

Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

Vicerrectorado de  
**INVESTIGACION**

Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE  
OPERACIONES FERROVIARIAS MEDIANTE SIMULACIONES**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Industrial

**AUTOR**

Paniora Ceron, Lucio

**ASESOR**

Ing. Villanueva Guzmán, Victor Gonzalo

**JURADO**

Dra. Alzamora Rivero, Cristina Asunción

Mg. Benavides Cavero, Oscar

Mg. Salazar Bravo, Leonidas Carolina

Ing. Calderón Cuenca, Blasdemir Isidoro

Lima – Perú

2019



## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermanos por enseñarme que todas las cosas hay que valorarlas, trabajarlas y luchar para lograr los objetivos de la vida.

## RESUMEN

El presente trabajo tiene por finalidad exponer, en primer lugar, los fundamentos teóricos para el diseño y construcción de modelos o escenarios de operaciones ferroviarias mediante simulaciones, haciendo énfasis en el uso de herramientas de simulación como método eficiente para el diseño del servicio ferroviario. En segundo lugar, se procederá a describir la metodología para el diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante simulación, para lo cual es necesario seguir los pasos correspondientes tales como el modelamiento de la infraestructura, la definición del Material Rodante, la definición de los servicios y los horarios, así como la ejecución de la simulación del servicio ferroviario. Finalmente, a fin de poner en práctica los conocimientos teóricos detallados, se procede a aplicar la metodología al caso de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao, para lo cual se utilizará el software especializado en simulaciones ferroviarias, Opentrack, de lo cual se obtendrá resultados tales como: tiempo de viaje, velocidad comercial, consumo de energía de tracción y, por último, construcción de modelos o escenarios de operaciones ferroviarias y dimensionamiento de la flota de trenes para cada escenario de operación ferroviaria planteado.

**Palabras claves:** simulación, modelos de infraestructura, intervalo de paso, tiempo de parada, tiempo de vuelta de cabina, dinámica del tren, rendimiento del tren.

## ABSTRACT

The purpose of this paper is to present, in the first place, the theoretical foundations for the design and construction of railway operations models or scenarios through simulations, emphasizing the use of simulation tools as an efficient method for the design of the railway service. Secondly, we will proceed to describe the methodology for the design and construction of railway operations models by simulation, for which it is necessary to follow the corresponding steps such as the modeling of the infrastructure, the definition of the Rolling Stock, the definition of the services and schedules as well as the execution of the simulation of the railway service. Finally, in order to put into practice the detailed theoretical knowledge, we proceed to apply the methodology to the case of Line 4 of the Lima Metro, for which the software specialized in railway simulations, Opentrack, will be used, from which results will be obtained such as: travel time, commercial speed, traction energy consumption and, in the end, construction of rail operations models or scenarios and sizing of the train fleet for each railway operation model proposed.

**Palabras claves:** simulation, infrastructure models, headways, dwell time, turnback, train dynamics, train performance.

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPITULO I</b> .....	<b>2</b>
<b>GENERALIDADES</b> .....	<b>2</b>
<b>1.1. Precedentes de la Investigación</b> .....	<b>2</b>
1.1.1. Precedentes Nacionales .....	2
1.1.2. Precedentes Internacionales .....	2
<b>1.2. Planteamiento del Problema</b> .....	<b>3</b>
1.2.1. Descripción de la realidad problemática .....	3
1.2.2. Formulación del Problema de investigación .....	4
<b>1.3. Objetivos</b> .....	<b>5</b>
1.3.1. Objetivo general .....	5
1.3.2. Objetivos específicos .....	5
<b>1.4. Hipótesis</b> .....	<b>5</b>
<b>1.5. Justificación e importancia del estudio</b> .....	<b>5</b>
<b>1.6. Factibilidad y viabilidad de la investigación</b> .....	<b>5</b>
<b>CAPITULO II</b> .....	<b>7</b>
<b>MARCO TEORICO</b> .....	<b>7</b>
2.1. Principio de diseño de horarios .....	7
2.1.1. Términos básicos de operación ferroviaria .....	7
2.1.2. Diagrama de tráfico .....	11
2.1.3. Modelado de la trayectoria del tren.....	14
2.1.4. Intervalos de paso y tiempos de separación entre diagramas de bloqueo.	20
2.1.5. Métodos de programación .....	26
2.1.6. Horario Cíclico .....	30
2.2. Modelado de la Infraestructura.....	32
2.2.1. Teoría Grafica y su aplicación .....	32
2.2.2. Modelos macroscópicos.....	38
2.2.3. Modelos microscópicos.....	40
2.2.4. Diferencias entre modelos de infraestructura .....	45
2.3. Dinámica del tren y estimación del tiempo de recorrido .....	46
2.3.1. Esfuerzo de tracción .....	46
2.3.2. Esfuerzo de Resistencia.....	49
2.3.3. Calculo del tiempo de recorrido .....	54
2.3.4. Comportamiento del movimiento del tren .....	54
2.4. Simulación.....	55
2.4.1. El papel de la simulación.....	56

2.4.2.	Métodos de simulación .....	58
2.4.3.	Herramientas de simulación .....	62
2.4.4.	Beneficios de la simulación .....	64
2.5.	Definición de términos .....	65
<b>CAPITULO III</b>	.....	<b>69</b>
<b>METODOLOGIA</b>	.....	<b>69</b>
3.1.	Modelo de simulación microscópica sincrónica .....	69
3.2.	Elementos del modelo de simulación microscópica sincrónica .....	70
3.3.	Caso de estudio: Línea 4 del Metro de Lima y Callao.....	72
3.4.	Proceso de diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviario mediante simulaciones .....	79
3.4.1.	Subproceso modelamiento de la Infraestructura .....	80
3.4.2.	Subproceso definición del Material Rodante .....	88
3.4.3.	Subproceso definición de Servicios y Horarios .....	90
3.4.4.	Control de ejecución de la simulación .....	91
3.5.	Escenarios de operaciones ferroviarias para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao	93
3.5.1.	Escenario 1: Operación Estación Gambetta – Estación Carmen de la Lengua	94
3.5.2.	Escenario 2: Operación Estación José de Sucre – Estación La Molina ....	95
3.5.3.	Escenario 3: Operación Estación Gambetta – Estación Conde de San Isidro	97
3.5.4.	Escenario 4: Operación Estación Gambetta – Estación La Molina.....	98
3.5.5.	Operación completa de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao - Estación Gambetta – Estación Mercado Santa Anita .....	100
<b>CAPITULO IV</b>	.....	<b>105</b>
<b>RESULTADOS</b>	.....	<b>105</b>
4.1.	Consideraciones iniciales .....	105
4.2.	Control de calidad de los inputs .....	110
4.3.	Calibración del rendimiento del tren.....	113
4.4.	Estimación de los tiempos de viaje, velocidad comercial, consumo de energía de tracción según dirección del movimiento .....	114
4.5.	Estimación de la flota de trenes para cada escenario de servicio ferroviario propuesto	119
4.6.	Análisis del servicio ferroviario de cada escenario de escenario propuesto.....	123
4.6.1.	Escenario 1: Operación Estación Gambetta – Estación Carmen de la Lengua	123
4.6.2.	Escenario 2: Operación Estación José de Sucre – Estación La Molina ..	127
4.6.3.	Escenario 3: Operación Estación Gambetta – Estación Conde de San Isidro	130
4.6.4.	Escenario 4: Operación Estación Gambetta – Estación La Molina.....	133
4.6.5.	Escenario Operación Estación Gambetta – Estación Mercado Santa Anita	137

4.7. Resumen de modelos o escenarios de operaciones ferroviarias para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao.....	142
4.8. Evaluación económica y financiera del proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao	147
4.8.1. Costo de inversiones (CAPEX) .....	147
4.8.2. Costo de operación y mantenimiento (OPEX) .....	150
4.8.3. Evaluación del proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao .....	155
4.8.3.1. Evaluación Social.....	156
4.8.3.2. Evaluación Privada.....	162
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>170</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>171</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>175</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1: Secciones de bloqueos limitados por señales principales .....	10
Figura N° 2: Diferente arreglo de señal en enclavamiento .....	11
Figura N° 3: Principio de un diagrama de tráfico.....	12
Figura N° 4: Diagrama de tráfico con estación en eje horizontal y vertical .....	13
Figura N° 5: Diagrama de tráfico en una estación .....	14
Figura N° 6: Control de longitud de las señales en bloqueo fijo .....	16
Figura N° 7: Tiempo de bloque en una sección de bloqueo .....	19
Figura N° 8: Determinación de intervalo mínimo mediante diagrama de tiempos de bloqueo .....	20
Figura N° 9: Principio de asignación de intervalos de paso.....	22
Figura N° 10: Principio de cálculo de intervalos de paso.....	23
Figura N° 11: Distancia entre tiempos de bloque en una línea de doble vía.....	24
Figura N° 12: Distancia entre tiempos de bloqueo en una estación de paso .....	24
Figura N° 13: Trayectoria de tiempos de amortiguación .....	25
Figura N° 14: Tiempos de amortiguación en una estación de transferencia.....	26
Figura N° 15: Principio de programación manual.....	27
Figura N° 16: Asignación de tiempos de parada a secciones de bloqueo .....	28
Figura N° 17. Visualización de una programación en conflicto.....	29
Figura N° 18: Programación de intervalos fijos en una línea simple .....	31
Figura N° 19: Tiempo de ciclo.....	32
Figura N° 20: Ejemplo de modelo de nodo y enlace .....	34
Figura N° 21: Ejemplo de nodo y enlaces en una estación .....	34
Figura N° 22: Principio de gráfico- colon .....	37
Figura N° 23: Transición desde planos a modelo gráfico .....	37
Figura N° 24: Principio de modelado macroscópico de la Infraestructura.....	39
Figura N° 25: Esquema en modelos de infraestructura microscópica .....	42
Figura N° 26: Relación entre modelos de infraestructura macroscópica y microscópica .	45
Figura N° 27: Representación de la fuerza de adherencia .....	47
Figura N° 28: Curva de esfuerzo tracción .....	49
Figura N° 29: Comportamiento del movimiento del Tren .....	55
Figura N° 30: Modelo de simulación microscópica sincrónica.....	69
Figura N° 31: Elementos del modelo de Infraestructura .....	70
Figura N° 32: Definición del Material Rodante .....	71

Figura N° 33: Elementos del Servicio – Horario .....	71
Figura N° 34: Elementos de simulación.....	72
Figura N° 35: Detalle de Salidas.....	72
Figura N° 36: Trazado de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao .....	73
Figura N° 37: Grados de Automatización de Sistemas Metro .....	77
Figura N° 38: Proceso de diseño y construcción de modelo de operaciones mediante simulaciones.....	80
Figura N° 39: Trazado de vértices, segmentos y ubicación del punto kilométrico .....	84
Figura N° 40: Configuración del segmento mediante la introducción de rampas, pendientes, radio de curvatura y restricción de velocidades .....	84
Figura N° 41: Elaboración de base de datos de estaciones .....	85
Figura N° 42: Configuración de la estación en la vía férrea y ubicación de cambiavías... 85	
Figura N° 43: Diseño de la señalización en la vía férrea .....	86
Figura N° 44: Construcción de rutas.....	86
Figura N° 45: Construcción de paths o trayectorias.....	87
Figura N° 46: Construcción de itinerarios .....	87
Figura N° 47: Construcción de la curva esfuerzo versus velocidad .....	89
Figura N° 48: Configuración del Material Rodante.....	90
Figura N° 49: Definición de Servicio y Horarios .....	91
Figura N° 50: Control de simulación y selección de salidas .....	92
Figura N° 51: Esquemas de operación de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao .....	94
Figura N° 52: Cargas proyectadas por Estación según dirección en hora punta mañana – Estación Gambetta hasta Estación Carmen de la Lengua .....	95
Figura N° 53: Cargas proyectadas por estación según dirección en hora punta mañana - Estación José de Sucre hasta Estación La Molina - Escenario 1 .....	96
Figura N° 54: Cargas proyectadas por estación según dirección en hora punta mañana - Estación Gambetta hasta Estación Conde de San Isidro - Escenario 2.....	98
Figura N° 55: Cargas proyectadas por estación según dirección en Hora Punta .....	99
Figura N° 56: Comparativo de la carga máxima proyectada versus capacidad ofertada en hora punta mañana - Funcionamiento parcial de la Línea 4 .....	99
Figura N° 57: Cargas proyectadas por estación según dirección en hora punta mañana - Estación Gambetta hasta Estación Mercado Santa Anita - 2055 .....	102
Figura N° 58: Comparativo de la carga máxima versus capacidad ofertada en hora punta mañana - Funcionamiento total de la Línea 4 .....	103

Figura N° 59: Diagrama flujo del proceso de diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante simulación .....	101
Figura N° 60: Esquema de vías y señalización – Línea 4.....	105
Figura N° 61: Esquema del gradiente en la vía 2 (Estación Gambetta – Estación .....	110
Figura N° 62: Esquema del gradiente en la vía 1 (Estación Mercado Santa Anita – Estación Gambetta).....	111
Figura N° 63: Esquema altimétrico de la Línea 4 (Gambetta - Mercado Santa Anita - Gambetta) .....	111
Figura N° 64: Radios de la curvatura en la vía 1.....	112
Figura N° 65: Restricciones de la velocidad en la vía férrea .....	113
Figura N° 66: Diagrama de marcha, dirección Estación Bocanegra – Estación Gambetta	115
Figura N° 67: Diagrama de marcha, dirección Mercado Santa Anita - Gambetta.....	116
Figura N° 68: Diagrama de marcha, dirección Gambetta - Mercado Santa Anita.....	116
Figura N° 69: Esquema de ocupaciones Estación Bocanegra – Estación Gambetta a 80 segundos de intervalo de paso.....	117
Figura N° 70: Consumo de energía de tracción, dirección Gambetta - Mercado Santa Anita .....	118
Figura N° 71: Consumo de energía, dirección Mercado Santa Anita - Gambetta.....	119
Figura N° 72: Diagrama de marcha – vuelta automática en andén de inversión Gambetta	120
Figura N° 73: Diagrama de marcha – vuelta automática en andén de inversión Mercado Santa Anita.....	121
Figura N° 74: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación Gambetta hasta Estación Carmen de la Lengua - Escenario 1 .....	123
Figura N° 75: Esquema de operación en la Estación Gambetta .....	124
Figura N° 76: Secuencia de inversión automática en el andén de inversión en la Estación Gambetta.....	124
Figura N° 77: Esquema de operación en la Estación Carmen de la Lengua .....	125
Figura N° 78: Secuencia de inversión automática en el andén de frontal en la Estación Carmen de la Lengua.....	126
Figura N° 79: Diagrama de tráfico desde 6:00 a.m. hasta 9:00 a.m. – Estación Carmen de la Lengua a Estación Gambetta .....	127
Figura N° 80: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación José de Sucre a La Molina - Escenario 1 .....	128
Figura N° 81: Esquema de operación en la estación José de Sucre .....	128
Figura N° 82: Esquema de Operación en la estación La Molina .....	129

Figura N° 83: Diagrama de tráfico desde 7:00 a.m. hasta 8:00 a.m. - Estación José de Sucre a La Molina .....	129
Figura N° 84: Diagrama de tráfico - Inicio de operación desde Patio Taller La Molina...	130
Figura N° 85: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación Gambetta a Conde de San Isidro - Escenario 2.....	130
Figura N° 86: Esquema de operación en la estación Conde de San Isidro .....	131
Figura N° 87: Diagrama de tráfico desde 6:30 a.m. hasta 7:30 a.m. - Estación Gambetta hasta Conde de San Isidro.....	132
Figura N° 88: Diagrama de tráfico del escenario 2- Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra .....	132
Figura N° 89: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación Gambetta a La Molina - Escenario 3 .....	133
Figura N° 90: Diagrama de tráfico desde 6:30 a.m. hasta 7:30 a.m. - Estación Gambetta hasta la Estación La Molina .....	134
Figura N° 91: Diagrama de tráfico del escenario 3 - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (sin ampliación de capacidad) y La Molina .....	135
Figura N° 92: Diagrama de tráfico del escenario 3 - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (con ampliación de capacidad) y La Molina.....	136
Figura N° 93: Comparativo de la demanda diaria estimada versus capacidad ofertada en Hora punta mañana - Funcionamiento parcial de la Línea 4 .....	136
Figura N° 94: Comparación de la demanda diaria proyectada versus la capacidad ofertada .....	137
Figura N° 95: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación Gambetta hasta Estación Mercado Santa Anita.....	138
Figura N° 96: Esquema de operación en la Estación Mercado de Santa Anita .....	138
Figura N° 97: Diagrama de tráfico desde 7:30 a.m. hasta 8:30 a.m. - Estación Gambetta a Mercado Santa Anita.....	139
Figura N° 98: Diagrama de tráfico - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (sin ampliación) y La Molina .....	140
Figura N° 99: Diagrama de tráfico - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (con ampliación de capacidad hasta 18 trenes) y La Molina .....	141
Figura N° 100: Diagrama de tráfico - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (con ampliación de capacidad hasta 26 trenes) y La Molina .....	141
Figura N° 101: Pasos para la estimación de los beneficios sociales.....	158

Figura N° 102: Estructura de diferentes flujos de caja para la evaluación privada de un proyecto  
..... 163

## LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1: Demanda diaria, carga máxima y factor de renovación de pasajero – .....	74
Tabla N° 2: Demanda diaria por estaciones para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao .	75
Tabla N° 3: Demanda diaria, carga máxima y factor de renovación de pasajero – .....	76
Tabla N° 4: Ficha técnica de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao .....	76
Tabla N° 5: Extracto de la elaboración del libro de vías .....	82
Tabla N° 6: Modelamiento de la Infraestructura.....	82
Tabla N° 7: Especificación de actividades del modelamiento de Infraestructura en Opentrack .....	83
Tabla N° 8: Especificaciones técnicas del Material Rodante .....	88
Tabla N° 9: Definición del Material Rodante.....	88
Tabla N° 10: Especificación de actividades definición del Material Rodante .....	89
Tabla N° 11: Definición de Servicio y Horarios.....	90
Tabla N° 12: Especificación de actividades de definición de Servicio y Horarios .....	91
Tabla N° 13: Control de ejecución de la simulación.....	92
Tabla N° 14: Especificación de actividades del control de ejecución de la simulación.....	92
Tabla N° 15: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada – Estación Gambetta hasta estación Carmen de la Lengua - Escenario 1.....	94
Tabla N° 16: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación José de Sucre hasta Estación La Molina - Escenario 1 .....	96
Tabla N° 17: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada – Estación Gambetta hasta Estación Conde de San Isidro - Escenario 2.....	97
Tabla N° 18: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Estación La Molina - Escenario 398	
Tabla N° 19: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Mercado Santa Anita - 2025..	100
Tabla N° 20: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Mercado Santa Anita - 2030..	101
Tabla N° 21: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Mercado Santa Anita - 2035..	101

Tabla N° 22: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Mercado Santa Anita - 2055..	102
Tabla N° 23: Tiempos de paradas en las estaciones para cada escenario de servicio ferroviario .....	106
Tabla N° 24: Banda horaria .....	106
<b>Tabla N° 25: Calibración del rendimiento del Material Rodante</b> .....	113
Tabla N° 26: Estimación de los tiempos de viaje, velocidad comercial y consumo de energía de tracción de tren en cada escenario de servicio ferroviario .....	114
Tabla N° 27: Tiempo de vuelta automática en el andén de inversión Estación Gambetta	120
Tabla N° 28: Tiempo de vuelta automática en el andén de inversión Estación Mercado Santa Anita.....	121
Tabla N° 29: Dimensionamiento de la flota de trenes para cada escenario de servicio ferroviario .....	122
Tabla N° 30: Comparación de la demanda diaria proyectada versus la capacidad ofertada diaria .....	137
Tabla N° 31: Resumen de modelos de operaciones ferroviarias para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao.....	144
Tabla N° 32: Costos de inversión a nivel de macro precios.....	149
Tabla N° 33: Resumen de costo de operación y Mantenimiento en soles para cada escenario de operación en millones de soles.....	153
Tabla N° 34: Costo de ejecutar escenarios de servicios ferroviarios en operación real .	154
Tabla N° 35: Costo de ejecutar escenarios de servicios ferroviarios mediante simulación	154
Tabla N° 36: Flujo de beneficios sociales incrementales (millones de dólares).....	161
<b>Tabla N° 37: Indicadores de rentabilidad social</b> .....	162
Tabla N° 38: Parámetros Generales.....	166
Tabla N° 39: Parámetros de Inversión.....	166
Tabla N° 40: Parámetros de financiamiento.....	167
Tabla N° 41: Tasa de descuento .....	167
Tabla N° 42: Parámetros de operación .....	167
Tabla N° 43: Flujo de Caja Económico, Flujo de Financiamiento Neto y Flujo de Caja Financiero del proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao (USD millones) .....	168
Tabla N° 44: Indicadores de rentabilidad privada .....	169





## INTRODUCCIÓN

El rendimiento de una línea ferroviaria es cada vez más crítico ante la creciente necesidad del servicio ferroviario. El creciente uso del servicio ferroviario es debido a que este medio de transporte tiene una variedad de ventajas en comparación con otros modos de transporte, tales como: es eficiente, rápido y seguro. Para lograr que la oferta del servicio ferroviario se adecue a la demanda es necesaria la implementación de nuevos modelos de servicios ferroviarios en función de la demanda a través del máximo aprovechamiento de los recursos implicados, mediante el uso de herramientas asistencia directa a la operación que permitan conocer el comportamiento realista del sistema. En el contexto señalado, el objetivo de este trabajo es diseñar y construir modelos de operaciones ferroviarios mediante simulaciones. Para alcanzar el objetivo planteado, el presente trabajo se ha distribuido en cuatro capítulos. En el primer capítulo se presenta: la descripción del problema; la formulación del problema; objetivos; justificación e importancia del estudio y factibilidad, y viabilidad del estudio. En el segundo capítulo, se expone los estudios relacionados con la materia de la tesis y las bases teóricas, con la finalidad de entender el proceso de diseño y construcción de un servicio ferroviario y que factores están involucrados, para conseguir ello se estudian: El principio de diseño del horario, el modelamiento de la infraestructura, la dinámica del tren y la estimación del tiempo de recorrido, y la simulación. En el tercer capítulo, se muestra la metodología mediante la cual se describe el modelo de simulación microscópica sincrónica, se expone los elementos del modelo de simulación microscópica, se propone el proceso de diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias, y escenarios de servicios ferroviarios para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao. En el cuarto capítulo, se expone y se analiza los resultados de la simulación para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao para cada escenario de servicios ferroviarios, tales como: tiempo de recorrido, velocidad comercial, consumo de energía, estimación de flota total, etc. Finalmente, se presenta las conclusiones y recomendaciones.

## **CAPITULO I GENERALIDADES**

### **1.1. Precedentes de la Investigación**

Con el objetivo de diseñar y construir modelos o escenarios de operaciones ferroviarias mediante simulaciones, se ha revisado información concerniente al uso de la herramienta de simulación, Opentrack, para operaciones ferroviarias a nivel nacional e internacional; toda la información obtenida permitió tener una idea más clara de la importancia de las herramientas de simulación para planificaciones de operaciones ferroviarias entre otros.

#### **1.1.1. Precedentes Nacionales**

En el año 2013, el Consorcio GEODATA – ESAN – SERCONSULT en el Marco “Estudio de Pre inversión a Nivel de Factibilidad del Proyecto: “Construcción de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett-Gambeta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao”, presentó la Simulación de la Operación Ferroviaria. En dicho documento se presenta diferentes escenarios de operación ferroviaria para la Línea 2 del Metro de Lima y Callao realizados con el software Opentrack.

#### **1.1.2. Precedentes Internacionales**

En el año 2011, Nadjla Ghaemi, realizó el estudio “Railway Microscopic Simulation Framework for S&G Studies” en la Delft University of Technology, en el estudio el autor desarrolló un esquema para la evaluación de las herramientas de simulación microscópico. En el trabajo se realiza el test de dos herramientas de simulación: Opentrack y FRISO (Flexible Rail Infrastructure Simulation of Operation), llegando a la conclusión que el Opentrack provee mayor flexibilidad definición de radios y gradientes, tiene mayor criterio para definir los tipos de material rodante y sus características.

En el año 2013, Carlo Ferruccio presentó el estudio “BOTTURA EFFETTI DELLA MANUTENZIONE DEL GESTORE DELL'INFRASTRUTTURA FERROVIARIA SULLA CIRCOLAZIONE DEI TRENI” en el Politécnico de Milano, en dicho trabajo el autor analiza los efectos de interrupciones en la vía férrea mediante simulaciones, para ello hace uso del software Opentrack, indicando que el software es uno de los más apreciados y su calidad ha sido confirmado en numerosas pruebas, ya que esta

herramienta simula escenarios con interrupciones definiendo efectos y permitiendo al operador de la infraestructura una adecuada toma de decisión.

En el año 2014, Christoph Krause presentó la tesis de maestría denominado “Simulation of dynamic station dwell times delays on high frequency rail transport systems – representing dynamic station delay with Opentrack”, en dicho estudio se hace uso del software Opentrack para implementar la simulación ferroviaria, siendo una de las conclusiones que dicho software es la herramienta conocida y ampliamente usado en el campo de planificación y consultoría del tráfico ferroviario.

## **1.2. Planteamiento del Problema**

### **1.2.1. Descripción de la realidad problemática**

El transporte ferroviario urbano, el Metro, es un atractivo medio de transporte con una variedad de beneficios ya que provee alta capacidad de transporte de los usuarios en las ciudades, es eficiente energéticamente pues no contamina el medio ambiente, es rápido pues tiene una vía de circulación independiente y seguro debido a que trabaja de modo seguro.

Ante las ventajas que tiene el Metro en comparación con otros modos de transporte está originando que la demanda en este medio de transporte se incremente notablemente. Un ejemplo es el caso de la Línea 1 del Metro de Lima. “En la actualidad, la demanda promedio en días hábiles al mes de noviembre 2015, es similar la demanda proyectada para el año 18 de la concesión (año 2033)” Autoridad Autónoma del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao (2015).

Asimismo, a nivel internacional la demanda de viajes en metros se ha incrementado.

Los servicios de metro de alta frecuencia se enfrentan cada vez más a la creciente demanda, obligando a los operadores a proporcionar capacidad adicional. Hay dos opciones básicas para lograr esto: una nueva infraestructura, que requiere altos niveles de inversión u optimización operacional, que cuesta menos (Cosandy & Joris, 2016, pág. 42).

En ese sentido, el incremento de la demanda en sistemas metro puede traer dos consecuencias:

Requerimiento de nueva flota de trenes, esto puede venir con las modificaciones de la infraestructura total o parcial. La implementación esta alternativa requiere una inversión enorme dependiendo de la complejidad de la modificación.

El segundo aspecto sería el diseño de nuevos servicios ferroviarios en función de patrón de comportamiento de la demanda. El costo de implementación de esta alternativa dependerá si las empresas operadoras ejecutan los nuevos servicios en operación real, modelo físico experimental, o utilizan algunas herramientas de ayuda en la operación.

En ese sentido, el presente estudio se enfoca en el segundo aspecto con la finalidad de hacer conocer el uso de herramientas de ayuda en la operación ferroviaria desde la parte teórica hasta práctica.

### **1.2.2. Formulación del Problema de investigación**

La demanda en el transporte ferroviario se está incrementando considerablemente, ante ello existe la necesidad latente de nuevos servicios ferroviarios. Por lo tanto, la elaboración de modelos de servicios ferroviarios en función a la demanda será primordial para poder satisfacer la necesidad de viajes de los usuarios. Sin embargo, la elaboración de modelos de servicios ferroviarios en la vía férrea en forma experimental, operación real, tiene costo muy elevado, debido que se tiene que movilizar los trenes, estos consumen energía, consumo de energía de las estaciones y equipos auxiliares, gastos en personal de operación, centro de control, de las estaciones, etc.

Por lo expuesto, se plantea la siguiente pregunta:

¿Existe algún método para la elaboración de escenarios de operaciones ferroviarias que sea más eficientes que realizarlo en operación real?

Asimismo, en nuestro país se ha identificado ausencia de estudios académicos relacionados a la elaboración de servicios ferroviarios mediante uso de herramientas de apoyo a la operación y temas relacionados a dicho tópico. En ese sentido, con el presente estudio se pretende mostrar el proceso para diseñar y construir un servicio ferroviario mediante simulación y su aplicación práctica.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo es diseñar y construir modelos de operaciones ferroviarias mediante simulaciones dinámicas.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Describir los principios del diseño de los horarios.
- Presentar los conceptos básicos sobre modelado de la infraestructura ferroviaria.
- Abordar dinámica del tren y estimación del tiempo de recorrido.
- Presentar la teoría de la simulación.
- Elaborar los modelos de servicios ferroviarios.

### **1.4. Hipótesis**

El uso de herramientas de simulación, para el diseño de escenarios de operaciones ferroviarias, es un método eficiente que un modelo físico experimental.

### **1.5. Justificación e importancia del estudio**

La importancia del estudio radica pues se muestra el uso de la herramienta de simulación para el diseño y construcción de modelos o escenarios de operaciones ferroviarias. La metodología elaborada en el presente estudio será la base para futuras investigaciones relacionadas a operaciones ferroviarias en nuestro país. Asimismo, se presenta los principales conceptos para entender la operación ferroviaria.

### **1.6. Factibilidad y viabilidad de la investigación**

El estudio es factible porque se considera los parámetros y especificaciones de una línea ferroviaria, se aplicó a la Línea 4 del Metro de Lima y Callao, lo cual permitirá conocer el comportamiento lo más aproximado a la realidad. Además, el estudio será útil para futuras investigaciones en temas de operaciones ferroviarias.

La investigación es viable, pues se dispone de los recursos necesarios para llevarla a cabo, tales como bibliografía y software.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1. Principio de diseño de horarios**

En este subcapítulo se presenta los conceptos básicos de operación ferroviaria, diagrama de tráfico, modelamiento de la trayectoria del tren (principio de separación de trenes), intervalos de paso y el tiempo cíclico. El contenido de este subcapítulo está basado en el trabajo de Pahl (2014):

##### **2.1.1. Términos básicos de operación ferroviaria**

###### **➤ Vías, Rutas y Estaciones**

Las vías son las rutas de un sistema ferroviario. Una red ferroviaria en términos de UIC consta de nodos conectados por enlaces. En UIC code 406 los enlaces entre nodos se denominan líneas.

Las líneas consecutivas y los nodos en conjunto, entre un origen definido y un objetivo, se denomina una ruta (en un segundo significado, el término ruta se usa también para una ruta a través de un enclavamiento o zona cambiavías). En su forma más simple, un nodo es sólo un lugar donde los trenes pueden pasar de una línea a otra.

Las estaciones son los nodos más complejos, áreas extendidas, en la que es posible realizar el adelantamiento, cruce o inversión de sentido de los trenes. Una estación terminal de pasajeros consiste en un grupo de vías de plataforma y algunas instalaciones de patio para estacionamiento de los trenes. En las grandes terminales, también hay a menudo servicios de mantenimiento para el material rodante. Los terminales grandes a menudo se encuentran en la intersección o unión de diferentes rutas.

Una estación de pasajeros es aquella con una o más plataformas para paradas programadas de trenes de pasajeros.

En la operación ferroviaria, las vías se refieren a menudo como líneas. Para fines operacionales, las vías se dividen en dos clases.

Las líneas de recorridos son las vías en las que los trenes se desplazan por la red. Las líneas de recorridos deben estar equipadas con dispositivos de señalización necesarios para los movimientos regulares del tren.

Un bucle es una línea de recorrido que se utiliza para pasar y adelantar trenes.

Las vías laterales (terceras vías) son líneas utilizadas para el montaje de trenes, el almacenamiento de coches y trenes, carga y descarga de fines similares, pero no para los movimientos regulares del tren.

#### ➤ **Elementos de la vía**

Un desvío o cambiavías son un conjunto de rieles, puntos móviles y un cruce móvil, que efectúan la ramificación tangencial de las vías y permiten que los trenes o vehículos circulen sobre una vía a otra. En la operación ferroviaria y la señalización, un desvío es usualmente referido como un par de puntos (en resumen, los puntos), aunque este término en su significado original solo se aplica a la parte de un desvío donde se localizan los puntos.

Un cruce es un conjunto de rieles que permite que dos vías se crucen en un tramo de la vía.

Los descarriladores son dispositivos de tierra que se usan para proteger los movimientos del tren contra el movimiento desatendido de vehículos en las vías convergentes.

#### ➤ **Movimientos y Manejo de Maniobra**

Los movimientos de marcha son realizados por locomotoras con o sin vagones, con autoridad para operar en una vía principal bajo el control de las señales principales. Las condiciones de operación para un movimiento de marcha (velocidad máxima, condiciones de frenado) se especifican en el horario de trabajo.

Los movimientos de maniobra son aquellos para mover vehículos de una vía a otra, y propósitos similares. Los movimientos de maniobra se realizan bajo requisitos simplificados a una velocidad muy baja que permite detenerse ante



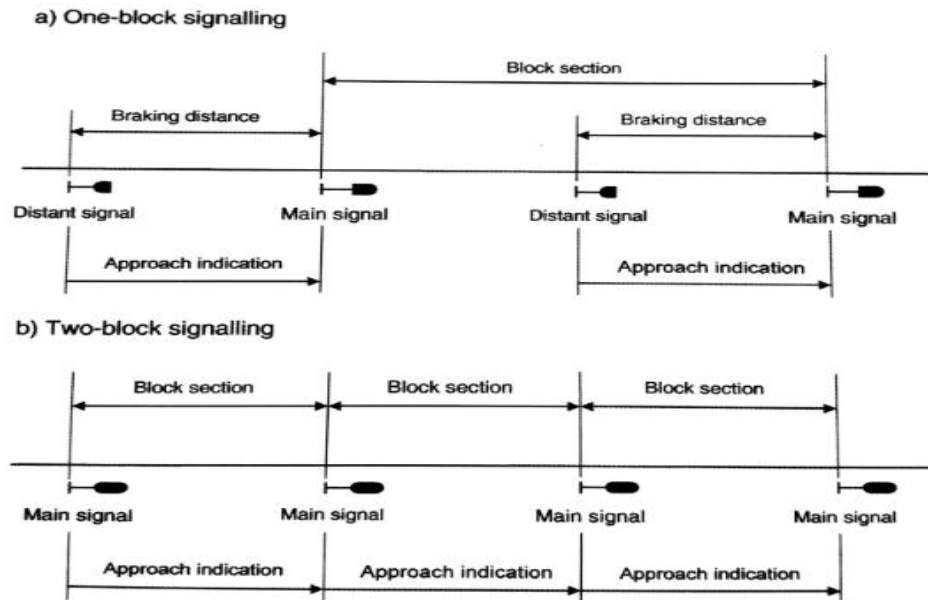
cualquier vehículo u obstrucción. Las unidades de maniobra pueden entrar en las vías ocupadas. Los movimientos de maniobra no están programados al establecer el horario, pero la necesidad de ellos y el tiempo necesariamente tomado debe ser considerada.

### ➤ **Señales y Enclavamientos**

Las señales laterales de la línea indican si un movimiento puede entrar en la sección de la vía más allá de la señal. Existen diferentes señales para los movimientos de marcha y de maniobra. Una señal principal indica si un movimiento puede entrar en una sección de la línea. En un territorio con un sistema de bloque fijo (Ver principio de separación de trenes, más adelante), las líneas se dividen en secciones de bloque con el fin de separar el tren de forma segura. Un tren no debe entrar en una sección de bloque hasta que esa sección haya sido despejada por el tren que está por delante. En el territorio de bloque fijo, los movimientos de marcha están autorizados por indicaciones de señal. Excepto en las líneas de baja velocidad, una señal que autoriza un movimiento de marcha requiere un aspecto de aproximación a la distancia de frenado en aproximación a la señal, porque la distancia de detención es generalmente más larga que el alcance de la visión.

En un territorio en el que la distancia entre las señales no supera la distancia de frenado, el aspecto de aproximación es normalmente proporcionado por la señal en la parte trasera. Esto se denomina señalización de múltiples secciones, ya que una señal principal proporciona información para al menos dos secciones de bloque siguientes. En un territorio con distancias muy largas entre las señales principales, se colocan señales distantes a la distancia de frenado en la aproximación a una señal principal (Fig. N° 1). Una señal distante sólo puede proporcionar un aspecto de aproximación para la señal de antemano pero no puede mostrar un aspecto de parada. Este principio de señalización se denomina señalización de una sección, ya que una señal principal sólo puede proporcionar información para una sección de bloque.

**Figura N° 1: Secciones de bloqueos limitados por señales principales**



Fuente: Jorn Pachl (2014).

