

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes de la Empresa . . . . .	1
1.2. Descripción del Proceso de Transporte de Mineral . . . . .	1
1.2.1. Interior Mina . . . . .	2
1.2.2. Transporte Principal . . . . .	3
1.2.3. Plantas de Procesamiento . . . . .	5
1.3. Motivación . . . . .	6
1.3.1. Ejemplo Oportunidades de Mejora . . . . .	9
1.3.2. Sincronización de Trenes y Asignación de Trenes a Piques . . . . .	13
1.4. Objetivos . . . . .	14
1.4.1. Objetivo General . . . . .	14
1.4.2. Objetivos Específicos . . . . .	14
1.5. Alcances y Limitaciones . . . . .	14
1.6. Metodología . . . . .	15
1.7. Estructura de la Tesis . . . . .	16
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>17</b>
2.1. Grafos . . . . .	17
2.1.1. Grafo Dirigido . . . . .	18
2.1.2. Ruta . . . . .	18
2.1.3. Ciclo . . . . .	19
2.1.4. Grafo Conexo . . . . .	19
2.2. Árboles . . . . .	19
2.2.1. Árbol Dirigido . . . . .	19
2.2.2. Árbol Binario . . . . .	21
2.3. Árboles de Decisión . . . . .	22
2.3.1. Ejemplo de Árbol de Decisión Determinístico . . . . .	23
2.4. Branch & Bound . . . . .	24
2.4.1. Problemas de Programación Lineal y Entera . . . . .	25
2.4.2. Algoritmo Branch & Bound . . . . .	25
2.5. Computación Paralela . . . . .	28
2.5.1. Teoría de Paralelización . . . . .	29
<b>3. Descripción del Algoritmo</b>	<b>32</b>
3.1. Representación de la Red Ferroviaria . . . . .	32
3.2. Árbol de Decisión Binario . . . . .	34

3.2.1.	Ramificación del Árbol . . . . .	35
3.2.2.	Método para Recorrer el Árbol . . . . .	39
3.2.3.	Solución del Árbol de Decisión . . . . .	43
3.3.	Método de Poda de Ramas . . . . .	44
3.3.1.	Generación de Cotas para Poda de Nodos No Terminales . . . . .	45
3.3.2.	Poda de Ramas . . . . .	51
3.3.3.	Gap de la Solución . . . . .	51
<b>4.</b>	<b>Resolución en Paralelo</b>	<b>53</b>
4.1.	División del Problema en Subárboles . . . . .	53
4.1.1.	Solución del Árbol con Paralelización . . . . .	55
4.2.	Método de Sondajes . . . . .	55
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>57</b>
5.1.	Calibración y Validación del Modelo . . . . .	57
5.1.1.	Calibración . . . . .	57
5.1.2.	Validación . . . . .	58
5.2.	Elección del Número de Threads a Ejecutar . . . . .	60
5.2.1.	Utilización del Hardware . . . . .	61
5.2.2.	Rendimiento del Algoritmo . . . . .	62
5.3.	Caso de Estudio: Turno C 23/01/2017 . . . . .	64
5.3.1.	Parámetros . . . . .	64
5.3.2.	Ejecución del Algoritmo y Resultados . . . . .	65
5.3.3.	Análisis Operacional de la Solución . . . . .	69
5.4.	Caso de Estudio: Turno de 40 Vueltas . . . . .	71
5.4.1.	Parámetros . . . . .	72
5.4.2.	Ejecución del Algoritmo y Resultados . . . . .	73
5.4.3.	Análisis Operacional de la Solución . . . . .	75
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>78</b>
6.1.	Conclusiones Generales . . . . .	78
6.2.	Limitaciones y Trabajos Futuros . . . . .	79
	<b>Bibliografía</b>	<b>81</b>