

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	x
Índice de Ilustraciones	xii
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Alcances	2
2. Antecedentes	4
2.1. Estado del Arte	4
2.1.1. Proyecto OSIRIS (Optimal Strategy to Innovate and Reduce energy consumption In urban rail Systems)	4
2.1.2. Estudio de Integración de Inyección de Energía Renovable en Metro de Santiago	5
2.1.3. Estudios y casos sobre la incorporación de frenos regenerativos y almacenamiento de energía en sistemas ferroviarios	5
2.2. Metro de Santiago	7
2.2.1. Línea 4	7
2.3. Modelación de la dinámica de un tren	8
2.3.1. Modelo Quasi-Dinámico longitudinal de un tren	9
2.3.2. Ecuaciones de movimiento	13
2.3.3. Fases de la marcha de un tren	15
2.3.4. Maneras, estrategias y tácticas de conducción	17
2.4. Almacenamiento de energía	18
2.4.1. Tecnologías de almacenamiento de energía	18
2.4.2. Tipos de aplicaciones de sistemas de almacenamiento de energía en trenes	21
2.4.3. Estrategia de recortes de picos de potencia	24
2.5. Modelo de gestión de energía de Metro	27
3. Metodología	29
3.1. Modelación y simulación de la dinámica de un tren en una línea de metro	29
3.1.1. Modelación y cálculos de la dinámica del tren	30
3.1.2. Método para la caracterización del tren y la línea en la simulación	36
3.2. Selección del tipo de aplicación y tecnología del sistema de almacenamiento de energía	38

3.2.1.	Selección del tipo de aplicación	38
3.2.2.	Selección de tecnología de almacenamiento de energía	40
3.3.	Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía	42
3.4.	Modelación y simulación del sistema de almacenamiento a bordo en un tren a lo largo de una línea	45
3.4.1.	Estructura general de la simulación	46
3.4.2.	Modelo de recorte de potencia	47
3.4.3.	Degradación del sistema de almacenamiento de energía para un tren	47
3.5.	Simulación de escenarios de almacenamiento de energía para la línea ferroviaria	47
3.5.1.	Descripción general de la simulación	47
3.5.2.	Definición de bitácoras de trenes para los diferentes escenarios	50
3.5.3.	Cálculo de la energía eléctrica consumida anualmente	52
3.5.4.	Cálculo de la degradación anual del sistema de almacenamiento de energía	53
3.6.	Evaluación económica	53
3.6.1.	Consideraciones generales de la evaluación económica	53
3.6.2.	Costos	54
3.6.3.	Beneficios	55
3.6.4.	Flujo de Caja	57
4.	Resultados	58
4.1.	Simulación quasi-dinámica de un tren	58
4.1.1.	Velocidades máximas entre estaciones	58
4.1.2.	Velocidad	59
4.1.3.	Aceleración	61
4.1.4.	Esfuerzo de Tracción	62
4.1.5.	Esfuerzo de Frenado	64
4.1.6.	Potencia de Tracción	66
4.1.7.	Potencia eléctrica demandada al tercer riel	68
4.1.8.	Potencia Eléctrica disponible para Recuperación	69
4.1.9.	Energía demandada al tercer riel	71
4.1.10.	Energía eléctrica disponible para la recuperación	72
4.2.	Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía	73
4.2.1.	Dimensionamiento en función de la resiliencia de la línea	73
4.2.2.	Dimensionamiento en función del tamaño del sistema de almacenamiento de energía	74
4.3.	Simulación de los escenarios de almacenamiento de energía para un tren	76
4.3.1.	Escenario Gigacell	76
4.3.2.	Escenario Altairnano	80
4.3.3.	Escenario Toshiba SciB TM	83
4.3.4.	Energía demandada al tercer riel en función del sistema de almacenamiento de energía	89
4.3.5.	Energía eléctrica almacenada proveniente desde los frenos regenerativos en función del sistema de almacenamiento de energía	89
4.4.	Simulación de los escenarios de almacenamiento de energía para la línea 4 del metro de Santiago.	90
4.4.1.	Caso Base	90
4.4.2.	Caso Gigacell	97

4.4.3.	Caso Altairnano	107
4.4.4.	Caso SciB	116
4.4.5.	Energía consumida desde las sub-estaciones rectificadoras	124
4.4.6.	Potencias máximas inyectadas por las sub-estaciones rectificadoras	125
4.4.7.	Degradación anual del sistema de almacenamiento de energía	125
4.4.8.	Degradación anual del sistema de almacenamiento para la flota de trenes	127
4.5.	Evaluación Económica	127
4.5.1.	Costos	127
4.5.2.	Beneficios	128
4.5.3.	Indicadores de rentabilidad	129
5.	Discusión	131
5.1.	Simulación quasi-dinámica de un tren	131
5.2.	Simulación de los escenarios de almacenamiento de energía para un tren	133
5.3.	Simulación de los de los escenarios de almacenamiento de energía para la línea 4 del Metro	134
5.4.	Evaluación Económica	136
5.5.	Trabajos Futuros	137
	Conclusiones	138
6.	Bibliografía	140
	Anexos	144
A.	Características generales del recorrido de la línea 4	145
B.	Cálculo de la degradación anual del sistema de almacenamiento de energía	147
B.1.	Determinación del ciclaje del sistema de almacenamiento de energía en función del tiempo	148
B.2.	Determinación del ciclaje anual para el conjunto de trenes	148
B.3.	Cálculo de la degradación anual del sistema de almacenamiento de energía para la flota de trenes	151
C.	Especificaciones técnicas de las tecnologías de almacenamiento de energía	152
C.1.	30-K6 Gigacell - Kawasaki (Ni-MH)	152
C.2.	24V 70 Ah Battery module - Altairnano (LTO)	154
C.3.	Toshiba <i>SciBTM</i>	154
D.	Flujos de Caja	155
D.1.	Escenario <i>Gigacell</i>	156
D.2.	Escenario <i>Altairnano</i>	157
D.3.	Escenario <i>Toshiba SciB</i>	158