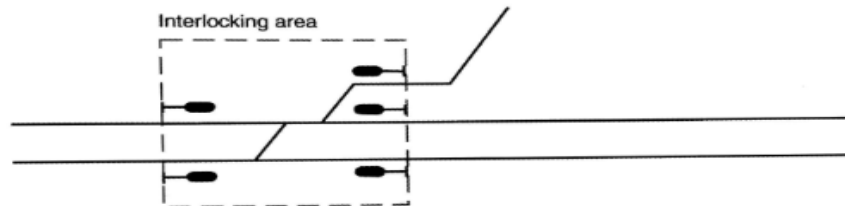
El enclavamiento es una descripción de la disposición mediante la cual los puntos y las señales están eléctricamente interconectados de tal manera que cada movimiento se sigue al otro es en una secuencia apropiada y segura. Las rutas señalizadas para los trenes en las vías principales suelen estar enclavadas. Las señales que gobiernan los movimientos del tren a través de un enclavamiento pueden llamarse señales de enclavamiento. Una señal de enclavamiento también puede limitar una sección de bloque. Los puntos y señales dentro del enclavamiento son controlados por una estación local de enclavamiento o desde un centro de control remoto. En la mayoría de los ferrocarriles, las señales que imitan un enclavamiento se llaman señales de origen.

Hay dos disposiciones básicas de señal en un enclavamiento (Fig. N° 2). En primer lugar, hay interbloques sin señales de enclavamiento consecutivas dentro de los límites de la señal de inicio. Las señales principales proporcionan la autoridad para correr a través de toda la entrada de bloqueo en la siguiente sección de bloqueo. En segundo lugar, hay enclavamientos con signos de enclavamiento consecutivos. La sección limitada dentro de la señal doméstica, que está limitada por señales de enclavamiento consecutivas, se denomina a

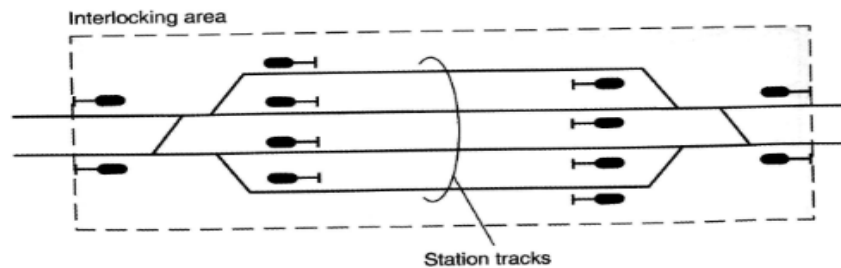
menudo una vía de estación, que está separada de las secciones de la llamada línea abierta.

**Figura N° 2: Diferente arreglo de señal en enclavamiento**

**a) Interlocking without consecutive interlocking signals**



**b) Interlocking with consecutive interlocking signals**



Fuente: Jorn Pachtl (2014)

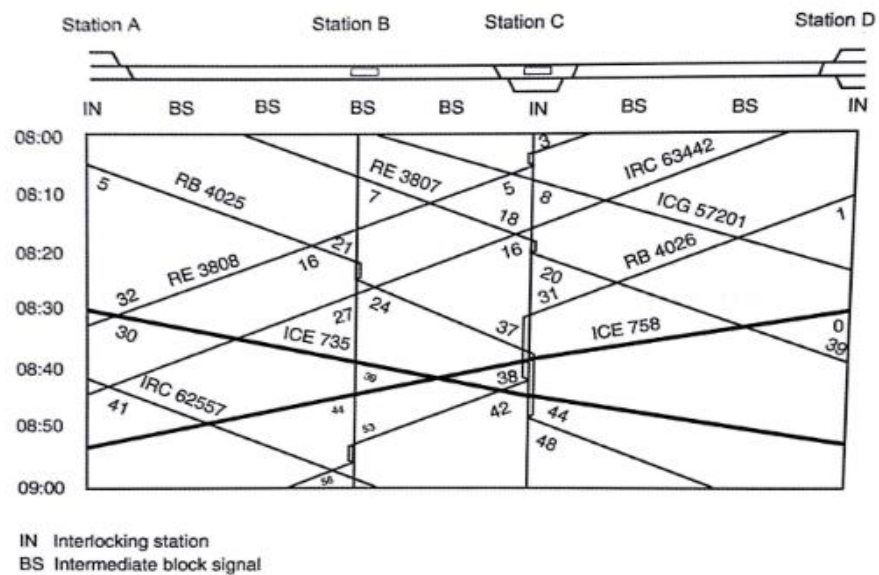
Los ferrocarriles no se refieren a estas secciones de la sección de la estación como secciones del bloqueo, tienen el mismo efecto en la separación del tren como una sección del bloqueo. Diferente de las secciones de bloqueo de la línea abierta, las vías de la estación se pueden utilizar para adelantar, cruzar e invertir las direcciones de los trenes. Una plataforma de estaciones para paradas programadas de trenes de pasajeros no está necesariamente asociada con una vía de estación que no necesite una plataforma. También hay estaciones con sus plataformas asociadas en la línea abierta, que no implican necesariamente una disposición de puntos o la capacidad de invertir trenes dentro del sistema de señalización.

### 2.1.2. Diagrama de tráfico

Los diagramas de tráfico se utilizan tanto como la base de toda la planificación del tráfico ferroviario y también como documentos esenciales para el control de la operación actual.

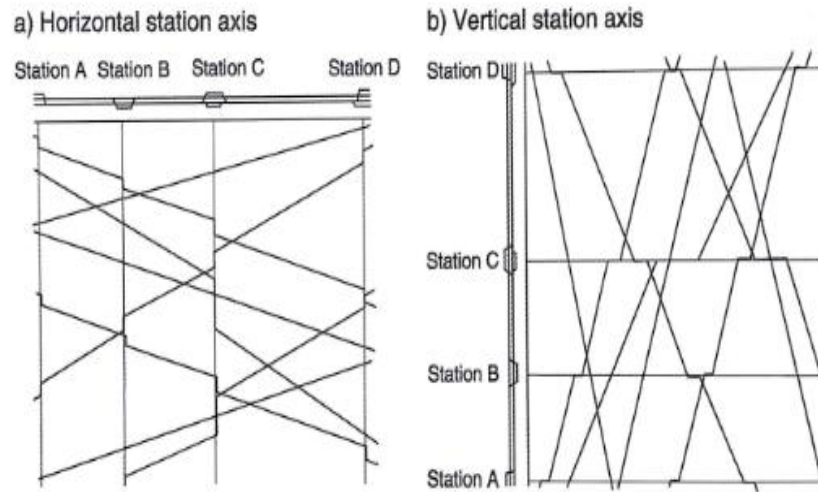
La cantidad de tráfico en una línea se describe en forma de un diagrama de distancia-tiempo que consiste en un eje de tiempo y un eje de estación. En cada estación, hay una línea paralela al eje del tiempo. Esta ubicación representa el punto en el que se aplican los horarios programados para esa estación. El movimiento del tren está representado por trayectos de tren (gráficos de distancia-distancia tiempo) con una descripción de tren inscrita en ellos. En las intersecciones de los recorridos de tren y de las líneas de la estación, el tiempo real se marca por los números minuciosos (Fig. N° 3). Los diagramas de tráfico pueden mostrarse con un eje horizontal o vertical en estación (Fig. N° 4).

**Figura N° 3: Principio de un diagrama de tráfico**



Fuente: Jorn Pahl (2014)

**Figura N° 4: Diagrama de tráfico con estación en eje horizontal y vertical**

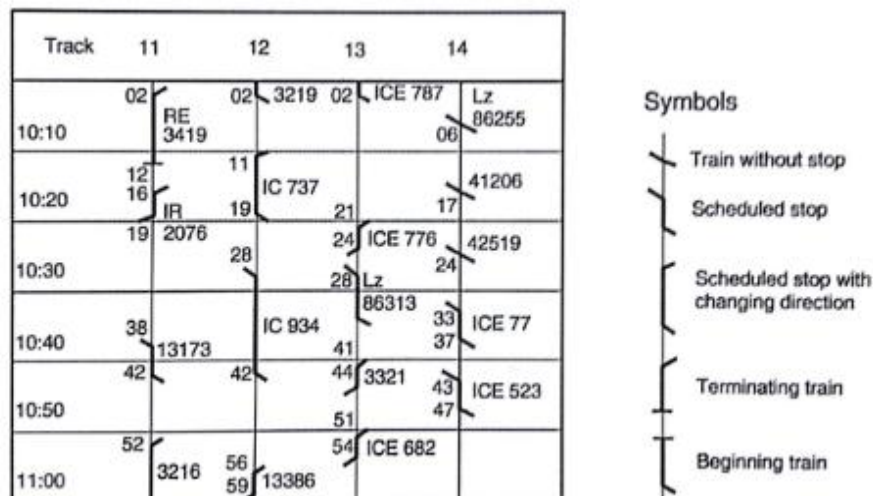


Fuente: Jorn Pachi (2014)

La información de los dos tipos de diagramas tiene el mismo valor.

Las ocupaciones de las vías están marcadas por rayas que tienen la descripción, la llegada y los tiempos de salida inscritos en ese momento (Fig. N° 5). Las pequeñas piezas curvadas al final de las franjas sugieren indicar la dirección del movimiento. En la pequeña disposición, los horarios de la estación se utilizan a menudo en vez de diagramas de tráfico más complejos de la estación. En algunos ferrocarriles, la ocupación de las vías de la estación se integra en los diagramas de tráfico de la línea. Para estaciones intermedias más pequeñas, esto es suficiente. Para terminales más grandes, un diagrama de tráfico separado de la estación conduce a una mejor visión general.

Figura N° 5: Diagrama de tráfico en una estación



Fuente: Jorn Pachtl (2014)

### 2.1.3. Modelado de la trayectoria del tren

Una trayectoria del tren describe el uso de la infraestructura para un movimiento del tren en una vía y en tiempo. Como requisito básico, un horario no debe contener ningún conflicto de programación entre las trayectorias de trenes. No es suficiente para describir una trayectoria de tren sólo con su gráfico de distancia -tiempo. También debe haber un modelo para describir "canal de tiempo" de movimiento de tren que produce alrededor de su línea de distancia-tiempo. Un modelo que describe ese canal tiempo muy exactamente es el llamado modelo de tiempo de bloqueo. La correcta aplicación del modelo de tiempo de bloqueo requiere una comprensión básica de los principios de separación de trenes.

#### ➤ Principios de separación de trenes

En el tráfico de carreteras, la separación de vehículos se efectúa por el principio de la distancia relativa de frenado. Si un vehículo frena, el conductor de un vehículo siguiente notará las luces traseras del freno y comenzará a frenar. Dos vehículos pueden seguir en la distancia que es igual a la diferencia de las distancias de frenado de los vehículos más una distancia adicional de seguridad para asegurar suficiente tiempo de reacción para el conductor del segundo coche.

En una rueda de acero sobre sistema de rieles de acero, el coeficiente de adhesión es en promedio ocho veces menor que en el tráfico de carreteras. Como resultado, la fuerza de frenado que se puede transmitir desde un tren a la vía es también ocho veces menor que la fuerza de frenado que se puede transmitir desde un vehículo de carretera a la superficie de la carretera. Esto conduce a distancias de frenado para vehículos ferroviarios que pueden exceder significativamente el alcance de visualización del conductor. Por lo tanto, la separación del tren por la vista del conductor sólo es posible cuando se ejecuta a una velocidad restringida (usualmente no más de 25 km / h). Esto sólo es aceptable para los movimientos de maniobra y para los movimientos de marcha en el modo de operación degradado. Para los movimientos regulares, se requieren procedimientos de separación de los trenes que funcionen independientemente del rango de visión del conductor.

El principio utilizado para la separación segura de los trenes depende de los siguientes criterios:

- cómo se transmite la autoridad de movimiento de la vía al tren,
- cómo se libera la línea para dejar circular el tren posterior.

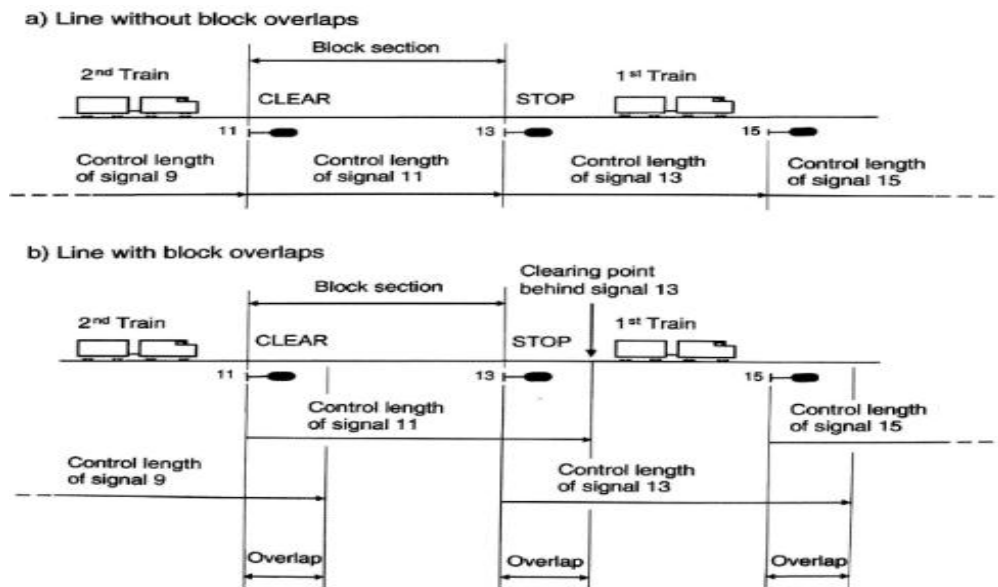
Si la autoridad de movimiento sólo se transmite en puntos discretos, por ejemplo, en las señales laterales, o por órdenes escritas o verbales, esto necesariamente conducirá a la separación del tren en una distancia de bloqueo fijo ya que cada autoridad de movimiento tiene que cubrir toda la sección hasta el siguiente punto donde se puede recibir autoridad adicional. Este principio está en vigencia en todas las líneas donde los trenes están gobernados por señales fijas de lado de la línea y protegidos por un sistema intermitente ATP. Esto funciona para todo tipo de sistemas ATP intermitentes incluyendo el Nivel 1 del Sistema Europeo de Control de Trenes ETCS.

En las líneas donde se utiliza la separación del tren a distancia de bloqueo, la vía se divide en secciones de bloqueo. Una sección de bloqueo puede ser ocupada exclusivamente por un solo tren. En una operación de bloqueo fijo señalado, las secciones de bloque están limitadas por señales que proporcionan autoridad de movimiento para entrar en la sección de bloque protegida por las señales. Para borrar una señal para un tren que debe entrar en una sección de bloque, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- El tren delantero debe haber liberado la sección de bloqueo.
- El tren delantero debe haber liberado el solapamiento más allá de la siguiente señal (sólo en las líneas donde se usan solapamientos de bloques).
- El tren delantero debe estar protegido de los siguientes movimientos del tren mediante una señal de parada.
- El tren debe estar protegido contra movimientos opuestos.

En los ferrocarriles donde no se requieren solapamientos de bloqueo, la longitud de control de una señal es igual a la sección de bloqueo (Fig. N° 6 a). Algunos ejemplos son principalmente los ferrocarriles en Norteamérica y en Rusia, Otros ferrocarriles requieren una longitud de control de una señal que es más larga que la sección de bloque (Fig. N° 6 b).

**Figura N° 6: Control de longitud de las señales en bloqueo fijo**



Fuente: Jorn Pacht (2014)

La diferencia es llamada "superposición" porque en esta área la longitud de control de una señal se superpone con la longitud de control de la siguiente señal. Superposiciones son características de seguridad común en ferrocarriles con operación de pasajeros de alta densidad. El propósito de los solapamientos es proteger los movimientos de los trenes contra los trenes que superan una



señal de parada a una corta distancia debido al mal manejo de los frenos. En Europa, donde el transporte de pasajeros es la columna vertebral del sistema ferroviario, los solapamientos también se utilizan con frecuencia en los ferrocarriles estándar. Dado que una señal principal sólo se puede borrar cuando tanto la sección de bloque como la superposición detrás de la señal principal están despejadas, un tren que se aproxima a una señal de parada siempre tendrá una superposición clara más allá de esa señal.

En las líneas donde los trenes son gobernados continuamente por un sistema de señal de la cabina, la señal lateral de la línea no es necesaria. Sin embargo, la transmisión continua de autoridad de movimiento no es todavía un criterio suficiente para abolir las secciones fijas de bloqueo. Además, el tren tiene que liberar la vía no en intervalos fijos, sino de forma continua. Esto requiere una comprobación permanente de la integridad en los trenes. Puesto que para los sistemas ferroviarios tradicionales todavía no se ha encontrado una solución suficiente para este problema, la separación de los trenes en distancia fija de bloques sigue siendo el principio estándar para un espaciamiento seguro de trenes en la mayoría de los ferrocarriles de todo el mundo.

Desde el punto de vista de la separación de trenes, el beneficio esencial de un sistema de bloques fijo con señalización de cabina comparado con un sistema de bloque fijo con señales laterales de línea es la independencia de las señales de cabina de la distancia de aproximación del sistema de señalización lateral, por ejemplo, la distancia entre la señal en la entrada de la sección de bloque y la señal en la parte trasera que proporciona la indicación de aproximación. Esto permite que los trenes funcionen a velocidades más altas. Es por eso que la señalización de la cabina; Hoy es el sistema estándar en todas las líneas de alta velocidad, en todo el mundo.

En la mayoría de los ferrocarriles, la señalización de la cabina se combina con un sistema ATP continuo.

La señalización de cabina sin secciones de bloque fijo se conoce generalmente como bloqueo móvil. Este término expresa el hecho de que las secciones de bloque fijo ya no existen o, en otras palabras, la longitud del bloque se reduce a cero. Dado que los datos de localización del tren se transmiten a intervalos cortos, el intervalo de tiempo para la localización segura del tren es parte del

avance mínimo para dos trenes sucesivos. Debido al problema no resuelto de la verificación de la integridad de los trenes en los trenes, los sistemas de bloque en movimiento aún no se utilizan en la operación ferroviaria estándar, sino en un par de ferrocarriles de tránsito. Sin embargo, con respecto a aplicaciones futuras, la especificación ETCS contiene un nivel 3 que se basa en el bloque en movimiento.

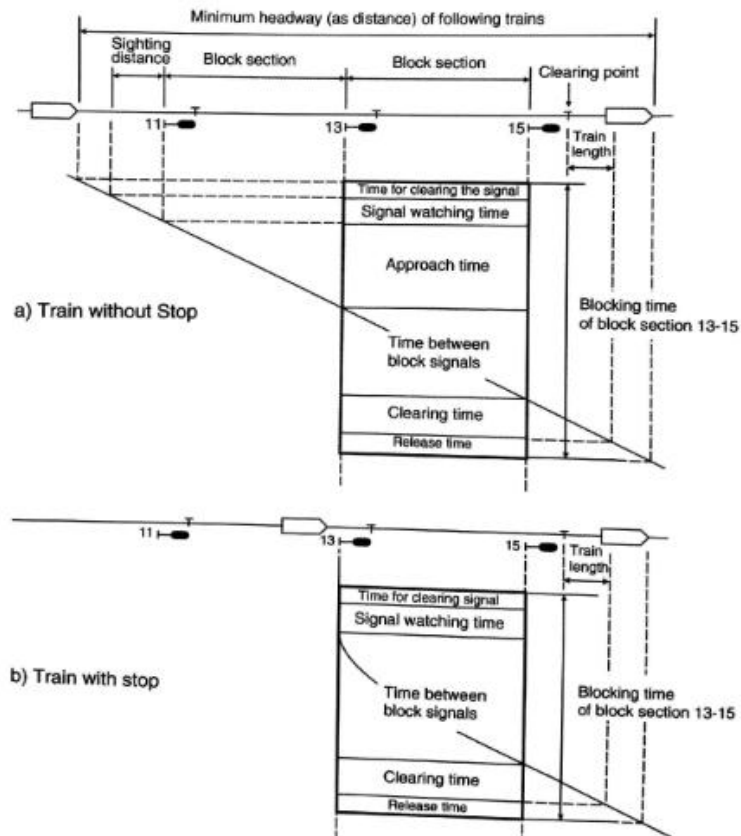
➤ **Aplicación del modelo de tiempo de bloqueo**

El tiempo de bloqueo es el tiempo transcurrido total de una sección de la vía (por ejemplo, una sección de bloqueo, una ruta enclavada) se asigna exclusivamente a un movimiento del tren y por lo tanto bloqueado para otros trenes. Por lo tanto, el tiempo de bloqueo de una sección de vía comienza con la emisión de la autoridad de movimiento para el tren para esta sección (por ejemplo, borrando una señal). La autoridad de movimiento debe emitirse antes de que el tren haya alcanzado la distancia de frenado en su aproximación a esta sección. Por ejemplo, en operación señalizada el tren no debe haber pasado todavía la señal que da la indicación de aproximación a la señal en la entrada de la sección. El tiempo de bloqueo finaliza después de que el tren ha abandonado completamente la sección y todos los aparatos de señalización han sido reajustados a la posición normal para que la autorización de movimiento pueda ser emitida a otro tren para entrar en la misma sección. Por lo tanto, el tiempo de bloqueo de una sección de vía es normalmente mucho más largo que el tiempo que el tren ocupa la sección. En un territorio con señales de lado, el tiempo de bloqueo de una sección de bloqueo para un tren sin parada programada en la entrada de esa sección consiste en los siguientes intervalos de tiempo (ver Fig. N° 7):

- El tiempo para borrar la señal
- Un cierto tiempo para que el conductor vea el aspecto en la señal que da la indicación del acercamiento a la señal en la entrada de la sección del bloqueo (ésta puede ser una señal de bloqueo o una señal distante separada)
- El tiempo de aproximación entre la señal que proporciona la indicación de aproximación y la señal en la entrada de la sección de bloqueo
- El tiempo de recorrido entre las señales de bloqueo

- El tiempo para salir de la sección del bloqueo - si es necesario - la superposición con toda la longitud del tren
- El tiempo de liberación para "desbloquear" el sistema de bloqueo

**Figura N° 7: Tiempo de bloqueo en una sección de bloqueo**

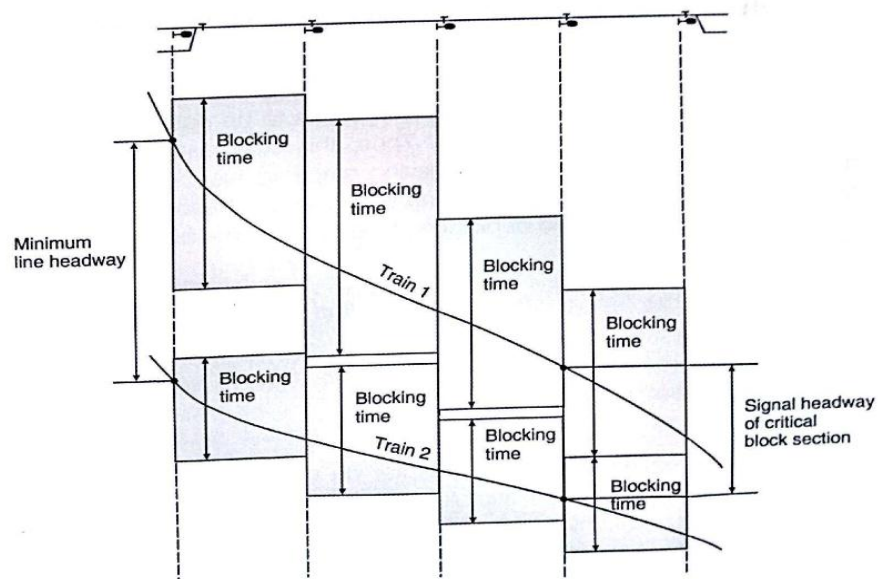


Fuente: Jorn Pacht (2014)

Para un tren sin parada programada en la entrada de la sección de bloqueo, el tiempo de aproximación es obsoleto. En algunas publicaciones, el tiempo de bloqueo se llama tiempo de ocupación que es una traducción literal del término alemán "Belequnqszolt". Ese término se usó en los libros de texto alemanes antiguos. Ya no se prefiere en la terminología alemana, ya que puede conducir a malentendidos. Lo mismo es cierto para el término tiempo de ocupación, ya que el uso operacional de una sección de bloqueo por un movimiento de tren es significativamente más largo que el tiempo en que la sección está físicamente ocupada por el tren. Por lo tanto, el término tiempo de bloqueo parece mucho más apropiado que el término tiempo de ocupación.

El dibujo de los tiempos de bloqueo de todas las secciones de bloqueo que un tren ocupa en un diagrama distancia - tiempo es llamado "La escalera de tiempo de bloqueo" (Fig. N° 8). La escalera de tiempo de bloqueo representa el uso operativo de una línea por un tren. Con la escalera de tiempo de bloqueo, es posible determinar el avance mínimo entre dos trenes. Los tiempos de bloqueo determinan directamente el avance de la señal como el intervalo de tiempo mínimo entre dos trenes sucesivos, considerando sólo una sección de bloqueo.

**Figura N° 8: Determinación de intervalo mínimo mediante diagrama de tiempos de bloqueo**



Fuente: Jorn Pachtl (2014)

El intervalo mínimo de la línea es el tiempo mínimo de separación entre dos trenes, no sólo en la sección de bloques, sino también en las escaleras de tiempo para toda la línea entre dos estaciones. En este caso, las escaleras de tiempo de bloqueo de dos trenes sucesivos se tocarían sin tolerancia alguna. Al menos una sección de bloqueo (la "sección de bloque crítico"). Aunque la Fig. N° 9 muestra los trenes que se siguen uno al otro en la misma dirección como típico en líneas de doble vía, los tiempos de bloqueo también se pueden usar en la operación de una sola vía para encontrar los puntos críticos entre las trayectorias de los trenes opuestos.

#### 2.1.4. Intervalos de paso y tiempos de separación entre diagramas de bloqueo

Planificar suficiente intervalo de paso entre los trenes en una trayectoria es un requisito esencial de la programación.

Los intervalos de paso se pueden considerar de dos maneras diferentes:

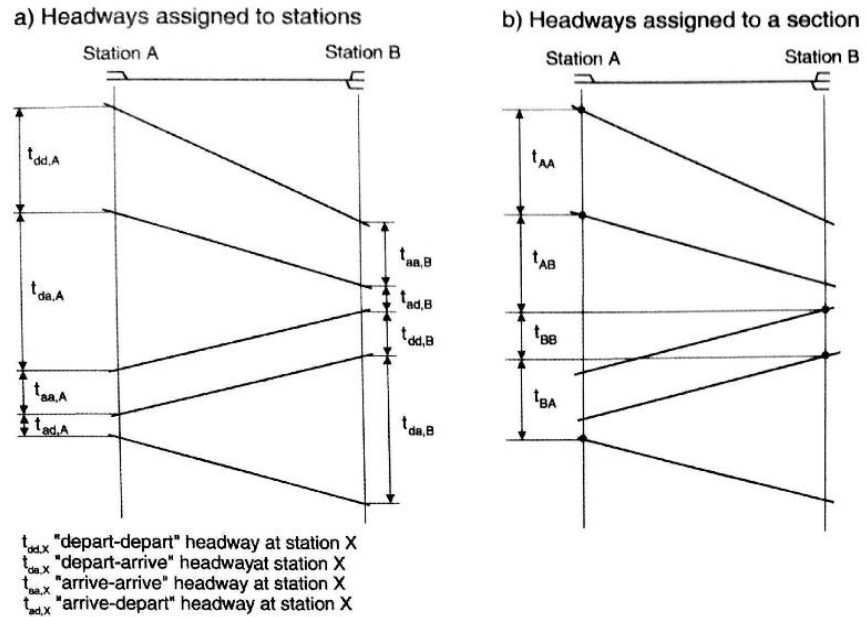
- Intervalos asignados a las estaciones que limitan una sección
- Intervalos asignados a la sección entre dos estaciones

La asignación de intervalos entre las estaciones es el principio más tradicional (Fig. N° 9 a). Todavía es común en la programación. Hay cuatro tipos de intervalos:

- El intervalo entre dos trenes que parten secuencialmente en la misma línea ("salida - salida" intervalo)
- El intervalo entre dos trenes que llegan desde la misma línea ("llegada-llegada" intervalo)
- El intervalo entre la llegada de un tren y la salida de un tren opuesto hacia la misma línea ("llegada-salida" intervalo)
- El intervalo entre la salida de un tren y la llegada de un tren opuesto desde la misma línea (salida "de salida-llegada" intervalo)

Si los intervalos están asignados a una sección entre dos estaciones, no hay diferentes tipos de intervalos. El intervalo es siempre la diferencia entre los tiempos en que dos trenes sucesivos de cualquier dirección entran en la sección (Fig. N° 9 b). En los últimos años, este principio se ha vuelto muy popular para el análisis de la capacidad de línea. La ventaja es que el mínimo intervalo para todas las combinaciones de tren de una sección se puede describir con una sola hoja. Esta ventaja también es interesante para los sistemas de programación que utilizan hojas de intervalo mínimo como datos de entrada.

**Figura N° 9: Principio de asignación de intervalos de paso**



Fuente: Jorn Pachl (2014)

Este principio permite calcular los intervalos de paso de dos maneras diferentes. El intervalo de paso puede ser calculado a partir del momento en que los trenes pasan un punto especificado al entrar en la sección (por ejemplo, una señal o el punto donde se aplica la hora de salida programada) o desde el comienzo del tiempo de bloqueo de la primera sección de bloque entre las dos estaciones (Fig. N° 10). El segundo principio es muy valioso para la investigación de la capacidad. Para la programación, el cálculo de los intervalos desde el pasaje en puntos específicos es más apropiado.

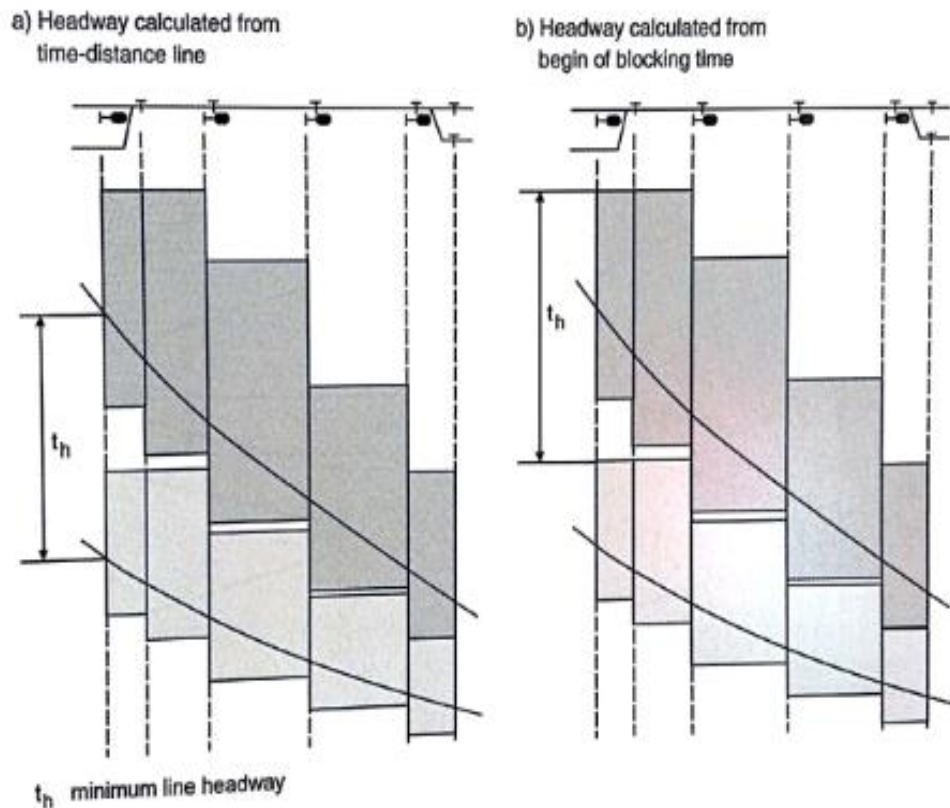
El intervalo de paso programado entre dos trenes debe consistir en el intervalo mínimo de la línea más el tiempo de amortiguación requerido para compensar los pequeños retrasos. El tiempo de amortiguación es la ranura más pequeña entre las escaleras de tiempo de bloqueo de dos trenes (Fig. N° 11 y N° 12). En algunos ferrocarriles, el tiempo de amortiguación se denomina margen de recuperación. Sin embargo, este término no debe confundirse con el tiempo de recuperación. El tiempo de recuperación permite que un tren realice un pequeño atraso mientras que el tiempo de amortiguación evita que se transmita un pequeño retardo a otros trenes. Por otro lado, el tiempo de recuperación prolonga el tiempo de recorrido de un tren

mientras que los tiempos de amortiguación reducen el número de trenes que se pueden programar.

La cantidad de tiempo de amortiguación depende del nivel de servicio requerido. Por lo general, el tiempo de amortiguación se determina dependiendo del tipo de intervalo en la línea. La mayoría de los ferrocarriles utilizan las siguientes reglas básicas.

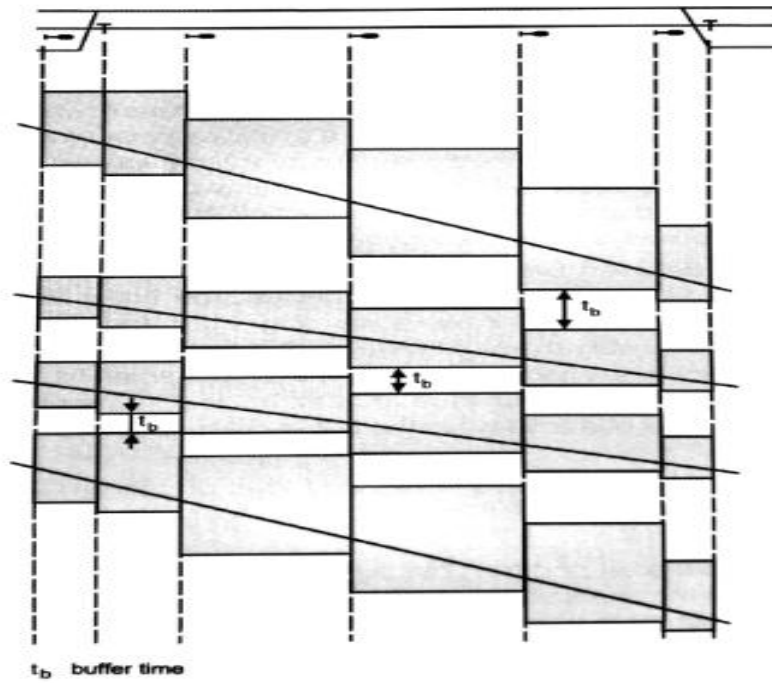
- Tiempo de amortiguación grande cuando el segundo tren tiene una prioridad más alta que el primer tren
- Pequeño tiempo de amortiguación cuando el primer tren tiene una prioridad más alta que el segundo tren
- Tiempo de amortiguación promedio cuando ambos trenes tienen la misma prioridad

**Figura N° 10: Principio de cálculo de intervalos de paso**



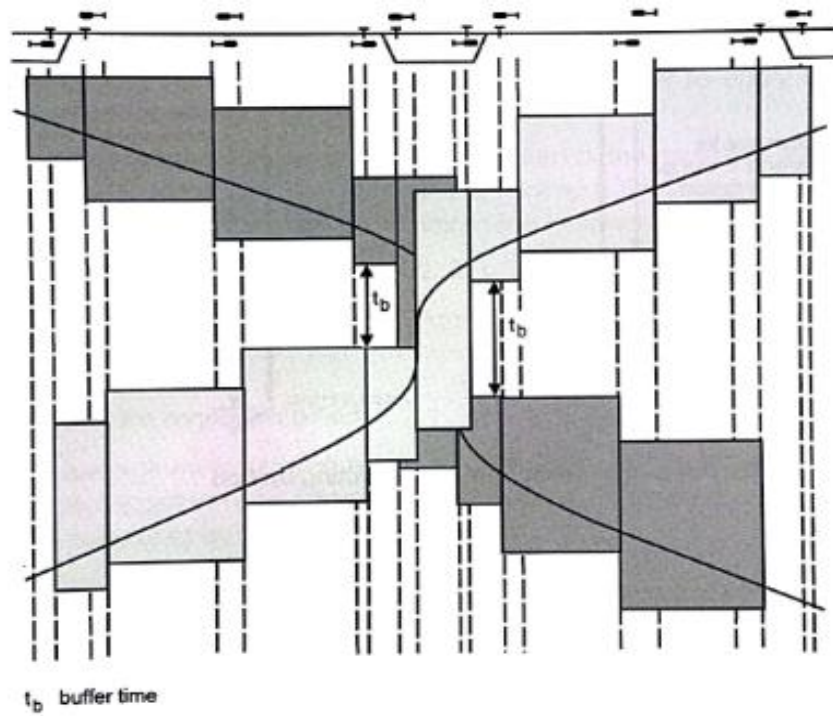
Fuente: Jorn Pachtl (2014)

Figura N° 11: Distancia entre tiempos de bloque en una línea de doble vía



Fuente: Jorn Pachl (2014)

Figura N° 12: Distancia entre tiempos de bloqueo en una estación de paso



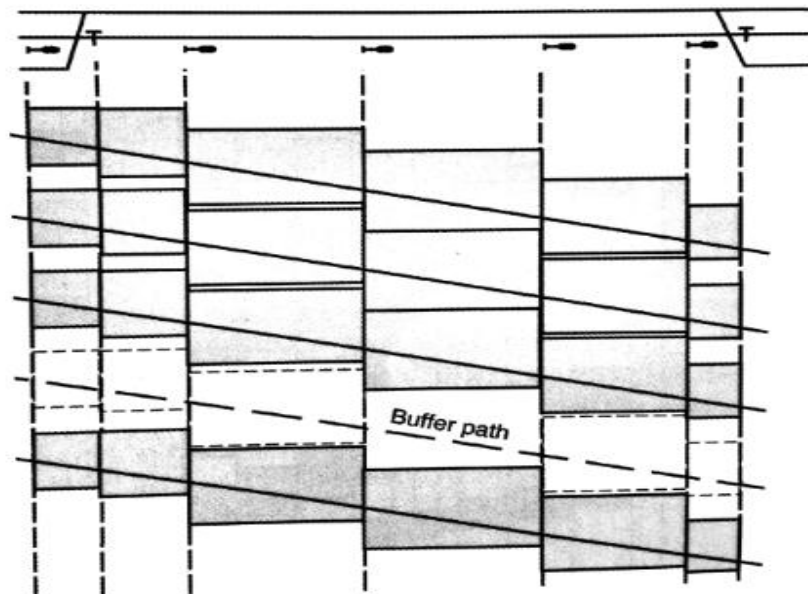
Fuente: Jorn Pachl (2014)



Los ferrocarriles suizos ya utilizan el principio de que, en áreas terminales con una densidad de tráfico muy alta, las trayectorias ferroviarias se planificarán sin amortiguación si se agrega un tiempo de recuperación suficiente para compensar el retraso entre los terminales. Una asignación exacta de un tiempo de amortiguación a cada trayecto de tren de acuerdo con las reglas anteriores sólo tiene sentido en una operación programada con precisión en la que la secuencia de tren rara vez cambia. En las líneas donde los trenes a menudo se quedan fuera de sus horarios o con un montón de trenes adicionales, el tráfico puede ser programado sin tiempos de amortiguación para cada tren. Esto es típico para las líneas de carga y para las líneas de conexión dentro de áreas terminales grandes. En tales líneas, la reserva que se requiere para una buena calidad de operación podría ser mejor proporcionada por la regla que un cierto número de trenes debe ser seguido por una trayectoria de amortiguación clara (Fig. N° 13).

