m/día), magnitud para nada despreciable. El hecho por el que no se toma explícitamente el tiempo de retroceso como un aumento extra en los costos, es porque ya está incluido en cada una de las actividades de avance. Todos los arcos que se construyen, luego pasan por el retroceso, no hay ningún camino por el que pase la tunelera, por el que posteriormente no pase en reversa. De esta forma, la pérdida de rendimiento está incluida en el avance. En lugar de considerar que demora 2 horas en avanzar y una en retroceder, se considera que demora 3 en avanzar y ninguna en retroceder, lo que es una simplificación fuerte, pero válida. Luego, el rendimiento se calcula con estas velocidades.

Capítulo 6

Conclusión

Se cumplen los objetivos del trabajo, se propone una metodología con el fin de encontrar la ruta más favorable para construir un nivel de producción de minería de caving. Este es la aleación de dos geometrías independientes, la de los romboides y la de los triángulos (caso de estudio reducido), con los cuales se puede formar prácticamente cualquier figura y así completar el nivel de producción.

Si bien el modelo diseñado tiene las limitaciones mencionadas en el capítulo de Discusión, es un acercamiento a la metodología que permitirá encontrar un camino óptimo, tomando en cuenta todas las posibilidades, en lugar de un agendamiento propuesto que considera las bondades y problemáticas de la TBM y se ciñe a ellas para encontrar un resultado favorable.

Como se dijo en el capítulo de Introducción, aunque se encuentre la ruta óptima, hay características de las Tunnel Boring Machines que podrían afectar a tal punto en la decisión que no fuera viable implementarla. Algunas de estas son el tiempo de traslado y preparación que requiere; haciendo necesario planificar con meses de anticipación para que el equipo esté disponible el día de inicio de la obra. El alto costo de inversión no suele ser un impedimento para que la industria implemente el uso de TBM, siempre y cuando sea rentable a la larga; dado que es un costo pequeño en comparación con las grandes sumas de dinero que significa este tipo de proyectos. Otra limitación es el hecho de que las secciones que las tuneladoras construyen son en su gran mayoría circulares, por lo que geometrías como la de la figura 2.3 no son factibles. Esto debe ser considerado a la hora de tomar decisiones, sobretodo cuando se calcula el volumen de material excavado, ya que hay diferencias entre una sección con arco de punto medio, típicas de PyT, y una circular. Además, los proyectos realizados con Perforación y Tronadura suelen tener distintas secciones transversales dentro de un macro bloque, dependiendo del propósito del túnel y de donde está ubicado en la red. La TBM tiene una sección única, por lo que en la mayoría de los casos, se estará excavando de más, ya que el área elegida será equivalente a la del túnel de mayor sección; a menos que se decidiera construir con más de una tuneladora, en cuyo caso habría que hacer un layout para cada una y coordinarlas para que el trabajo de una no se solape con el resto.

A pesar de las limitaciones del método de TBM, su implementación en niveles de pro-

ducción y hundimiento de minería de caving podría acelerar el proceso constructivo y con ello, el tiempo de puesta en marcha de la extracción de la mina, valores clave en la toma de decisiones de los proyectos mineros. Si bien los alcances de este trabajo no son suficientes para decidir entre el uso de TBM y PyT, el presente entrega herramientas valiosas para que el proceso de investigación sobre este tema continúe. Consecuencia del ahorro de tiempo en la construcción de los niveles de hundimiento y producción pueden ser aumento en la inversión en la industria, ya que retornos anticipados generarían un flujo de caja más atractivo para el mandante, perfeccionamiento de esta tecnología, con el fin de adaptarla cada vez más a este tipo de problemas, como desarrollo de tuneladoras con radios de giro cada vez menores y por lo tanto más versátiles, entre otros efectos favorables para la industria y el país. Sin embargo, a pesar de lo mucho que se pueda avanzar en esta materia, de manera de hacer las TBMs lo más versátiles posibles, el método de excavación tradicional siempre será una alternativa que la estará acompañando, ya sea para proyectos pequeños o utilizándose ambos métodos en el mismo.

6.1. Trabajo futuro

El siguiente paso para continuar con la investigación de factibilidad del uso de TBM en minería de caving, es estudiar la aplicación de túneles auxiliares que lleven la maquinaria de un lugar a otro del nivel de producción, sin ingresar a este. Eso permitirá ampliar las posibilidades de movilidad de la tuneladora y por lo tanto, abrirá el abanico a nuevas soluciones que podrían, o no, resultar siendo la mejor estrategia de agendamiento para implementar el uso de excavación mecanizada en este tipo de proyectos. A continuación se presenta la figura 6.1, la que grafica el concepto de los túneles auxiliares en color celeste, añadiéndolos al caso de estudio visto hasta el momento.

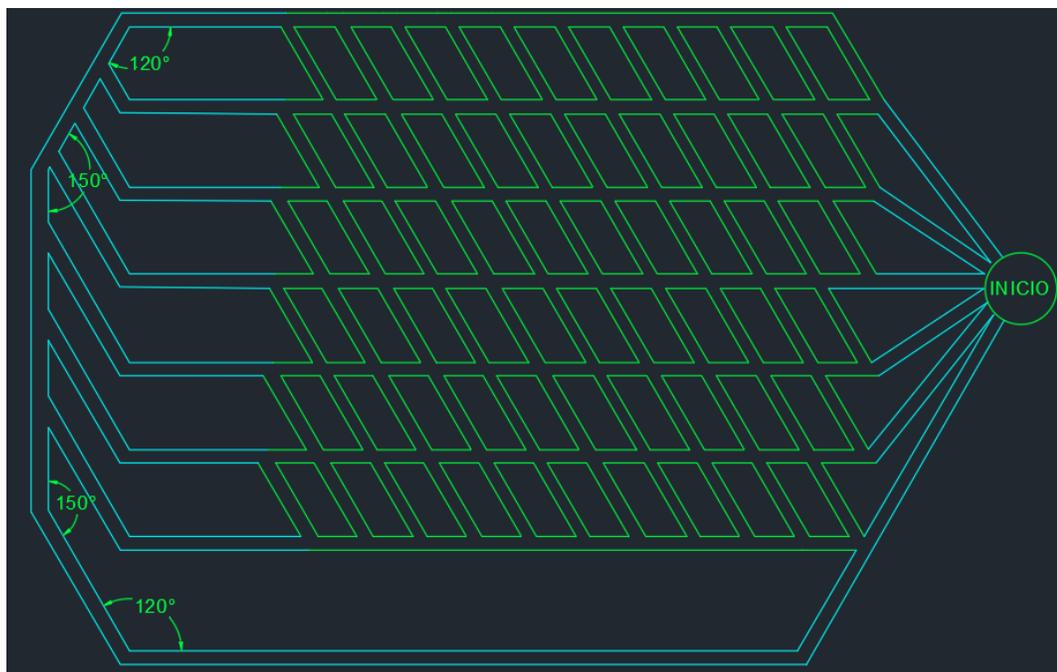


Figura 6.1: Caso de estudio propuesto (Elaboración propia)

En esta, la actividad de inicio se encuentra a la derecha del todo, desde la cual se puede acceder por distintos puntos a la red principal (en verde). Además, hay túneles auxiliares que permiten trasladar la maquinaria al extremo opuesto del nivel de producción, desde donde también se puede comenzar a construir. La dirección del flujo producido por las modificaciones se muestra en la figura 6.2.

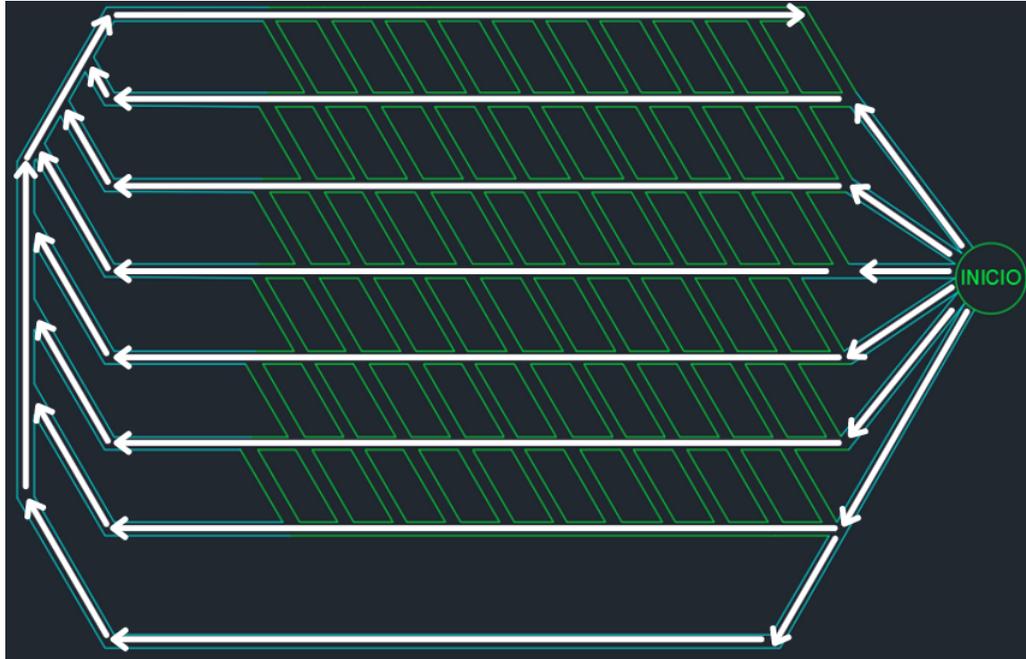


Figura 6.2: Flujo caso de estudio propuesto (Elaboración propia)

Esta propuesta abre la posibilidad de que, mediante túneles auxiliares externos al nivel de producción, se llegue a la esquina superior izquierda de la red, lo que permitiría que se construya el nivel de producción hacia abajo y hacia la derecha, sumándose a la alternativa de construir hacia arriba y a la izquierda, que es como se había resuelto el problema anteriormente en este informe. Esta propuesta rompe el supuesto, cierto hasta el momento, de que bajo ninguna circunstancia se puede avanzar hacia la derecha ni hacia abajo, ya que gracias a la nueva configuración, no es necesario tomar ángulos de 60° para hacerlo, sino avanzar por algún túnel auxiliar para comenzar a construir desde la esquina superior izquierda.