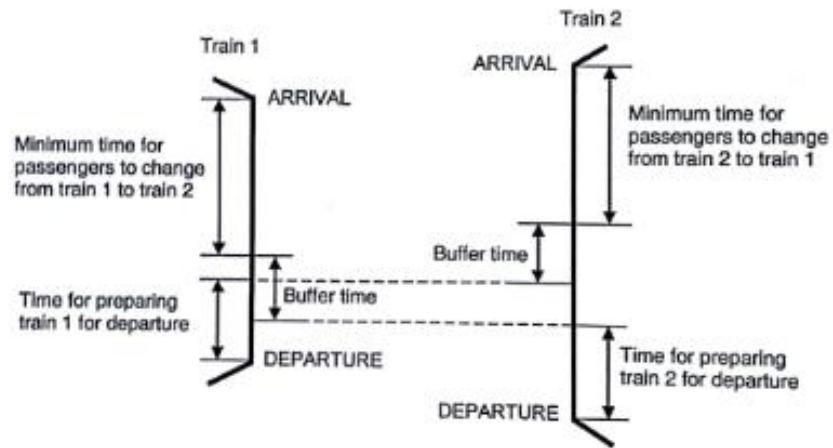
Debajo de los tiempos de amortiguación del trayecto del tren, también se requiere tiempo de amortiguación en las estaciones de conexión donde existen conexiones de transferencia programadas entre los trenes y donde la tripulación o equipo cambia de un tren a otro. Para evitar la transmisión de retrasos en tales puntos, se debe añadir un tiempo de amortiguación al tiempo que se requiere para la transferencia (Fig. N° 14).

**Figura N° 13: Trayectoria de tiempos de amortiguación**



Fuente: Jorn Pacht (2014)

**Figura N° 14: Tiempos de amortiguación en una estación de transferencia**



Fuente: Jorn Pahl (2014)

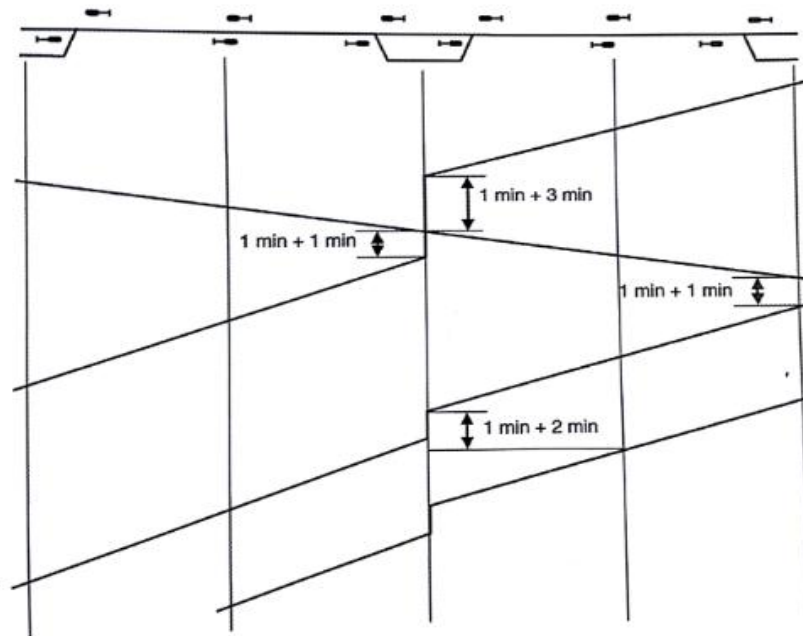
### 2.1.5. Métodos de programación

#### ➤ Programación manual

En la programación manual, la trayectoria del tren se construye como un polígono de una estación a otra. Los tiempos de viaje se leen en las tablas especiales, que consisten en los tiempos de recorridos entre todas las estaciones y los tiempos adicionales requeridos para la aceleración y el frenado. Estos tiempos de recorrido ya contienen el tiempo de recuperación normal. Los tiempos de recuperación especiales para el mantenimiento deben añadirse manualmente. Dado que el cálculo del tiempo de recorrido es bastante complejo, estas tablas suelen ser preparadas por un ordenador. Por lo tanto, la programación manual no se lleva a cabo completamente sin el apoyo de las computadoras (en algunos ferrocarriles con sólo unas pocas clases diferentes de tren, el tiempo de recorrido puede ser determinado por controles físicos). Para determinar los intervalos mínimos en la línea, un cálculo completo de los gráficos de tiempo de bloqueo no es práctico en la programación manual. Los intervalos mínimos de la línea se determinan de forma simplificada. Los tiempos de bloqueo de las secciones de bloqueo se consideran por un tiempo suplementario general añadido al tiempo de recorrido dentro de la sección. En los ferrocarriles europeos, este tiempo extra suele ser de 1 minuto (Fig. N° 15). Además, se añade un tiempo de amortiguación, que por lo general se encuentra dentro del intervalo de uno a tres minutos.

En paradas programadas, la asignación correcta del tiempo de permanencia a las secciones de bloque depende de la disposición de señal de la estación. En una estación con una señal tanto en la entrada como en la salida de la vía de la estación, el tiempo de permanencia no pertenece a la sección de bloqueo en aproximación a la estación ni a la sección de bloque más allá de la estación (Fig. N° 16 a). En una estación con una señal sólo a la salida de la estación, el tiempo de permanencia pertenece a la sección de bloqueo en aproximación a la estación (Fig. N° 16 b). La sección de bloque en aproximación a la estación sólo se liberará después de que el tren se haya marchado. En una estación con una señal sólo en la entrada de la estación, el tiempo de parada pertenece a la sección de bloque más allá de la estación (Fig. N° 16 c). La sección del bloque en el acercamiento a la estación se lanza después que el tren ha llegado.

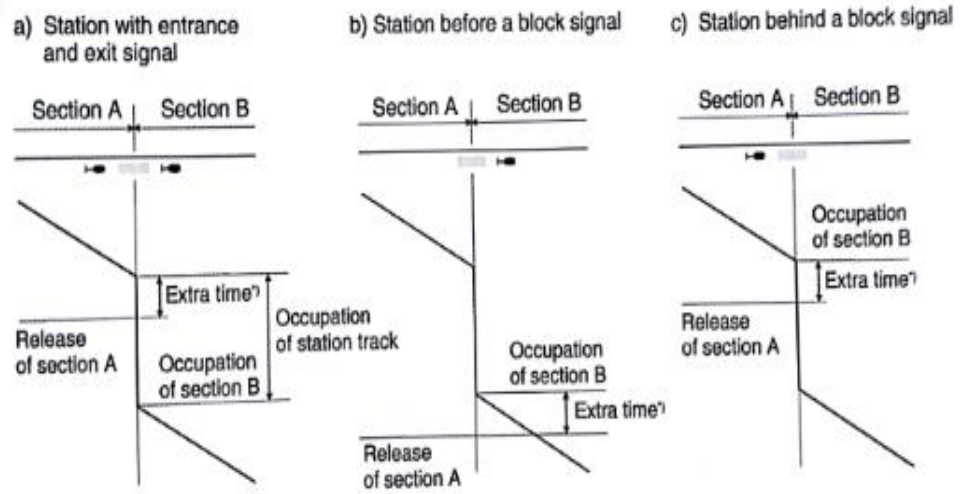
**Figura N° 15: Principio de programación manual**



Fuente: Jorn Pacht (2014)

No es una buena práctica planear estaciones con una señal sólo en la entrada de la estación. Cuando un tren tiene que esperar a la señal debido a una sección de bloqueo ocupada por delante, no puede entrar en la vía de la plataforma y utilizar el tiempo de espera para los pasajeros a salir y abordar.

**Figura N° 16: Asignación de tiempos de parada a secciones de bloqueo**



\*) This extra time is a part of the blocking time of the section to be released.

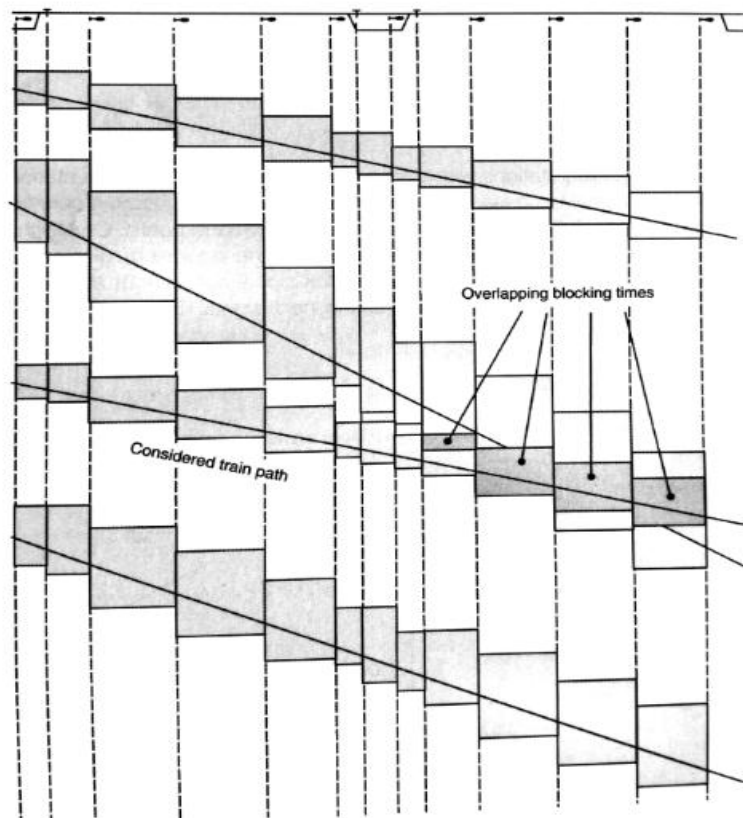
Fuente: Jorn Pachl (2014)

➤ **Programación basada en computadora**

Algunos esquemas programación basados en computadoras usan modelos simplificados. Este tipo de programación basada en computadora es muy exitoso comparado con la programación manual pura y reducirá el esfuerzo significativamente. Es una opción razonable para operadores de infraestructuras con una estructura de red no muy compleja. Sin embargo, en las redes complejas y en las regiones de los grandes terminales, los sistemas de programación basados en el modelo simplificado alcanzarán sus límites.

El corazón de sistemas de programación computarizados más avanzados es un cálculo de las escalas de tiempo de bloqueo. Algunos ferrocarriles utilizan los mismos sistemas de simulación para la programación que se utilizan para la búsqueda de capacidad. Pero con el software de simulación puro, no es fácil de detectar la ubicación exacta de los conflictos de tren donde los tiempos de amortiguación tienen que ser añadidos

Figura N° 17. Visualización de una programación en conflicto



Fuente: Jorn Pachtl (2014)

Para satisfacer las demandas de las compañías ferroviarias, muchos suministros de software de simulación han producido recientemente módulos de programación como complementos para su software. Estos módulos pueden calcular y mostrar los tiempos de bloqueo de las escaleras a las vías simuladas de manera muy similar a los sistemas de programación puro. Las escaleras de tiempo de bloqueo se pueden visualizar en una pantalla. Por lo tanto, los conflictos de programación se detectan exactamente por la superposición de los tiempos de bloqueo (Fig. N°17).

Este tipo de sistema de programación basado en computadora requiere una base de datos de infraestructura muy sofisticada, que no sólo contiene la distribución de la vía con todos los límites de velocidad y restricciones de línea, sino también todos los datos de señalización que son necesarios para el cálculo de tiempos de bloqueo. El diseñador de horarios puede resolver conflictos de programación desplazando o modificando las curvas de tiempo-distancia. En un futuro próximo, habrá sistemas de programación que ayuden al

programador no sólo por la visualización en conflicto, sino también por sugerencias para resolver conflictos basados en conocimiento de fondo.

### 2.1.6. Horario Cíclico

Un horario cíclico se basa en un patrón de tráfico que se repite cada hora. Dentro de este patrón, los trenes de la misma ruta se programan a intervalos fijos. Los horarios cíclicos son muy comunes en las líneas europeas de pasajeros, por razones comerciales. En las líneas de una sola vía así operadas, el tiempo de recorrido entre dos puntos de reunión programados (vías de paso) es igual a la mitad del recorrido fijo (Fig. N° 18). Cuando dos estaciones de paso están demasiado cerca entre sí, el tiempo de recorrido o el tiempo de permanencia tienen que ser extendido hasta esta cantidad. Esta es una gran limitación con respecto a la construcción de un horario con intervalos de tiempo fijos en líneas de una sola vía. Debido a las matemáticas de la situación, el número de puntos de encuentro en una línea de una sola vía requerida para un horario con intervalos de tiempo fijos puede determinarse fácilmente por la siguiente ecuación:

$$n_{MP} \geq 2 * t_{rt} / t_{fix}$$

$n_{MP}$  : Número de puntos de encuentro

$t_{rt}$  : Tiempo de recorrido de la línea

$t_{fix}$  : Intervalo de tiempo fijo entre trenes

El número de trenes necesarios para operar una ruta en intervalos de tiempo fijos se calcula de la siguiente manera:

$$n_T = t_c / t_{fix}$$

$n_T$  : Número de trenes

$t_c$  : Tiempo del ciclo

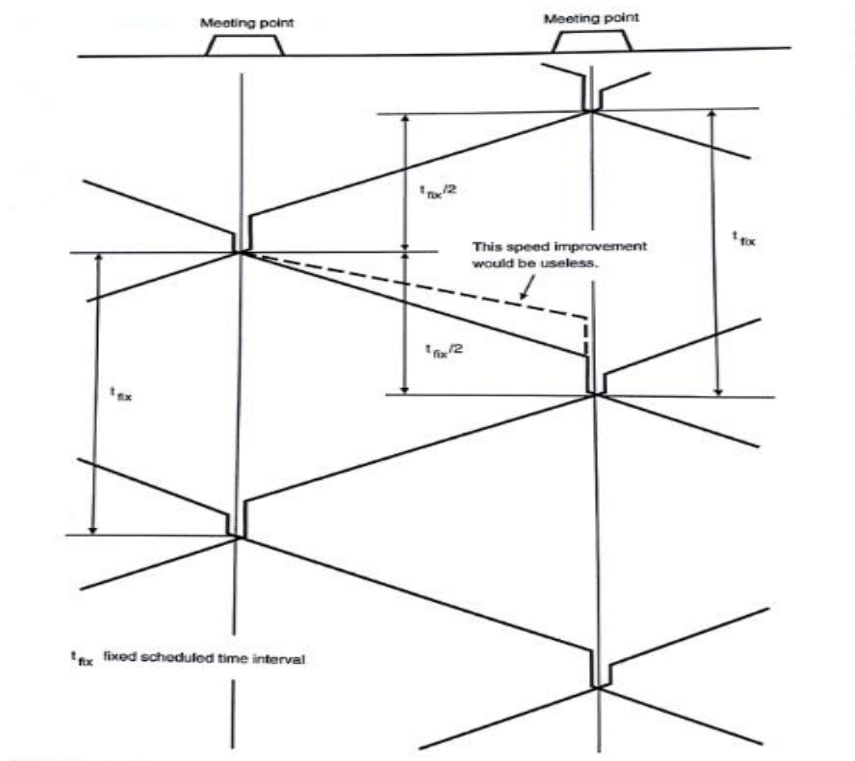
$t_{fix}$  : Intervalo de tiempo fijo entre trenes

El tiempo de ciclo es el tiempo total entre dos salidas sucesivas del mismo tren en la misma estación en la misma dirección (Fig. N° 19).

En cuanto a la combinación de varias rutas de tren, existen tres estrategias de planificación utilizadas en los horarios cíclicos:

- Horarios cíclicos no simétricos
- Horarios cíclicos simétricos
- Horarios cíclicos integrados

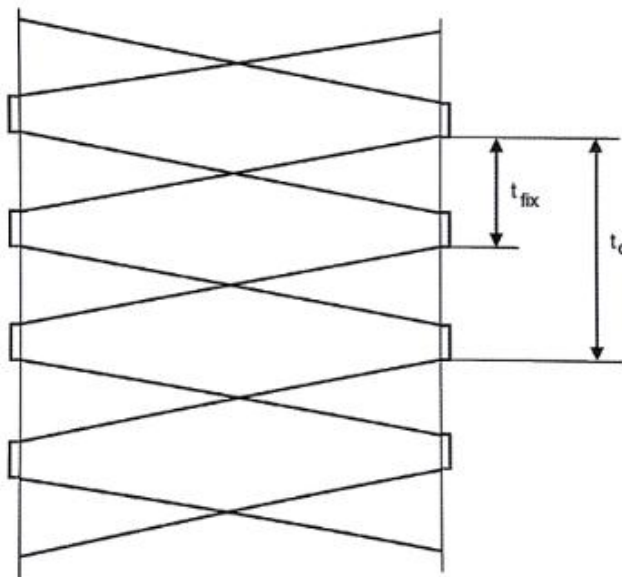
**Figura N° 18: Programación de intervalos fijos en una línea simple**



Fuente: Jorn Pacht (2014)

Como se muestra en la Fig. N° 18, los trenes de direcciones opuestas se reúnen dos veces dentro del intervalo de tiempo fijo programado. Por lo tanto, para los trenes de una ruta, el horario es siempre simétrico en el tiempo de reunión de los trenes opuestos. Este tiempo también se denomina "tiempo de simetría" del calendario. Si diferentes intervalos de tren programados de intervalo fijo pasan por la misma línea, estas rutas de tren pueden tener diferentes tiempos de simetría.

**Figura N° 19: Tiempo de ciclo**



Fuente: Jorn Pachl (2014)

Un horario simétrico se muestra en la figura anterior, donde muestra el tiempo de ciclo (págs. 14-45).

## **2.2. Modelado de la Infraestructura**

En este subcapítulo se describe los conceptos básicos del modelamiento de la Infraestructura, siendo esta la base para las tareas de planificación de servicios ferroviarios. El contenido de este subcapítulo está basado en el trabajo de Radtke (2014):

### **2.2.1. Teoría Grafica y su aplicación**

La mejor práctica en el modelado de la infraestructura ferroviaria es utilizar estructuras derivadas de la Teoría de Grafos. Los modelos gráficos han probado la ventaja de que son muy flexibles y son un poderoso medio para representar incluso la infraestructura ferroviaria más compleja en un modelo matemático eficiente. Además, estos modelos permiten un almacenamiento modular y redundante libre y manejo de los datos en grandes modelos de computadora. Estos modelos pueden ampliarse y modificarse, y su tamaño generalmente no está limitado. La infraestructura ferroviaria real existente (vías, sistemas de señalización o atributos como gradiente, radio, superposiciones etc.) se separa en



pedazos (enlaces). Estos enlaces están encerrados por nodos, que se unen a los enlaces.

Para una mejor comprensión del modelado de la infraestructura ferroviaria, se introducirán algunas definiciones:

- Un nodo (en términos matemáticos llamado 'vértice') es una representación de una ubicación arbitraria en una red ferroviaria.
- Un enlace (o matemáticamente 'segmento') es una conexión entre dos nodos.

El nivel de detalle de la infraestructura se define como sigue:

- Los modelos nodo-enlace microscópicos contienen el nivel más alto posible de detalles sobre nodos y enlaces dependiendo del propósito.
- Los modelos nodo-enlace macroscópico contienen información agregada sobre nodos y enlaces.
- Los modelos nodo-enlace mesoscópico son síntesis de modelos de infraestructura microscópicos y macroscópicos.

Para todos los modelos de infraestructura, un gráfico valorado (ver Fig. N° 20)

$$G := (V, E, c)$$

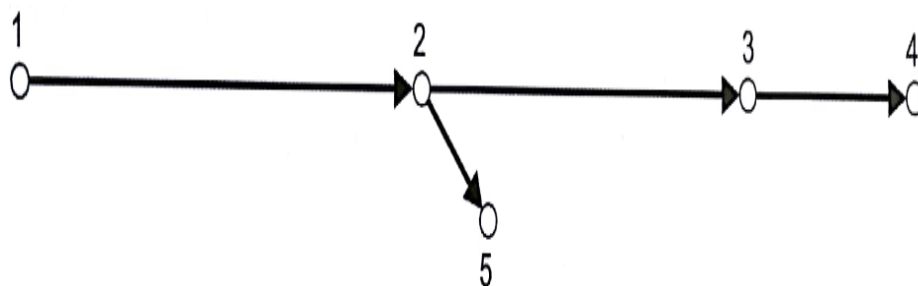
Con una función peso

$$c(e) \geq 0 \forall e \in E$$

y los nodos  $V$  (vértice) y los enlaces  $E$  (segmento) se pueden definir como:

- Dirigido: si dos nodos adyacentes están vinculados al menos un enlace, la dirección se ilustra con una flecha.
- Simple: si  $G$  no contiene enlaces o bucles paralelos
- Conectado: Si para algunos dos nodos de  $G$ , existen enlaces conectando nodos.

**Figura N° 20: Ejemplo de modelo de nodo y enlace**



Fuente: Alfons Radtke (2014)

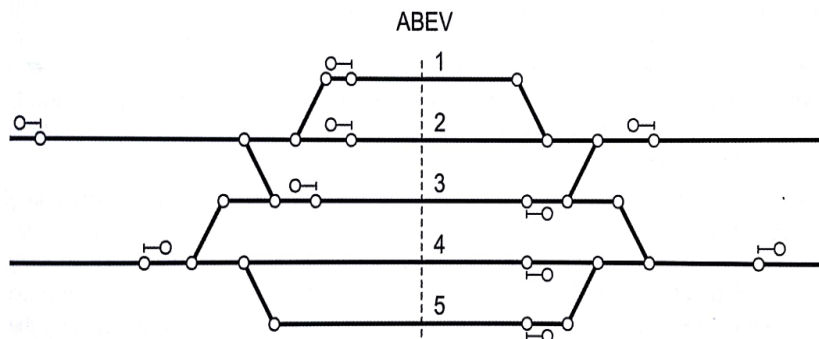
En el ejemplo simple ilustrado en la Fig. N° 20, se pueden ver cuatro enlaces:  $\{1-2\}$ ,  $\{2-3\}$ ,  $\{3-4\}$  y  $\{2-5\}$ . Este gráfico está dirigido (ver la flecha al final del enlace), no contiene bucles y el nodo  $\{2\}$  está incorporado en tres enlaces.

Utilizando un gráfico como modelo matemático, se pueden transformar varios problemas relacionados con el ferrocarril, para ser almacenados y procesados por algoritmos informáticos:

- Infraestructura ferroviaria real
- Las dependencias abstractas, reglas o flujos

En la Fig. N° 21, se puede ver un modelo de gráfico simple de la infraestructura ferroviaria de una estación pequeña incluyendo numeración de vías. Debe tenerse en cuenta que no todos los tipos de nodos aparecen en la ilustración. No hay ningún nodo para los cambios de velocidad o gradiente visible.

**Figura N° 21: Ejemplo de nodo y enlaces en una estación**



Fuente: Alfons Radtke (2014)

Para diversos problemas de optimización y su representación gráfica, existen algoritmos matemáticos y heurísticas muy eficaces. Para el modelado de la infraestructura ferroviaria, los dos problemas siguientes son los más significativos:

- Cálculo de las trayectorias más cortas en las redes de grafos entre dos nodos según diferentes criterios (problema del camino más corto). El algoritmo de Dijkstra podría ser usado para resolver este tipo de problema.
- Cálculo de flujos máximos o mínimos en redes de grafos teniendo en cuenta ciertas funciones de capacidad a los enlaces o nodos y no dependiendo del tiempo (problemas de flujo máximo y mínimo, algoritmo de salida de Kilter o Edmonds y Karp podrían utilizarse aquí).

Además, ciertos problemas ferroviarios (por ejemplo, asignación de vehículos) sólo pueden describirse utilizando enfoques más complejos en gráficos como el flujo de múltiples materias primas, flujos concurrentes máximos, flujos dinámicos o incluso una combinación con algoritmos heurísticos como recocido simulado o algoritmos genéticos.

Los atributos de una infraestructura ferroviaria modelado en forma gráfica se asignan a los enlaces y nodos. Los atributos típicos de los nodos son:

- Atributos geográficos (marcación kilométrica, coordenadas de posición, nombres, etc.)
- Tipo de nodo (señal, cambiavías, puntos de tiempo, etc.)

Para la atribución de enlaces existen dos enfoques:

- Modelos orientados a enlaces: Cada enlace contiene toda la información relevante (por ejemplo, velocidad, pendiente, radio, electrificación, dirección).
- Modelos orientados a nodos: Los tipos de nodos especiales indican el cambio de atributos (por ejemplo, velocidad cambia de nodo a nodo, gradiente cambia de nodo a nodo, etc.). En general, los enlaces no contienen ninguna información en modelos orientados a nodos. Cada nodo tiene una coordenada de posición. La longitud de un segmento puede calcularse por la diferencia de la posición de los nodos de inicio y final.

Ambos planteamientos tienen ventajas y desventajas. La asignación redundante de todos los atributos de infraestructura ferroviaria a cada enlace único en un modelo orientado a enlace puede verse como una desventaja, desperdiciando la capacidad de almacenamiento e implicando problemas en el manejo de cambios en esos atributos. Si un usuario necesita cambiar un atributo determinado en un área, todos los vínculos de esa zona deben tenerse en cuenta. En algunos casos, los enlaces deben separarse y crear un nuevo nodo para obtener una asignación modificada de atributos.

Sin embargo, los editores de infraestructura modernos proporcionan un soporte eficiente con funciones fáciles de usar para superar el problema de manejo de datos. Además, la cantidad de datos que se han de almacenar en la RAM de un ordenador ya no es crítica. En teoría, toda la red del ferrocarril alemán con aproximadamente 64.000 kilómetros de vía daría lugar a 64.000.000 de enlaces de una longitud de un metro. En la práctica, los enlaces de un metro son la excepción, toda la red de infraestructura ferroviaria microscópica alemana con aproximadamente 850.000 enlaces y 830.000 nodos puede mantenerse en 2 GB de RAM en un PC estándar.

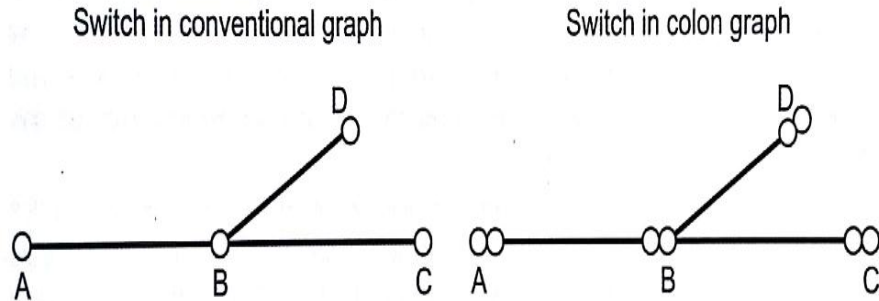
La ventaja de un modelo de atribución orientado a nodos es sin duda la posibilidad de almacenamiento de datos sin redundancia. Por ejemplo, para introducir un cambio de velocidad, hay que establecer un nodo del tipo "nodo de velocidad" en la posición deseada, o cambiar un nodo existente. Por otro lado, los modelos orientados a nodos requieren algoritmos más complejos para calcular todos los atributos de un determinado enlace de la red

Esta tarea puede ser muy difícil al considerar las marcas kilométricas en las redes ferroviarias, que a menudo no están bien definidas por razones históricas. Los cambios en la dirección del marcaje del kilómetro (subir, bajar) y el manejo de los valores erróneos del kilómetro requieren un esfuerzo significativo. En general, los modelos orientados a enlaces no necesitan esta funcionalidad.

En la Fig. N° 22, se ha ilustrado un enfoque alternativo al modelado de nodos. Denominado colon- gráfico permite una manera fácil de asegurar la correcta utilización de puntos durante la operación ferroviaria.

En el lado derecho, la duplicación de los nodos se puede ver. Aplicando la regla de que una ruta factible contiene la relación "nodo-nodo-enlace-nodo-nodo-enlace-nodo-nodo", es obvio que sólo las vías de A a través de B a C o D son factibles; Se excluye una trayectoria D-B-C.

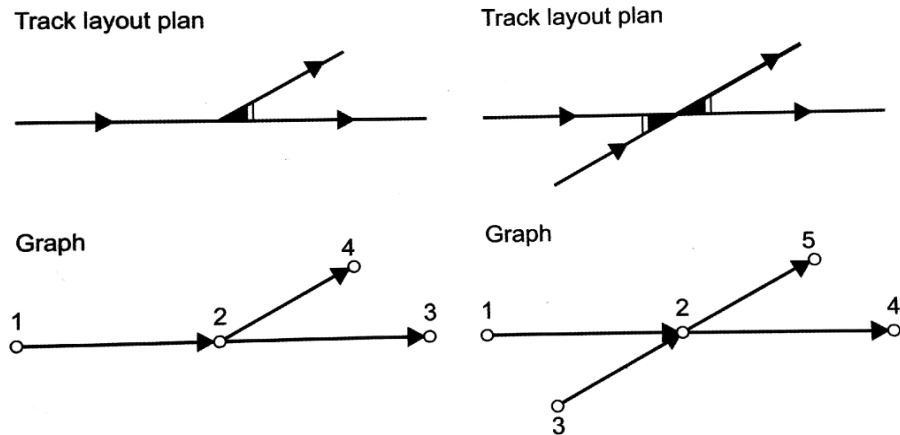
**Figura N° 22: Principio de gráfico- colon**



Fuente: Alfons Radtke (2014)

Fig. N° 23 ilustra la transición de los datos sin procesar de los planos de trazado de la vía en un modelo de gráfico de enlace de nodo. La representación de un conjunto de puntos (nodo (2)) se puede ver en el lado izquierdo. En la práctica, el centro del conjunto de puntos se transforma en un nodo. El enlace (2-3,2-4) contiene la velocidad para la ruta divergente. En el lado derecho de la fig. 3.4, el cruce permite las siguientes trayectorias ((1-2-2-4 y 1-2 a 2-5 / 3-2 a 2-5 y 3-2 a 2-4).

**Figura N° 23: Transición desde planos a modelo gráfico**



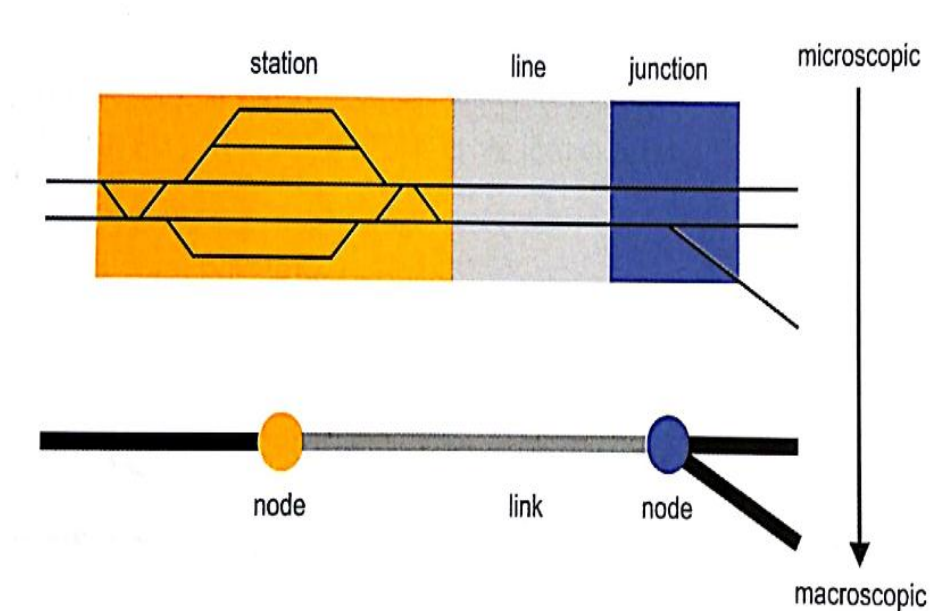
En resumen, se demuestra por un gran número de aplicaciones que la teoría de grafos puede modelar una infraestructura ferroviaria muy compleja y grande en un modelo matemático. Además, se han desarrollado algoritmos y conceptos eficientes para almacenar los datos y resolver problemas operacionales ferroviarios.

### **2.2.2. Modelos macroscópicos**

En general, el modelo macroscópico suele ser preferido para las tareas de planificación a largo plazo o problemas especiales de enrutamiento. Los modelos macroscópicos de la infraestructura contienen mucho menos segmentos y nodos en comparación con los modelos microscópicos y tienen una visión más abstracta de la infraestructura. Por ejemplo, toda la infraestructura ferroviaria alemana puede describirse en un modelo macroscópico con aproximadamente 10.000 enlaces y 10.000 nodos.

Un nodo en un modelo macroscópico representa una estación o un desvío en la red. Fig. N° 24 ilustra el principio básico de una red ferroviaria macroscópica. El modelo microscopio del elemento "estación", "línea" y "desvío" puede incluir un par de cien enlaces microscópicos y nodos, dependiendo de la complejidad. Por ejemplo, la "estación" podría ser una parada regular simple a lo largo de una línea con las plataformas en la vía principal, o la estación entera de Hannover en Alemania incluyendo 14 vías de la plataforma en la convergencia de varias líneas de ferrocarril. El modelo macroscópico ilustrado en la Fig. N° 24 contiene sólo dos nodos y cuatro enlaces.

**Figura N° 24: Principio de modelado macroscópico de la Infraestructura**



Fuente: Alfons Radtke (2014)

Los datos macroscópicos se pueden introducir manualmente de varias fuentes; incluso las fuentes públicas (internet) son suficientes en algunos casos. Si se dispone de una base de datos de infraestructura microscópica, es preferible una transferencia directa desde el modelo microscópico al modelo macroscópico.

Un nodo macroscópico típico contendría la siguiente información:

- Atributos geográficos (coordenadas, nombres, etc.)
- Tipo de nodo (estación, patio de maniobras, unión, etc.)
- Alguna información operacional (estación terminal, resistencias de recorrido)

Los enlaces macroscópicos pueden contener la siguiente información:

- Longitud
- Tipo de línea (alta velocidad, pasajeros, carga o línea mixta)
- Número de línea
- Número de vías
- Disponibilidad de trenes (electrificación, carga por eje, calibre de carga)
- Promedio de tiempo de viaje,
- Capacidad media (por ejemplo, según la UIC 406)

Una aplicación principal de los modelos de red macroscópicos es para la planificación a largo plazo de la infraestructura y la asignación de tráfico con el propósito de la búsqueda de trenes en las redes sin restricciones de tiempo. La introducción de nuevos trenes durante la asignación de tráfico, la búsqueda de un camino o el rerutamiento de los trenes de carga siempre requiere la búsqueda de un camino factible. En práctica, este es un proceso de dos pasos. La primera búsqueda en una red macroscópica no considera todas las vías individuales en líneas o estaciones, sino que determina una secuencia de estaciones para el recorrido del tren. Algunos criterios fundamentales considerados son, por ejemplo, la carga por eje, la electrificación u otras reglas operacionales, como los patrones de detención de los trenes de pasajeros o las rutas preferidas para los trenes de alta velocidad o de mercancías. En redes complejas, el tiempo de cálculo puede reducirse. Después de encontrar una solución inicial (por ejemplo, aplicando el algoritmo de Dijkstra), la afinación "fina" de la trayectoria del tren puede ser terminada más tarde en una red microscópica, calculando todas las vías en líneas y estaciones. Además, se puede determinar la plataforma en estaciones.

Los modelos macroscópicos no son adecuados para todas las tareas detalladas de planificación de operaciones ferroviarias, como el cálculo de tiempos de viaje o la detección de conflictos. En general, estos modelos no contienen información sobre la velocidad máxima exacta y el gradiente de la vía o las restricciones debidas al sistema de señalización. De este modo, no es posible calcular un tiempo de viaje correcto. El enfoque de utilizar un gradiente o velocidad "promedio" en modelos macroscópicos inducirá a error a un usuario, y los cálculos de tiempo de viaje basados en estos datos no deberían ser utilizados en trabajos de investigación o consultoría serios.

### **2.2.3. Modelos microscópicos**

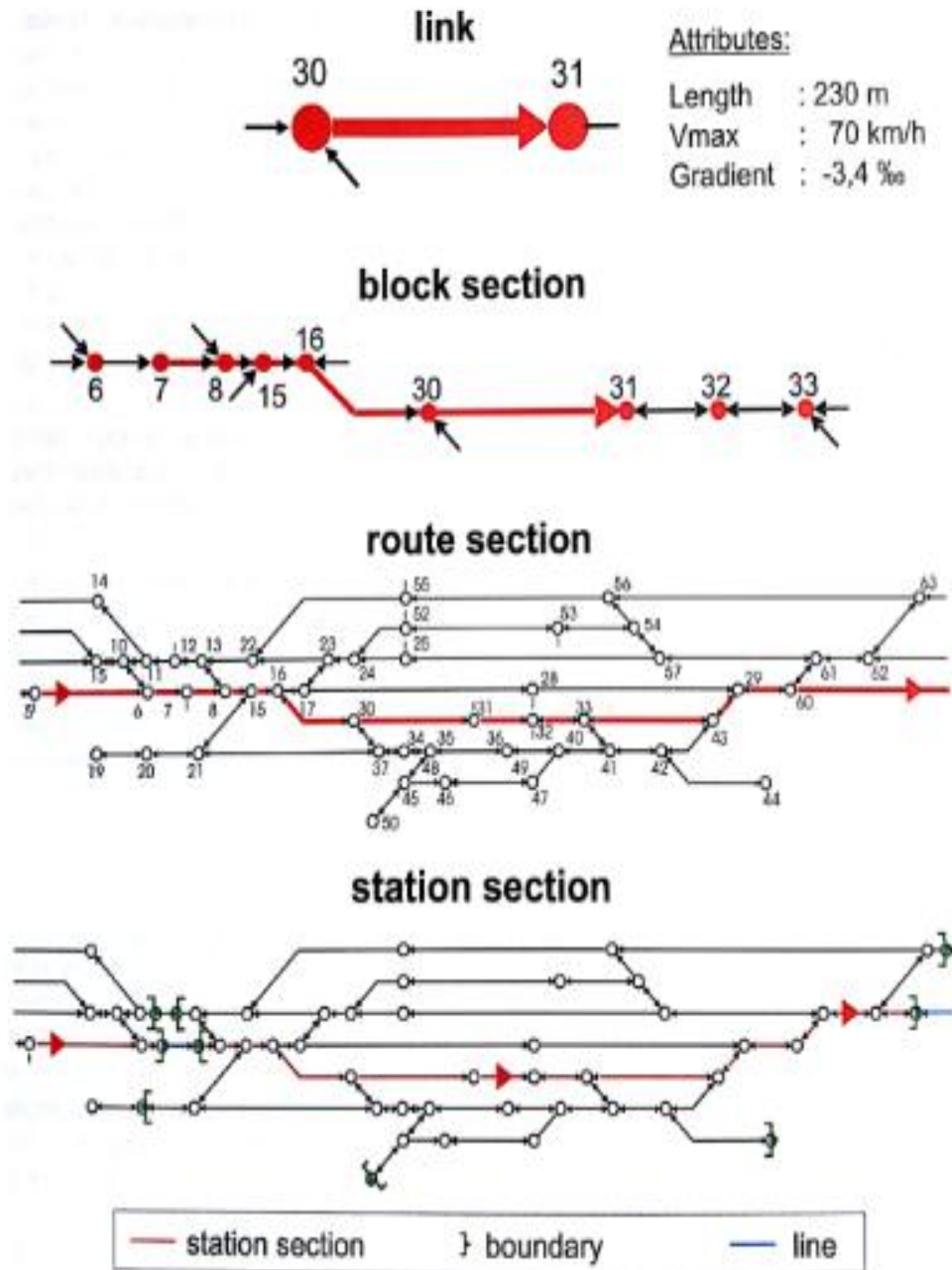
Un modelo de nodo-enlace detallado puede usarse para modelar la infraestructura en un modelo de infraestructura denominado modelo microscópico. Este modelo combina la información de la vía como la velocidad, el gradiente o el radio, con el sistema de señalización (señales, secciones del bloqueo, puntos de la liberación) y alguna información operacional como rutas, plataformas alternativas, puntos de la sincronización y una disponibilidad (marcas de tiempo). Cada pequeño cambio en uno de los atributos considerados anteriormente requiere un nuevo nodo,



dividiendo un enlace existente y generando uno nuevo. Dependiendo del enfoque elegido, la información se asigna al nodo o al enlace. En la práctica, la mínima longitud de un enlace existente describe la infraestructura ferroviaria en modelo microscópico tiene una longitud de un metro. Por razones de modelado, es útil trabajar en algunos casos con enlaces de 0 m (modelado de problemas de señalización). Basado en esta granularidad, el modelo de infraestructura microscópica no sólo es adecuado, pero incluso obligatorio para el cálculo del tiempo de recorrido exacto, la construcción del horario, la planificación de la posesión y la simulación de operaciones ferroviarias, la detección de conflictos y la resolución.

Un modelo típico de infraestructura microscópica contiene todas las vías en las líneas y especialmente en las estaciones. Fig. N° 25 muestra cómo los enlaces simples representan una infraestructura ferroviaria completa. Una sección de bloqueo, definida como una sección protegida por señales, puede estar formada por unos pocos enlaces. La sección de bloqueo tiene un nodo inicial y un nodo final. Ambos nodos pertenecen a los enlaces individuales existentes. Por lo tanto, en el modelo, no son necesarios nodos adicionales para describir el bloque.

Figura N° 25: Esquema en modelos de infraestructura microscópica



Fuente: Alfons Radtke (2014)

Varias secciones de bloqueo pueden ser abstraídas a secciones de ruta, que son secuencias de enlaces que guían a los trenes a través de la estación. Son proporcionados por el sistema de enclavamiento en la estación respectiva. Los trenes se asignan a las secciones de ruta, que pueden utilizarse para especificar la trayectoria de tren correcta a través de cada estación, encontrar una trayectoria

de tren correcta durante la construcción del horario o la simulación operacional ferroviaria, o asignar caminos protegidos por señales en una estación compleja a una plataforma.

Por lo tanto, una sección de ruta sólo se puede crear si esta sección es factible desde el punto de vista operacional. Una sección de ruta, el cual supone ser utilizada por locomotoras eléctricas, no debe ser creada en un modelo si algunos enlaces no están electrificados (o están temporalmente sin suministro eléctrico). Este enfoque simple puede utilizarse para transferir requisitos técnicos (por ejemplo, electrificación) o reglas operativas (plataformas alternativas teniendo en cuenta la longitud de la plataforma) en el modelo.

Los enfoques de modelado ligeramente diferentes usan secciones de estación para la definición de trayectos de tren.

Las secciones de estación son secuencia de enlaces conectados dentro de una sola estación, comenzando y terminando en los llamados límites de estación. Son proporcionados por el sistema de enclavamiento en la estación respectiva. Los trenes son asignados a secciones de ruta para especificar la trayectoria correcta de tren a través de cada estación. Este concepto tiene la ventaja de que los complejos movimientos de los trenes en las estaciones pueden describirse claramente en el modelo.

La siguiente lista contiene atributos de infraestructura, ordenados por importancia para el modelado correcto de la infraestructura para el cálculo de tiempos de viaje, construcción de horarios y simulación:

- Longitud de un enlace
- Gradiente
- Velocidad permitida (variaciones para diferentes tipos de trenes)
- Indicadores de velocidad abordó
- Electrificación y diferentes sistemas eléctricos
- Radio
- Sistema de señalización (M / P, ATC, LZB, ETCS L1 a L3, varias señalizaciones de múltiples aspectos)
- Superposiciones
- Liberar el contacto y la ubicación de despeje

- Circuitos de vía
- Tableros de parada
- Bloques y rutas
- Técnica de enclavamiento
- Exclusión de rutas
- Disponibilidad de infraestructura

Durante los últimos años, el modelo de infraestructura se ha ampliado para incluir la disponibilidad (sello temporal) de los elementos de la infraestructura. Estos sellos de tiempo se pueden asignar a un solo grupo o grupos de nodos y enlaces de un modelo de infraestructura microscópica. Es evidente que, con estos sellos de tiempo en el modelo de infraestructura, es sencillo generar automáticamente el modelo de adaptación de la infraestructura microscópica y el calendario correspondiente. Esto utiliza los días en la operación de una manera muy flexible durante un cierto período de tiempo (día, semana, etc.) y se obtiene de la misma base de datos. Por lo tanto, es posible mantener sólo una base de datos de infraestructura para generar una infraestructura de corto plazo para el calendario ad-hoc, así como para tareas de planificación de infraestructura a largo plazo.

Los modelos microscópicos han sido utilizados por más de 25 años en Alemania y otros países europeos para la planificación operativa de redes, líneas y cruces basados en computadoras. A partir de la experiencia adquirida, es evidente que, para obtener resultados fiables, la interrelación entre la infraestructura, el material rodante y el calendario debe evaluarse a nivel de red microscópica, que incluye todas las líneas y estaciones (amplitud de las redes, todas las vías). La complejidad considerada puede incluir varios sistemas de señalización, diferentes dinámicas de vehículos y reglas de programación de trenes, así como condiciones operacionales adicionales. Todas estas cuestiones dependen en cierto modo de la modelización fiable de la infraestructura ferroviaria.

Además, el trabajo en complejas redes de infraestructura (total o parcial) se está convirtiendo en un enfoque estándar. Por ejemplo, la identificación y evaluación de la fiabilidad de los indicadores de capacidad para líneas ferroviarias requiere la inclusión de por lo menos las uniones adyacentes y de una mejor manera la consideración de una red (parcial). Se hizo evidente durante la aplicación práctica de la construcción de horarios, planificación de la posesión y / o de los métodos de simulación de los ferrocarriles, que todas las ramas de estas uniones deberían

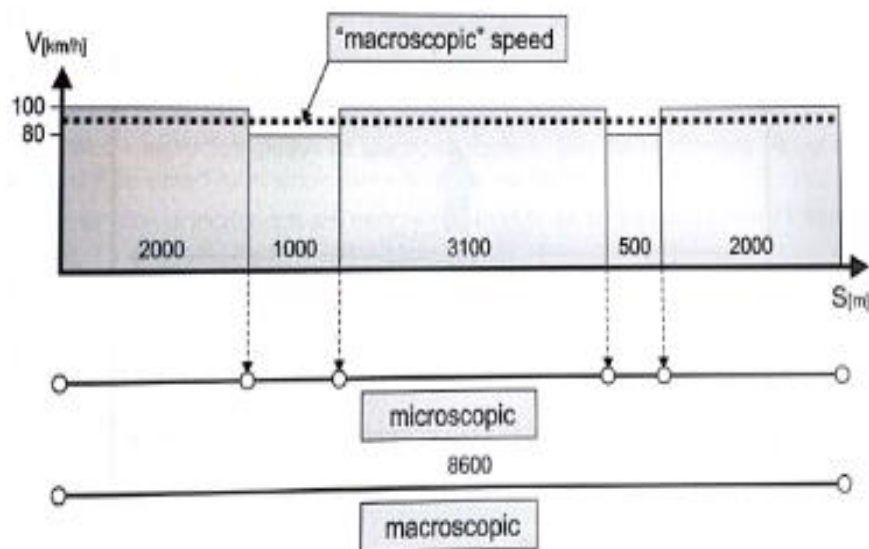
considerarse también en el modelo de red para asegurar que la construcción del horario, la planificación de la posesión y / o la simulación podría incorporar el impacto de los trenes que llegan a los cruces de las líneas de derivación.

#### 2.2.4. Diferencias entre modelos de infraestructura

Las diferencias entre los modelos microscópico y macroscópico se explicarán en el siguiente ejemplo. En la Fig. N° 26 una pequeña sección de una línea de ferrocarril se ha ilustrado en ambos. El eje vertical representa el límite de velocidad sobre la sección; El eje horizontal describe la longitud de la sección. En total, los 8.600 m están separados por cinco eslabones microscópicos que son diferentes en longitud

Como es típico en los modelos microscópicos, hay un nuevo nodo en la posición exacta donde un atributo (aquí el límite de velocidad) se ha cambiado. Para mantener el ejemplo simple, todos los otros atributos han sido eliminados de la ilustración. El modelo macroscópico sólo contiene

**Figura N° 26: Relación entre modelos de infraestructura macroscópica y microscópica**



Fuente: Alfons Radtke (2014)

Un enlace (fusionando los cinco enlaces microscópicos a uno macroscópico), uniendo el nodo inicial y final. El problema de asignar un límite de velocidad al enlace macroscópico es obvio. Hay las siguientes opciones:

- El mínimo límite de velocidad microscópico (80 km / h)
- Máximo límite de velocidad microscópico (100 km / h)
- Límite de velocidad medio considerando la longitud proporcional de los enlaces microscópicos (96,51 km / h): la línea punteada de la Fig. 26 denominado "velocidad macroscópica"

Una comparación de los cálculos de tiempo de viaje utilizando las tres opciones de límites de velocidad macroscópicos con el límite de velocidad microscópico mostró variaciones entre + 6% (demasiado rápido) y -20% (demasiado lento. Esto demuestra por qué los modelos macroscópicos no deben utilizarse para calcular el tiempo de viaje, la construcción del cronograma o la detección de conflictos en el proceso de planificación (págs. 48 -57).

## 2.3. Dinámica del tren y estimación del tiempo de recorrido

La dinámica del tren es el estudio del movimiento del tren y todos los factores relevantes que pueden influir en ella. A continuación, se presentan las variables dinámicas asociadas al tren y sus respectivas fórmulas matemáticas. El contenido de este capítulo se basa en la en el trabajo de Nan (2011):

### 2.3.1. Esfuerzo de tracción

#### a) Esfuerzo de tracción inducida $F_T(N)$

El esfuerzo de tracción inducida  $F_T$  se define como el esfuerzo que está destinado a mover el tren, el cual es generado por la locomotora (coche motor). El esfuerzo de tracción inducida se define como el único esfuerzo interno desde el tren para controlar el tren y que está relacionado con la potencia  $P[W]$  y la velocidad  $v[m/s]$  como se muestra en la siguiente fórmula:

$$F_T = \frac{P}{v}$$

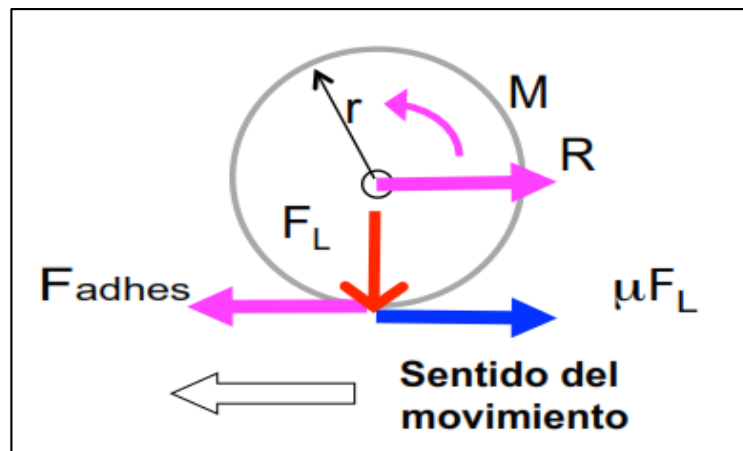
#### b) Las limitaciones del esfuerzo de tracción

En situaciones prácticas, no toda cantidad de esfuerzo de tracción inducida puede ser transmitido al tren, debido principalmente a las siguientes condiciones:

- Existe un factor  $\eta$  de eficiencia de energía durante el proceso de esfuerzo de la propia estructura mecánica de transmisión dentro del tren. Por lo general, este factor  $\eta$  de eficiencia de energía se estima entre 97% y 98%.
- Con el fin de evitar sobrecalentamiento del motor de un tren, la potencia máxima es limitado a un cierto valor.

El esfuerzo adherencia  $F_{adhes}[N]$  se determina por el valor de la adherencia y peso de la locomotora  $F_L[N]$ , y proporciona máximo esfuerzo de tracción posible sin girar las ruedas, a continuación, se presenta la representación gráfica:

**Figura N° 27: Representación de la fuerza de adherencia**



Fuente: CAMINS.CAT

Donde;

$F_L$  =Peso de la locomotora (eje tractivo)

$M$  =Momento transmitido por el motor

$R$  =Resistencia del Tren

$F_L = \frac{M}{r}$  =Fuerza en la llanta

$\mu$  =Coeficiente de adherencia rueda – carril

Condiciones:

Si  $F_{adhes} \leq R$  y  $F_{adhes} \leq \mu F_L$  ---> inmovilidad (ni giro ni traslación)

Si  $F_{adhes} \leq R$  y  $F_{adhes} > \mu F_L$  ---> giro con resbalamiento sin traslación

Si  $F_{adhes} > R$  y  $F_{adhes} > \mu F_L$  ---> traslación con resbalamiento

Si  $F_{adhes} > R$  y  $F_{adhes} \leq \mu F_L$  ---> traslación sin resbalamiento

$$F_{adhes} = F_L * \mu$$

El valor de adhesión  $\mu$  está influenciado por muchos factores tales como las características del material de la rueda y la vía, el tiempo y otros factores; y es difícil de obtener un valor razonable y preciso. Sin embargo, de acuerdo con (Brunger y Dahlhaus 2008), el valor de adhesión se puede estimar en tren en función de la velocidad, tal como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\mu(v) = \frac{7.5}{(3.6 * v + 44)} + 0.161$$

La variable  $v$  en la fórmula anterior sólo se refiere al valor numérico absoluta de la velocidad del tren (sin considerar la dirección de marcha del tren), la Fig. N° 28 muestra el diagrama esfuerzo versus velocidad.

### c) Esfuerzo de tracción efectiva y su representación

El esfuerzo de tracción efectiva  $F_{Traccion}$  y sus presentaciones de a) y b), el esfuerzo de tracción efectiva  $F_{Traccion}[N]$  puede ser presentada como la siguiente fórmula:

$$F_{Traccion} = \min \left\{ P * \frac{\eta}{v}, F_L * \mu \right\}$$

Sin embargo, por conveniencia, el esfuerzo de tracción eficaz también podría ser presentado en fórmulas hiperbólicas o parabólicas como se muestra a continuación:

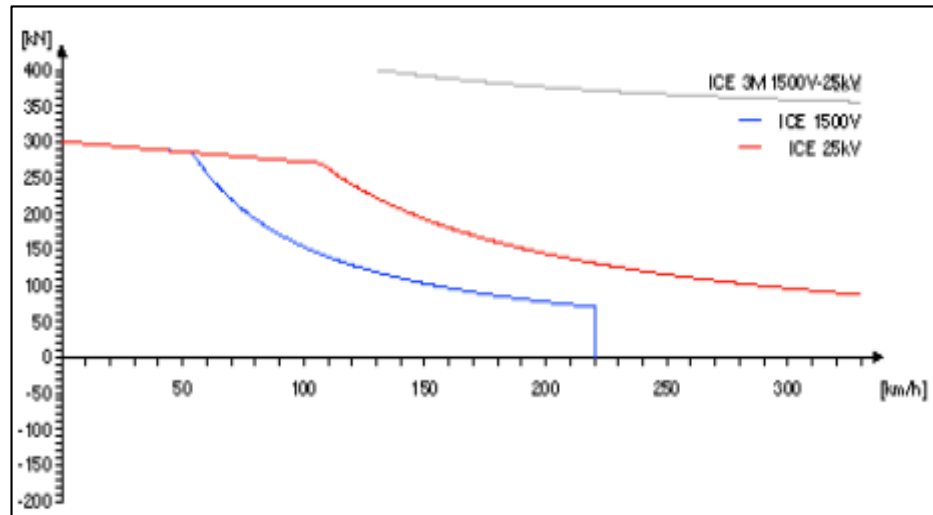
$$F_{Traccion} = C_{0,k} + C_{1,k} * v + C_{2,k} * v^2, \quad v_k \leq v \leq v_{k+1}$$

$$F_{Traccion} = \frac{C_{h,k}}{v}, \quad v_k \leq v \leq v_{k+1}$$



Donde  $C_{0,k}[N]$  ,  $C_{1,k}[Ns/m]$ ,  $C_{2,k}[Ns^2/m^2]$  son los coeficientes para la velocidad  $v$  con diferentes energía y  $v_k$  el intervalo límite de la velocidad. Además, la relación entre el esfuerzo de tracción efectiva y la velocidad del tren se muestra en la siguiente figura:

**Figura N° 28: Curva de esfuerzo tracción**



Fuente: Brunger y Dahlhaus 2008

### 2.3.2. Esfuerzo de Resistencia

Esfuerzo de resistencia al tren se clasifican en dos tipos: resistencia de línea y resistencia del tren.

La resistencia de la línea, se refiere a la resistencia que es causada por el gradiente, curva o túnel; para la resistencia del tren, es un resultado de la resistencia aerodinámica y resistencia al mecanismo interno del tren.

Resistencia del tren puede ser dividida en resistencia a la tracción y resistencia a la unidad de vehículo (coches de pasajeros, vagones de mercancías).

#### a) Resistencia de línea $F_{RI}[N]$

Cuando un tren está recorriendo a lo largo de la vía, puede experimentar dos tipos de resistencias: resistencia al gradiente y resistencia a la curva.

➤ **Resistencia al gradiente**  $F_{RIg}[N]$  está dada por la fórmula:

$$F_{RIg} = g * m * \text{sen } \alpha \approx g * m * n$$

Donde  $n$  es el factor de gradiente definido como la razón de dos puntos diferencia vertical dividido por su diferencia horizontal.

- **Resistencia de la curva** se puede calcular por la siguiente formula:

$$F_{Ric} = g * m * \frac{700}{r}$$

Donde  $r$  es el radio de la curva y 700 es un coeficiente empírico. Si  $r = 700$  m, resistencia curva es la misma que la resistencia gradiente de gradiente de  $n = 1$  en la fórmula resistencia al gradiente. Por lo tanto, la influencia de la resistencia curva es relativamente pequeña en general.

- **Resistencia de aire del Túnel**

Los trenes que viajan en los túneles experimentan sustancialmente mayor resistencia del aire. La cantidad de resistencia postura depende de la superficie exterior del tren, la forma del túnel, la sección transversal del túnel y la suavidad de las paredes del túnel. Resistencia a la rodadura del tren aumenta por el túnel resistencia  $F_T$ . Para tramos de vía normales (es decir, no en túneles)  $F_T = 0$

$$F_T = f_T * v^2$$

Donde

$F_T$  = Resistencia del túnel [N]

$f_T$  = Factor túnel [kg/m]

$v$  = Velocidad [m/s]

## b) La resistencia del tren $F_{TR}$ [N]

La resistencia del tren puede ser causado por dos razones:

Cuando el tren se mueve, se experimentará una resistencia del aire; resistencia a la rodadura causada por tren interacción mecanismo interno, tales como ruedas, adherencia, etc.

Por lo general, la resistencia del tren es presentado por formulas parabólicas, denominado también como ecuación de Davis, en honor a W.J. Davis, quien publicó la fórmula en un artículo sobre resistencia a la tracción de locomotoras eléctricas y coches en 1926:

$$F_{TR} = A + B * v + C * v^2$$

A= Coeficiente relaciona al peso [N]

B= Coeficiente relacional al peso del tren y velocidad [N s/m]

C= Coeficiente de resistencia aerodinámica [N s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]

$F_{TR}$  = Resistencia del tren [N]

v= Velocidad [m/s]

a continuación, se procede a describir cada componente de la ecuación anterior:

#### **i) Coeficiente 'A': independiente de la velocidad**

El factor A depende de características del material rodante y representa las resistencias a la rodadura que se generan por la fricción entre la rueda y el carril. Este factor depende del peso.

#### **ii) Coeficiente 'B': proporcional a la velocidad**

El coeficiente 'B' representa las diversas resistencias mecánicas que son proporcionales a la velocidad como la rotación de los ejes, transmisión mecánica, de frenado, etc. Depende de múltiples parámetros de los cuales los más importantes son:

- Peso del tren.
- Construcción de vía férrea.
- Influencia de la resistencia del impulso del aire: un tren ingiere aire para el enfriamiento y la ventilación, lo que provoca una resistencia adicional al impulso del aire

#### **iii) Coeficiente 'C': proporcional al cuadrado de la velocidad**

El coeficiente 'C' representa la resistencia del aire (que incluye turbulencias). Este factor está influenciado por múltiples parámetros, tales como:

- La sección transversal del vehículo o efecto de cabeza.
- Fricción en los costados del tren.
- Objetos sobresalientes (pantógrafos y equipos de techo, etc.)
- Arrastre trasero o efecto cola (pérdida de cola).
- Arrastre creado entre coches o vagones (espacios entre los coches)
- Comportamiento en túneles.

En la práctica, hay varias fórmulas se pueden utilizar para calcular la resistencia del tren, a continuación se desarrolla la forma de cálculo de cada una de ellas:

### 1. La resistencia del tren - Dahlaus

En (Brunger y Dahlhaus 2008), la fórmula parabólica de resistencia especializada para la unidad de tracción (incluyendo múltiples unidades) es la siguiente fórmula:

$$F_{TR} = g * m_T * (a_0 + a_1 * v) + a_2 * v^2 + a_{2r} * v_r^2$$

Donde  $a_0, a_1 [m/s]$  y  $a_2, a_{2r} [Nm^2/s^2]$  son el coeficiente de la fórmula,  $m_T [kg]$  es la masa de la unidad de tracción, y  $v_r$  es la velocidad relativa entre el aire y vehículo. En una situación de viento en contra es igual a 15 km / h, que tendrá  $v_r = v + 4.17m/s$ .

### 2. La resistencia de tren - Sauthoff

La fórmula Sauthoff resuelve cálculo de la resistencia vehículo para coches de pasajeros, y sus coeficientes para la fórmula en resistencia del tren se determina por la masa de los vehículos, un factor relevante en el número de ejes, el número de vehículos y un valor representa la cruzada área de la sección de los vehículos ponderados con su comportamiento aerodinámico. La fórmula Sauthoff (Brunger y Dahlhaus 2008), es la siguiente:

$$F_{TR} = \left( \frac{1}{1000} \right) * m_w * g * (1.9 + c_b * 3.6 * v) + 0.0471 * (n_w + 2.7) * A_f * (3.6 * v_r)^2$$

Donde

$m_w$  = Masa del vehículo [kg]

$c_b$  = Factor de número de ejes

$n_w$  = Número de vehículos

$A_f$  = Factor para el área transversal del vehículo ponderado por su comportamiento dinámico

$v_r$  = Velocidad relativa entre el aire y el vehículo [m/s]

El autor indica que indica que el uso diferente de la fórmula de resistencia del tren muestra diferencia en la fuerza de tracción, mientras que las desviaciones son mínimas en la estimación del tiempo de recorrido de los trenes. Por lo tanto, el resultado de usar diferentes fórmulas derivará en uso de diferentes energías, mientras que el tiempo de recorrido será casi el mismo

#### c) Resistencia total $F_R$ [N]

La resistencia total  $F_R$  es la sumatoria de la resistencia de la línea, resistencia del tren y resistencia del túnel, en la siguiente fórmula se ilustra lo indicado:

$$F_R = F_{RIg} + F_{RIc} + F_{TR} + F_{Tunel}$$

#### d) Masas en rotación

La parte giratoria del tren también consumirá algo del esfuerzo; por lo tanto, una masa factor de  $f_p$  se utiliza para equilibrar la diferencia de cada parte del tren. Este valor es calculado en la fórmula:

$$f_p = (f_{pT} * m_T + f_{pW} * m_W) / (m_T + m_W)$$

Donde

$f_{pT}$  = Es el factor de rotación de la unidad de tracción

$f_{pW}$  = Es el factor de rotación coches de pasajeros o carga

### 2.3.3. Calculo del tiempo de recorrido

La fuerza resultante para que el tren se pueda movilizar en la siguiente:

$$F_{Tracción} - F_R = f_p * m * a = f_p * m * dv/dt$$

A partir de la formula anterior se despeja el variable tiempo  $t$ , se tiene la siguiente expresión matemática:

$$t = \int \frac{m * f_p}{F_{Tracción}(v) - F_R(v)} dv$$

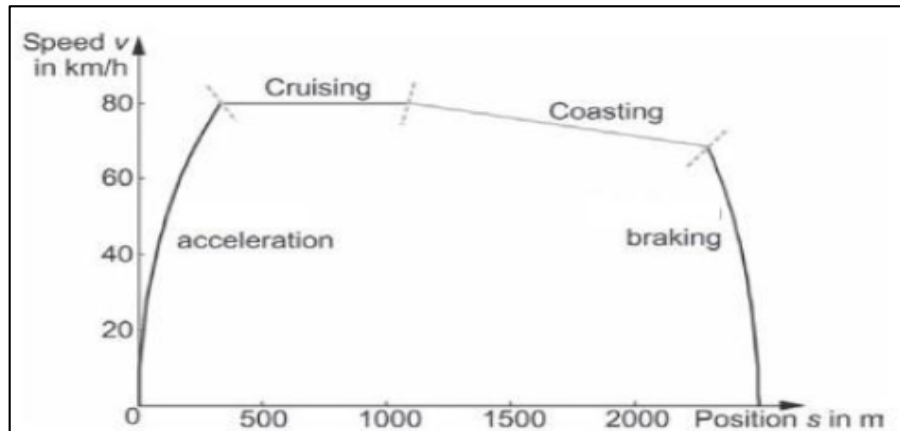
Sin embargo, la fórmula anterior no se puede calcularse directamente, porque la fuerza de tracción efectiva del tren y resistencia total es en función de su velocidad y varía para cada segundo.

Por lo tanto, para calcular los valores se utilizan métodos numéricos para la estimación del tiempo, en este caso se usa el método de Euler. Método de Euler funciona calculando el cambio en una variable de un punto de partida dado y calcula cada valor funcional utilizando el valor funcional anterior, la anterior derivada de la función, y un paso de tiempo fijo (Hürlimann 2010). Este tipo de método de cálculo es ampliamente aceptado como herramienta para el cálculo de tiempo de viaje del tren.

### 2.3.4. Comportamiento del movimiento del tren

Durante un recorrido de un tren, sólo existe cuatro tipos de posible comportamiento del movimiento básico que se pueden identificar en la práctica: la aceleración, crucero, inercia y el frenado, las que se muestra en la Fig. N° 29. Todo el movimiento de los trenes puede ser descrito por las secuencias de comportamiento movimiento básico.

**Figura N° 29: Comportamiento del movimiento del Tren**



Fuente: Brunger y Dahlhaus 2008

Para la fase de aceleración de un tren, el esfuerzo de tracción debe ser mayor que la fuerza de resistencia.

La fase de crucero significa que el tren está funcionando a una velocidad constante. En este caso,  $F_{\text{tracción}} = F_R$  y el tiempo de viaje ( $t$ ) de esta fase se puede derivar mediante la fórmula simple de Newton  $t = s / v$ , donde  $s$  es la distancia de crucero.

La fase de inercia significa que el tren está en marcha sin ningún esfuerzo por parte del motor, donde  $F_{\text{tracción}} = 0$  [N]. En este caso, el tren no lo hará consumir toda la energía y su velocidad puede aumentar o disminuir dependiendo de la pendiente de la sección y el valor de la resistencia del tren;

La fase de frenado, nominalmente significa que el tren está reduciendo la velocidad con la fuerza de tracción  $F_{\text{tracción}} < 0$  [N]. Sin embargo, desde un punto de vista práctico el uso puede ser clasificado como el frenado normal y el frenado de emergencia. El frenado normal se utiliza en situación normal, y su esfuerzo de desaceleración es más pequeño que el de la frenada de emergencia con el fin de hacer que los pasajeros se sienten más cómodos, mientras que el frenado de emergencia se utiliza en situaciones inesperadas y su objetivo es hacer que el tren se mueva hasta la parada como tan pronto como sea posible (págs. 7-16).

## 2.4. Simulación

En este subcapítulo se presenta el rol que cumple de la simulación, métodos de simulación, herramientas de simulación y beneficios del uso de la simulación. El contenido de este tópico está basado en la obra de Watson y Medeossi (2014) :

#### **2.4.1. El papel de la simulación**

A continuación, se enuncia algunos conceptos relacionados a la simulación y la aplicación de la misma:

“La simulación es un método popular para analizar sistemas complejos cuando no se utilizan herramientas analíticas disponibles” (Goverde, 2005, pág. 74).

Siefer (2008) señala que:

Durante los recientes años, se ha convertido claramente la simulación como un apropiado método para reproducir la realidad en un proceso virtual. Los resultados pueden ayudar a entender y analizar los procesos más fácilmente.

[...]

Con la ayuda de las herramientas de simulación, un laboratorio virtual puede desarrollarse en el sistema informático. En este laboratorio, los horarios y la infraestructura pueden ser cambiados y modificados en diferentes formas. El laboratorio virtual no tiene limitaciones y es mucho más eficiente en costo que un modelo físico experimental, con la ayuda de la simulación, el planificador puede chequear sus ideas por toda la planificación de la infraestructura o modos de operación: en ese caso, la simulación es una herramienta para planificación y optimización (pág.155).

Así como también Transit Cooperative Research Program (2013) dice lo siguiente respecto a la simulación:

Un modelo de simulación de operaciones describe de manera realista los movimientos de los trenes o red ferroviaria, incluyendo líneas principales, cruces, estaciones y terminales. Simulaciones son potentes herramientas analíticas que representan con precisión:

- Las características físicas de la infraestructura de un tránsito o ferrocarril red,



- Las características de rendimiento de los trenes que operan en la red
- El sistema de control de señalización / tren que rige las operaciones de los trenes red.

Estos modelos son sofisticados programas diseñados para representar operaciones en un entorno de planificación o un centro de control en línea. Simulación de modelos pueden ser desarrollados y utilizados en varios niveles de complejidad. Estos modelos pueden simular de forma realista los movimientos de los trenes en una variedad de redes niveles de complejidad, múltiples vías/rutas, y patrones de detención variable. Ellos son capaces de resolver conflictos complejos de varios trenes de manera realista. Estos modelos han sido demostrados ser plenamente capaz de manejar complejas configuraciones de vías y mezclas de trenes en una red. (pág. 91).

La simulación ha sido definida por Robinson (1994) como "un modelo que imita la realidad" y por Gamerman y López (2006) como "tratamiento de un problema real a través de la reproducción en un entorno controlado por el experimentador". Robinson señala que la simulación puede ser más apropiada para los modelos matemáticos en los que existen variables y que los modelos matemáticos no son buenos para evaluar los impactos "knock on". Por ejemplo, en las operaciones ferroviarias, los "retrasos secundarios" se deben a que el tren retrasa otro. En algunas circunstancias, la simulación se realiza mediante la elaboración de un modelo físico; tratando de simular el comportamiento de las operaciones ferroviarias en el mejor de los casos emprendido por ordenador.

La simulación de los horarios de los ferrocarriles se usa para probar el impacto en el desempeño de cambiar un rango de variables, incluyendo:

- Diferentes opciones de horarios (más trenes, diferentes estructuras horarias)
- Diferentes características de rendimiento de los trenes (factores mecánicos y humanos)
- Diferentes configuraciones de infraestructura
- Cambios en el nivel y naturaleza de los retrasos / tardanza

Por lo general, esto es llevado a cabo por el departamento de planificación estratégica de un ferrocarril o la organización de planificación de trenes "a largo

plazo", centrada en tomar las mejores decisiones posibles con respecto al siguiente cambio o inversión importante en infraestructura o material rodante. Además, la simulación se utiliza con la planificación operacional ferroviaria para:

- Realizar análisis de los tiempos de amortiguación como insumo para la construcción de los horarios.
- Probar los conflictos entre trenes en el horario planificado
- Generar horarios a partir de cero (aunque a menos que el problema sea muy simple normalmente es mejor usar otros enfoques o buscar más rutas en un horario existente
- Modificar los horarios para acomodar el trabajo de ingeniería.
- Modelar los movimientos del tren dentro de los patios de mantenimiento
- Modelar los flujos peatonales en las estaciones, incluyendo la comprensión de la interacción entre los trenes que pasan tarde y la congestión en plataformas y escaleras mecánicas.
- Predecir los conflictos "en tiempo real" para apoyar en el día las decisiones de enmendar el servicio de tranvía en reacción a los retrasos.
- Ayudar a los conductores y otros tripulantes del tren a "Aprender la ruta" a través de paquetes de simulación de conductores y práctica de señalización haciendo el mejor uso de la infraestructura para minimizar el retraso del tren.