Esto abre la posibilidad a que algunos túneles sean construidos en cualquiera de los dos sentidos, complejizando el problema, pero dando más opciones de solución. Es interesante estudiar cuales son las nuevas restricciones de programación y construcción, y qué supuestos son necesarios para garantizar que el resultado obtenido del modelo sea factible y aplicable en la práctica.

Capítulo 7

Bibliografía

- [1] ITA. (2009). General Report on Conventional Tunneling Method. Disponible en: https://tunnel.ita-aites.org/media/k2/attachments/public/ITA_Report_N2_WG19_P.pdf
- [2] Pozo, J. (2021). Unidad 3: Excavación en Roca [Material de clase]. Construcción de Túneles, Universidad de Chile.
- [3] Consejo Minero. (2021). Cifras actualizadas de la minería. Disponible en: <https://consejominero.cl/mineria-en-chile/cifras-actualizadas-de-la-mineria/>
- [4] Stewart, P., Ramezanzadeh, A. & Knights, P. (2006). Benchmark Drill and Blast and Mechanical Excavation Advance Rates for Underground Hard-Rock Mine Development. *Australian Mining Technology Conference*
- [5] Zheng, Y.L., Zhang, Q.B. & Zhao, J. (2016). Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunnelling and Underground Space Technology*
- [6] Herrera Pino, G. (2021). Análisis de la aplicabilidad de TBM en nivel de producción de minería Block Caving. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181787>
- [7] Rodríguez Toro, C. (2020). Desafíos geomecánicos para el uso de TBM en minería masiva de Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/17756>
- [8] Valenzuela Núñez, F. (2017). Estimación de la producción en sector Diablo Regimiento, mina El Teniente, mediante simulación a eventos discretos. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145208>
- [9] Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C. (2013). Mechanical excavation in mining and civil industries. *CRC press*
- [10] Cigla, M., Yagiz, S. & Ozdemir, L. (2001). Application of tunnel boring machines in underground mining development. *Excavation Engineering Earth Mechanics Institute*.
- [11] Barioffi, A., Fernandez, E., Ciocca, G., & Grandori, R. (2011). DS Compact TBM dealing witcomplex and unexpected geology in Los Bronces Exploratory Tunnel. *Proceedings Rapi Excavation and Tunnelling Conference 2011*

- [12] Herrenknecht. (2010, Octubre 15). Herrenknecht.com. Disponible en: <https://www.herrenknecht.com/en/references/referencesdetail/gotthard-base-tunnel/>
- [13] Robbins. (2020). Túneles profundos con TBM en Los Andes chilenos: Un estudio comparativo de dos desafiantes proyectos tuneleros en Chile. *Webinar Túneles con TBM: Diseño, construcción, servicios y proyectos de ingeniería. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE)*.
- [14] Flores, G., & Catalan, A. (2018). A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- [15] Rojas, E., Molina, R. & Cavieres, P. (2003). Pre-undercut caving in El Teniente mine, Chile. *Underground mining methods*
- [16] Sáez Garrido, K. (2019). Diseño de nivel de producción alternativo en Block/Panel Caving. Disponible en <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/664>
- [17] Gómez, R. & Labbé, E. (2019). Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del “block caving”. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (1): 181-198.
- [18] Catálogo CAT. Disponible en: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment.html
- [19] Sinfield, J. & Einstein, H. (1996). Evaluation of Tunneling Technology Using the “Decision Aids for Tunneling”. *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- [20] Min, S. (2003). The application of “Decision Aids for Tunneling (DAT)” to the Sucheon tunnel in Korea. Disponible en <http://hdl.handle.net/1721.1/34014>
- [21] Min, S., Einstein, H., Lee, J. & Kim, T. (2003). Application of Decision Aids for Tunneling (DAT) to a Drill & Blast Tunnel. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- [22] Harran, R. (2018). Decision Aids for Tunneling a catalogue for application to small tunnels. Disponible en: <https://infoscience.epfl.ch/record/263991?ln=en>
- [23] Record breaking TBM performance in China. (2018). TunnelTalk. Disponible en: <https://www.tunneltalk.com/China-22Feb2018-Robbins-main-beam-gripper-TBM-breaking-records-in-China.php>
- [24] Villarroel, D. (2015). La tronadura en minería subterránea: el efecto de hacer las cosas bien. IDMining. Disponible en: <http://idmining.cl/la-tronadura-en-mineria-subterranea-el-efecto-de-hacer-las-cosas-bien/>
- [25] Nancel-Penard, P., Morales N., Rojas V. & González T. (2020). A heuristic approach for scheduling activities with .^oRprecedence constraints at an underground mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Volume 34(10), 748-762.

Anexos

Anexo A

Resumen extendido

Análisis de Constructibilidad y Puntos Críticos del uso de TBM en Minería de Caving

Gustavo Penroz¹, Luis Felipe Orellana², Pierre Nancel-Penard³

¹Departamento de Ingeniería Civil, FCFM - Universidad de Chile

²Departamento de Ingeniería de Minas, FCFM - Universidad de Chile

³Advanced Mining Technology Center, FCFM - Universidad de Chile

Contacto:

- Gustavo Penroz (gustavo.penroz@ug.uchile.cl)
- Luis Felipe Orellana (luisfelipe.orellana@ing.uchile.cl)
- Pierre Nancel-Penard (pierre.nancel@amtc.cl)

Ideas Clave:

- Uso de TBM en Minería de Caving
- Evaluación de escenarios constructivos
- Desarrollo de modelo de decisión basado en criterio de costos

Resumen

El uso de TBM en la construcción de los niveles de hundimiento y producción de minería de caving podría acelerar la puesta en marcha de la extracción de mineral, debido a las

mayores velocidades de avance que posee, en comparación con el método de Perforación y Tronadura. La limitación de los radios de giro de la excavación mecanizada lleva a realizar un modelo que entregue como resultado el agendamiento de la ruta que la tunelera debe recorrer, en un nivel de producción previamente propuesto. Se plantean soluciones para dos geometrías de nivel de producción, las que al aplicarse en conjunto entregan una secuencia constructiva que resuelve una red típica de nivel de producción. Es decir, es un modelo que minimiza los costos de construcción, al considerar la cantidad de curvas que toma la TBM, el largo de los tramos y las condiciones geotécnicas del terreno. Si bien no es un modelo de optimización, entrega una solución que reduce costos en la fase previa a la explotación de la mina.

Abstract

The use of TBM in the construction of undercut and production levels of caving mining could accelerate the start-up of ore extraction, due to the higher speed it has, compared to the Drill and Blast method. The limitation of the turning radius of the mechanized excavation leads to the creation of a model that gives as a result the scheduling of the route that the tunnel should follow, at a previously proposed level of production. Solutions are proposed for two production level geometries, that applied together provide a constructive sequence that solves a typical production level layout. That is, a model that minimizes construction costs, by considering the number of curves that TBM takes, the length of the sections and the geotechnical conditions of the field. Although it is not an optimization model, it provides a solution that reduces costs in the pre-extraction phase of the mine.

Introducción

La minería es muy importante para el desarrollo del país, ya que es su principal actividad económica. Es por esto que se intenta optimizarla lo más posible, sobretodo la fase previa a la explotación, ya que es cuando el mandante está invirtiendo recursos y no está recibiendo ingresos a cambio. Actualmente, para la construcción de los niveles de producción y hundimiento se usa el método de Perforación y Tronadura, el que, entre sus muchas ventajas, es versátil, pero la velocidad de avance es baja, en comparación con otros métodos como Tunnel Boring Machine, TBM. Se desea evaluar el uso de TBM -cuya mayor desventaja es lo grande de sus radios de giro- por sobre PyT, por lo que se deben minimizar la cantidad de curvas en el agendamiento de la ruta que seguirá la tunelera. Además de la cantidad de giros, las condiciones geotécnicas del terreno son un factor clave en la decisión del método a utilizar.

Metodología

Lo primero es proponer un layout válido para un Nivel de Producción de macroblock caving. En la búsqueda de un programa que permita montar el modelo, se opta por UDESS, un

software de agendamiento minero desarrollado por el AMTC. El primer paso es la familiarización con sus atributos y modo de funcionamiento, para lo que se comienza construyendo el Caso 1, una red con forma de romboide de 3x3 calles, en el cual las actividades son los tramos horizontales y diagonales de la red. Posteriormente se trabaja con el Caso 2, un romboide de 4x4 calles, para el cual se cambia el concepto de actividades a arcos entre dos tramos, lo que permite controlar la cantidad de giros o rectas que hay. En esta fase, se aplica el método de actividades "versión 2". Por último, se diseña el "Caso de estudio reducido", la solución a una nueva geometría que, en conjunto con la obtenida en las fases anteriores, permiten resolver el Caso de Estudio.