#### **2.4.2. Métodos de simulación**

A continuación, se describe los diferentes métodos de simulación y cuando es apropiada la ejecución de cada una de ellas.

##### ➤ **Determinista vs estocástico**

La simulación es determinística si todos los parámetros son definidos por el usuario y no contienen componentes aleatorios. Los modelos determinísticos se utilizan para representar sistemas reales que son demasiado complejos para ser evaluados analíticamente y donde el impacto de perturbaciones aleatorias (o cuasi aleatorias) para el funcionamiento normal del sistema no necesita ser evaluado.

En simulaciones estocásticas se introducen componentes aleatorios para representar mejor otros fenómenos. Dado que las simulaciones estocásticas se utilizan para evaluar el comportamiento de un sistema con algunos factores

aleatorios, los resultados de una sola ejecución de simulación no tienen relevancia estadística. Como consecuencia, se deben realizar varias múltiples simulaciones.

Las simulaciones determinísticas apoyan la planificación del horario o el diseño de nuevas infraestructuras, mientras que los modelos estocásticos permiten analizar la robustez del horario o el análisis de estabilidad.

#### ➤ **Continúo vs discreto**

En los modelos de simulación continua, el valor de las variables de estado cambia continuamente en el tiempo. Se calcula por lo tanto con resolución analítica continua de ecuaciones de estado. En modelos de simulación discreta, las variables de estado se calculan únicamente a intervalos de tiempo fijos (modelos de avance de tiempo de incremento fijo) o cuando ocurre un evento, independientemente del intervalo de tiempo entre dos sucesos sucesivos. Los simuladores de ferrocarril son continuos cuando resuelven la ecuación de movimiento con un algoritmo continuo, mientras que los modelos más simplificados usan procesos predefinidos y tiempos de sucesos en un enfoque discreto.

Dado que algunos de los procesos de operaciones ferroviarias son continuos, tales como, por ejemplo, el movimiento del tren a lo largo de una línea, mientras que otros son discretos, tales como la liberación de una sección de bloque o la salida programada de una estación, los modelos más avanzados de simulación utilizan un enfoque mixto continuo-discreto.

#### ➤ **Microscópico vs Macroscópico**

Los modelos de macro-simulación utilizan un modelo simplificado de infraestructura para reducir el tiempo de la computación y por lo tanto permiten la simulación de redes más grandes. Los modelos de micro-simulación ofrecen una descripción de la infraestructura que reproduce la funcionalidad del enclavamiento, seguridad y los sistemas de bloqueo. Los modelos macroscópicos describen la red y el horario como un gráfico dirigido de nodos simples (estaciones) y enlaces que representan las secciones de línea e incluyen la frecuencia y el tiempo de funcionamiento de los trenes. Los

elementos de infraestructura geográfica dentro de modelos microscópicos también están representados por un gráfico, pero representa la disposición completa de estaciones y líneas incluyendo la alineación vertical y horizontal, todas las cambiavías y la señalización, enclavamiento y protección automática del tren / sistemas de protección. Estos datos, combinados con las características técnicas del material rodante y un horario detallado, permiten reproducir los movimientos de los trenes con mayor detalle.

Dado que algunas de las salidas de una simulación microscópica, tales como los tiempos de recorrido calculados, son una entrada de macro-simulación, y la dimensión de las redes que se pueden simular en un tiempo razonable es completamente diferente, así como la precisión de las salidas, los dos métodos de simulación pueden ser considerados como complementarios. Los modelos microscópicos tienden a ser más precisos debido al mayor detalle en el modelo de infraestructura, por lo que hasta la fecha se han utilizado en una medida mucho mayor que los modelos macroscópicos para simulaciones operacionales ferroviarias.

#### ➤ **Modelos de simulación síncronos y asíncronos**

Los modelos de simulación microscópicos pueden ser síncronas o asíncronas.

En la simulación síncrona, toda la ecuación de movimiento de los trenes que se mueven juntos en una red microscópica se modela con respecto al enclavamiento y la funcionalidad del sistema de seguridad. Las diferencias entre modelos están principalmente en la flexibilidad para representar diferentes tecnologías, en la capacidad de recibir entradas automáticas o generar salidas específicas.

En una simulación asíncrona estándar, los trenes con mayor prioridad se simulan primero, y los conflictos entre ellos se resuelven con una estrategia de primer orden de llegada; las ocupaciones de infraestructura resultantes se almacenan. Entonces el proceso se repite para cada grupo de prioridad, saturando cada vez más las ventanas de tiempo que todavía no se usan. Por lo tanto, es posible que no hay conflicto entre los trenes con diferentes prioridades: los servicios de alta prioridad nunca se ven obligados a frenar o detenerse por los conflictos con los trenes de baja prioridad.

Modelos asíncronas y síncronas muestran diferentes puntos fuertes y débiles, que los hacen complementarios para apoyar la planificación ferroviaria. La simulación síncrona permite representaciones más realistas del tráfico de trenes, con todos los trenes que se mueven simultáneamente en líneas y por lo tanto interactúan entre sí, con retrasos secundarios transferidos de trenes de alta prioridad a trenes de baja prioridad y viceversa. En los modelos síncronos también es sencillo implementar una gran variedad de incidentes, lo que puede implicar cerca de toda la infraestructura y elementos de señalización, también con variabilidad estocástica, como apertura intermitente y cierre de pasos de nivel.

La simulación asíncrona es más adecuada para soportar la construcción de horarios, que se realiza por pasos y donde los trenes de baja prioridad están normalmente programados después de otros servicios. También es fácil definir nuevos cursos dentro de un horario predefinido, obteniendo un horario libre de conflictos y una asignación automática de las vías de la estación.

Los modelos síncronos son más ampliamente utilizados, pero hay algunos problemas inherentes.

Existe el riesgo de que los modelos síncronos no siempre gestionen correctamente el orden de prioridad, ya que la prioridad puede basarse únicamente en la pre-reserva de sección de bloqueo, causando obstáculos poco realistas a otros trenes e incrementando ocupaciones cada vez mayores de la sección conflictiva. Por otro lado, en las herramientas síncronas siempre se prefieren los trenes con alta prioridad y desplazan los trenes con menor prioridad. Debido a la estructura estrictamente jerárquica de una simulación asíncrona, los trenes con baja prioridad pueden recibir más retrasos en una simulación asíncrona que en realidad.

Otro problema con los modelos síncronos es el de los bloqueos. Normalmente ocurren en líneas de una vía o bidireccionales, cuando se permite que dos o más trenes bloquen y / o entren en la misma sección de línea al mismo tiempo, pudiendo detenerse "cabeza a cabeza" uno frente al otro, incapaz para moverse y "bloqueado" hasta el final de la simulación. Los bloqueos pueden resolverse en su mayoría mediante algoritmos simples, que son normalmente

confiables y eficientes, pero en cierta situación se necesitan algoritmos más complejos o intervención manual (véase la sección posterior de este capítulo). Donde no es posible eliminar el bloqueo modificando el ajuste para el modelo, puede ser necesario descartar estas simulaciones que pueden reducir la fiabilidad de los resultados.

### 2.4.3. Herramientas de simulación

#### ➤ Modelos de macro-simulación

Las herramientas para la simulación de modelos macroscópicos se han desarrollado principalmente para simular horarios de una amplia red ferroviaria. Para ello, se hacen aproximaciones para mantener la complejidad del modelo y simulación de tiempo de recorrido manejable, pero a costa de una reducida precisión. Estos modelos tienden a ser utilizados en una etapa de planificación estratégica, a veces en conjunción con modelos de micro-simulación.

A continuación, se lista los softwares simulación macroscópica:

- FASTA (EPFL 2013) es un sistema de simulación de eventos discretos desarrollado en la EPFL de Lausana.
- MERIT (Modelando la Fiabilidad de la Infraestructura y el Horario) (AEA Technology Rail, 2002) es una herramienta de simulación de eventos discretos propiedad de DeltaRail para simulaciones en grandes redes.
- El macro-simulador determinístico NEMO (Netz -EvaluationsMOdell) (IVE, 2013) es una herramienta de planificación estratégica para la evaluación de escenarios de infraestructura.
- SIMONE es una herramienta de simulación de eventos discretos utilizada por Prorail, el gestor de infraestructuras holandés desde 1999, véase Middelkoop & Bouwman (2001).
- TRAIL (Logística de Infraestructura de Disponibilidad de Fiabilidad de Trenes) es una herramienta de simulación de confiabilidad de sistemas ferroviarios suministrada por DNV.

- TTRA (el analizador de robustez de horario) es un elemento del producto Trapeze's Trainplan.

Todos los paquetes anteriores se han utilizado en su mayor parte en ferrocarriles de tráfico mixto y, en particular, donde predominan los trenes de mercancías, las líneas principales de vía única son los más comunes y los planes de tren varían día a día para acomodar los vagones de carga que necesitan ser movido.

➤ **Modelos de simulación microscópicos síncronos**

Estos paquetes, que son los más utilizados por las organizaciones académicas y comerciales, tienen similitudes considerables en términos de enfoque. Ellos tienen modelos detallados de la infraestructura y calculan la localización de los trenes como ellos se mueven a través de la red, usando la infraestructura y características del rendimiento de los trenes. Las diferencias claves entre los modelos, cómo ellos funcionan con la red y se relacionan con el algoritmo sofisticado de despacho de trenes (el corazón del simulador que hace las prioridades del tren y las decisiones del enrutamiento en lugar del despachador o del tren controlador). Otros factores son la facilidad de uso de las interfaces de usuario, la medida en que el usuario puede ajustar la forma en que se ejecuta la simulación o sustituir manualmente la configuración del software, la provisión de interfaces con otros sistemas y la sofisticación de las salidas.

A continuación, se enuncia las herramientas de simulación:

- HERMES - Graffica ofrece el entorno holístico para el modelado ferroviario y la simulación experimental.
- OpenTrack (Huerlimann (2001)) es una herramienta de simulación desarrollada en el Instituto de Planificación y Sistemas de Transporte (IVT) de la ETH Zurich y ahora suministrada y refinada por OpenTrack Railway Technology Ltd.

- RailPlan es otro modelo detallado de simulación de señales, que simula en detalle la infraestructura, el horario y la información del material rodante (Comreco Rail, 1997).
- Los modelos RailSIM Network Simulator entrenan operaciones en muchos sistemas de control de trenes sobre redes ferroviarias de múltiples corredores y múltiples modos.
- RailSys (RMCon, 2008) es un paquete completo de simulación de la señal, que también tiene módulos que facilitan la gerencia de la infraestructura, la construcción del horario y la planificación de la posesión.
- VISION (visualización y simulación interactiva de redes ferroviarias) es propiedad de DeltaRail y Network Rail tiene una licencia perpetua. Se utiliza para fines de especialidad de Network Rail (donde otros simuladores microscópicos no tienen un entendimiento completo de la señalización británico), con algunas licencias también en España e Italia (RFI).

En la actualidad Opentrack y RailSys son los más ampliamente utilizados de estos paquetes de software.

Para la aplicación del presente estudio se utilizó el software Opentrack.

#### **2.4.4. Beneficios de la simulación**

De acuerdo a Siefer (2008) los beneficios de la simulación son las siguientes:

- Ahorro de dinero. Porque la construcción de una nueva infraestructura de ferrocarril es muy costosa y es un proceso de largo tiempo, la construcción de un prototipo no es posible. Una vez construido, se tiene que ser usado por un periodo largo sin algún cambio. La simulación permite planificar y verificar un comportamiento importante antes de efectuarlo.



- Análisis del rendimiento. En real operación de trenes se requiere un análisis detallado de la ocupación de la vía y liberación de la vía para evaluar la interacción entre diferentes trenes, o entre trenes y la infraestructura. Algunas de competencia entre trenes ocurren raramente. En una simulación, innumerables combinaciones de trenes pueden ser creados, y los resultados puede ser fácilmente evaluado.
- Evaluación de Interacciones. En operación real de trenes, no hay espacio para experimento. Solo existe un pequeño tiempo para experimental los trenes durante el periodo de operación. En una simulación se puede correr trenes de diferentes tipos y evaluar las diferentes opciones de operación.
- Evitar perturbaciones. Si un horario existente debe ser modificado, las perturbaciones desde experimentación son indeseables. Ideas para cambiar un horario existente puede ser revisado con la simulación muy fácilmente antes de ser aplicado esto en una operación real de trenes.
- Revisar futuros horarios. La influencia de la infraestructura y los vehículos cambian, así como también nuevas modificación de vías o conceptos deber ser simulado. Adicionalmente, la simulación con perturbaciones puede probar la estabilidad del horario. Si la estabilidad del horario en la simulación no cumple con la calidad predefinida, una modificación del horario o de la infraestructura es necesaria para ofrecer a los usuarios un horario realista (pag.155).

## 2.5. Definición de términos

Wikipedia (2018) define la UIC:

Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) ó International Union of Railways  
 La Unión Internacional de ferrocarriles, es la organización ferroviaria mundial fundada en 1922 con el objetivo de avanzar hacia la estandarización y la mejora de los sistemas de construcción y explotación de ferrocarriles interoperables, en la actualidad acoge en su seno a 194 miembros, entre ferrocarriles nacionales, operadoras, administradores de infraestructura, compañías de transporte público y otras de diferentes países.

Railsystem (2018) define el ETCS como:

“European Traffic Control System (ETCS). Es el Sistema Europeo de Control de Trenes, es un sistema automático de protección de trenes (ATP) para reemplazar los sistemas ATP existentes en Europa”.

Las siguientes dos definiciones fue dado por Bachiller (2014):

➤ **Automatic train protection (ATP)**

Protección Automática del Tren, es el sistema y todos los equipos responsables de la seguridad básica del tren; evita las colisiones, el sobrepasado de la señal roja y exceder los límites de velocidad al aplicar los frenos automáticamente.

➤ **Automatic Train Operation (ATO)**

La operación automática del tren asegura el pilotaje de tren automático parcial o completo y las funcionalidades sin conductor. El sistema ATO realiza todas las funciones del controlador, excepto el cierre de la puerta. El conductor solo necesita cerrar las puertas, y si el camino está despejado, el tren pasará automáticamente a la siguiente estación.

Las siguientes definiciones están basadas en el trabajo de Soubllette (2011):

➤ **Capacidad de transporte**

La capacidad de transporte se define como la cantidad de pasajeros que es posible transportar durante una hora.

➤ **Factor de ocupación**

El factor de ocupación corresponde a la relación entre la oferta y la demanda de transporte y se puede interpretar como una medición del confort.

➤ **Velocidad comercial**

La velocidad comercial corresponde la velocidad promedio del tren., incluyendo los tiempos de parada de los trenes en las distintas estaciones.

➤ **Tiempo de vuelta**

El tiempo de vuelta corresponde al tiempo que demora un tren en dar una vuelta completa a todo el circuito de la línea.

➤ **Cantidad de trenes en la línea**

La cantidad de trenes en la línea corresponde al número de trenes mínimos necesarios para operar según lo programado, de manera tal de cubrir toda la línea con el intervalo de explotación presupuestado.

➤ **Consumo específico**

El consumo específico de un coche, corresponde a la energía necesaria para que un coche avance una distancia de 1km.

➤ **Porcentaje de Regeneración**

Se define como la razón entre la energía regenerada en la etapa de frenado del tren y la energía que este consume en la etapa de tracción.

➤ **Porcentaje de Recuperación**

Se define como la razón entre la parte de la energía regenerada que es efectivamente utilizada por otro consumo de la red y la energía consumida en tracción. (págs.15-17)

Las siguientes definiciones fueron tomadas del Reglamento Nacional del Sistema Eléctrico de Transporte de Pasajeros en vías férreas que formen parte del Sistema Ferroviario Nacional (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2010) que fue elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones y promulgado por el Presidente de la Republica mediante Decreto Supremo N° 039-2010-MTC:

➤ **Operación ferroviaria**

Conjunto de tareas vinculadas al movimiento de los trenes

➤ **Pasajero o usuario**

Persona que utiliza los servicios de transporte ferroviario en un determinado tramo de la red ferroviaria.

➤ **Tren**

Todo vehículo ferroviario con propulsión propia, con cabina de comando con control manual, semiautomático o automático, enganchado o no a otros vehículos ferroviarios, que se desplaza por la vía férrea.

➤ **Patio**

Sistema de vías férreas, instalaciones y edificaciones, destinado al mantenimiento de equipos, máquinas y vehículos ferroviarios, así como a la formación de trenes.

## CAPITULO III METODOLOGIA

### 3.1. Modelo de simulación microscópica sincrónica

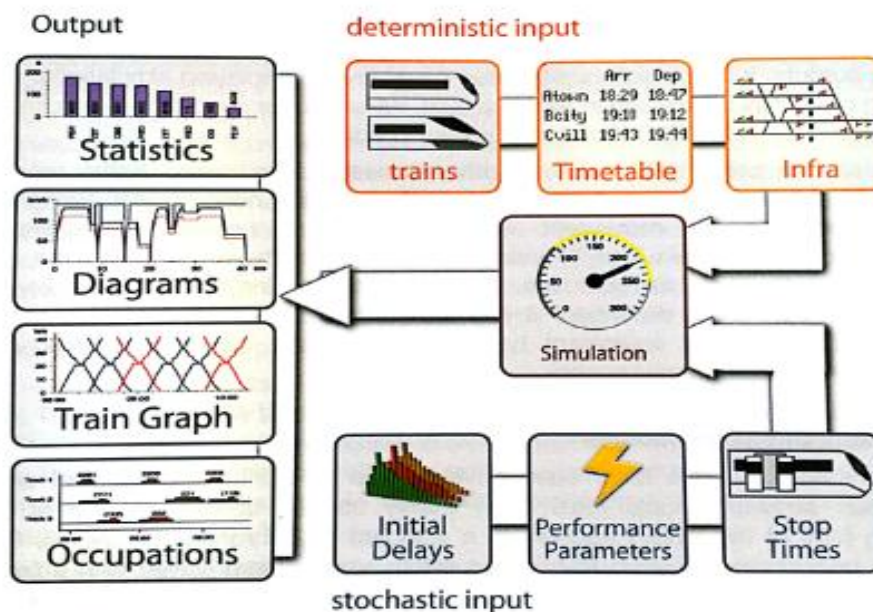
Watson y Medeossi (2014) presentaron el esquema de simulación microscópica sincrónica con dos tipos de entradas: determinística y estocástica.

Las entradas determinísticas corresponden a la Infraestructura, Horarios y el Material Rodante, mientras que las entradas estocásticas son los atrasos iniciales, parámetros de rendimiento y los tiempos paradas de los trenes en las estaciones.

Los autores también ilustran las salidas de la simulación microscópica sincrónica tales como gráficos diversos (diagrama de marcha de los trenes, diagrama distancia versus velocidad, ocupaciones, etc.).

El esquema del modelo de simulación microscópica sincrónica se ilustra en la siguiente figura:

**Figura N° 30: Modelo de simulación microscópica sincrónica**



Fuente: Robert Watson y Giorgio Medeossi (2014)

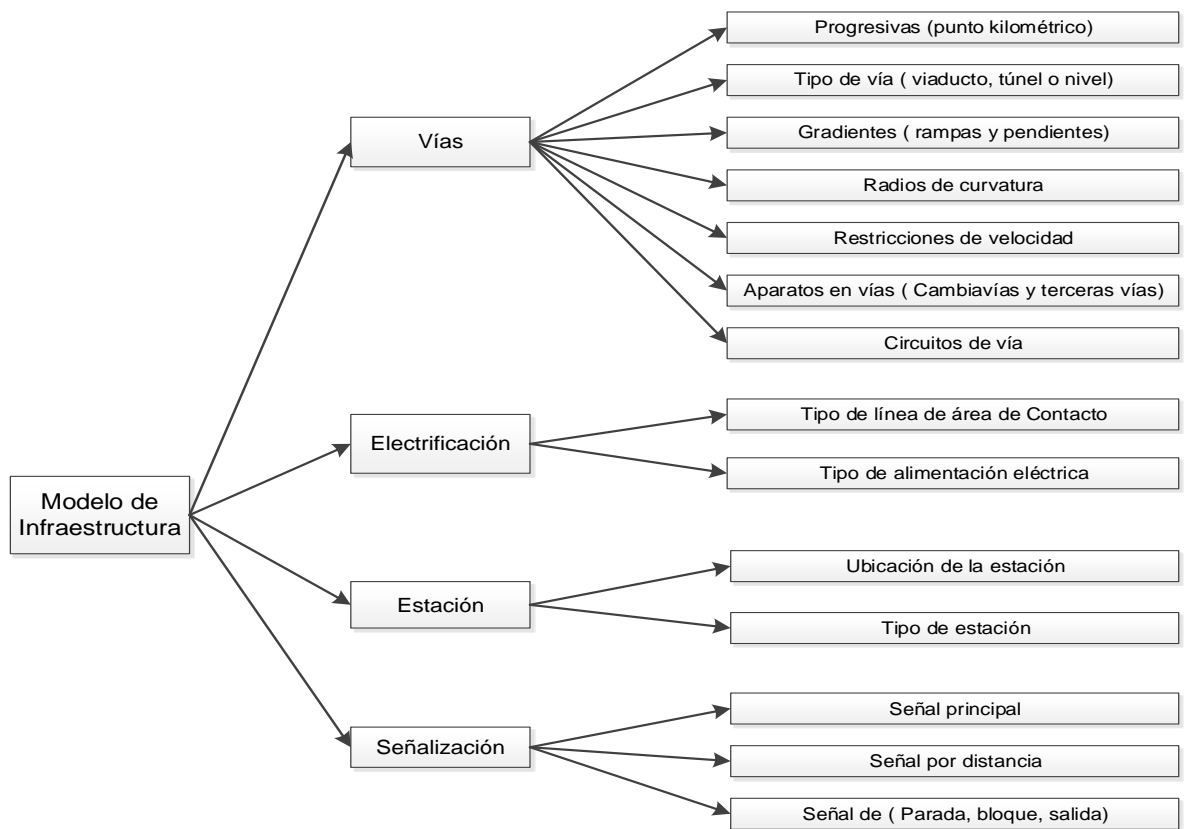
Como se ha indicado en el marco teórico, la metodología de simulación microscópica sincrónica es muy utilizada por las organizaciones académicas y comerciales, debido a que dicha metodología representa la disposición completa de estaciones y líneas incluyendo la alineación vertical y horizontal, todas las cambiavías y la señalización, enclavamiento y protección automática del tren / sistemas de protección. Estas informaciones, combinados con las características técnicas del Material Rodante y un horario detallado, permiten

reproducir los movimientos de los trenes con mayor detalle y calcular los tiempos de recorridos más precisos. Por esta razón, la metodología para el diseño y construcción de modelos de operaciones será el modelo de simulación microscópica sincrónica.

### 3.2. Elementos del modelo de simulación microscópica sincrónica

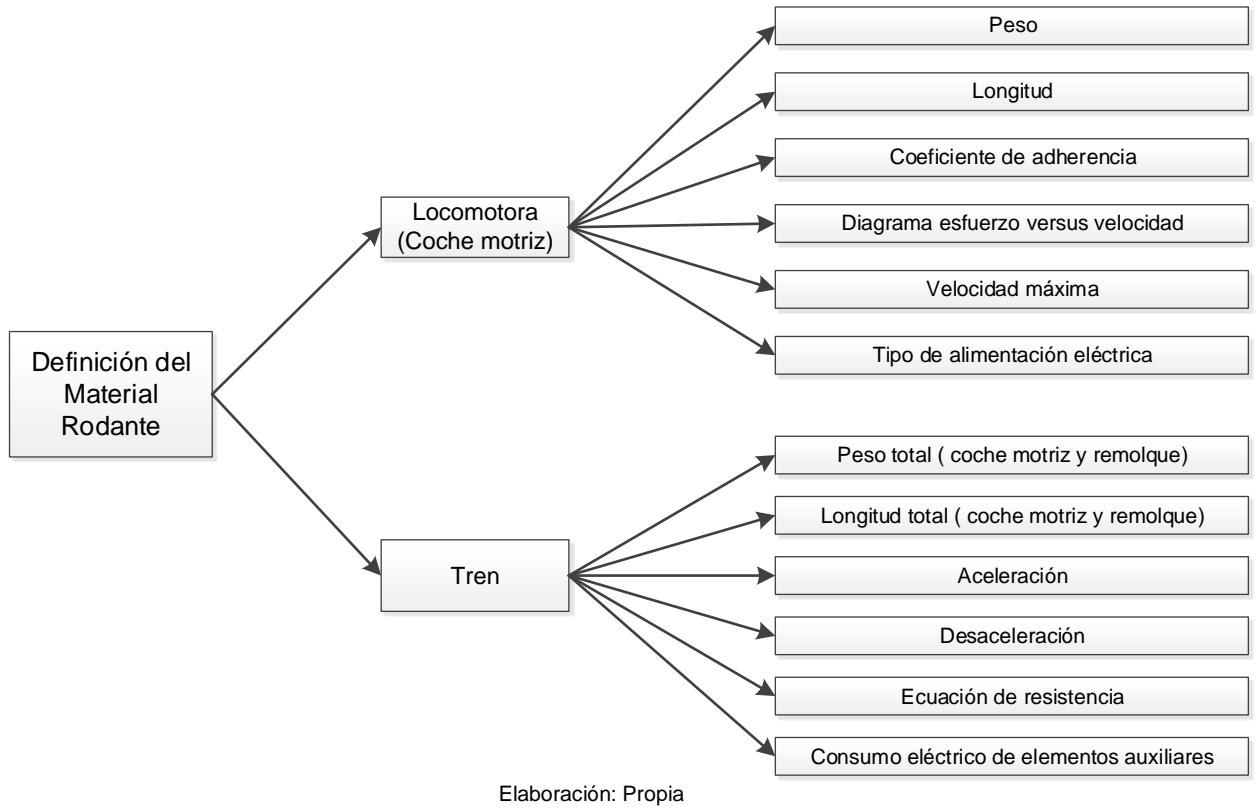
Las siguientes esquematizaciones de los elementos de cada una de las entradas, simulación, salidas de la simulación microscópica sincrónica están basadas en el trabajo de Ghaemi (2011):

**Figura N° 31: Elementos del modelo de Infraestructura**

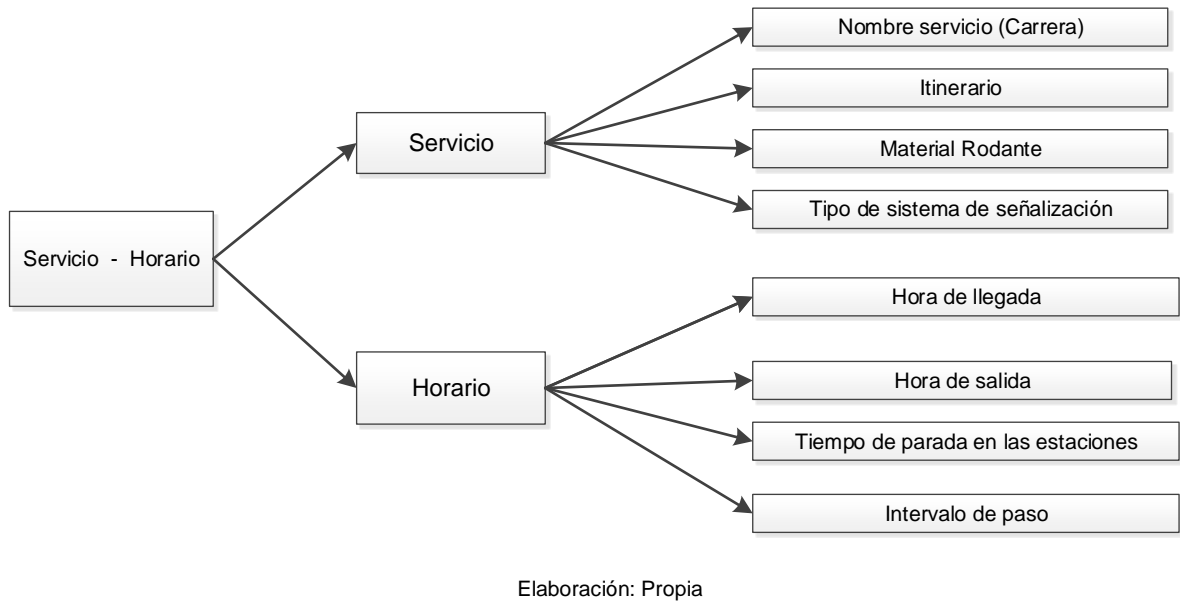


Elaboración: Propia

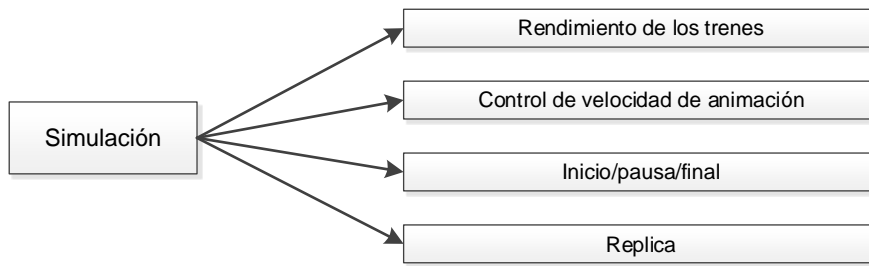
**Figura N° 32: Definición del Material Rodante**



**Figura N° 33: Elementos del Servicio – Horario**

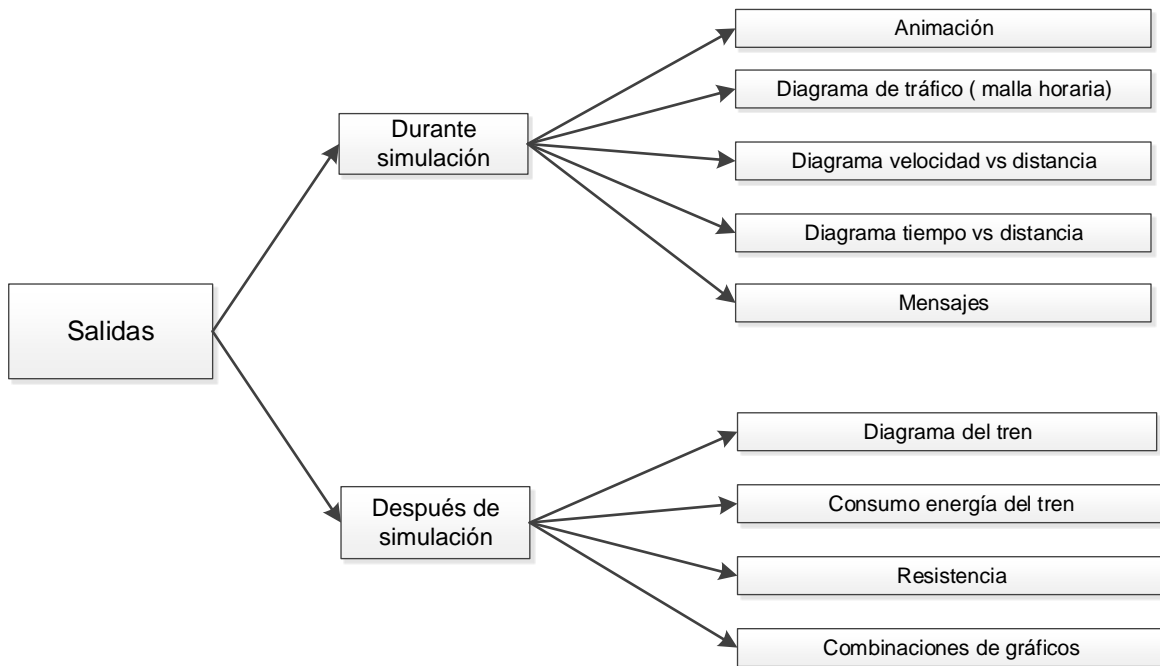


**Figura N° 34: Elementos de simulación**



Elaboración: Propia

**Figura N° 35: Detalle de Salidas**



Elaboración: Propia

### 3.3. Caso de estudio: Línea 4 del Metro de Lima y Callao

El Consorcio L-4-L (EUROESTUDIOS, GEOCONTROL ANDINA, GEOCONTROL, TEC-CUATRO, CONSULTORIA KAPAK, LOGIT ENG. CONS. Y CUSOR) (2017) en el marco de la “Consultoría Integral del Concurso de Proyectos Integrales para la Concesión de la Línea 4 de la Red Básica del Metro de Lima y Callao” realizó el estudio de Preinversión a nivel factibilidad presentando en el mes de noviembre del 2017 el estudio de la demanda (en adelante, Estudio de Demanda – Línea 4), a continuación se presentan los principales



resultados del Estudio de la demanda correspondientes al escenario optimista ya que esto determina la máxima capacidad de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao ( la metodología de proyección de la demanda se muestra en el **Anexo N° 1**).

#### ➤ Trazado de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao

El trazado seleccionado de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao sigue el eje vial de las avenidas Elmer Faucett – Av. La Marina- Av. Javier Prado, hasta la Estación Mercado Santa Anita, en donde se integra con la Línea 2 del Metro de Lima y Callao. Contará con 28 estaciones, 8 de las cuales, de la estación Gambetta a la Estación Carmen de la Legua forman parte de las obras de la Línea 2 que actualmente está proceso de desarrollo de estudios a nivel de Ingeniería.

Asimismo, el Estudio indica que la Línea 4 tendrá 5 estaciones de integración intermodal con las otras líneas de Metro, dos con la Línea 2 y las otras 3 con las líneas 1, 3 y 6.

La siguiente figura ilustra el trazado y la localización general de las estaciones de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao.

**Figura N° 36: Trazado de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao**



Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

➤ **Escenarios de estimación de la demanda**

Los escenarios futuros de la demanda para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao previstas en el Estudio consideran las siguientes fases:

**1. El horizonte de funcionamiento parcial:**

- Tramo Gambeta- Carmen de la Legua
- Tramo José de Sucre - La Molina
- Tramo Gambetta - Conde de San Isidro
- Tramo Gambetta - La Molina

**2. El horizonte de funcionamiento total:**

- Tramo Gambetta – Mercado Santa Anita - 2025
- Tramo Gambetta – Mercado Santa Anita - 2030
- Tramo Gambetta – Mercado Santa Anita - 2035
- Tramo Gambetta – Mercado Santa Anita - 2055

Respecto al horizonte de funcionamiento parcial, a partir del estudio de puede extraer la siguiente información:

**Tabla N° 1: Demanda diaria, carga máxima y factor de renovación de pasajero – Horizonte de funcionamiento parcial de la Línea 4**

<b>Tramo</b>	<b>Longitud (km)</b>	<b>Demanda diaria</b>	<b>Carga máxima</b>	<b>Factor de renovación de pasajero</b>
Gambeta- Carmen de la Legua	6.95	112,974	8,172	1.00
José de Sucre - La Molina	13.28	433,847	17,640	1.50
Gambeta- Conde de San Isidro	17.3	387,996	13,189	1.61
Gambeta - La Molina	26.25	814,974	24,040	1.68

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4  
Elaboración: Propia

Es importante definir el concepto del factor de renovación de pasajero, ya que este factor se utilizará para proyectar la capacidad ofertada para cada escenario.

Factor de renovación de pasajero. Es el ratio que se mide como el total de pasajeros transportados entre la capacidad máxima de carga (pasajeros) de los trenes en una hora punta (OSITRAN, 2016, pág. 32). En otras palabras, es la capacidad extra de los trenes debido a que pasajeros que realizan viajes cortos liberan espacios dentro de los trenes, generando una capacidad neta de transporte mayor a la capacidad del tren.