Resultados

El resultado principal es que se obtiene la Carta Gantt de los tres escenarios propuestos en la metodología. Adicionalmente, y dependiendo de la orientación del layout, hay solo dos puntos en los que se puede comenzar a construir el nivel de producción cuando este tiene forma de romboide, como en los Casos 1 y 2, y es en sus vértices de 60° . Cuando la forma es como la del Caso de Estudio, es necesario crear una metodología auxiliar para la geometría del Caso de Estudio Reducido, la cual se combina con la de romboide para resolver el problema. Por último, se implementa el sistema de actividades "versión 2", el que permite describir el movimiento de la tunelera durante la construcción. Para la obtención de estos resultados, fue vital modificar las librerías UDESS, agregando restricciones.

Discusión

La ubicación de los posibles puntos de inicio es sumamente importante, ya que acota la toma de decisiones sobre donde comenzar a dos lugares. Las actividades de UDESS se diseñan como arcos entre dos tramos, en lugar de tramos independientes, esto para poder penalizar las curvas por sobre las rectas. Según se ve en la Carta Gantt de los escenarios, el criterio que usa UDESS es hacer la mayor cantidad de tramos rectos posibles, siempre y cuando las condiciones geotécnicas lo permitan. El sistema de actividades "versión 2" es una herramienta poderosa, ya que gracias a ella, prácticamente no se hacen imposiciones respecto a la ruta, lo que permite al programa tener libertad de encontrar la mejor solución. Por último, el resultado de este estudio está acotado a un solo macroblock, lo que ignora la disposición de los túneles de acceso a este.

Conclusiones

Se cumple con los objetivos del trabajo, diseñar una metodología que permita encontrar la ruta más favorable para construir un nivel de producción de minería subterránea mediante el uso de TBM, basado en criterio de costos. Para ello se implementa en UDESS la toma de decisiones para la excavación mecanizada, lo que incluye una modificación del mismo, un

sistema de actividades nuevo y el añadido de dos nuevas restricciones. Si bien los alcances del trabajo no llegan a asegurar que la encontrada es la ruta óptima, ni incluyen un estudio económico que compare entre las dos alternativas a métodos constructivos, PyT y TBM, es un acercamiento a la metodología que permitirá encontrar un camino óptimo que tome en cuenta todas las condiciones que influyen en la decisión de si utilizar uno u otro método, o ambos combinados. Finalmente, es importante notar que a pesar de que las condiciones geotécnicas, constructivas y de innovación tecnológica permitan en un futuro asegurar el uso de TBM en minería de caving, el método de Perforación y Tronadura sigue siendo sumamente versátil y tiene ventajas que le permitirán estar presente de forma total o parcial en este tipo de proyectos.

Anexo B

Caso 2

Actividades Caso 2

Tabla 7.1: Actividades Caso 2, parte 1 (Elaboración propia)

ID	LARGO [m]	ING [\$]	MAX RATE
I22	16	1000	1
I18	36	500	1
R2223	16	1000	1
C2219	36	500	1
C2320	36	500	1
R2324	16	1000	1
C2421	36	500	1
C1815	16	500	1
R1811	36	1000	1
C1512	36	500	1
R1516	16	1000	1
R1912	36	1000	1
C1916	16	500	1
C1613	36	500	1
R1617	16	1000	1
R2013	36	1000	1
C2017	16	500	1
C1714	36	500	1
R2114	36	1000	1
C1108	16	500	1
R1104	36	1000	1
C0805	36	500	1
R0809	16	1000	1

Tabla 7.2: Actividades Caso 2, parte 2 (Elaboración propia)

ID	LARGO [m]	ING [\$]	MAX RATE
R1205	36	1000	1
C1209	16	500	1
C0906	36	500	1
R0910	16	1000	1
C1310	16	500	1
R1306	36	1000	1
C1007	36	500	1
R1407	36	1000	1
C0401	16	500	1
C0502	16	500	1
R0102	16	1000	1
R0203	16	1000	1
C0603	16	500	1
R2223v2	16	1000	1
C2219v2	36	500	1
C2320v2	36	500	1
R2324v2	16	1000	1
C1815v2	16	500	1
R1811v2	36	1000	1
C1512v2	36	500	1
R1516v2	16	1000	1
R1912v2	36	1000	1
C1916v2	16	500	1
C1613v2	36	500	1
R1617v2	16	1000	1
R2013v2	36	1000	1
C2017v2	16	500	1
C1108v2	16	500	1
R1104v2	36	1000	1
C0805v2	36	500	1
R0809v2	16	1000	1
R1205v2	36	1000	1
C1209v2	16	500	1
C0906v2	36	500	1
R0910v2	16	1000	1
C1310v2	16	500	1
R1306v2	36	1000	1

Precedencias Caso 2

Tabla 7.3: Precedencias Caso 2, parte 1 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
I18	R1811	1
R1811	R1104	2
R1104	C0401	3
C0401	R0102	4
R0102	R0203	5
R1811	C1108	6
C1108	R0809	7
R0809	R0910	8
R0809	C0906	9
C1108	C0805	10
C0805	C0502	11
C0502	R0203	12
I18	C1815	13
C1815	R1516	14
R1516	R1617	15
C1714	R1407	16
R1516	C1613	17
C1613	C1310	18
C1613	R1306	19
C1815	C1512	20
C1512	C1209	21
C1209	R0910	22
C1209	C0906	23
C1512	R1205	24
R1205	C0502	25
I22	R2223	26
R2223	R2324	27
R2324	C2421	28
C2421	R2114	29
R2114	R1407	30
R2223	C2320	31
C2320	C2017	32
C2017	C1714	33
C2320	R2013	34
R2013	C1310	35
R2013	R1306	36
I22	C2219	37
C2219	C1916	38
C1916	R1617	39
R1617	C1714	40

Tabla 7.4: Precedencias Caso 2, parte 2 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
C1916	C1613	41
C1310	C1007	42
R1306	C0603	43
C2219	R1912	44
R1912	C1209	45
R0910	C1007	46
C0906	C0603	47
R1912	R1205	48
R1811v2	R1104	49
R1104v2	C0401	50
R1811v2	C1108	51
C1108v2	R0809	52
R0809v2	R0910	53
R0809v2	C0906	54
C1108v2	C0805	55
C0805v2	C0502	56
C1815v2	R1516	57
R1516v2	R1617	58
R1516v2	C1613	59
C1613v2	C1310	60
C1613v2	R1306	61
C1815v2	C1512	62
C1512v2	C1209	63
C1209v2	R0910	64
C1209v2	C0906	65
C1512v2	R1205	66
R1205v2	C0502	67
R2223v2	R2324	68
R2324v2	C2421	69
R2223v2	C2320	70
C2320v2	C2017	71
C2320v2	R2013	72
R2013v2	C1310	73
R2013v2	R1306	74
C2219v2	C1916	75
C1916v2	R1617	76
R1617v2	C1714	77
C1916v2	C1613	78
C1310v2	C1007	79
R1306v2	C0603	80
C2219v2	R1912	81
R1912v2	C1209	82
R0910v2	C1007	83

Tabla 7.5: Precedencias Caso 2, parte 3 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
C0906v2	C0603	84
R1912v2	R1205	85
C2421	C2320v2	86
R2114	C2320v2	87
R1407	C2320v2	88
C2320	R2324v2	89
C2219	R2223v2	90
C0401	C1108v2	91
R0102	C1108v2	92
R0203	C1108v2	93
C1108	R1104v2	94
C1815	R1811v2	95
R1516	C1512v2	96
C1512	R1516v2	97
R1912	C1916v2	98
C1916	R1912v2	99
R1617	C1613v2	100
C1714	C1613v2	101
C1613	R1617v2	102
C2017	R2013v2	103
C1714	R2013v2	104
R2013	C2017v2	105
R0809	C0805v2	106
C0805	R0809v2	107
R1205	C1209v2	108
C0502	C1209v2	109
C1209	R1205v2	110
R0910	C0906v2	111
C1007	C0906v2	112
C0906	R0910v2	113
C0603	R0910v2	114
R1306	C1310v2	115
C0603	C1310v2	116
C1310	R1306v2	117
C1007	R1306v2	118

Código restricciones Caso 2

Restricciones de incompatibilidad

```
UDESS_list_incomp_horiz=[  
    ["R1516", "C1916", "R1516v2", "C1916v2"],  
    ["C1512", "R1912", "C1512v2", "R1912v2"],  
    ["C1613", "R2013", "C1613v2", "R2013v2"],  
    ["R1617", "C2017", "R1617v2", "C2017v2"],  
    ["C0805", "R1205", "C0805v2", "R1205v2"],  
    ["R0809", "C1209", "R0809v2", "C1209v2"],  
    ["C0906", "R1306", "C0906v2", "R1306v2"],  
    ["R0910", "C1310", "R0910v2", "C1310v2"],  
    ["C1714", "R2114"],  
    ["C1007", "R1407"],  
    ["R0102", "C0502"],  
    ["R0203", "C0603"],  
    ["R2223", "R2223v2"],  
    ["C2219", "C2219v2"],  
    ["C2320", "C2320v2"],  
    ["R2324", "R2324v2"],  
    ["R1811", "R1811v2"],  
    ["C1815", "C1815v2"],  
    ["R1104", "R1104v2"],  
    ["C1108", "C1108v2"]  
]
```

Figura 7.1: Código AIC Caso 2 (Elaboración propia)

Restricciones de forzado

```
UDESS_list_force=  
[["I22",["R2223","C2219"]],  
["R2223",["C2320","R2324"]],  
["R2223v2",["C2320","R2324"]],  
["R2324",["C2421"]],  
["R2324v2",["C2421"]],  
["C2421",["R2114","C2320v2","C2219v2","I18"]],  
["R2114",["R1407","C2320v2","C2219v2","I18"]],  
["R1407",["C2320v2","C1613v2","C2219v2","C1512v2",  
"R1811v2","R2013v2","R2223v2","R1912v2","R2324v2","I18"]],  
  
["C2320",["C2017","R2013","R2324v2","I18"]],  
["C2320v2",["C2017","R2013","C2219v2","I18"]],  
["C2017",["C1714","R2324v2","R2013v2","C2219v2","I18"]],  
["C2017v2",["C1714","C2219v2","R2324v2","I18"]],  
["C1714",["R1407","R2013v2","R1912v2","C2219v2","R2324v2",  
"C1613v2","R2223v2","C1512v2","R1811v2","I18"]],  
  
["R2013",["C2017v2","R1306","C1310","R2324v2","C2219v2","I18"]],  
["R2013v2",["R2324v2","R1306","C1310","C2219v2","I18"]],  
["C1310",["C1007","R1306v2","C2017v2","R2324v2","C2219v2",  
"R2223v2","R1912v2","R1617v2","C1512v2","R1811v2","I18"]],  
  
["C1310v2",["C1007","C2017v2","R2324v2","C2219v2","R2223v2",  
"R1912v2","R1617v2","C1512v2","R1811v2","I18"]],  
  
["C1007",["R1306v2","C2017v2","R2324v2","C2219v2","R2223v2",  
"R1912v2","R1617v2","C1916v2","R1205v2","C0906v2","C1512v2",  
"R1811v2","R1516v2","C1815v2","R1104v2","C0805v2","I18"]],  
  
["R1306",["C0603","C1310v2","C2017v2","R2324v2","C2219v2",  
"R2223v2","R1912v2","R1617v2","R1811v2","C1512v2","I18"]],  
  
["R1306v2",["C0603","C2017v2","R2324v2","C2219v2","R2223v2",  
"R1912v2","R1617v2","R1811v2","C1512v2","I18"]],  
  
["C0603",["C1310v2","C2017v2","R2324v2","C2219v2","R2223v2",  
"R1912v2","R1617v2","C1916v2","R1205v2","R0910v2","C1512v2",  
"R1811v2","R1516v2","C1815v2","R1104v2","C0805v2","I18"]],
```

Figura 7.2: Código FAC Caso 2, parte 1 (Elaboración propia)

```

["C2219",["R1912","C1916","R2223v2"]],
["C2219v2",["R1912","C1916","I18"]],
["C1916",["R1617","C1613","R2223v2","R1912v2","I18"]],
["C1916v2",["R1617","C1613","R2223v2","I18"]],
["R1617",["C1714","C1613v2","R2223v2","R1912v2","I18","R1811v2",
"C1512v2"]],

["R1617v2",["C1714","R2223v2","R1912v2","I18","R1811v2",
"C1512v2"]],

["C1613",["C1310","R1306","R1617v2","R2223v2","R1912v2","I18",
"R1811v2","C1512v2"]],

["C1613v2",["C1310","R1306","R2223v2","R1912v2","I18","R1811v2",
"C1512v2"]],

["R1912",["R1205","C1209","R2223v2","C1916v2","I18"]],
["R1912v2",["R1205","C1209","R2223v2","I18"]],
["C1209",["R0910","C0906","R2223v2","C1916v2","I18","R1205v2",
"R1516v2","R1811v2"]],

["C1209v2",["R0910","C0906","R2223v2","C1916v2","I18","R1516v2",
"R1811v2"]],

["R0910",["C1007","R2223v2","C1916v2","I18","R1205v2","C0906v2",
"R1516v2","R1811v2","C1815v2","R1104v2","C0805v2"]],

["R0910v2",["C1007","R2223v2","C1916v2","I18","R1205v2","R1516v2",
"R1811v2","C1815v2","R1104v2","C0805v2"]],

["C0906",["C0603","R2223v2","C1916v2","I18","R1205v2","R0910v2",
"R1516v2","R1811v2","C1815v2","R1104v2","C0805v2"]],

["C0906v2",["C0603","R2223v2","C1916v2","I18","R1205v2","R1516v2",
"R1811v2","C1815v2","R1104v2","C0805v2"]],

["R1205",["C0502","R2223v2","C1916v2","I18","C1209v2","R1516v2",
"R1811v2"]],

```

Figura 7.3: Código FAC Caso 2, parte 2 (Elaboración propia)

```

["R1205v2", ["C0502", "R2223v2", "C1916v2", "I18", "R1516v2", "R1811v2"]],
["C0502", ["R0203", "R2223v2", "C1916v2", "I18", "C1209v2", "R1516v2",
"R1811v2", "C1815v2", "R1104v2", "R0809v2"]],

["R0203", ["R2223v2", "C1916v2", "I18", "C1209v2", "R1516v2", "R1811v2",
"C1815v2", "R1104v2", "R0809v2", "C1108v2"]],

["I18", ["R1811", "C1815"]],
["C1815", ["R1516", "C1512", "R1811v2"]],
["C1815v2", ["R1516", "C1512"]],
["R1516", ["R1617", "C1613", "R1811v2", "C1512v2"]],
["R1516v2", ["R1617", "C1613", "R1811v2"]],
["C1512", ["R1205", "C1209", "R1811v2", "R1516v2"]],
["C1512v2", ["R1205", "C1209", "R1811v2"]],
["R1811", ["R1104", "C1108"]],
["R1811v2", ["R1104", "C1108"]],
["C1108", ["R0809", "C0805", "C1815v2", "R1104v2"]],
["C1108v2", ["R0809", "C0805", "C1815v2"]],
["R0809", ["R0910", "C0906", "C1815v2", "R1104v2", "C0805v2"]],
["R0809v2", ["R0910", "C0906", "C1815v2", "R1104v2"]],
["C0805", ["C0502", "C1815v2", "R1104v2", "R0809v2"]],
["C0805v2", ["C0502", "C1815v2", "R1104v2"]],
["R1104", ["C0401"]],
["R1104v2", ["C0401"]],
["C0401", ["R0102", "C1815v2", "C1108v2"]],
["R0102", ["R0203", "C1108v2", "C1815v2"]]

```

Figura 7.4: Código FAC Caso 2, parte 3 (Elaboración propia)

Caso de estudio reducido

Actividades caso de estudio reducido

Tabla 7.6: Actividades caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)

ID	LARGO	ING	MAX RATE
I54	17	500	1
I48	33	1000	1
C5447	33	500	1
R5453	17	1000	1
C5346	33	500	1
R5352	17	1000	1
C5245	33	500	1
R5251	17	1000	1
C5144	33	500	1
R5150	17	1000	1
C5043	33	500	1
R5049	17	1000	1
C4942	33	500	1
R4835	33	1000	1
C4841	17	500	1
C4134	33	500	1
R4140	17	1000	1
R4734	33	1000	1
C4740	17	500	1
C4033	33	500	1
R4039	17	1000	1
R4633	33	1000	1
C4639	17	500	1
C3932	33	250	1
R3938	17	500	1
R4532	33	500	1
C4538	17	250	1
C3831	33	250	1
R3837	17	500	1
R4431	33	500	1
C4437	17	250	1
C3730	33	250	1
R3736	17	500	1
R4330	33	500	1
C4336	17	250	1
R3524	33	1000	1

Tabla 7.7: Actividades caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)

ID	LARGO	ING	MAX RATE
C3529	17	500	1
C2923	33	500	1
R2928	17	1000	1
R3423	33	1000	1
C3428	17	500	1
C2822	33	125	1
R2827	17	500	1
R3322	33	250	1
C3327	17	250	1
C2721	33	125	1
R2726	17	500	1
R3221	33	250	1
C3226	17	250	1
C2620	33	250	1
R2625	17	500	1
R3120	33	500	1
C3125	17	250	1
R2415	33	1000	1
C2419	17	500	1
C1914	33	500	1
R1918	17	250	1
R2314	33	1000	1
C2318	17	125	1
C1813	33	250	1
R1817	17	250	1
R2213	33	500	1
C2217	17	125	1
C1712	33	250	1
R1716	17	500	1
R2112	33	500	1
C2116	17	250	1
R1508	33	1000	1
C1511	17	500	1
C1107	33	250	1
R1110	17	500	1
R1407	33	500	1
C1410	17	250	1
C1006	33	250	1
R1009	17	500	1
R1306	33	500	1
C1309	17	250	1
R0803	33	1000	1

Tabla 7.8: Actividades caso de estudio reducido, parte 3 (Elaboración propia)

ID	LARGO	ING	MAX RATE
C0805	17	500	1
C0502	33	500	1
R0504	17	1000	1
R0702	33	1000	1
C0704	17	500	1
C0301	17	500	1
C5447v2	33	500	1
R5453v2	17	1000	1
C5346v2	33	500	1
R5352v2	17	1000	1
C5245v2	33	500	1
R5251v2	17	1000	1
C5144v2	33	500	1
R5150v2	17	1000	1
C5043v2	33	500	1
R5049v2	17	1000	1
R4835v2	33	1000	1
C4841v2	17	500	1
C4134v2	33	500	1
R4140v2	17	1000	1
R4734v2	33	1000	1
C4740v2	17	500	1
C4033v2	33	500	1
R4039v2	17	1000	1
R4633v2	33	1000	1
C4639v2	17	500	1
C3932v2	33	250	1
R3938v2	17	500	1
R4532v2	33	500	1
C4538v2	17	250	1
C3831v2	33	250	1
R3837v2	17	500	1
R4431v2	33	500	1
C4437v2	17	250	1
C3730v2	33	250	1
R3736v2	17	500	1
R4330v2	33	500	1
C4336v2	17	250	1
R3524v2	33	1000	1
C3529v2	17	500	1
C2923v2	33	500	1
R2928v2	17	1000	1