En la siguiente tabla se muestra la demanda proyectada diaria según estaciones en el horizonte de funcionamiento parcial y funcionamiento total (año 2025) de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao:

**Tabla N° 2: Demanda diaria por estaciones para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao**

Estación	Código estación	Integración	Funcionamiento parcial				Funcionamiento total
			Gambetta - Carmen de la Lengua	José de Sucre - La Molina	Gambetta- Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	Gambetta - Mercado Santa Anita
Gambetta	GAB		21,573		42,019	47,785	50,395
Canta Callao	CAC		7,979		15,853	16,407	15,621
Bocanegra	BOC		3,695		7,685	8,890	9,000
Aeropuerto	AER		8,394		13,666	15,830	17,490
El Olívar	ELO		3,058		3,991	4,197	4,314
Quilca	QUI		13,243		19,133	24,703	27,399
Morales Duárez	MOD		4,618		6,437	8,712	9,050
Carmen de la Legua	CAR	con L-2	50,423		59,606	50,965	40,546
Venezuela	VEN				13,555	27,563	28,636
Rafael Escardo	RAE				16,245	29,951	33,358
Pando	PAN	con L-6			17,849	28,274	33,774
José de Sucre	JSU			32,254	19,959	29,436	38,214
Brasil	BRA			22,653	14,230	24,967	26,574
Felipe Salaverry	FSA			14,495	8,254	18,301	22,256
Guillermo Prescott	GUP			24,696	17,152	28,138	29,844
Las Palmeras	LPA			11,636	14,632	23,758	27,453
Conde de San Isidro	CSI	con L-3		98,368	97,747	114,899	130,823
Rivera Navarrete	RIN			10,847		18,434	23,103
Pablo Carriquiry	PAC			8,818		26,191	27,152
La Cultura	CUL	con L-1		89,043		115,070	126,520
San Luis	SLU			5,770		12,881	13,833
Trébol de Monterrico	TMO			18,662		26,032	26,890
Manuel Olgúin	MAO			10,929		12,748	12,624
Los Frutales	LOF			12,191		11,318	9,992
La Molina	LMO			73,563		89,494	58,741
Santa Patricia	SPA						59,288
Mayorazgo	MAY						4,520
Mercado Santa Anita	MSA	con L-2					45,016
<b>Total</b>			<b>112,983</b>		<b>388,013</b>	<b>814,944</b>	<b>952,426</b>

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

Para el horizonte de funcionamiento total de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao, la cual contara con 28 estaciones a lo largo de 30.50 kilómetros, los resultados del Estudio de la Demanda arrojan los siguientes datos:

**Tabla N° 3: Demanda diaria, carga máxima y factor de renovación de pasajero – Horizonte de funcionamiento total de la Línea 4**

Año	Demanda diaria	Carga máxima	Factor de renovación de pasajero
2025	952,426	28,010	1.74
2030	1,030,774	30,462	1.76
2035	1,111,269	35,103	1.69
2055	1,278,490	40,384	1.69

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

Finalmente, en la Tabla N° 4 se presenta la ficha técnica de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao, donde se muestra las principales características:

**Tabla N° 4: Ficha técnica de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao**

Parámetros	Valor
Número de estaciones	28
Longitud total	30.50 km
Velocidad máxima de diseño	80 km/h
Distancia entre terceras vías	6 a 8 km
Ubicación de los cambiavías	en tramos rectos
Trocha	1435 mm
Radio de curvatura mínimo	250 m
Pendiente máxima en terceras vías y patio	0.15%
Gradiente longitudinal máxima en la vía principal	3.50%
Grado de automatización	GoA 4

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia





La Línea 4 del Metro de Lima y Callao será totalmente automático, es decir, con grado de automatización 4. Al respecto, Railsystem (2018) describe los niveles de automatización de sistemas metro:

En los sistemas de metro, la automatización se refiere al proceso mediante el cual la responsabilidad de la gestión de la operación de los trenes se transfiere del conductor al sistema de control del tren.

Hay varios grados de automatización (Grados de automatización, GoA); estos se definen de acuerdo con las funciones básicas del funcionamiento del tren que son responsabilidad del personal y que son responsabilidad del sistema mismo. Por

ejemplo, la Línea 1 del Metro de Lima actualmente en operación es GoA 1, debido a que el conductor es responsable de tracción y freno, parada en las estaciones, cierre de puertas y recuperación de fallos, por otro lado, la Línea 2 del Metro de Lima y Callao actualmente en construcción será totalmente automático (GoA 4) sin personal de operación a bordo, asimismo la Línea 4 también será de grado de automatización 4, en la Fig. 37 se describe los grados de automatización de sistemas metro y su implicancia en operación de trenes.

**Figura N° 37: Grados de Automatización de Sistemas Metro**

Grado de automatización	Tipo de operación del tren	Movimiento del tren	Parada del tren	Cierre de puertas	Recuperación de fallos
GoA 1 	ATP con conductor	Conductor	Conductor	Conductor	Conductor
GoA 2 	ATP y ATO con conductor	Automático	Automático	Conductor	Conductor
GoA 3 	Sin conductor	Automático	Automático	Personal abordo (asistente)	Personal abordo (asistente)
GoA 4 	Operación de tren desatendida	Automático	Automático	Automático	Automático

ATP - Automatic Train Protection      ATO - Automatic Train Operation

Fuente: <http://www.railsystem.net/metro-automation/>

El GOA4 permite a los operadores optimizar el tiempo de funcionamiento de los trenes, aumentar la velocidad promedio del sistema, acortar los intervalos de paso hasta 75 segundos y reducir el tiempo de permanencia en las estaciones (en condiciones óptimas) a 15 segundos.

Asimismo, Bachiller (2014) explica los sistemas tecnológicos que permiten el funcionamiento de metros automáticos:

La conducción automática incorpora los siguientes sistemas tecnológicos:

ATS (Automatic Train Supervision): Sistema para la gestión del transporte y las infraestructuras.

ATP (Automatic Train Protection): Sistema responsable de la seguridad básica: evita colisiones, rebases de señales de parada, limita la velocidad excesiva mediante la aplicación de frenado automáticamente

ATO (Automatic Train Operation): Sistema que permite la conducción automática de estación a estación; el conductor supervisa el movimiento de los pasajeros. El sistema es responsable de la optimización de la operación y de la regulación.

ATC (Automatic Train Control): Sistema que permite la operación totalmente automatizada; no se requiere para ello conductor, ATC se compone de:

$$\text{ATC} = \text{ATS} + \text{ATP} + \text{ATO}$$

El Sistema GOA 4 exige, además de las funciones específicas propias del sistema ATC, un conjunto de requisitos imprescindibles que deben cumplir el resto de sistemas e instalaciones:

- INFRAESTRUCTURA: Adaptación de túnel y estaciones para situaciones de emergencia (incendios, desalojo de viajeros ante averías, etc.)
- ANDENES: Barreras anti – intrusión en vía (Puertas de Andén)
- COCHERAS: Diseñadas para el funcionamiento automático
- MATERIAL MÓVIL: Preparado para la realización de inversiones de marcha automáticas, evacuación de viajeros y telecontrol
- DISPONIBILIDAD: Para el conjunto de sistemas vía y tren
- TELEVIGILANCIA: En estaciones y material móvil
- MANTENIMIENTO: Más especialización y mayores exigencias

Asimismo, la Línea 4 del Metro de Lima y Callao estará equipado con la Tecnología CBTC (Communication Based Train Control) para la señalización. Esta es un sistema de señalización actualmente más avanzado de control de la circulación de trenes.

La tecnología CBTC permite:

- Acercar los trenes en condiciones de seguridad, para lograr una alta capacidad de transporte, o aumentarla en caso de renovaciones.
- Reducir la cantidad de equipos en la vía

- Mejorar las actividades de mantenimiento con supervisión avanzada

Su aplicación más adecuada es para líneas con tráfico muy elevado de trenes. Por ello, se está aplicando en líneas de metro pesado, tal es caso de Línea 2 del Metro de Lima y Callao.

Con su utilización se busca:

- Mejoras en la seguridad
- Aumento de la capacidad de transporte
- Aumento de la velocidad comercial
- Mejoras en la regularidad
- Mejoras en mantenimiento y disponibilidad

### **3.4. Proceso de diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviario mediante simulaciones**

La herramienta para el diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias utilizado en el presente trabajo será el software Opentrack:

OpenTrack comenzó a mediados de la década de 1990 como un proyecto de investigación en el Instituto Federal Suizo de Tecnología. El objetivo del proyecto Modelado Orientado a Objetos en ferrocarriles fue desarrollar un catalizador para soluciones económicas prácticas a problemas complejos de tecnología ferroviaria.

Hoy en día, la herramienta de simulación ferroviaria OpenTrack es un software de planificación ferroviaria bien establecido y es utilizado por los ferrocarriles, la industria del suministro ferroviario, consultorías y universidades en diferentes países (Opentrack, 2018).

El software Opentrack utiliza tres tipos de datos como input que son:

- El Material Rodante
- La Infraestructura
- Horario teórico

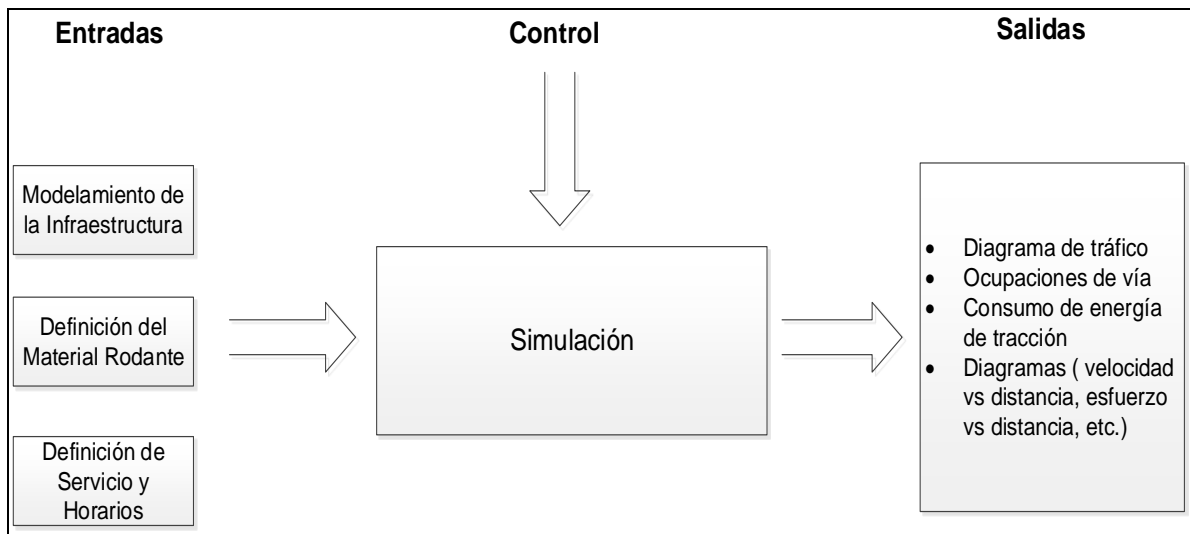
La simulación en OpenTrack es una simulación mixta. Esto significa que es una mezcla de procesos continuos y discretos de simulación. El proceso continuo consiste en el movimiento del tren. OpenTrack simula los movimientos del tren usando ecuaciones de movimiento

(ecuaciones diferenciales) de los vehículos. Los procesos discretos incluyen cosas tales como cambios en el estado de las instalaciones de seguridad (señal aspectos) o retrasos.

Se usa un método numérico (Método de Euler) para resolver las ecuaciones del movimiento del tren ya que no es posible encontrar la solución de la ecuación de movimiento diferencial de forma analítica. Euler método proporciona suficientemente valores aproximados para la simulación.

La forma esquemática o metodología mediante la cual trabaja el software Opentrack es la simulación microscópica sincrónica. En ese sentido, en la Fig. N° 38 se ilustra la metodología que se aplicara en el proceso de diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante simulaciones:

**Figura N° 38: Proceso de diseño y construcción de modelo de operaciones mediante simulaciones**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

Los inputs de la figura anterior son subprocesos y el proceso de control se llamará la simulación, a continuación, se desarrolla los subprocesos de modelamiento de la Infraestructura, definición del Material Rodante y definición de Servicio y Horarios.

### 3.4.1. Subproceso modelamiento de la Infraestructura



El modelamiento de la Infraestructura consiste en la construcción de la línea ferroviaria mediante la reproducción del esquema de vías en la computadora la cual contendrá la información relacionada a las vías, estaciones, rampas, pendientes, elementos en la vía (cambiavías y terceras vías), radios de curvatura, señales, restricciones de velocidades e itinerarios.

Los inputs para el modelamiento de la Infraestructura han sido tomados del Estudio de Preinversión a nivel de Factibilidad de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao, y los Estudios Definitivos de Ingeniería de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta (Ramal de la Línea 4) de la Red Básica del Metro de Lima y Callao, a continuación, se denota la documentación necesaria para la construcción del modelo de la Infraestructura:

➤ **Planos de trazado de la vía:**

Planimetría. Contiene información que producirá cambios en el movimiento del tren en el eje horizontal, debido a radios de curvatura.

Altimetría. Contiene información que generara cambios en el movimiento del tren en eje vertical, debido a rampas y pendientes.

➤ **Plano de esquema de vías**

Contiene información de la ubicación de las estaciones, cambiavías, terceras vías y Patio Taller.

➤ **Plano de ubicación de señalización**

Dado que la señalización es el encargado de dirigir el tránsito del tren por la vía férrea, es necesario conocer en qué lugar del trazado se encuentran los puntos de control.

➤ **Restricciones de la velocidad debido al trazado**

En la operación del sistema se debe tener en cuenta aquellas zonas donde debido a la topología del terreno es necesario establecer restricciones de velocidad para evitar posibles descarrilamientos. Por ejemplo, en las cambiavías y curvas cerradas y/o peligrosas.

El listado de los documentos utilizados para el desarrollo del modelo de la Infraestructura se indica en el Anexo N° 2.

Para un óptimo trabajo se elaboró el libro de vías con la información de los planos de planimetría, altimetría, esquema de vías y restricción de velocidades, a continuación, se muestra un extracto de dicho libro (el libro de vías completo se muestra en el Anexo N° 3).

**Tabla N° 5: Extracto de la elaboración del libro de vías**

Estación	Progresiva		Rampa / pendiente (o/oo)	Curva / cambiavías / desvio	Radio de Curvatura (m)	Restricción de velocidad (km/h)
	Desde (m)	Hacia (m)				
	0.072670	0.187960				80.00
	0.187960	0.235793		Bretelle		80.00
	0.235793	0.260793				80.00
GAMBETTA	0.260793	0.323043				50.00
	0.323043	0.385293				50.00
	0.385293	0.410295				80.00
	0.410295	0.480853		Bretelle		80.00
	0.480853	0.510852				80.00
	0.510852	0.903178	9.250			80.00
	0.903178	1.051698	9.250	C1	350.00	75.00
	1.051698	1.105429	9.250			80.00
	1.105429	1.180429				80.00
CANTA CALLAO	1.180429	1.242679				50.00
	1.242679	1.304929				50.00
	1.304929	1.379929				80.00
	1.379929	2.159440	4.030			80.00
	2.159440	2.192882	4.030	Desvio		80.00
	2.192882	2.237963	4.030			80.00
	2.237963	2.312963				80.00
BOCANEGRA	2.312963	2.375213				50.00
	2.375213	2.437463				50.00

Elaboración: Propia

**Tabla N° 6: Modelamiento de la Infraestructura**

PROCESO	Diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante simulación
SUBPROCESO	Modelamiento de la Infraestructura
PROCEDIMIENTO	Modelamiento de la Infraestructura en Opentrack

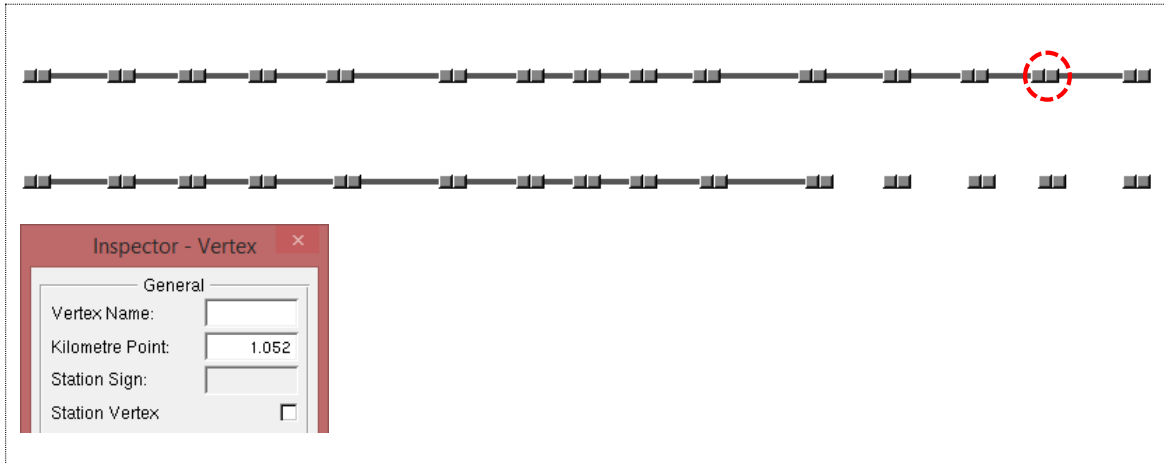
Elaboración: Propia

**Tabla N° 7: Especificación de actividades del modelamiento de Infraestructura en Opentrack**

ID	Requisitos	Nombre de Actividad	Responsable	Tareas	Duración (días)	Producto Resultante
1	- Planos de planimetría - Planos de altimetría - Plano de restricciones de velocidad	Elaboración de libro de vías	Profesional en operaciones ferroviarias	A partir de los planos indicados construir el libro de vías, esta debe contener: - Las progresivas de la vía (de estaciones, cambiavías y terceras vías) - Los gradientes ( rampas y pendientes) - Radios de curvatura - Restricciones de velocidad	Depende de la longitud de la Línea metro	Libro de vía en formato Excel (Tabla N° 5)
2		Trazado de la vía férrea en OT	Profesional en operaciones ferroviarias	Trazar los vértices y segmentos	Depende de la longitud de la Línea metro	Vía férrea (Figura N° 39)
3		Introducción de los datos de libro de vías en OT	Profesional en operaciones ferroviarias	Introducir las progresivas (vertex), gradientes, radios de curvatura y restricciones de velocidad (segmento) en la vía férrea	Depende de la longitud de la Línea metro	Vía férrea con los datos del libro de vías (Figuras N° 39 y 40)
4		Creación de base de datos de estaciones	Profesional en operaciones ferroviarias	Crear la base de datos de estaciones	Depende de la longitud de la Línea metro	Base datos de estaciones (Figura N° 41)
5		Asignación de estaciones en la vía férrea	Profesional en operaciones ferroviarias	Colocar estaciones en la vía férrea y asignar el área de estación	Depende de la longitud de la Línea metro	Línea con estaciones (Figura N° 42)
6	Planos de señalización	Introducción de señales en la vía férrea	Profesional en operaciones ferroviarias	Asignar señales en la vía férrea en función a los planos de señalización o diseñar el esquema de señalización	Depende de la longitud de la Línea metro	Línea con señalización (Figura N° 43)
7		Construcción de rutas	Profesional en operaciones ferroviarias	Construir las rutas en la vía férrea (de señal a señal)	Depende de la longitud de la Línea metro	Línea con rutas (Figura N° 44)
8		Construcción de paths	Profesional en operaciones ferroviarias	Construir las paths en la vía férrea (un conjunto de rutas)	Depende de la longitud de la Línea metro	Línea con path (Figura N° 45)
9		Construcción de Itinerarios	Profesional en operaciones ferroviarias	Construir los itinerarios en la vía férrea (un conjunto de paths)	Depende de la longitud de la Línea metro	Línea con itinerario (Figura N° 46)

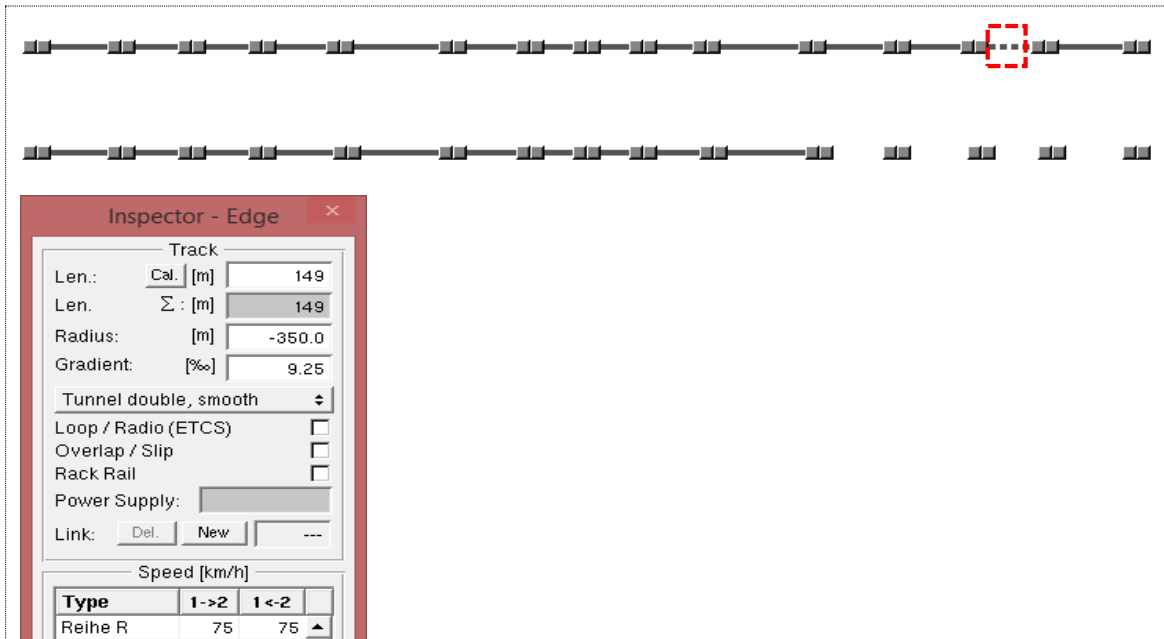
Elaboración: Propia

**Figura N° 39: Trazado de vértices, segmentos y ubicación del punto kilométrico**



Fuente: Opentrack  
 Elaboración: Propia

**Figura N° 40: Configuración del segmento mediante la introducción de rampas, pendientes, radio de curvatura y restricción de velocidades**



Fuente: Opentrack  
 Elaboración: Propia

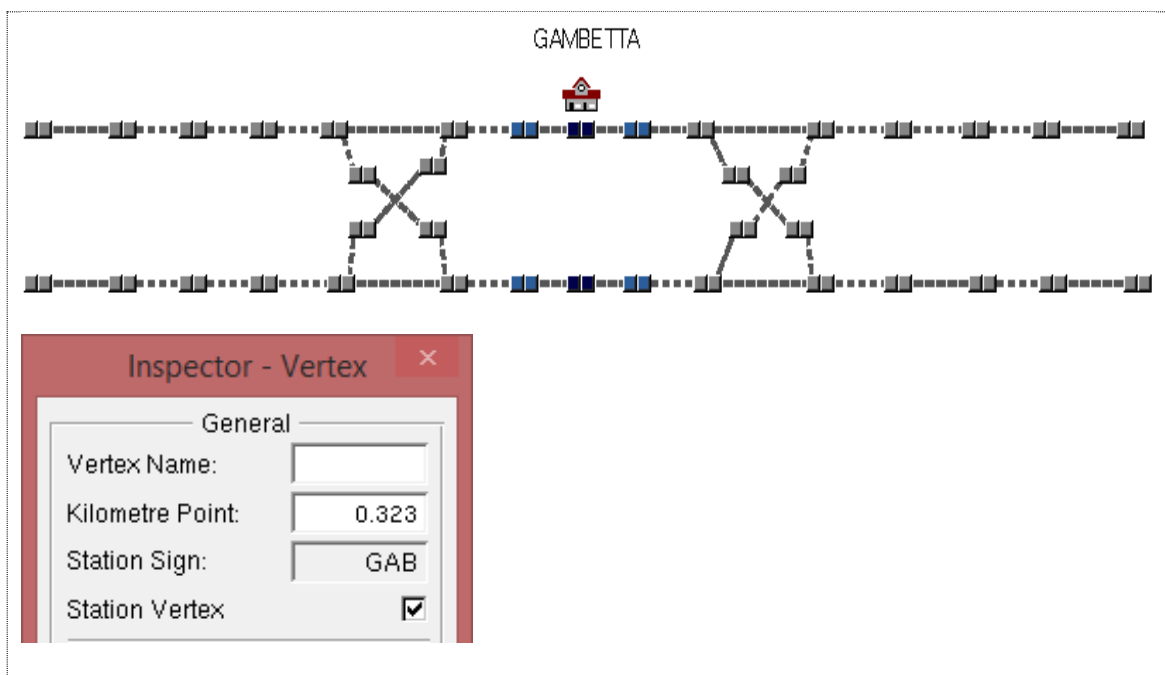
**Figura N° 41: Elaboración de base de datos de estaciones**

ID	Name	Type	Comp. ID
AER	AEROPUERTO		0
BOC	BOCANEGRA		0
BRA	BRASIL		0
CAC	CANTA CALLAO		0
CAR	CARMEN DE LA LENGUA		0
CSI	CONDE DE SAN ISIDRO		0
CUL	LA CULTURA		0
ELO	EL OLIVAR		0
FSA	FELIPE SALAVERRY		0
GAB	GAMBETTA		0

Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

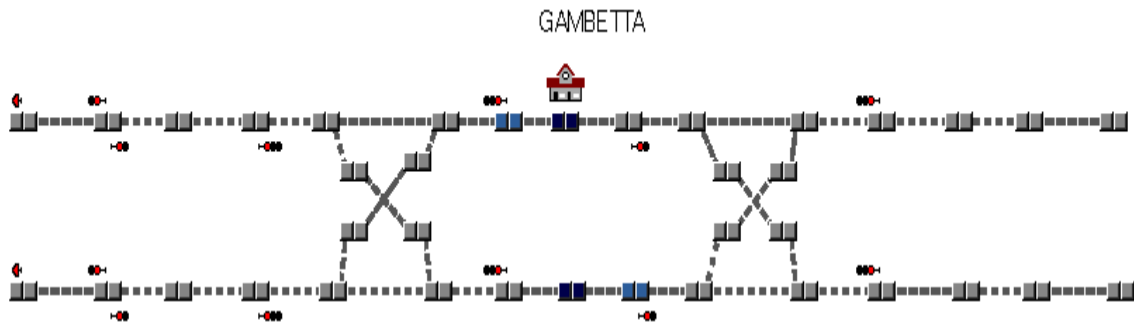
**Figura N° 42: Configuración de la estación en la vía férrea y ubicación de cambiavías**



Fuente: Opentrack

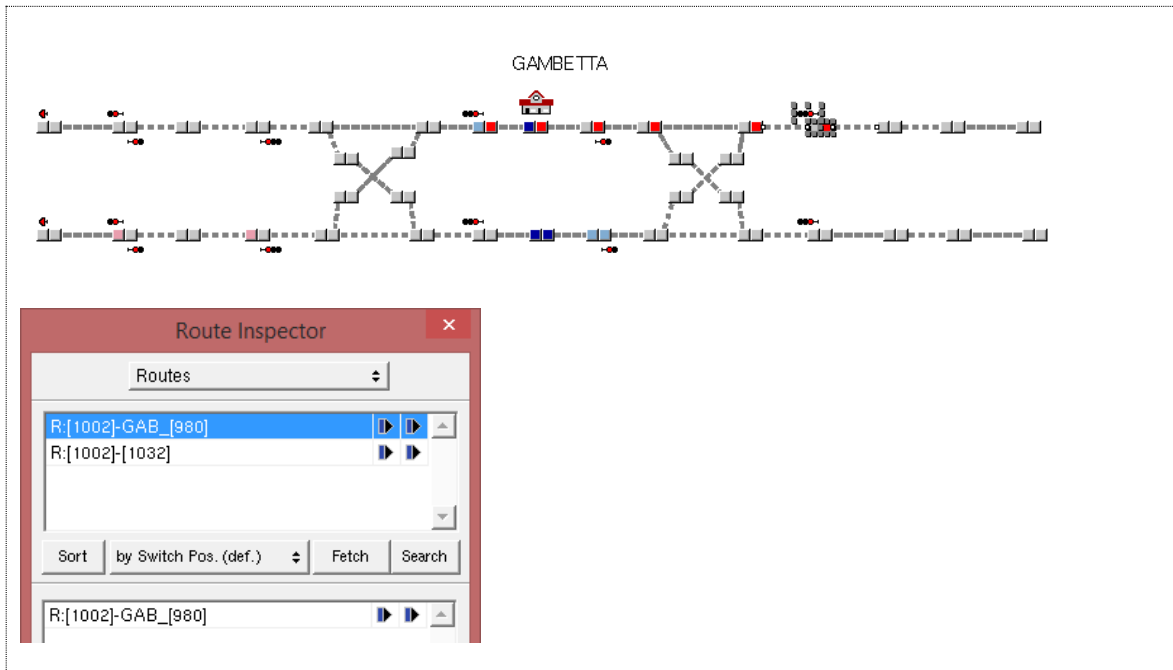
Elaboración: Propia

Figura N° 43: Diseño de la señalización en la vía férrea



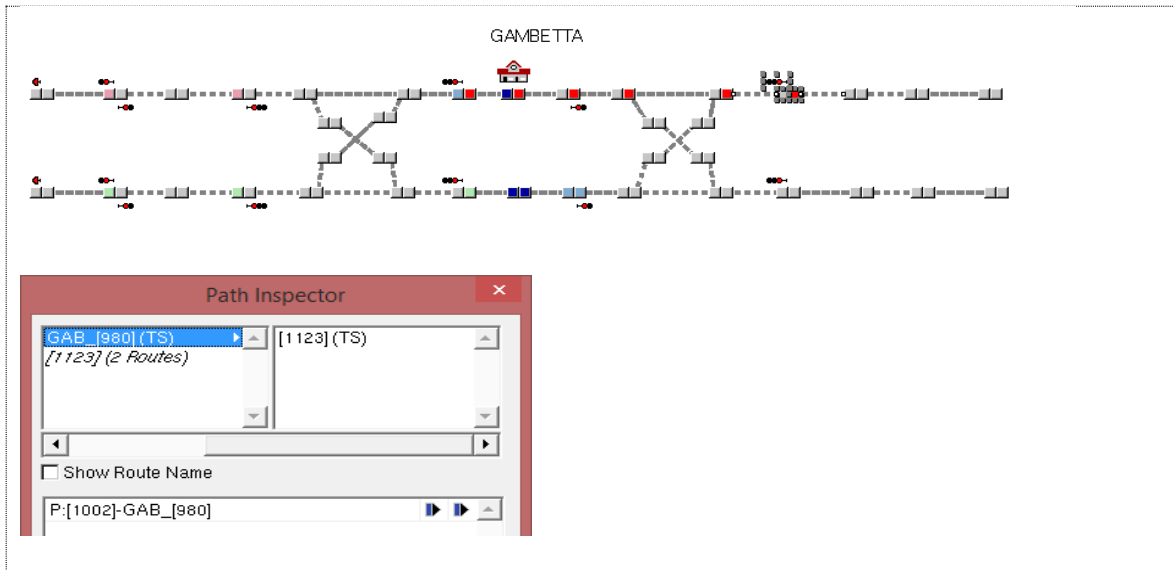
Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

Figura N° 44: Construcción de rutas



Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

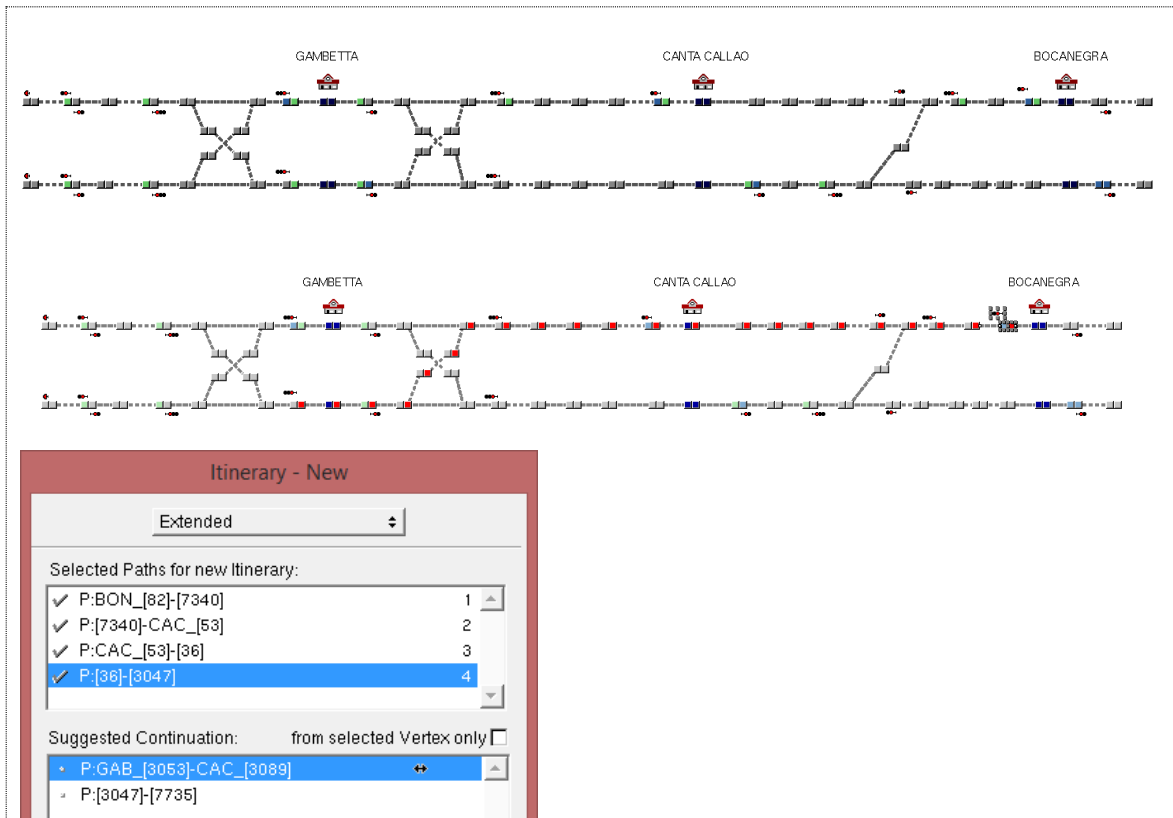
**Figura N° 45: Construcción de paths o trayectorias**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

**Figura N° 46: Construcción de itinerarios**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

### 3.4.2. Subproceso definición del Material Rodante

Este subproceso consiste en la definición de cada tipo de Material Rodante para una determinada línea ferroviaria, por lo tanto, se debe definir para cada tren los parámetros específicos tales como: longitud, peso, máxima velocidad, aceleración, desaceleración, el tipo de alimentación eléctrica, coeficiente de resistencia al aire, diagrama esfuerzo vs velocidad, etc. Asimismo, se tiene definir el coche motriz y remolque.

Los inputs para la definición del Material Rodante han sido tomados de las especificaciones técnicas del Material Rodante de la Línea 2 del Metro de Lima y Callao (Anexo N° 2), en la siguiente Tabla N° 8 se muestra un resumen de las especificaciones técnicas del Material Rodante de la Línea 2 del Metro de Lima y Callao.

**Tabla N° 8: Especificaciones técnicas del Material Rodante**

	<b>Tren de 6 coches</b>	<b>Tren de 7 coches</b>
Longitud del tren	107 m	125 m
Peso (6 pax/m <sup>2</sup> )	292.904 tn	343.12 tn
Capacidad (6 pax/m <sup>2</sup> )	1200	1400
Configuración del Tren	M1-R-M2-M2-R-M1	M1-R-M2-M3-M2-R-M1
Velocidad máxima de diseño	90 km/h	90 km/h
Velocidad máxima en servicio	80 km/h	80 km/h
Aceleración máxima de servicio en vía a nivel (8 pax/m <sup>2</sup> )	1.2 m/s <sup>2</sup>	1.2 m/s <sup>3</sup>
Desaceleración máxima de servicio en vía a nivel (8 pax/m <sup>2</sup> )	1 m/s <sup>2</sup>	2 m/s <sup>2</sup>
Tensión de suministro nominal	1500 vcc	1501 vcc
Potencia instalada de los convertidores auxiliares	270 Kw	271 Kw

Fuente: Especificaciones técnicas del Material Rodante – Línea 2

Elaboración: Propia

**Tabla N° 9: Definición del Material Rodante**

PROCESO	Diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante simulación
SUBPROCESO	Definición de Material Rodante
PROCEDIMIENTO	Definición del Material Rodante en OPENTRACK

Elaboración: Propia

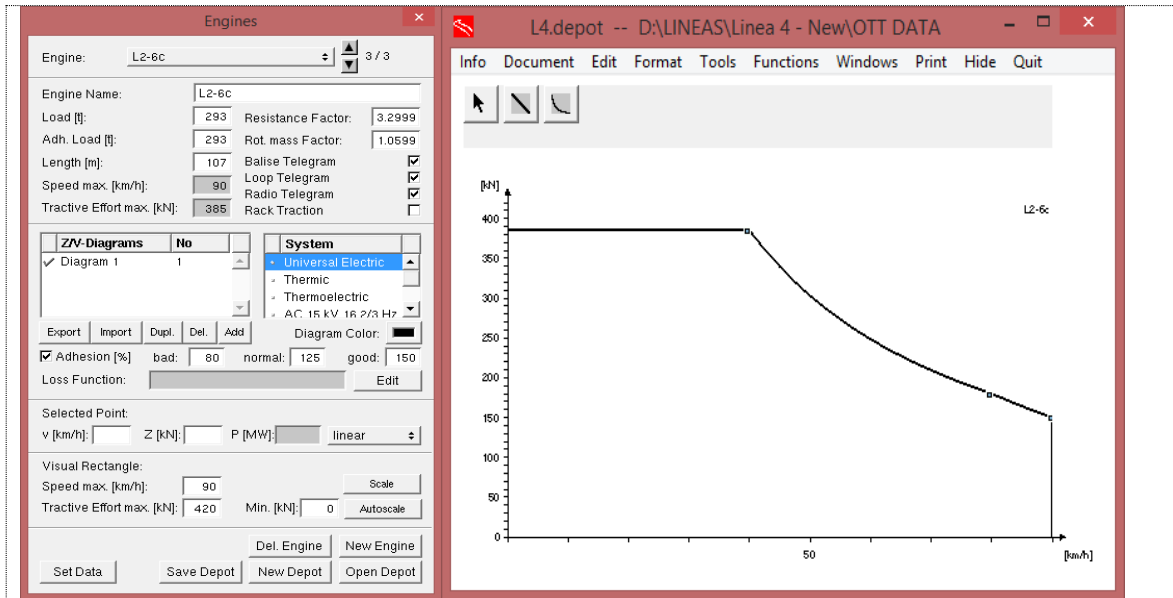


**Tabla N° 10: Especificación de actividades definición del Material Rodante**

ID	Requisitos	Nombre de Actividad	Responsable	Tareas	Duración (horas)	Producto Resultante
1	Especificaciones técnicas del Material Rodante	- Construcción del Coche Motriz - Curva Esfuerzo vs Velocidad	Profesional en operaciones ferroviarias	A partir de la especificación técnica del Material Rodante, construir el Coche Motriz, considerando los siguientes aspectos: - Peso total de tren - Longitud total del tren - Velocidad máxima - Esfuerzo máximo - Trazado de la curva esfuerzo vs velocidad	Depende del tipo de trenes	Coche motriz (Figura N° 47)
2	Especificaciones técnicas del Material Rodante	Configuración del Tren	Profesional en operaciones ferroviarias	se configura el tren completo, para ello se realiza lo siguiente: - introducción de la cantidad de coches remolque - Consumo de eléctrico de elementos auxiliares - Aceleración - Desaceleración - Ecuación de resistencia	Depende del tipo de trenes	Tren (Figura N° 48)

Elaboración: Propia

**Figura N° 47: Construcción de la curva esfuerzo versus velocidad**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

**Figura N° 48: Configuración del Material Rodante**

Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

### 3.4.3. Subproceso definición de Servicios y Horarios

En este subproceso se define el servicio, para ello se tiene como entrada los itinerarios, tipo de sistema de señalización y el tren. Se construye los horarios para dicho servicio, definiendo los tiempos de parada en cada estación y tiempo de cambio de cabina.

Los tiempos de parada en cada una de las estaciones se elaboran a partir del estudio de la demanda, se indicará más adelante.

**Tabla N° 11: Definición de Servicio y Horarios**

PROCESO	Diseño y construcción de modelos de servicios ferroviarios mediante simulación
SUBPROCESO	Definición del Servicio y Horarios
PROCEDIMIENTO	Definición del Servicio y Horarios en OPENTRACK

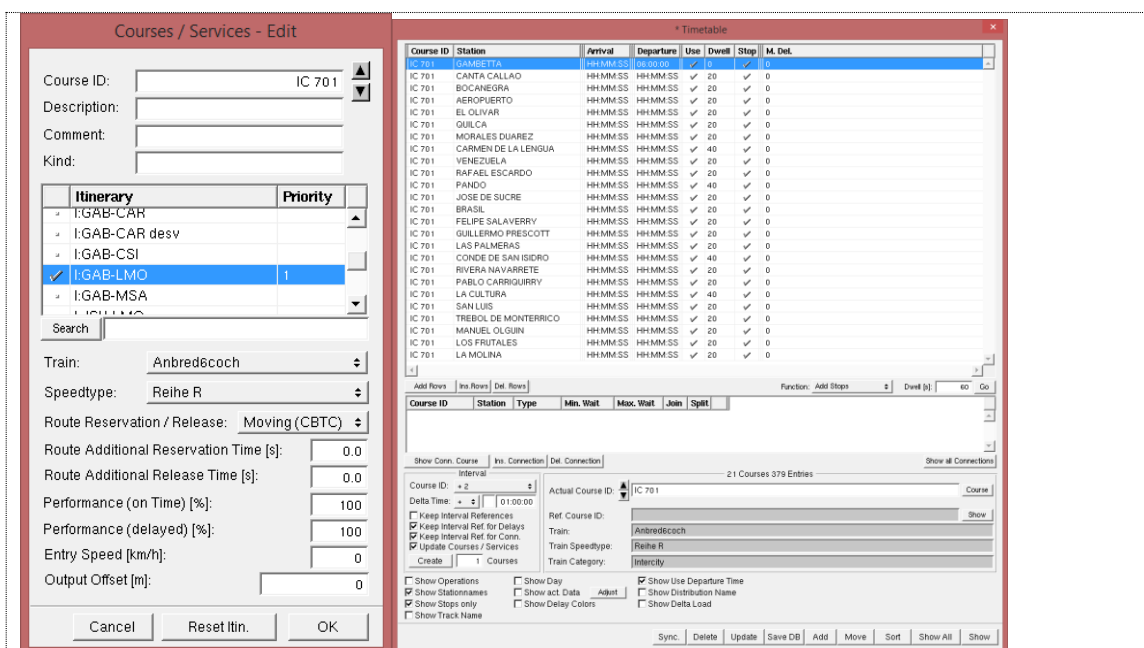
Elaboración: Propia

Tabla N° 12: Especificación de actividades de definición de Servicio y Horarios

ID	Requisitos	Nombre de Actividad	Responsable	Tareas	Duración (Horas)	Producto Resultante
1	- Itinerarios -Tren	creación del servicio ferroviario	Profesional en operaciones ferroviarias	Elaborar el servicio mediante asignación de itinerario, Tipo de tren, tipo de señalización, etc.	Depende la cantidad de servicio a definir	Servicio ferroviario, sin tiempos de parada en las estaciones (Figura N° 49)
2	Estudio de demanda	Asignación de tiempos de parada en las estaciones	Profesional en operaciones ferroviarias	Asignar los tiempos de espera en las estaciones, intervalo de paso, horario de salida del primer tren, etc.	depende de la cantidad de servicios y la cantidad de estaciones	Servicio ferroviario con tiempos de parada en las estaciones e intervalos de paso (Figura N° 49)

Elaboración: Propia

Figura N° 49: Definición de Servicio y Horarios



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

### 3.4.4. Control de ejecución de la simulación

En esta etapa se controla los parámetros de la simulación tales como: velocidad de simulación, horario de inicio, parámetros de rendimiento del tren, etc. Tiene como inputs los subprocessos anteriormente explicados.

**Tabla N° 13: Control de ejecución de la simulación**

PROCESO	Diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante simulación
SUBPROCESO	Control de ejecución de Simulación
PROCEDIMIENTO	Control de ejecución de Simulación en OPENTRACK

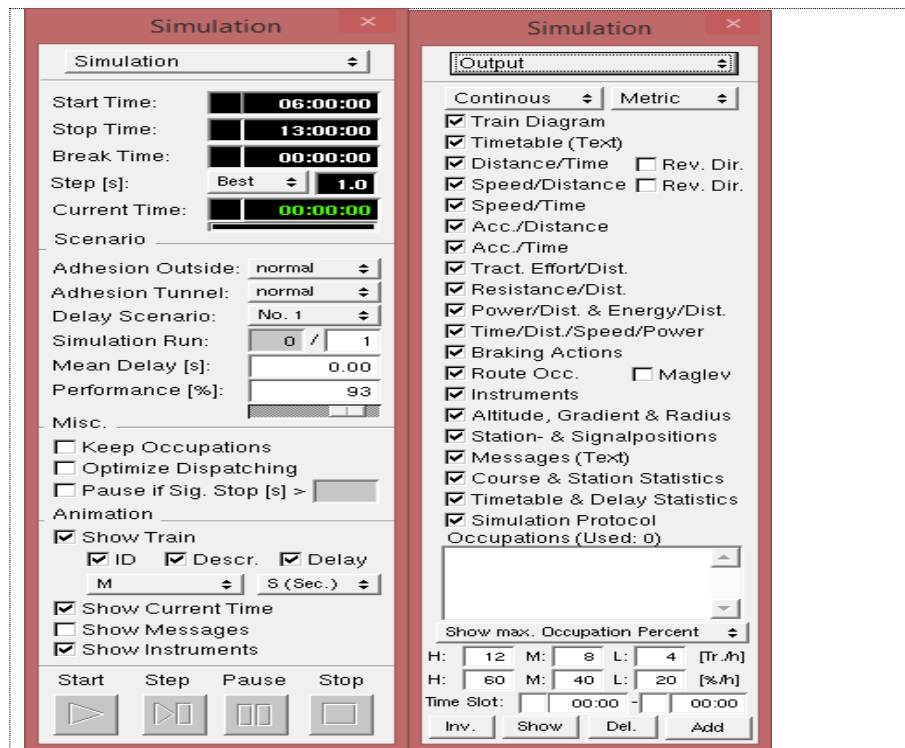
Elaboración: Propia

**Tabla N° 14: Especificación de actividades del control de ejecución de la simulación**

ID	Requisitos	Nombre de Actividad	Responsable	Tareas	Duración (Minutos)	Producto Resultante
1	Infraestructura Material Rodante Servicio - Horario	Introducción de parámetros de simulación	Profesional en operaciones ferroviarias	Ingresar los parámetros de simulación: - Seleccionar servicios a simular - Hora de inicio - Rendimiento del Tren	Minutos	Servicio con los parámetros de simulación (Figura N° 50)
2	Infraestructura Material Rodante Servicio - Horario	Ejecución de simulación	Profesional en operaciones ferroviarias	Ejecutar la simulación Controlar la velocidad de ejecución de la simulación, etc.	Horas/minutos	-Animación - Diagramas - Ocupaciones - Mensajes (Figura N° 50)

Elaboración: Propia

**Figura N° 50: Control de simulación y selección de salidas**



Elaboración: Propia

### **3.5. Escenarios de operaciones ferroviarias para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao**

Luego de haber diseñado y construido el modelo de la Infraestructura, definición del Material Rodante, la siguiente etapa es formular escenarios de servicios ferroviarios, para ello se analizara el Estudio de Demanda en horas punta y horas valle, específicamente las cargas máxima en una hora punta siendo esto primordial para el dimensionamiento de la flota con el objetivo de satisfacer la demanda proyectada en el escenario optimista, de acuerdo a los resultados del Estudio (Consortio L-4-L, 2017) se considera dos horizontes:

#### **1. Horizonte de funcionamiento parcial de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao.**

Este periodo consiste en los siguientes escenarios:

- Escenario 1: Operación Estación Gambetta – Estación Carmen de la Lengua
- Escenario 2: Operación Estación José de Sucre – Estación La Molina
- Escenario 3: Operación Estación Gambetta – Estación Conde de San Isidro
- Escenario 4: Operación Estación Gambetta – Estación La Molina

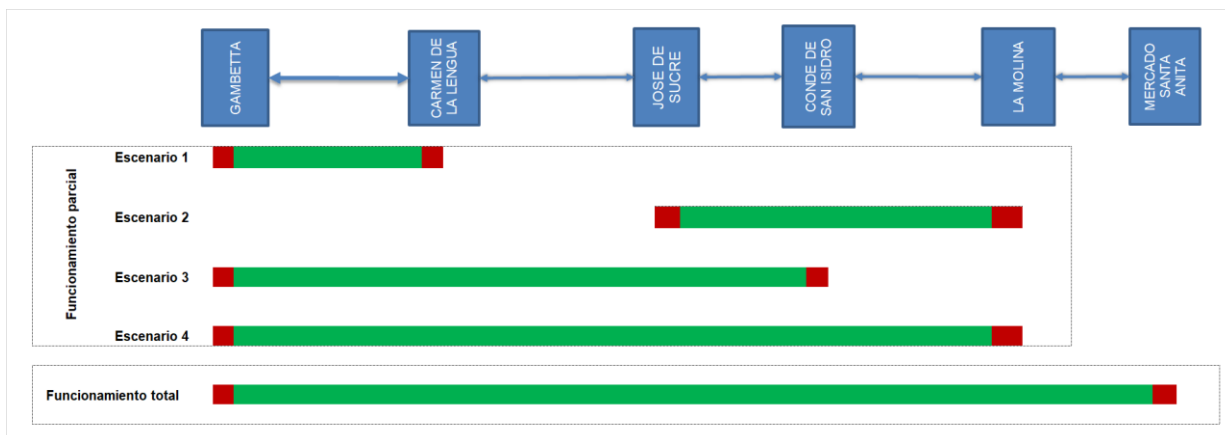
#### **2. Horizonte de funcionamiento total de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao.**

En la operación de la línea completa en función a la demanda se ha establecido en 2 fases:

- Fase 2025 - 2035
- Fase 2036 - 2055

En la siguiente figura se proyecta el esquema de operaciones ferroviarias en la Línea 4 del Metro de Lima y Callao:

**Figura N° 51: Esquemas de operación de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao**



Elaboración: Propia

### 3.5.1. Escenario 1: Operación Estación Gambetta – Estación Carmen de la Lengua

El tramo Estación Gambetta hasta Estación Carmen de la Lengua cubre una longitud de 6.94 kilómetros (distancia entre centros de estaciones terminales) a lo largo de 8 estaciones, de acuerdo al Estudio de Demanda la carga máxima proyectada en hora punta mañana es 8,172 viajes valor que puede ser cubierto por 7 trenes de 1200 de capacidad c/u a intervalos de paso de 8 minutos, el intervalo de paso en hora punta tarde y hora valle se calcula en 15 y 20 minutos respectivamente, tal como se ilustra en la tabla siguiente:

**Tabla N° 15: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada – Estación Gambetta hasta estación Carmen de la Lengua - Escenario 1**

Banda Horaria	Sentido	Carga máxima	Número de trenes necesarios (Capacidad 1200)	Intervalo de paso (minutos)
HPM	GAB-CAR	8,172	7	8
	CAR-GAB	5,659	5	12
HPT	GAB-CAR	3,500	3	20
	CAR-GAB	4,589	4	15
HV	GAB-CAR	3,016	3	20
	CAR-GAB	2,302	2	30

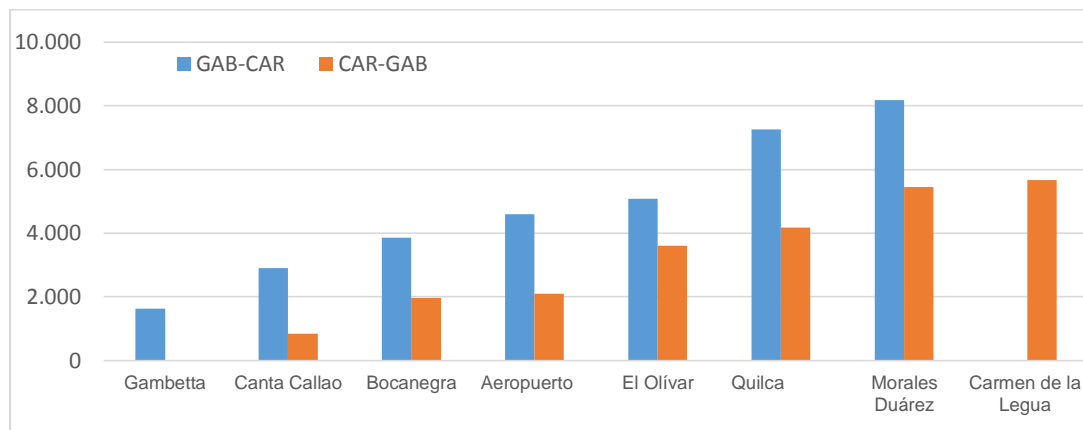
Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

El tiempo de espera en las estaciones se fija un valor 20 segundos en cada estación teniendo como referencia el estudio desarrollado por el Consorcio Geodata, Esan y Serconsult (2013), en la se dimensionó la flota para la Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta (Ramal de la Línea 4) se fijó tiempos de espera de 20 segundos y 40 segundos (en las estaciones de transferencia con otras líneas metros). Además, se tiene como referencia que los tiempos de espera en la Línea 1 del Metro de Lima y Callao en operación actual es 20 segundos.

En los siguientes escenarios de operación se utiliza un tiempo de espera de 20 segundos en la mayoría de las estaciones y 40 segundos en las estaciones terminales y estaciones de transferencia con otras líneas metro.

**Figura N° 52: Cargas proyectadas por Estación según dirección en hora punta mañana – Estación Gambetta hasta Estación Carmen de la Lengua - Escenario 1**



Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4  
Elaboración: Propia

### 3.5.2. Escenario 2: Operación Estación José de Sucre – Estación La Molina

La longitud total del tramo Estación José de Sucre hasta Estación La Molina es 13.27 kilómetros lo largo de 14 estaciones, de acuerdo al Estudio de Demanda la carga máxima estimada en hora punta mañana es 17 ,640 viajes, dicha cantidad puede ser atendida por 13 trenes de 1200 de capacidad c/u a intervalo de paso de 4 minutos aplicable también para hora punta tarde, mientras que en hora valle el intervalo calculado es 10 minutos, tal como se muestra en la siguiente Tabla.

**Tabla N° 16: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación José de Sucre hasta Estación La Molina - Escenario 1**

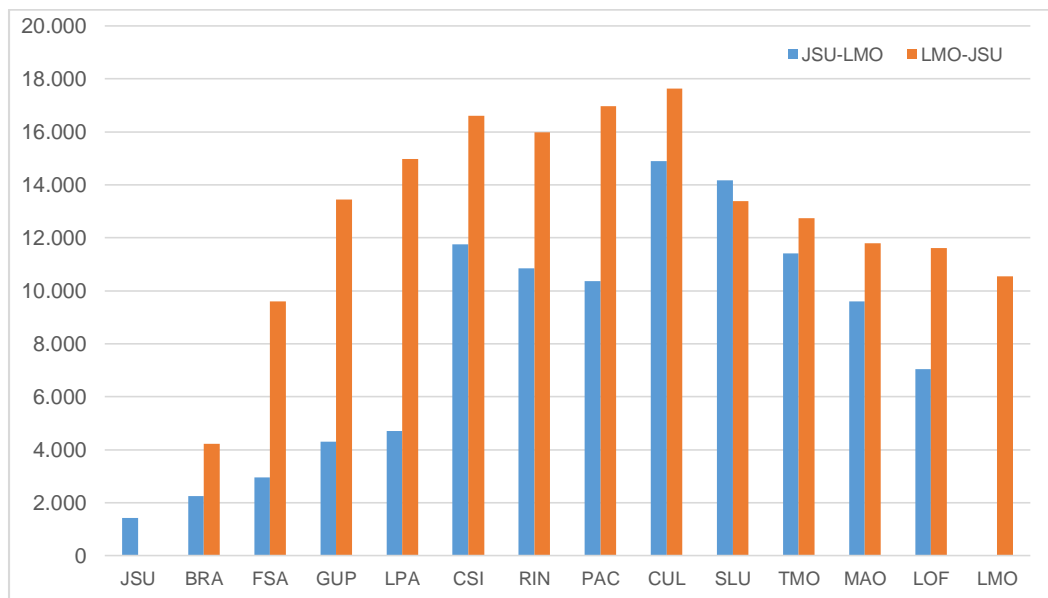
Banda Horaria	Sentido	Carga máxima	Número de trenes necesarios (Capacidad 1200)	Intervalo de paso (minutos)
HPM	JSU-LMO	14,890	13	4
	LMO-JSU	17,640	15	4
HPT	JSU-LMO	15,584	13	4
	LMO-JSU	11,850	10	6
HV	JSU-LMO	6,709	6	10
	LMO-JSU	6,995	6	10

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

Los tiempos de parada en las estaciones se fijan en 20 segundos en la mayoría de las estaciones, excepto en las estaciones que tendrán integración con las otras líneas, es el caso de la Estación La Cultura y Conde de San Isidro donde los tiempos de parada sería 40 segundos, las cargas según estaciones en hora punta mañana se ilustra en el siguiente gráfico.

**Figura N° 53: Cargas proyectadas por estación según dirección en hora punta mañana - Estación José de Sucre hasta Estación La Molina - Escenario 1**



Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia



### 3.5.3. Escenario 3: Operación Estación Gambetta – Estación Conde de San Isidro

La operación ferroviaria se realizaría en un tramo de 17.29 kilómetros la cual cubre a 17 estaciones, de acuerdo al Estudio de Demanda la carga máxima estimada en hora punta mañana es 13,189 viajes, este valor puede ser atendida por 11 trenes de 1200 de capacidad c/u y el intervalo de servicio calculado es 5 minutos aplicable también para hora punta tarde, mientras que en hora valle el intervalo calculado es 12 minutos, lo indicado se ilustra en la siguiente tabla:

**Tabla N° 17: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada – Estación Gambetta hasta Estación Conde de San Isidro - Escenario 2**

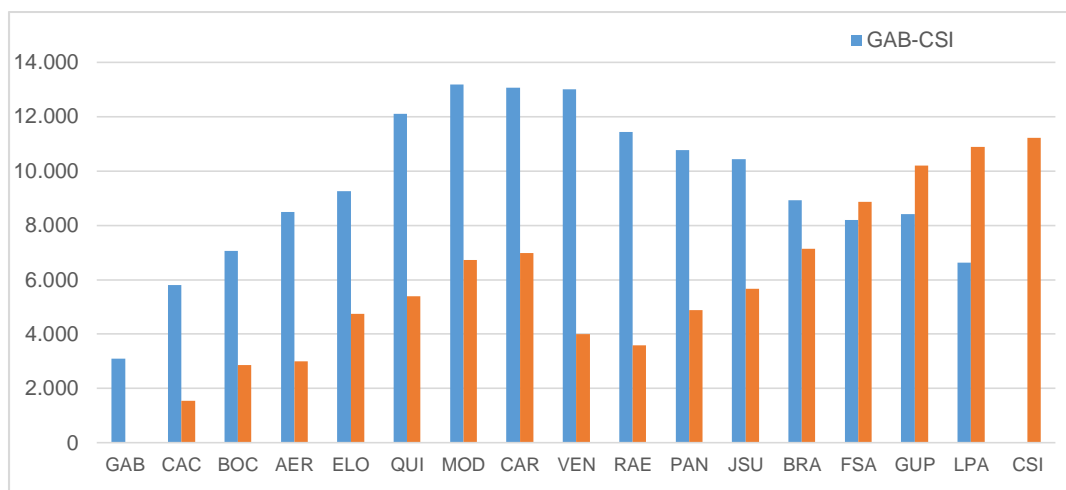
Banda Horaria	Sentido	Carga máxima	Número de trenes necesarios (Capacidad 1200)	Intervalo de paso (minutos)
HPM	GAB-CSI	13,189	11	5.0
	CSI-GAB	11,227	10	6.0
HPT	GAB-CSI	10,471	9	6.0
	CSI-GAB	7,911	7	8.0
HV	GAB-CSI	5,464	5	12.0
	CSI-GAB	5,643	5	12.0

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

Los tiempos de parada en las estaciones se fijan en 20 segundos en la mayoría de las estaciones, excepto en las estaciones que tendrán integración con las otras líneas, tales como: Estación Carmen de la Lengua, Pando y Conde de San Isidro donde los tiempos de parada sería de 40 segundos, las cargas según estaciones en hora punta mañana se ilustra en la siguiente figura.

**Figura N° 54: Cargas proyectadas por estación según dirección en hora punta mañana - Estación Gambetta hasta Estación Conde de San Isidro - Escenario 2**



Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

### 3.5.4. Escenario 4: Operación Estación Gambetta – Estación La Molina

El servicio ferroviario en el tramo Estación Gambetta hasta Estación La Molina beneficiaría a 25 estaciones a lo largo de 26.24 kilómetros, de acuerdo al Estudio de Demanda la carga máxima proyectada en hora punta mañana es 24 ,040 viajes, dicho valor puede ser atendida por 21 trenes de 1200 de capacidad c/u a intervalos de paso de 2.5 minutos aplicable también para hora punta tarde, mientras que en hora valle el intervalo sería 6 minutos, lo indicado se ilustra en la siguiente tabla:

**Tabla N° 18: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Estación La Molina - Escenario 3**

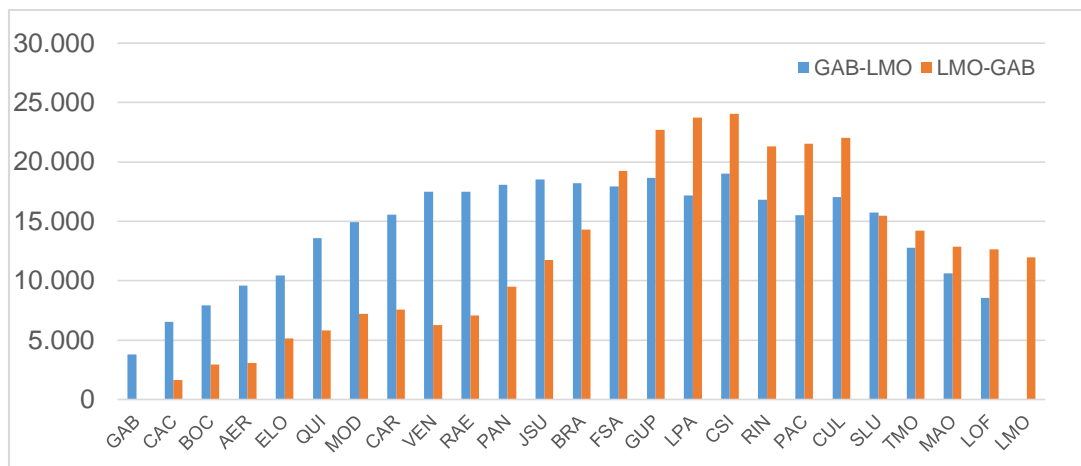
Banda Horaria	Sentido	Carga máxima	Número de trenes necesarios (Capacidad 1200)	Intervalo de paso (minutos)
HPM	GAB-LMO	19,026	16	3.0
	LMO-GAB	24,040	21	2.5
HPT	GAB-LMO	20,345	17	3.0
	LMO-GAB	14,674	13	4.0
HV	GAB-LMO	11,648	10	6.0
	LMO-GAB	11,570	10	6.0

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

Los tiempos de parada en las estaciones se fijan en 20 segundos en las estaciones, excepto en las estaciones que tendrán integración con las otras líneas como Estación Carmen de la Lengua, Pando, Conde de San Isidro y La Cultura donde los tiempos de parada se fija en 40 segundos, las cargas según estaciones en hora punta mañana se ilustra en la siguiente figura.

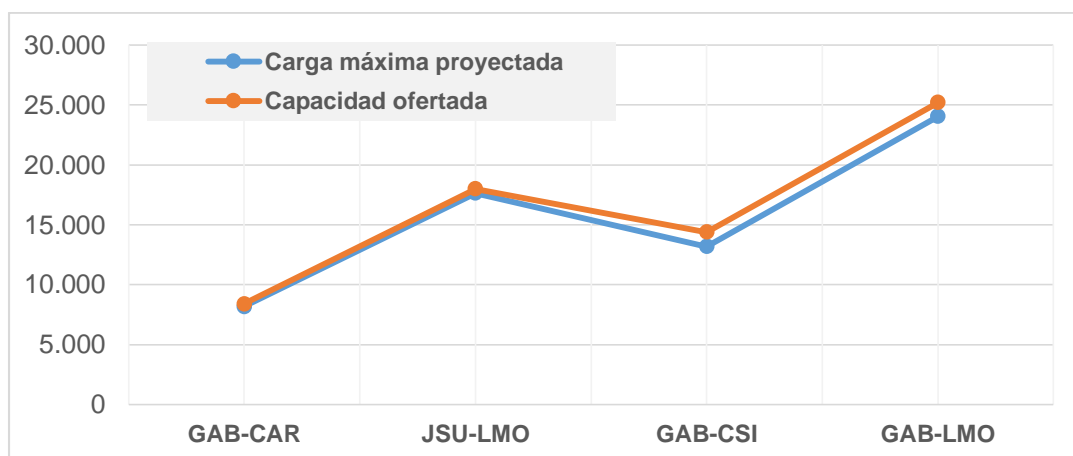
**Figura N° 55: Cargas proyectadas por estación según dirección en Hora Punta Mañana - Estación Gambetta hasta Estación La Molina - Escenario 3**



Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4  
Elaboración: Propia

Finalmente, en la Fig. N° 56, se muestra que la capacidad ofertada en hora punta mañana establecida en los cuadros anteriores cubre la carga máxima estimada en el estudio de la demanda.

**Figura N° 56: Comparativo de la carga máxima proyectada versus capacidad ofertada en hora punta mañana - Funcionamiento parcial de la Línea 4**



Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4  
Elaboración: Propia

### 3.5.5. Operación completa de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao - Estación Gambetta – Estación Mercado Santa Anita

La explotación del servicio ferroviario en la Línea 4 del Metro de Lima y Callao atenderá la demanda en 28 estaciones a lo largo de 30.49 kilómetros, los tiempos de espera en la mayoría de las estaciones será de 20 segundos excepto en las estaciones con integración (Carmen de la Lengua, Pando, Conde de San Isidro, La Cultura y Mercado Santa Anita) donde los tiempos de espera será de 40 segundos.

#### - Fase 2025 – 2030

Entre los años 2025 y 2030 se requieren entre 24 a 36 trenes de 1200 de capacidad c/u por sentido para satisfacer la carga estimada en una hora con un intervalo de paso de 2.5 a 2.3 minutos, en horas valle el intervalo de paso oscila entre 5 a 4.6 minutos, tal como se muestra en las siguientes tablas.

**Tabla N° 19: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Mercado Santa Anita - 2025**

Banda Horaria	Sentido	Carga máxima	Número de trenes necesarios (Capacidad 1200)	Intervalo de paso (minutos)
HPM	GAB-MSA	19,913	17	3.5
	MSA-GAB	28,010	24	2.5
HPT	GAB-MSA	23,869	20	3.0
	MSA-GAB	17,583	15	4.0
HV	GAB-MSA	13,385	12	5.0
	MSA-GAB	13,193	11	5.5

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

**Tabla N° 20: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Mercado Santa Anita - 2030**

<b>Banda Horaria</b>	<b>Sentido</b>	<b>Carga máxima</b>	<b>Número de trenes necesarios (Capacidad 1200)</b>	<b>Intervalo de paso (minutos)</b>
HPM	GAB-MSA	19,922	17	3.5
	MSA-GAB	30,462	26	2.3
HPT	GAB-MSA	27,253	23	2.6
	MSA-GAB	30,462	26	2.3
HV	GAB-MSA	13,320	12	5.0
	MSA-GAB	13,899	12	5.0

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

**- Fase 2035 – 2055**

A partir del año 2035 es necesario agregar el séptimo coche a los trenes de 6 coches para llegar a una capacidad de 1400 pasajeros por tren, con dicha integración cubre la carga máxima estimada hasta el año 2055, tal como se muestra en las siguientes tablas:

**Tabla N° 21: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Mercado Santa Anita - 2035**

<b>Banda Horaria</b>	<b>Sentido</b>	<b>Carga máxima</b>	<b>Número de trenes necesarios (Capacidad 1400)</b>	<b>Intervalo de paso (minutos)</b>
HPM	GAB-MSA	21,742	16	3.8
	MSA-GAB	35,103	26	2.3
HPT	GAB-MSA	30,510	22	2.7
	MSA-GAB	19,617	15	4.0
HV	GAB-MSA	14,234	11	5.5
	MSA-GAB	15,225	11	5.5

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

**Tabla N° 22: Determinación de número de trenes necesarios e intervalos de paso en función a la carga máxima proyectada - Estación Gambetta hasta Mercado Santa Anita - 2055**

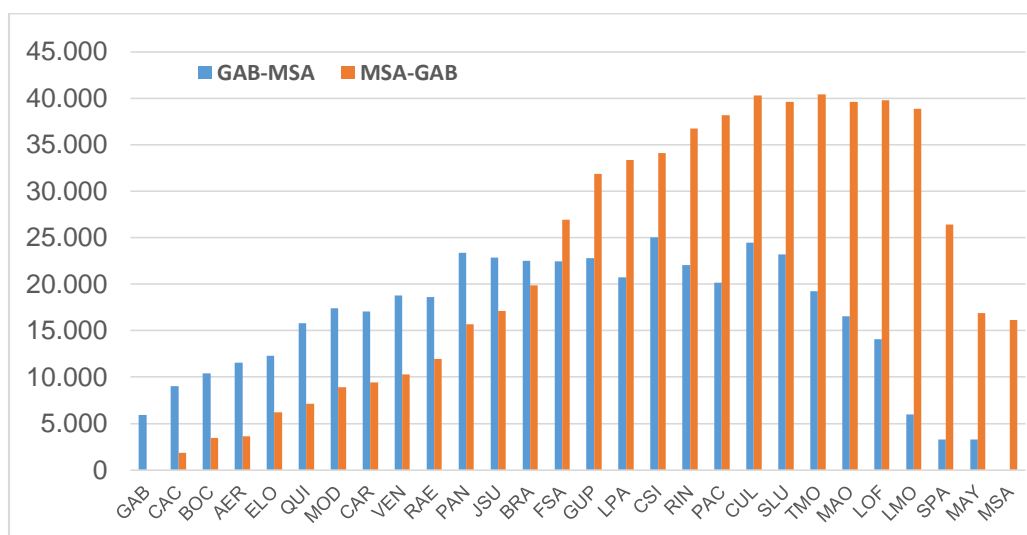
Banda Horaria	Sentido	Carga máxima	Número de trenes necesarios (Capacidad 1400)	Intervalo de paso (minutos)
HPM	GAB-MSA	25,012	18	3.3
	MSA-GAB	40,384	30	2.0
HPT	GAB-MSA	35,100	26	2.3
	MSA-GAB	22,568	17	3.5
HV	GAB-MSA	16,377	12	5.0
	MSA-GAB	17,512	13	4.6

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

En la Fig. N° 57, se muestran las cargas estimadas en horas punta mañana por dirección de viaje, como se indicó al principio de análisis de la etapa de funcionamiento completo de la Línea 4, los tiempos de parada se fijan en 20 segundos en la mayoría de las estaciones, excepto en las estaciones que tendrán integración con las otras líneas, es el caso de la Estación Carmen de la Lengua, Pando, Conde de San Isidro, La Cultura y Mercado San Anita, donde los tiempos de parada se fija en 40 segundos.

**Figura N° 57: Cargas proyectadas por estación según dirección en hora punta mañana - Estación Gambetta hasta Estación Mercado Santa Anita - 2055**

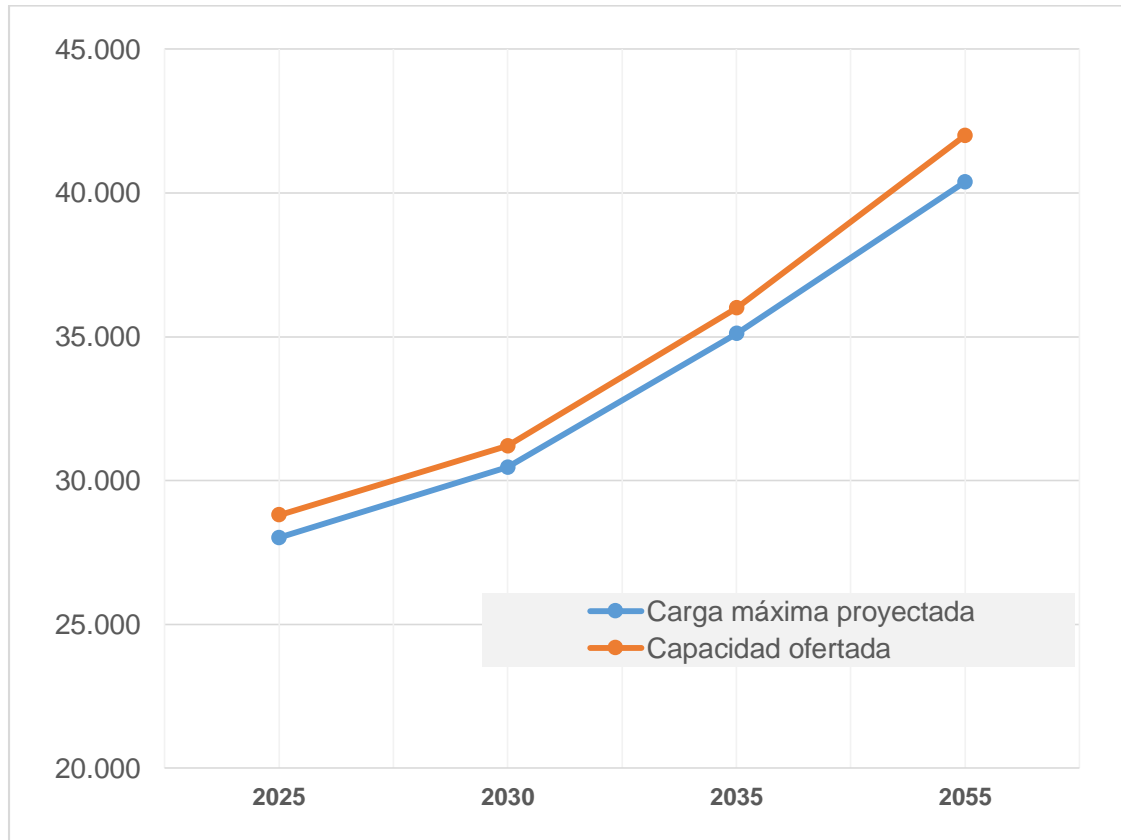


Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

Finalmente, en la Fig. N° 58 se observa que la capacidad ofertada en hora punta estimada en los cuadros anteriores cubre la carga máxima estimada en el estudio de la demanda.