Tabla 7.9: Actividades caso de estudio reducido, parte 4 (Elaboración propia)

ID	LARGO	ING	MAX RATE
R3423v2	33	1000	1
C3428v2	17	500	1
C2822v2	33	125	1
R2827v2	17	500	1
R3322v2	33	250	1
C3327v2	17	250	1
C2721v2	33	125	1
R2726v2	17	500	1
R3221v2	33	250	1
C3226v2	17	250	1
C2620v2	33	250	1
R2625v2	17	500	1
R3120v2	33	500	1
C3125v2	17	250	1
R2415v2	33	1000	1
C2419v2	17	500	1
C1914v2	33	500	1
R1918v2	17	250	1
R2314v2	33	1000	1
C2318v2	17	125	1
C1813v2	33	250	1
R1817v2	17	250	1
R2213v2	33	500	1
C2217v2	17	125	1
C1712v2	33	250	1
R1716v2	17	500	1
R2112v2	33	500	1
C2116v2	17	250	1
R1508v2	33	1000	1
C1511v2	17	500	1
C1107v2	33	250	1
R1110v2	17	500	1
R1407v2	33	500	1
C1410v2	17	250	1
C1006v2	33	250	1
R1009v2	17	500	1
R1306v2	33	500	1
C1309v2	17	250	1
R0803v2	33	1000	1
C0805v2	17	500	1

Tabla 7.10: Actividades caso de estudio reducido, parte 5 (Elaboración propia)

ID	LARGO	ING	MAX RATE
C0502v2	33	500	1
R0504v2	17	1000	1
R0702v2	33	1000	1
C0704v2	17	500	1

Precedencias caso de estudio reducido

Tabla 7.11: Precedencias caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
R0803	C0301	1
R1508	R0803	2
C0805	C0502	3
R1407	R0702	4
C1107	R0702	5
C0805	R0504	6
R1407	C0704	7
C1107	C0704	8
R1508	C0805	9
R2415	R1508	10
C1511	C1107	11
R2314	R1407	12
C1914	R1407	13
R1110	C1006	14
C1410	C1006	15
R2213	R1306	16
C1813	R1306	17
R1110	R1009	18
C1410	R1009	19
R2213	C1309	20
C1813	C1309	21
C1511	R1110	22
R2314	C1410	23
C1914	C1410	24
R2415	C1511	25
R1817	C1712	26
C2217	C1712	27
R3221	R2112	28
C2721	R2112	29
R1918	C1813	30
C2318	C1813	31
R3322	R2213	32
C2822	R2213	33
C2419	C1914	34
R3423	R2314	35
C2923	R2314	36
R3524	R2415	37
R1817	R1716	38
C2217	R1716	39
R3221	C2116	40

Tabla 7.12: Precedencias caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
C2721	C2116	41
R1918	R1817	42
C2318	R1817	43
R3322	C2217	44
C2822	C2217	45
C2419	R1918	46
R3423	C2318	47
C2923	C2318	48
R3524	C2419	49
R2726	C2620	50
C3226	C2620	51
R4431	R3120	52
C3831	R3120	53
R2827	C2721	54
C3327	C2721	55
R4532	R3221	56
C3932	R3221	57
R2928	C2822	58
C3428	C2822	59
R4633	R3322	60
C4033	R3322	61
C3529	C2923	62
R4734	R3423	63
C4134	R3423	64
R4835	R3524	65
R2726	R2625	66
C3226	R2625	67
R4431	C3125	68
C3831	C3125	69
R2827	R2726	70
C3327	R2726	71
R4532	C3226	72
C3932	C3226	73
R2928	R2827	74
C3428	R2827	75
R4633	C3327	76
C4033	C3327	77
C3529	R2928	78
R4734	C3428	79
C4134	C3428	80

Tabla 7.13: Precedencias caso de estudio reducido, parte 3 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
R4835	C3529	81
C5043	R4330	82
R3837	C3730	83
C4437	C3730	84
C5144	R4431	85
R3938	C3831	86
C4538	C3831	87
C5245	R4532	88
R4039	C3932	89
C4639	C3932	90
C5346	R4633	91
R4140	C4033	92
C4740	C4033	93
C5447	R4734	94
C4841	C4134	95
I48	R4835	96
R3837	R3736	97
C4437	R3736	98
C5043	C4336	99
R3938	R3837	100
C4538	R3837	101
C5144	C4437	102
R4039	R3938	103
C4639	R3938	104
C5245	C4538	105
R4140	R4039	106
C4740	R4039	107
C5346	C4639	108
C4841	R4140	109
C5447	C4740	110
I48	C4841	111
R5049	C4942	112
R5150	C5043	113
R5251	C5144	114
R5352	C5245	115
R5453	C5346	116
I54	C5447	117
R5150	R5049	118
R5251	R5150	119
R5352	R5251	120

Tabla 7.14: Precedencias caso de estudio reducido, parte 4 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
R5453	R5352	121
I54	R5453	122
R5453	C5447v2	123
C5447	R5453v2	124
R5352	C5346v2	125
C5346	R5352v2	126
R5251	C5245v2	127
C5245	R5251v2	128
R5150	C5144v2	129
C5144	R5150v2	130
R5049	C5043v2	131
C5043	R5049v2	132
C4841	R4835v2	133
R4835	C4841v2	134
R4140	C4134v2	135
C4134	R4140v2	136
C4740	R4734v2	137
R4734	C4740v2	138
R4039	C4033v2	139
C4033	R4039v2	140
C4639	R4633v2	141
R4633	C4639v2	142
R3938	C3932v2	143
C3932	R3938v2	144
C4538	R4532v2	145
R4532	C4538v2	146
R3837	C3831v2	147
C3831	R3837v2	148
C4437	R4431v2	149
R4431	C4437v2	150
R3736	C3730v2	151
C3730	R3736v2	152
C4336	R4330v2	153
R4330	C4336v2	154
C3529	R3524v2	155
R3524	C3529v2	156
R2928	C2923v2	157
C2923	R2928v2	158
C3428	R3423v2	159
R3423	C3428v2	160

Tabla 7.15: Precedencias caso de estudio reducido, parte 5 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
R2827	C2822v2	161
C2822	R2827v2	162
C3327	R3322v2	163
R3322	C3327v2	164
R2726	C2721v2	165
C2721	R2726v2	166
C3226	R3221v2	167
R3221	C3226v2	168
R2625	C2620v2	169
C2620	R2625v2	170
C3125	R3120v2	171
R3120	C3125v2	172
C2419	R2415v2	173
R2415	C2419v2	174
R1918	C1914v2	175
C1914	R1918v2	176
C2318	R2314v2	177
R2314	C2318v2	178
R1817	C1813v2	179
C1813	R1817v2	180
C2217	R2213v2	181
R2213	C2217v2	182
R1716	C1712v2	183
C1712	R1716v2	184
C2116	R2112v2	185
R2112	C2116v2	186
C1511	R1508v2	187
R1508	C1511v2	188
R1110	C1107v2	189
C1107	R1110v2	190
C1410	R1407v2	191
R1407	C1410v2	192
R1009	C1006v2	193
C1006	R1009v2	194
C1309	R1306v2	195
R1306	C1309v2	196
C0805	R0803v2	197
R0803	C0805v2	198
R0504	C0502v2	199
C0502	R0504v2	200

Tabla 7.16: Precedencias caso de estudio reducido, parte 6 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
C0704	R0702v2	201
R0702	C0704v2	202
R0803v2	C0301	203
R1508v2	R0803	204
C0805v2	C0502	205
R1407v2	R0702	206
C1107v2	R0702	207
C0805v2	R0504	208
R1407v2	C0704	209
C1107v2	C0704	210
R1508v2	C0805	211
R2415v2	R1508	212
C1511v2	C1107	213
R2314v2	R1407	214
C1914v2	R1407	215
R1110v2	C1006	216
C1410v2	C1006	217
R2213v2	R1306	218
C1813v2	R1306	219
R1110v2	R1009	220
C1410v2	R1009	221
R2213v2	C1309	222
C1813v2	C1309	223
C1511v2	R1110	224
R2314v2	C1410	225
C1914v2	C1410	226
R2415v2	C1511	227
R1817v2	C1712	228
C2217v2	C1712	229
R3221v2	R2112	230
C2721v2	R2112	231
R1918v2	C1813	232
C2318v2	C1813	233
R3322v2	R2213	234
C2822v2	R2213	235
C2419v2	C1914	236
R3423v2	R2314	237
C2923v2	R2314	238
R3524v2	R2415	239
R1817v2	R1716	240

Tabla 7.17: Precedencias caso de estudio reducido, parte 7 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
C2217v2	R1716	241
R3221v2	C2116	242
C2721v2	C2116	243
R1918v2	R1817	244
C2318v2	R1817	245
R3322v2	C2217	246
C2822v2	C2217	247
C2419v2	R1918	248
R3423v2	C2318	249
C2923v2	C2318	250
R3524v2	C2419	251
R2726v2	C2620	252
C3226v2	C2620	253
R4431v2	R3120	254
C3831v2	R3120	255
R2827v2	C2721	256
C3327v2	C2721	257
R4532v2	R3221	258
C3932v2	R3221	259
R2928v2	C2822	260
C3428v2	C2822	261
R4633v2	R3322	262
C4033v2	R3322	263
C3529v2	C2923	264
R4734v2	R3423	265
C4134v2	R3423	266
R4835v2	R3524	267
R2726v2	R2625	268
C3226v2	R2625	269
R4431v2	C3125	270
C3831v2	C3125	271
R2827v2	R2726	272
C3327v2	R2726	273
R4532v2	C3226	274
C3932v2	C3226	275
R2928v2	R2827	276
C3428v2	R2827	277
R4633v2	C3327	278
C4033v2	C3327	279
C3529v2	R2928	280

Tabla 7.18: Precedencias caso de estudio reducido, parte 8 (Elaboración propia)

Predecesor	Sucesor	Grupo
R4734v2	C3428	281
C4134v2	C3428	282
R4835v2	C3529	283
C5043v2	R4330	284
R3837v2	C3730	285
C4437v2	C3730	286
C5144v2	R4431	287
R3938v2	C3831	288
C4538v2	C3831	289
C5245v2	R4532	290
R4039v2	C3932	291
C4639v2	C3932	292
C5346v2	R4633	293
R4140v2	C4033	294
C4740v2	C4033	295
C5447v2	R4734	296
C4841v2	C4134	297
R3837v2	R3736	298
C4437v2	R3736	299
C5043v2	C4336	300
R3938v2	R3837	301
C4538v2	R3837	302
C5144v2	C4437	303
R4039v2	R3938	304
C4639v2	R3938	305
C5245v2	C4538	306
R4140v2	R4039	307
C4740v2	R4039	308
C5346v2	C4639	309
C4841v2	R4140	310
C5447v2	C4740	311
R5049v2	C4942	312
R5150v2	C5043	313
R5251v2	C5144	314
R5352v2	C5245	315
R5453v2	C5346	316
R5150v2	R5049	317
R5251v2	R5150	318
R5352v2	R5251	319
R5453v2	R5352	320

Código restricciones caso de estudio reducido

Restricciones de incompatibilidad

```
UDESS_list_incomp_horiz=[["C4740", "R4140", "C4740v2", "R4140v2"],
["C4134", "R4734", "C4134v2", "R4734v2"],
["C4639", "R4039", "C4639v2", "R4039v2"],
["C4033", "R4633", "C4033v2", "R4633v2"],
["C4538", "R3938", "C4538v2", "R3938v2"],
["C3932", "R4532", "C3932v2", "R4532v2"],
["C4437", "R3837", "C4437v2", "R3837v2"],
["C3831", "R4431", "C3831v2", "R4431v2"],
["C4336", "R3736", "C4336v2", "R3736v2"],
["C3730", "R4330", "C3730v2", "R4330v2"],
["C2923", "R3423", "C2923v2", "R3423v2"],
["C3428", "R2928", "C3428v2", "R2928v2"],
["C2822", "R3322", "C2822v2", "R3322v2"],
["C3327", "R2827", "C3327v2", "R2827v2"],
["C2721", "R3221", "C2721v2", "R3221v2"],
["C3226", "R2726", "C3226v2", "R2726v2"],
["C2620", "R3120", "C2620v2", "R3120v2"],
["C3125", "R2625", "C3125v2", "R2625v2"],
["C1914", "R2314", "C1914v2", "R2314v2"],
["C2318", "R1918", "C2318v2", "R1918v2"],
["C1813", "R2213", "C1813v2", "R2213v2"],
["C2217", "R1817", "C2217v2", "R1817v2"],
["C1712", "R2112", "C1712v2", "R2112v2"],
["C2116", "R1716", "C2116v2", "R1716v2"],
["C1107", "R1407", "C1107v2", "R1407v2"],
["C1410", "R1110", "C1410v2", "R1110v2"],
["C1006", "R1306", "C1006v2", "R1306v2"],
["C1309", "R1009", "C1309v2", "R1009v2"],
["C0502", "R0702", "C0502v2", "R0702v2"],
["C0704", "R0504", "C0704v2", "R0504v2"],
["C5447", "C5447v2"],
["C5346", "C5346v2"],
["C5245", "C5245v2"],
["C5144", "C5144v2"],
["C5043", "C5043v2"],
["R5453", "R5453v2"],
["R5352", "R5352v2"],
```

Figura 7.5: Código AIC caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)

```
["R5251", "R5251v2"],  
["R5150", "R5150v2"],  
["R5049", "R5049v2"],  
["C4841", "C4841v2"],  
["C3529", "C3529v2"],  
["C2419", "C2419v2"],  
["C1511", "C1511v2"],  
["C0805", "C0805v2"],  
["R4835", "R4835v2"],  
["R3524", "R3524v2"],  
["R2415", "R2415v2"],  
["R1508", "R1508v2"],  
["R0803", "R0803v2"]  
]
```

Figura 7.6: Código AIC caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)

Restricciones de forzado

```
UDESS_list_force=  
[["I54",["C5447","R5453"]],  
["R5453",["C5346","R5352"]],  
["R5453v2",["C5346","R5352"]],  
["R5352",["C5245","R5251"]],  
["R5352v2",["C5245","R5251"]],  
["R5251",["C5144","R5150"]],  
["R5251v2",["C5144","R5150"]],  
["R5150",["C5043","R5049"]],  
["R5150v2",["C5043","R5049"]],  
["R5049",["C4639"]],  
["R5049v2",["C4639"]],  
["C5043",["C4336","R4330","R5049v2","C5144v2","C5245v2",  
"C5346v2","C5447v2","I48"]],  
  
["C5043v2",["C4336","R4330","C5144v2","C5245v2","C5346v2",  
"C5447v2","I48"]],  
  
["C5144",["C4437","R4431","R5150v2","C5245v2","C5346v2",  
"C5447v2","I48"]],  
  
["C5144v2",["C4437","R4431","C5245v2","C5346v2","C5447v2",  
"I48"]],  
  
["C5245",["C4538","R4532","R5251v2","C5346v2","C5447v2",  
"I48"]],  
  
["C5245v2",["C4538","R4532","C5346v2","C5447v2","I48"]],  
["C5346",["C4639","R4633","R5352v2","C5447v2","I48"]],  
["C5346v2",["C4639","R4633","C5447v2","I48"]],  
["C5447",["C4740","R4734","R5453v2","I48"]],  
["C5447v2",["C4740","R4734","I48"]],  
["C4336",["R4330v2","R5049v2","C5144v2","C5245v2","C5346v2",  
"C5447v2","I48"]],  
  
["C4336v2",["R5049v2","C5144v2","C5245v2","C5346v2","C5447v2",  
"I48"]],
```

Figura 7.7: Código FAC caso de estudio reducido, parte 1 (Elaboración propia)

```

["R4330",["C4336v2","R5049v2","C5144v2","C5245v2","C5346v2",
"C5447v2","I48"]],

["R4330v2",["R5049v2","C5144v2","C5245v2","C5346v2","C5447v2",
"I48"]],

["C4437",["R3736","C3730","R4431v2","R5150v2","C5245v2",
"C5346v2","C5447v2","I48"]],

["C4437v2",["R3736","C3730","R5150v2","C5245v2","C5346v2",
"C5447v2","I48"]],

["R4431",["R3120","C3125","C4437v2","R5150v2","C5245v2",
"C5346v2","C5447v2","I48"]],

["R4431v2",["R3120","C3125","R5150v2","C5245v2","C5346v2",
"C5447v2","I48"]],

["C4538",["R3837","C3831","R4532v2","R5251v2","C5346v2",
"C5447v2","I48"]],

["C4538v2",["R3837","C3831","R5251v2","C5346v2","C5447v2",
"I48"]],

["R4532",["R3221","C3226","C4538v2","R5251v2","C5346v2",
"C5447v2","I48"]],

["R4532v2",["R3221","C3226","R5251v2","C5346v2","C5447v2",
"I48"]],

["C4639",["R3938","C3932","R4633v2","R5352v2","C5447v2",
"I48"]],

["C4639v2",["R3938","C3932","R5352v2","C5447v2","I48"]],
["R4633",["R3322","C3327","C4639v2","R5352v2","C5447v2",
"I48"]],

```

Figura 7.8: Código FAC caso de estudio reducido, parte 2 (Elaboración propia)

```

["R4633v2",["R3322","C3327","R5352v2","C5447v2","I48"]],
["C4740",["R4039","C4033","R4734v2","R5453v2","I48"]],
["C4740v2",["R4039","C4033","R5453v2","I48"]],
["R4734",["R3423","C3428","C4740v2","R5453v2","I48"]],
["R4734v2",["R3423","C3428","R5453v2","I48"]],
["I48",["C4841","R4835"]],
["R4835",["C3529","R3524"]],
["R4835v2",["C3529","R3524"]],
["R3524",["C2419","R2415"]],
["R3524v2",["C2419","R2415"]],
["R2415",["C1511","R1508"]],
["R2415v2",["C1511","R1508"]],
["R1508",["C0805","R0803"]],
["R1508v2",["C0805","R0803"]],
["R0803",["C0301"]],
["C4841",["C4134","R4140","R4835v2","I54"]],
["C4841v2",["C4134","R4140","I54"]],
["C4134",["C3428","R3423","R4140v2","R4835v2","I54"]],
["C4134v2",["C3428","R3423","R4835v2","I54"]],
["R4140",["C4033","R4039","C4134v2","R4835v2","I54"]],
["R4140v2",["C4033","R4039","R4835v2","I54"]],
["C4033",["C3327","R3322","R4039v2","C4134v2","R4835v2",
"I54","R4734v2","R5453v2","I48"]],

["C4033v2",["C3327","R3322","C4134v2","R4835v2","I54",
"R4734v2","R5453v2","I48"]],

["R4039",["C3932","R3938","C4033v2","C4134v2","R4835v2",
"I54","R4734v2","R5453v2","I48"]],

["R4039v2",["C3932","R3938","C4134v2","R4835v2","I54",
"R4734v2","R5453v2","I48"]],

["C3932",["C3226","R3221","R3938v2","C4033v2","C4134v2",
"R4835v2","I54","R4633v2","R5352v2","C5447v2","R4734v2",
"R5453v2","I48"]],

```

Figura 7.9: Código FAC caso de estudio reducido, parte 3 (Elaboración propia)

```

["C3932v2", ["C3226", "R3221", "C4033v2", "C4134v2", "R4835v2",
"I54", "R4633v2", "R5352v2", "C5447v2", "R4734v2", "R5453v2",
"I48"]],

["R3938", ["C3831", "R3837", "C3932v2", "C4033v2", "C4134v2",
"R4835v2", "I54", "R4633v2", "R5352v2", "C5447v2", "R4734v2",
"R5453v2", "I48"]],

["R3938v2", ["C3831", "R3837", "C4033v2", "C4134v2", "R4835v2",
"I54", "R4633v2", "R5352v2", "C5447v2", "R4734v2", "R5453v2",
"I48"]],

["C3831", ["C3125", "R3120", "R3837v2", "C3932v2", "C4033v2",
"C4134v2", "R4835v2", "I54", "R4532v2", "R5251v2", "C5346v2",
"R4633v2", "R5352v2", "C5447v2", "R4734v2", "R5453v2", "I48"]],

["C3831v2", ["C3125", "R3120", "C3932v2", "C4033v2", "C4134v2",
"R4835v2", "I54", "R4532v2", "R5251v2", "C5346v2", "R4633v2",
"R5352v2", "C5447v2", "R4734v2", "R5453v2", "I48"]],

["R3837", ["C3730", "R3736", "C3831v2", "C3932v2", "C4033v2",
"C4134v2", "R4835v2", "I54", "R4532v2", "R5251v2", "C5346v2",
"R4633v2", "R5352v2", "C5447v2", "R4734v2", "R5453v2", "I48"]],

["R3837v2", ["C3730", "R3736", "C3932v2", "C4033v2", "C4134v2",
"R4835v2", "I54", "R4532v2", "R5251v2", "C5346v2", "R4633v2",
"R5352v2", "C5447v2", "R4734v2", "R5453v2", "I48"]],

["C3730", ["R3736v2", "C3831v2", "C3932v2", "C4033v2", "C4134v2",
"R4835v2", "I54", "R4431v2", "R5150v2", "C5245v2", "R4532v2",
"R5251v2", "C5346v2", "R4633v2", "R5352v2", "C5447v2", "R4734v2",
"R5453v2", "I48"]],

["C3730v2", ["C3831v2", "C3932v2", "C4033v2", "C4134v2", "R4835v2",
"I54", "R4431v2", "R5150v2", "C5245v2", "R4532v2", "R5251v2",
"C5346v2", "R4633v2", "R5352v2", "C5447v2", "R4734v2", "R5453v2",
"I48"]],

```

Figura 7.10: Código FAC caso de estudio reducido, parte 4 (Elaboración propia)

```

["R3736",["C3730v2","C3831v2","C3932v2","C4033v2","C4134v2",
"R4835v2","I54","R4431v2","R5150v2","C5245v2","R4532v2",
"R5251v2","C5346v2","R4633v2","R5352v2","C5447v2","R4734v2",
"R5453v2","I48"]],

["R3736v2",["C3831v2","C3932v2","C4033v2","C4134v2","R4835v2",
"I54","R4431v2","R5150v2","C5245v2","R4532v2","R5251v2",
"C5346v2","R4633v2","R5352v2","C5447v2","R4734v2","R5453v2",
"I48"]],

["C3529",["C2923","R2928","R3524v2","C4841v2","I54"]],
["C3529v2",["C2923","R2928","C4841v2","I54"]],
["C3428",["C2822","R2827","R3423v2","R4140v2","R4835v2","I54",
"C4740v2","R5453v2","I48"]],

["C3428v2",["C2822","R2827","R4140v2","R4835v2","I54",
"C4740v2","R5453v2","I48"]],

["R3423",["C2318","R2314","C3428v2","R4140v2","R4835v2",
"I54","C4740v2","R5453v2","I48"]],

["R3423v2",["C2318","R2314","R4140v2","R4835v2","I54",
"C4740v2","R5453v2","I48"]],

["C3327",["C2721","R2726","R3322v2","R4039v2","C4134v2",
"R4835v2","I54","R4734v2","R5453v2","I48","C4639v2",
"R5352v2","C5447v2"]],
["C3327v2",["C2721","R2726","R4039v2","C4134v2","R4835v2",
"I54","R4734v2","R5453v2","I48","C4639v2","R5352v2","C5447v2"]],

["R3322",["C3327v2","R4039v2","C4134v2","R4835v2","I54",
"R4734v2","R5453v2","I48","C4639v2","R5352v2","C5447v2"]],

["R3322v2",["R4039v2","C4134v2","R4835v2","I54","R4734v2",
"R5453v2","I48","C4639v2","R5352v2","C5447v2"]],

["C3226",["C2620","R2625","R3221v2","R3938v2","C4033v2",
"C4134v2","R4835v2","I54","R4734v2","R5453v2","I48","R4633v2",
"R5352v2","C5447v2","C4538v2","R5251v2","C5346v2"]],

```

Figura 7.11: Código FAC caso de estudio reducido, parte 5 (Elaboración propia)

```

["C3226v2", ["C2620", "R2625", "R3938v2", "C4033v2", "C4134v2",
"R4835v2", "I54", "R4734v2", "R5453v2", "I48", "R4633v2", "R5352v2",
"C5447v2", "C4538v2", "R5251v2", "C5346v2"]],

["R3221", ["C2116", "R2112", "C3226v2", "R3938v2", "C4033v2",
"C4134v2", "R4835v2", "I54", "R4734v2", "R5453v2", "I48", "R4633v2",
"R5352v2", "C5447v2", "C4538v2", "R5251v2", "C5346v2"]],

["R3221v2", ["C2116", "R2112", "R3938v2", "C4033v2", "C4134v2",
"R4835v2", "I54", "R4734v2", "R5453v2", "I48", "R4633v2", "R5352v2",
"C5447v2", "C4538v2", "R5251v2", "C5346v2"]],

["C3125", ["R3120v2", "R3837v2", "C3932v2", "C4033v2", "C4134v2",
"R4835v2", "I54", "R4734v2", "R5453v2", "I48", "R4633v2", "R5352v2",
"C5447v2", "R4532v2", "R5251v2", "C5346v2", "C4437v2", "R5150v2",
"C5245v2"]],

["C3125v2", ["R3837v2", "C3932v2", "C4033v2", "C4134v2", "R4835v2",
"I54", "R4734v2", "R5453v2", "I48", "R4633v2", "R5352v2", "C5447v2",
"R4532v2", "R5251v2", "C5346v2", "C4437v2", "R5150v2", "C5245v2"]],

["R3120", ["C3125v2", "R3837v2", "C3932v2", "C4033v2", "C4134v2",
"R4835v2", "I54", "R4734v2", "R5453v2", "I48", "R4633v2", "R5352v2",
"C5447v2", "R4532v2", "R5251v2", "C5346v2", "C4437v2", "R5150v2",
"C5245v2"]],

["R3120v2", ["R3837v2", "C3932v2", "C4033v2", "C4134v2", "R4835v2",
"I54", "R4734v2", "R5453v2", "I48", "R4633v2", "R5352v2", "C5447v2",
"R4532v2", "R5251v2", "C5346v2", "C4437v2", "R5150v2", "C5245v2"]],

["C2923", ["C2318", "R2314", "R2928v2", "R3524v2", "C4841v2", "I54"]],
["C2923v2", ["C2318", "R2314", "R3524v2", "C4841v2", "I54"]],
["R2928", ["C2822", "R2827", "C2923v2", "R3524v2", "C4841v2", "I54"]],
["R2928v2", ["C2822", "R2827", "R3524v2", "C4841v2", "I54"]],
["C2822", ["R2827v2", "C2923v2", "R3524v2", "C4841v2", "I54",
"R3423v2", "R4140v2", "R4835v2", "C4740v2", "R5453v2", "I48"]],

```

Figura 7.12: Código FAC caso de estudio reducido, parte 6 (Elaboración propia)

```

["C2822v2",["C2923v2","R3524v2","C4841v2","I54","R3423v2",
"R4140v2","R4835v2","C4740v2","R5453v2","I48"]],

["R2827",["C2721","R2726","C2822v2","C2923v2","R3524v2",
"C4841v2","I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2",
"R5453v2","I48"]],

["R2827v2",["C2721","R2726","C2923v2","R3524v2","C4841v2",
"I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2","R5453v2",
"I48"]],

["C2721",["C2116","R2112","R2726v2","C2822v2","C2923v2",
"R3524v2","C4841v2","I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2",
"C4740v2","R5453v2","I48","R3322v2","R4039v2","C4134v2",
"R4734v2","C4639v2","R5352v2","C5447v2"]],

["C2721v2",["C2116","R2112","C2822v2","C2923v2","R3524v2",
"C4841v2","I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2",
"R5453v2","I48","R3322v2","R4039v2","C4134v2","R4734v2",
"C4639v2","R5352v2","C5447v2"]],

["R2726",["C2620","R2625","C2721v2","C2822v2","C2923v2",
"R3524v2","C4841v2","I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2",
"C4740v2","R5453v2","I48","R3322v2","R4039v2","C4134v2",
"R4734v2","C4639v2","R5352v2","C5447v2"]],

["R2726v2",["C2620","R2625","C2822v2","C2923v2","R3524v2",
"C4841v2","I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2",
"R5453v2","I48","R3322v2","R4039v2","C4134v2","R4734v2",
"C4639v2","R5352v2","C5447v2"]],

["C2620",["R2625v2","C2721v2","C2822v2","C2923v2","R3524v2",
"C4841v2","I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2",
"R5453v2","I48","R3322v2","R4039v2","C4134v2","R4734v2",
"C4639v2","R5352v2","C5447v2","R3221v2","R3938v2","C4033v2",
"R4633v2","C4538v2","R5251v2","C5346v2"]],

```

Figura 7.13: Código FAC caso de estudio reducido, parte 7 (Elaboración propia)

```

["C2620v2",["C2721v2","C2822v2","C2923v2","R3524v2","C4841v2",
"I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2","R5453v2","I48",
"R3322v2","R4039v2","C4134v2","R4734v2","C4639v2","R5352v2",
"C5447v2","R3221v2","R3938v2","C4033v2","R4633v2","C4538v2",
"R5251v2","C5346v2"]],

["R2625",["C2620v2","C2721v2","C2822v2","C2923v2","R3524v2",
"C4841v2","I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2",
"R5453v2","I48","R3322v2","R4039v2","C4134v2","R4734v2",
"C4639v2","R5352v2","C5447v2","R3221v2","R3938v2","C4033v2",
"R4633v2","C4538v2","R5251v2","C5346v2"]],

["R2625v2",["C2721v2","C2822v2","C2923v2","R3524v2","C4841v2",
"I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2","R5453v2","I48",
"R3322v2","R4039v2","C4134v2","R4734v2","C4639v2","R5352v2",
"C5447v2","R3221v2","R3938v2","C4033v2","R4633v2","C4538v2",
"R5251v2","C5346v2"]],

["C2419",["C1914","R1918","R2415v2","C3529v2","C4841v2","I54"]],
["C2419v2",["C1914","R1918","C3529v2","C4841v2","I54"]],
["C2318",["R2314v2","R2928v2","R3524v2","C4841v2","I54",
"C3428v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2","R5453v2","I48"]],

["C2318v2",["R2928v2","R3524v2","C4841v2","I54","C3428v2",
"R4140v2","R4835v2","C4740v2","R5453v2","I48"]],

["R2314",["C1410","R1407","C2318v2","R2928v2","R3524v2",
"C4841v2","I54","C3428v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2",
"R5453v2","I48"]],

["R2314v2",["C1410","R1407","R2928v2","R3524v2","C4841v2",
"I54","C3428v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2","R5453v2","I48"]],

["C2116",["R2112v2","R2726v2","C2822v2","C2923v2","R3524v2",
"C4841v2","I54","R3423v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2",
"R5453v2","I48","R3322v2","R4039v2","C4134v2","R4734v2",
"C4639v2","R5352v2","C5447v2","C3226v2","R3938v2","C4033v2",
"R4633v2","C4538v2","R5251v2","C5346v2"]],

```

Figura 7.14: Código FAC caso de estudio reducido, parte 8 (Elaboración propia)

```

["C2116v2", ["R2726v2", "C2822v2", "C2923v2", "R3524v2", "C4841v2",
"I54", "R3423v2", "R4140v2", "R4835v2", "C4740v2", "R5453v2", "I48",
"R3322v2", "R4039v2", "C4134v2", "R4734v2", "C4639v2", "R5352v2",
"C5447v2", "C3226v2", "R3938v2", "C4033v2", "R4633v2", "C4538v2",
"R5251v2", "C5346v2"]],

["R2112", ["C2116v2", "R2726v2", "C2822v2", "C2923v2", "R3524v2",
"C4841v2", "I54", "R3423v2", "R4140v2", "R4835v2", "C4740v2",
"R5453v2", "I48", "R3322v2", "R4039v2", "C4134v2", "R4734v2",
"C4639v2", "R5352v2", "C5447v2", "C3226v2", "R3938v2", "C4033v2",
"R4633v2", "C4538v2", "R5251v2", "C5346v2"]],

["R2112v2", ["R2726v2", "C2822v2", "C2923v2", "R3524v2", "C4841v2",
"I54", "R3423v2", "R4140v2", "R4835v2", "C4740v2", "R5453v2", "I48",
"R3322v2", "R4039v2", "C4134v2", "R4734v2", "C4639v2", "R5352v2",
"C5447v2", "C3226v2", "R3938v2", "C4033v2", "R4633v2", "C4538v2",
"R5251v2", "C5346v2"]],

["C1914", ["C1410", "R1407", "R1918v2", "R2415v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54"]],

["C1914v2", ["C1410", "R1407", "R2415v2", "C3529v2", "C4841v2",
"I54"]],

["R1918", ["C1914v2", "R2415v2", "C3529v2", "C4841v2", "I54"]],
["R1918v2", ["R2415v2", "C3529v2", "C4841v2", "I54"]],
["C1511", ["C1107", "R1110", "R1508v2", "C2419v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54"]],

["C1511v2", ["C1107", "R1110", "C2419v2", "C3529v2", "C4841v2",
"I54"]],

["C1410v2", ["C1006", "R1009", "R1918v2", "R2415v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54", "C2318v2", "R2928v2", "R3524v2", "C3428v2",
"R4140v2", "R4835v2", "C4740v2", "R5453v2", "I48"]],

["R1407", ["C0704", "R0702", "C1410v2", "R1918v2", "R2415v2",
"C3529v2", "C4841v2", "I54", "C2318v2", "R2928v2", "R3524v2",
"C3428v2", "R4140v2", "R4835v2", "C4740v2", "R5453v2", "I48"]],

```

Figura 7.15: Código FAC caso de estudio reducido, parte 9 (Elaboración propia)

```

["R1407v2",["C0704","R0702","R1918v2","R2415v2","C3529v2",
"C4841v2","I54","C2318v2","R2928v2","R3524v2","C3428v2",
"R4140v2","R4835v2","C4740v2","R5453v2","I48"]],

["C1107",["C0704","R0702","R1110v2","R1508v2","C2419v2",
"C3529v2","C4841v2","I54"]],

["C1107v2",["C0704","R0702","R1508v2","C2419v2","C3529v2",
"C4841v2","I54"]],

["R1110",["C1006","R1009","C1107v2","R1508v2","C2419v2",
"C3529v2","C4841v2","I54"]],

["R1110v2",["C1006","R1009","R1508v2","C2419v2","C3529v2",
"C4841v2","I54"]],

["C1006",["R1009v2","C1107v2","R1508v2","C2419v2","C3529v2",
"C4841v2","I54","R1407v2","R1918v2","R2415v2","C2318v2",
"R2928v2","R3524v2","C3428v2","R4140v2","R4835v2","C4740v2",
"R5453v2","I48"]],

["C1006v2",["C1107v2","R1508v2","C2419v2","C3529v2",
"C4841v2","I54","R1407v2","R1918v2","R2415v2","C2318v2",
"R2928v2","R3524v2","C3428v2","R4140v2","R4835v2",
"C4740v2","R5453v2","I48"]],

["R1009",["C1006v2","C1107v2","R1508v2","C2419v2",
"C3529v2","C4841v2","I54","R1407v2","R1918v2","R2415v2",
"C2318v2","R2928v2","R3524v2","C3428v2","R4140v2",
"R4835v2","C4740v2","R5453v2","I48"]],

["R1009v2",["C1107v2","R1508v2","C2419v2","C3529v2",
"C4841v2","I54","R1407v2","R1918v2","R2415v2","C2318v2",
"R2928v2","R3524v2","C3428v2","R4140v2","R4835v2",
"C4740v2","R5453v2","I48"]],

["C0805",["C0502","R0504","R0803v2","C1511v2","C2419v2",
"C3529v2","C4841v2","I54"]],

```

Figura 7.16: Código FAC caso de estudio reducido, parte 10 (Elaboración propia)

```

["C0805v2", ["C0502", "R0504", "C1511v2", "C2419v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54"]],

["C0704", ["R0702v2", "R1110v2", "R1508v2", "C2419v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54", "C1410v2", "R1918v2", "R2415v2", "C2318v2",
"R2928v2", "R3524v2", "C3428v2", "R4140v2", "R4835v2", "C4740v2",
"R5453v2", "I48"]],

["C0704v2", ["R1110v2", "R1508v2", "C2419v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54", "C1410v2", "R1918v2", "R2415v2", "C2318v2",
"R2928v2", "R3524v2", "C3428v2", "R4140v2", "R4835v2", "C4740v2",
"R5453v2", "I48"]],

["R0702", ["C0704v2", "R1110v2", "R1508v2", "C2419v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54", "C1410v2", "R1918v2", "R2415v2", "C2318v2",
"R2928v2", "R3524v2", "C3428v2", "R4140v2", "R4835v2", "C4740v2",
"R5453v2", "I48"]],

["R0702v2", ["R1110v2", "R1508v2", "C2419v2", "C3529v2", "C4841v2",
"I54", "C1410v2", "R1918v2", "R2415v2", "C2318v2", "R2928v2",
"R3524v2", "C3428v2", "R4140v2", "R4835v2", "C4740v2", "R5453v2",
"I48"]],

["C0502", ["R0504v2", "R0803v2", "C1511v2", "C2419v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54"]],

["C0502v2", ["R0803v2", "C1511v2", "C2419v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54"]],

["R0504", ["C0502v2", "R0803v2", "C1511v2", "C2419v2",
"C3529v2", "C4841v2", "I54"]],

["R0504v2", ["R0803v2", "C1511v2", "C2419v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54"]],

["C0301", ["C0805v2", "C1511v2", "C2419v2", "C3529v2",
"C4841v2", "I54"]]
]

```

Figura 7.17: Código FAC caso de estudio reducido, parte 11 (Elaboración propia)