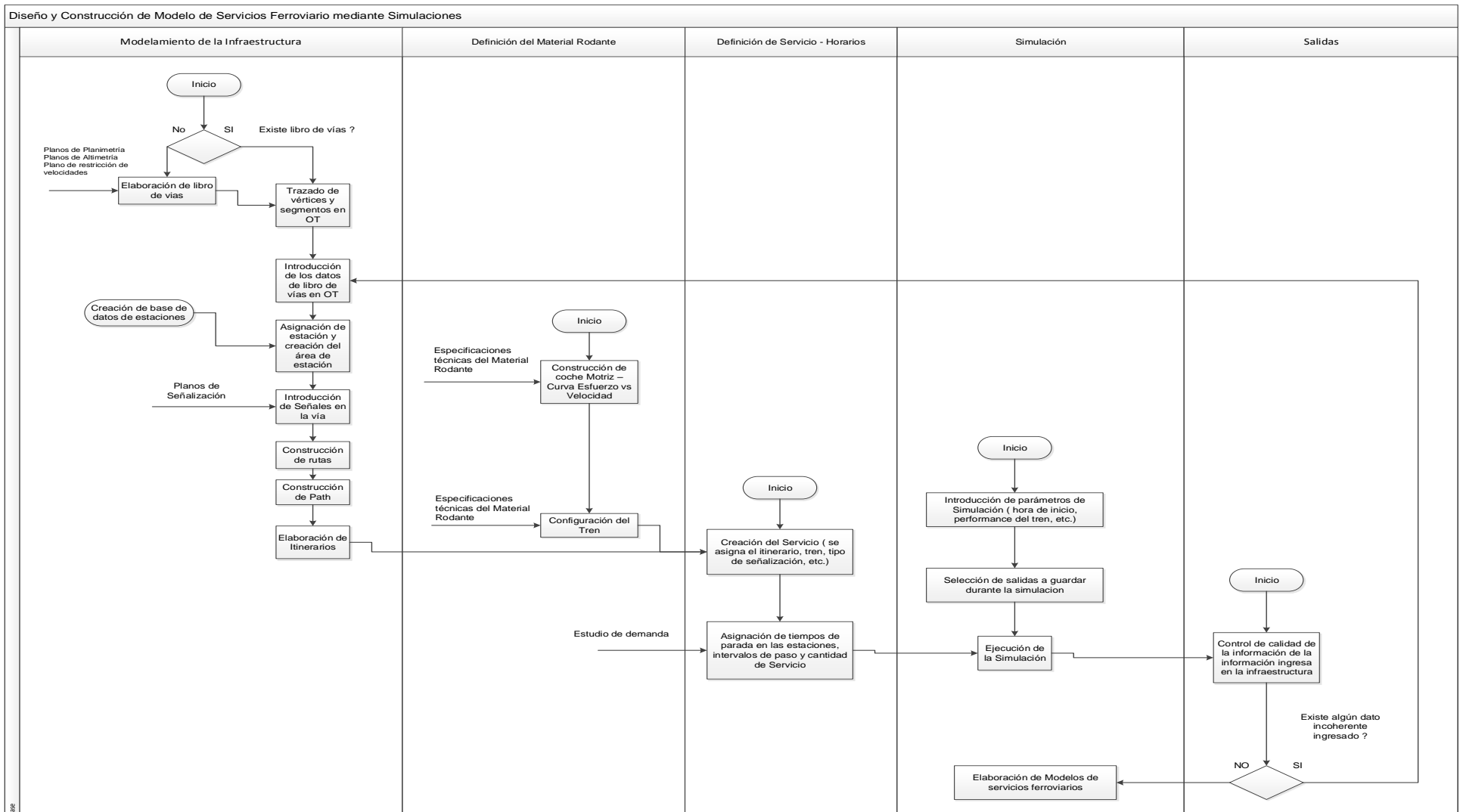
**Figura N° 58: Comparativo de la carga máxima versus capacidad ofertada en hora punta mañana - Funcionamiento total de la Línea 4**



Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4  
Elaboración: Propia

Finalmente, en la Fig. N° 59 se ilustra el diagrama flujo del proceso diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante la simulación.

Figura N° 59: Diagrama flujo del proceso de diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante simulación



Elaboración: Propia



## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS**

#### **4.1. Consideraciones iniciales**

##### **a) Horarios de operación**

El modelo del servicio ferroviario depende en su mayor parte de las especificaciones en los horarios de operación, datos que son propuestos por el profesional de operaciones al tomar en consideración principalmente el perfil de la demanda existente o proyectada, ya que de ello se desprenden variables como:

- Hora de inicio y fin de las operaciones diarias: medida que permita estar acorde con las necesidades de transporte del pasajero. Para los modelos de servicios propuestos se establece el inicio de la operación a las 6:00 a.m. y fin a las 22:00 p.m., teniendo como referencia el horario de servicio de la Línea 1 del Metro de Lima actualmente en operación.
- Tiempo de estacionamiento / parada en las estaciones: parámetros que brinda al pasajero la seguridad de ascender y descender de los trenes en las estaciones, estos valores se estiman en función de la demanda real o proyectada (ver Tabla N° 23).
- Inicio de las horas punta y horas valle: se define previamente y según el estudio de la demanda / patrón de comportamiento de las líneas en operación, las horas donde se experimenta la mayor afluencia de pasajeros u horas punta y tomando las horas restantes como horas valle. Este dato es vital, ya que permite definir ciertas estrategias de operación con el fin de cubrir la demanda de viajes. Asimismo, la carga máxima en hora punta determina el dimensionamiento de la flota de trenes para prestar el servicio para cada escenario propuesto. La banda horaria que se aplicó en el presente estudio será de la Línea 1 actualmente en operación (ver el Tabla N° 24)
- Tiempos de cambio de cabina / vuelta / inversión: es el tiempo mínimo que requiere el tren en una estación terminal para cambiar de sentido de movimiento, este factor depende de la disposición de las cambiavías (cambiavías frontal o posterior de la estación terminal) y el grado de automatización de sistema metro. El tiempo de cambio de cabina se puede dar de dos maneras en una estación terminal con cambiavías de ambos lados (frontal y posterior), en el caso inversión frontal en líneas metro automáticas solo se considera el tiempo de cambio de dirección del

movimiento del tren (inversión de los motores y comandos en dirección contraria) que generalmente oscila entre 1 a 2 segundos, Por ejemplo en el Estudio a nivel Preinversión de la Línea 2 del Metro de Lima y Callao se consideró 1.5 segundos (Consortio Geodata Esan y Serconsult, 2013). Por otro lado, cuando la inversión se realiza en andén posterior para el cálculo de tiempos de inversión se debe considerar el tiempo de recorrido desde estación hasta andén inversión por la vía 1, tiempo de cambio de dirección del movimiento del tren y el tiempo de recorrido desde andén de inversión por la vía 2 hasta la estación.

**Tabla N° 23: Tiempos de paradas en las estaciones para cada escenario de servicio ferroviario**

Estación	Código estación	Integración	Operación parcial				Operación total
			Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Gambetta - Mercado Santa Anita
			Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	
Gambetta	GAB		20		20	20	20
Canta Callao	CAC		20		20	20	20
Bocanegra	BOC		20		20	20	20
Aeropuerto	AER		20		20	20	20
El Olivar	ELO		20		20	20	20
Quilca	QUI		20		20	20	20
Morales Duárez	MOD		20		20	20	20
Carmen de la Legua	CAR	con L-2	40		40	40	40
Venezuela	VEN				20	20	20
Rafael Escardo	RAE				20	20	20
Pando	PAN	con L-6			40	40	40
José de Sucre	JSU			20	20	20	20
Brasil	BRA			20	20	20	20
Felipe Salaverry	FSA			20	20	20	20
Guillermo Prescott	GUP			20	20	20	20
Las Palmeras	LPA			20	20	20	20
Conde de San Isidro	CSI	con L-3		40	40	40	40
Rivera Navarrete	RIN			20		20	20
Pablo Carriquiry	PAC			20		20	20
La Cultura	CUL	con L-1		40		40	40
San Luis	SLU			20		20	20
Trébol de Monterrico	TMO			20		20	20
Manuel Olgúin	MAO			20		20	20
Los Frutales	LOF			20		20	20
La Molina	LMO			20		20	20
Santa Patricia	SPA						20
Mayorazgo	MAY						20
Mercado Santa Anita	MSA	con L-2					40

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

**Tabla N° 24: Banda horaria**

<b>Hora Punta</b>	<b>Lunes a Viernes</b>	06:30 a 09:30
		17:30 a 20:30
	<b>Sábados</b>	07:00 a 09:30
		13:00 a 20:00
<b>Hora Valle</b>	<b>Lunes a Viernes</b>	06:00 a 06:30
		09:30 a 17:30
		20:30 a 22:00
	<b>Sábados</b>	06:00 a 07:00
		09:30 a 13:00
		20:00 a 22:00
	<b>Domingos y Feriados</b>	06:00 a 22:00

Fuente: Plan de Prestación de Servicio de la Línea 1 del Metro de Lima (AATE)

## b) Rendimiento del tren

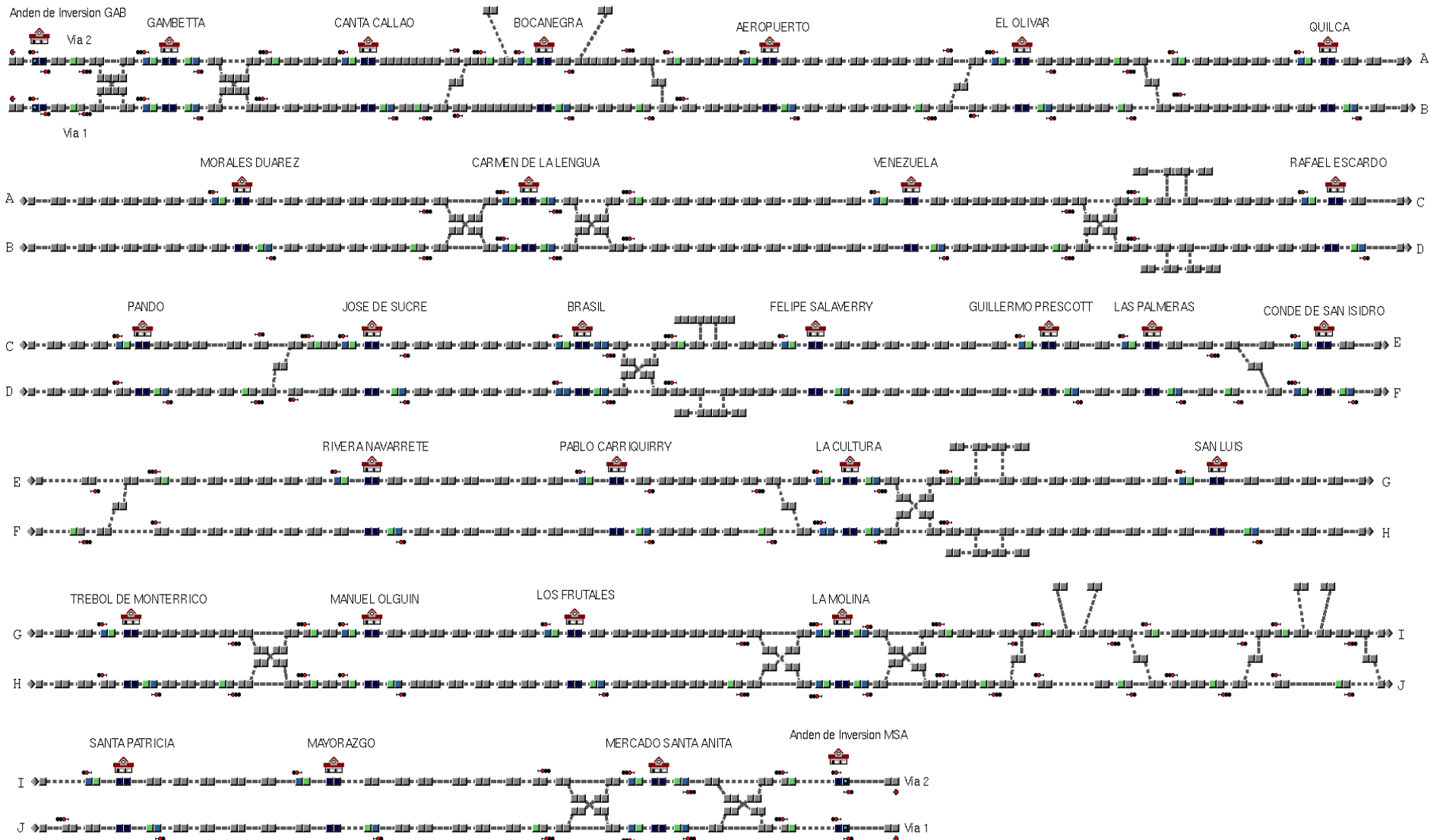
Watson y Medeossi (2014), afirma “los parámetros de rendimiento del tren son normalmente entre el 90% y el 98%, siendo el extremo inferior más común en la parada de trenes y valores muy cercanos al límite superior de los servicios de alta velocidad” (pág. 206).

Asimismo, en el estudio del dimensionamiento de la flota para la Línea 2 del Metro de Lima y Callao (Consortio Geodata Esan y Serconsult, 2013) indican que es posible plantear la hipótesis de explotar al máximo sus características técnicas, éstas serán después ligeramente menor en condiciones reales, debido a una serie de limitaciones intrínsecas, tales como:

- El inicio de la aceleración, que se produce con un leve retraso respecto al cierre de las puertas; asimismo, la aceleración máxima no se aplica al instante;
- El inicio de frenado está siempre precedido por un corto tramo en donde se reduce la tracción a cero y se aplica el frenado;
- La parada del vehículo, en donde la desaceleración se reduce respecto al máximo con el fin de evitar un retroceso demasiado alto;
- En el ejercicio real se evidencia alguna variabilidad en el rendimiento de los vehículos, en particular en el envejecimiento de los mismos.

Considerando que el rendimiento de los trenes se reduce a 93% del máximo con el fin de tener en cuenta el retraso de la aplicación de la máxima aceleración y frenado e insertar.

Figura N° 60: Esquema de vías y señalización – Línea 4



Fuente: Opentrack  
 Elaboración: Propia

## 4.2. Control de calidad de los inputs

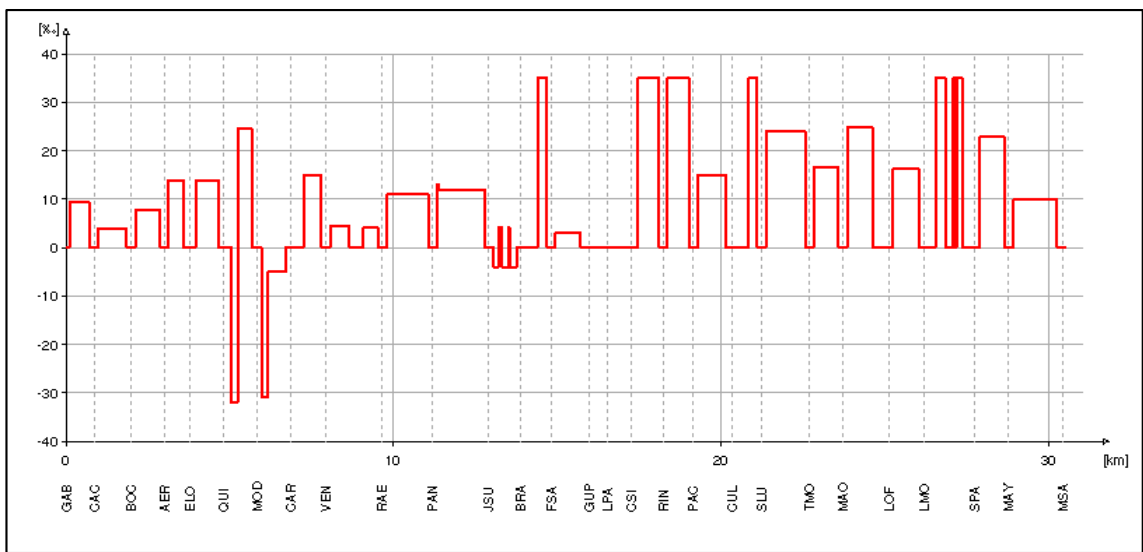
Previo a la ejecución de la simulación para estimar los tiempos de viajes / recorridos, velocidad comercial, etc., es necesario verificar que no exista ningún dato incoherente ingresado en el modelo de la infraestructura (ver Fig. N° 60), tales como: gradientes, radios de curvatura y restricción de velocidades.

### a) Verificación de altimetría de la vía

La Fig. N° 61 representa los cambios de movimiento del tren en eje vertical (rampas y pendientes) de la Estación Gambetta - Estación Mercado Santa Anita, siendo como pendiente y rampa máximas 35 (‰), este valor cumple con las especificaciones geométricas (Proinversión, 2014) de la superestructura donde establecieron como pendiente máximo de 35 (‰). Los gradientes en sentido contrario del movimiento se muestran en la Fig. N° 62.

Finalmente, en la Fig. N° 63 se ilustra la altimetría de la vía en un ciclo de viaje Estación Gambetta- Estación Mercado San Anita – Estación Gambetta, donde se puede apreciar que la gráfica es simétrica, por lo tanto, los datos han sido ingresados correctamente, cabe notar que la vía 2 es ascendente esto repercutirá en el tiempo de viaje y en el consumo de energía de tracción. La diferencia de altitud entre la cota más alta y la cota más baja de la línea es 269 metros.

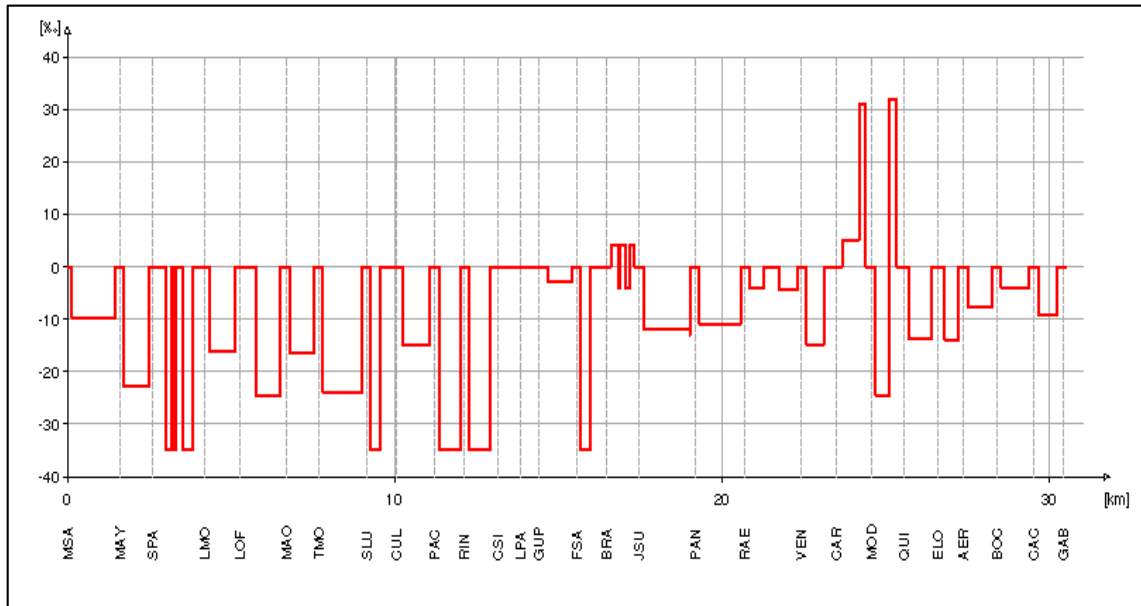
**Figura N° 61: Esquema del gradiente en la vía 2 (Estación Gambetta – Estación Mercado Santa Anita)**



Fuente: Opentrack

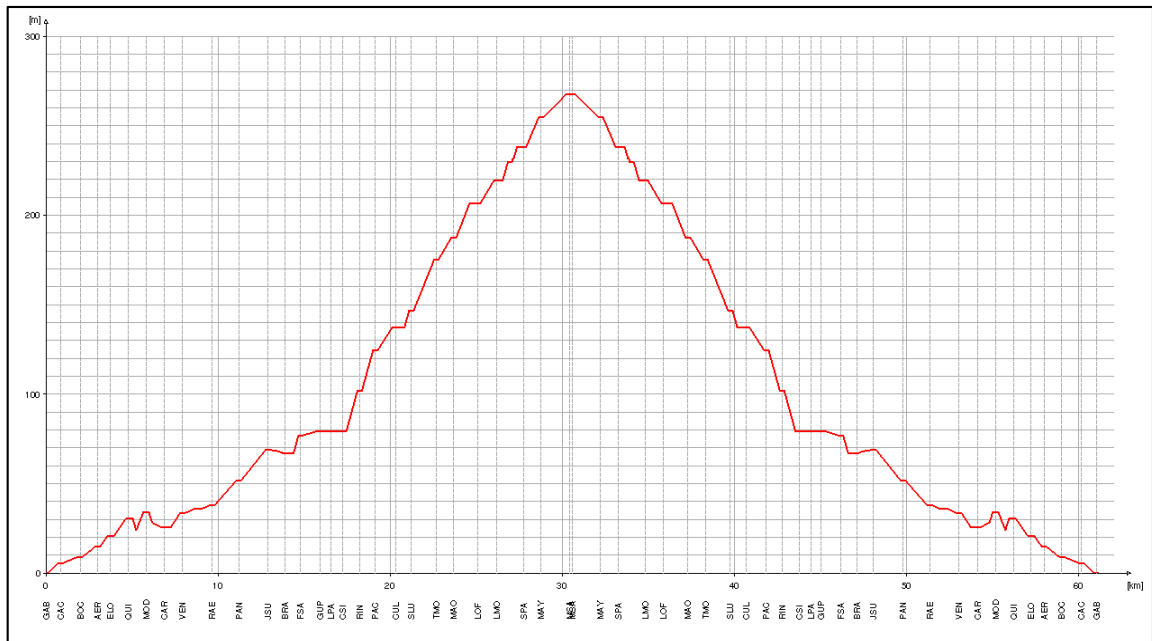
Elaboración: Propia

**Figura N° 62: Esquema del gradiente en la vía 1 (Estación Mercado Santa Anita – Estación Gambetta)**



Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

**Figura N° 63: Esquema altimétrico de la Línea 4 (Gambetta - Mercado Santa Anita - Gambetta)**

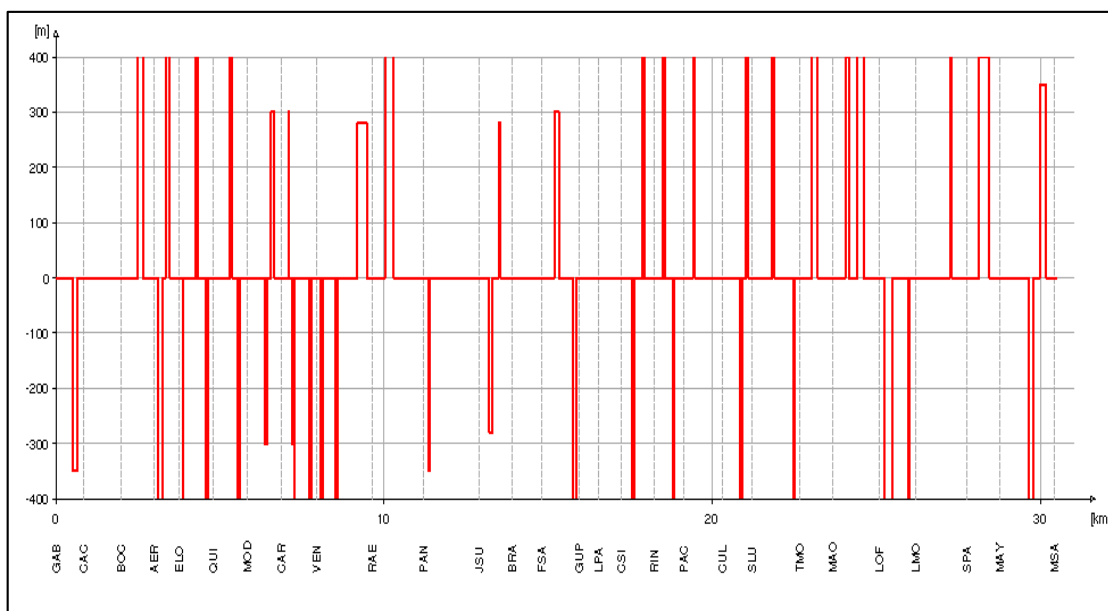


Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

## b) Verificación de planimetría de la vía

La Fig. N° 64, representa los cambios de movimiento del tren en eje horizontal (radios de curvatura) de la Estación Gambetta – Estación Mercado Santa Anita siendo el radio mínimo 280 metros, este valor cumple con las especificaciones geométricas (Proinversión, 2014) de la superestructura donde se estableció considerar radios superiores a 250 metros.

Figura N° 64: Radios de la curvatura en la vía 1



Fuente: Opentrack

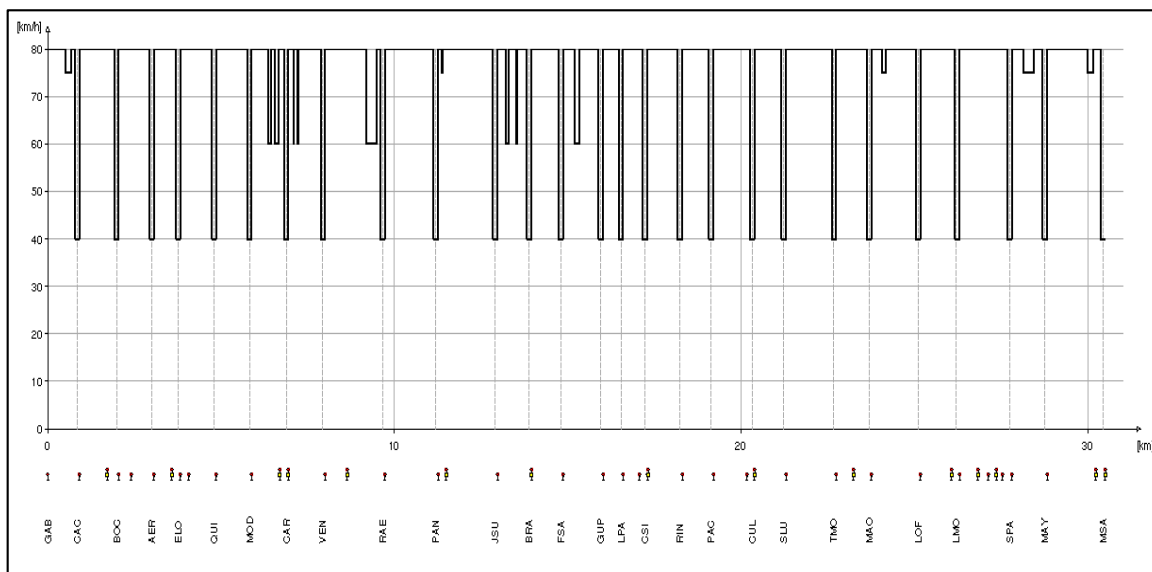
Elaboración: Propia

## c) Verificación de la restricción de velocidad en la vía férrea

La restricción de la velocidad se muestra en el diagrama de marcha de los trenes. Este gráfico en el eje de las abscisas representa la distancia recorrida por el tren incluyendo la posición de las estaciones y de las señales de la vía. En el eje de las ordenadas se plasma la restricción de la velocidad a lo largo del recorrido.

La línea negra de la Fig. N° 65 muestra las restricciones de velocidad impuestas a la circulación del tren en el trazado, se estableció la máxima velocidad de 80 km/h, 40 km/h a la entrada de cada estación y 50 km/h en las cambiavías, estos datos concuerdan con la restricción de velocidad indicados en el libro de vías.

**Figura N° 65: Restricciones de la velocidad en la vía férrea**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

### 4.3. Calibración del rendimiento del tren

En concordancia con el enunciado del punto 4.1 del presente trabajo, en la Tabla N° 25 se muestra la estimación de la velocidad comercial para diferentes rendimientos del Material Rodante, según los resultados es posible alcanzar la velocidad comercial mínimo de 36 km/h hasta a un rendimiento de 86%. Sin embargo, para el cálculo de tiempos de viaje de los modelos de operaciones ferroviarias se utilizara el rendimiento de 93% (Consortio Geodata Esan y Serconsult, 2013), teniendo como referencia la Línea 2 del Metro de Lima y Callao, debido a que esta ya fue utilizada en la simulación del Ramal de la Línea 4 (Estación Gambetta – Estación Carmen de la Lengua).

**Tabla N° 25: Calibración del rendimiento del Material Rodante**

Rendimiento	Tiempo de viaje (minutos)	Velocidad comercial (km/h)	Velocidad comercial mínimo (km/h)
98%	46.9	39.00	36
96%	48.4	38.43	36
<b>93%</b>	<b>48.4</b>	<b>37.79</b>	<b>36</b>
90%	49.5	36.98	36
88%	50.2	36.47	36
86%	50.8	36.03	36
83%	52.1	35.14	36

Elaboración: Propia



Una vez fijada el rendimiento del tren se procede a realizar la simulación del recorrido de un tren por dirección para cada modelo de operación ferroviario.

#### 4.4. Estimación de los tiempos de viaje, velocidad comercial, consumo de energía de tracción según dirección del movimiento

En el Tabla N° 26, se muestran las estimaciones de los tiempos de viaje, velocidad comercial y consumo de energía de tracción para cada modelo de servicio ferroviario mediante el recorrido de un tren por dirección del movimiento en la vía 1 y vía 2, en todos los caso la velocidad comercial es mayor a 36 km/h, el tiempo de viaje desde la Estación Gambetta hasta la Estación Mercado Santa Anita (vía 2) se estima en 48.42 minutos y el consumo de energía en 985.79 kWh. Asimismo, el tiempo de viaje en la vía 1 se estima en 48.18 minutos y el consumo de energía en 712.10 kWh se aprecia que estos datos son menores al de la vía 2, esto debido a que el movimiento es descendiente tal como se ilustró en el esquema de altimetría de la vía.

**Tabla N° 26: Estimación de los tiempos de viaje, velocidad comercial y consumo de energía de tracción de tren en cada escenario de servicio ferroviario**

Etapas	Desde	Hacia	Vía	Distancia (km)	Tiempo de viaje (minutos)	Velocidad comercial (km/h)	Consumo energía (kWh)
Funcionamiento parcial	Gambetta	Carmen de la Legua	vía 1	6.946	11.08	37.60	217.90
	Carmen de la Legua	Gambetta	vía 2	6.947	11.10	37.55	189.66
	José de Sucre	La Molina	vía 1	13.277	22.05	36.13	474.26
	La Molina	José de Sucre	vía 2	13.275	21.90	36.37	329.19
	Gambetta	Conde de San Isidro	vía 1	17.296	27.90	37.20	523.92
	Conde de San Isidro	Gambetta	vía 2	17.295	27.82	37.30	432.42
	Gambetta	La Molina	vía 1	26.249	42.50	37.06	855.61
	La Molina	Gambetta	vía 2	26.247	42.30	37.23	632.40
Funcionamiento total	Gambetta	Mercado Santa Anita	vía 1	30.495	48.42	37.79	985.79
	Mercado Santa Anita	Gambetta	vía 2	30.492	48.18	37.97	712.10

Elaboración: Propia

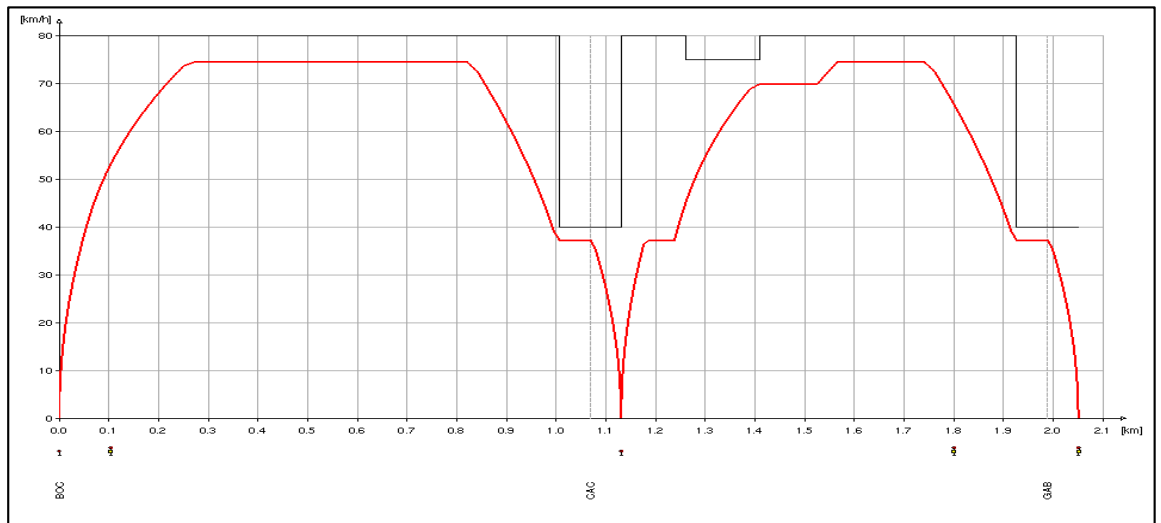
A continuación, se presenta algunas gráficas que muestran el comportamiento del movimiento del tren en la vía.

##### a) Diagrama de marcha

El diagrama de marcha del tren representa gráficamente del comportamiento dinámico del tren a lo largo de la vía. En este gráfico se imprime el cambio de la velocidad del tren en relación de la distancia recorrida y al segmento de vía por el cual éste se encuentre recorriendo. En el eje de las abscisas se representa la distancia recorrida por el tren incluyendo la posición de las estaciones y de las señales de la vía. En el eje de las ordenadas se imprime la variación de la velocidad del tren a lo largo del recorrido. La línea negra muestra las restricciones de velocidad impuestas a la circulación del tren en el trazado de la vía, la línea roja representa la velocidad que desarrolla el tren en cada punto del recorrido (ver la Fig. N° 66), donde aprecia a detalle el recorrido del tren desde Estación Bocanegra hasta Estación Gambetta. En la ilustración se puede apreciar las fases del movimiento del tren, por ejemplo, entre estaciones Bocanegra y Santa Callao.

- La fase aceleración: va desde que se inicia el movimiento del tren con velocidad cero incrementándose hasta una velocidad 74.4 km/h en 23 segundos a lo largo de 0.27 km.
- La fase de cruceo: es el periodo donde la velocidad se mantiene constante (74.4 km/h), en la figura va 0.27 km hasta 0.82 km.
- La fase de inercia: esta la etapa cuando el tren está en marcha sin ningún esfuerzo por parte del motor, en este caso el tren el tren no consumirá toda la energía.
- La fase de frenado. Es la etapa de aplicación del frenado, donde el tren está reduciendo la velocidad, va de 0.84 km hasta 1.13 km.

**Figura N° 66: Diagrama de marcha, dirección Estación Bocanegra – Estación Gambetta**

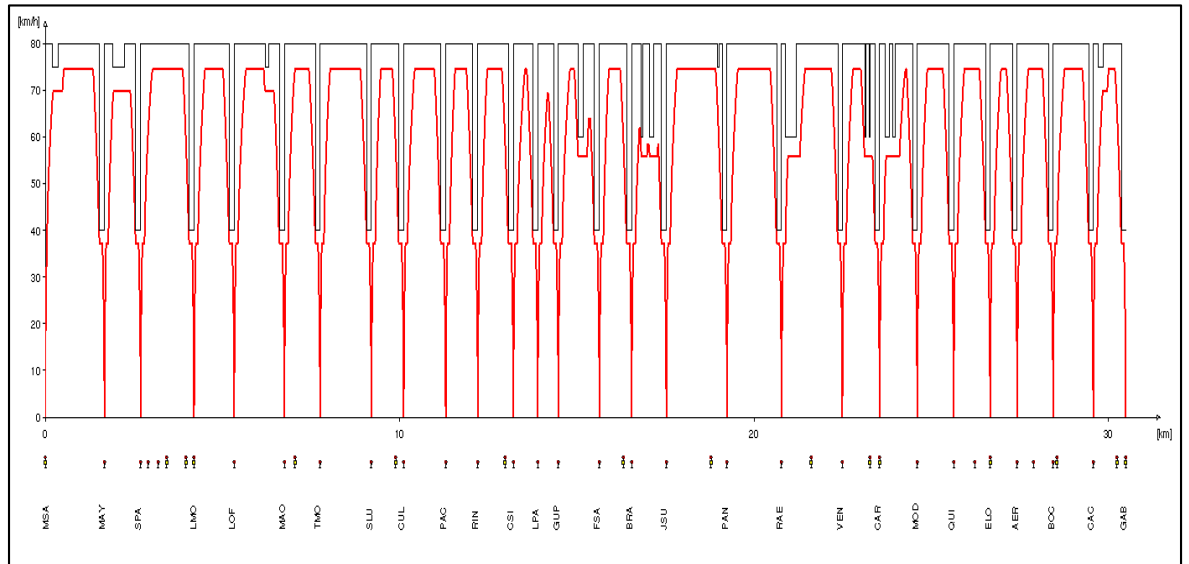


Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

En la Fig. N° 67 se muestra el diagrama de marcha del tren en dirección hacia Estación Gambetta, mientras que la Fig. N° 68 se ilustra el diagrama de marcha del tren en sentido opuesto (dirección hacia Estación Mercado Santa Anita).

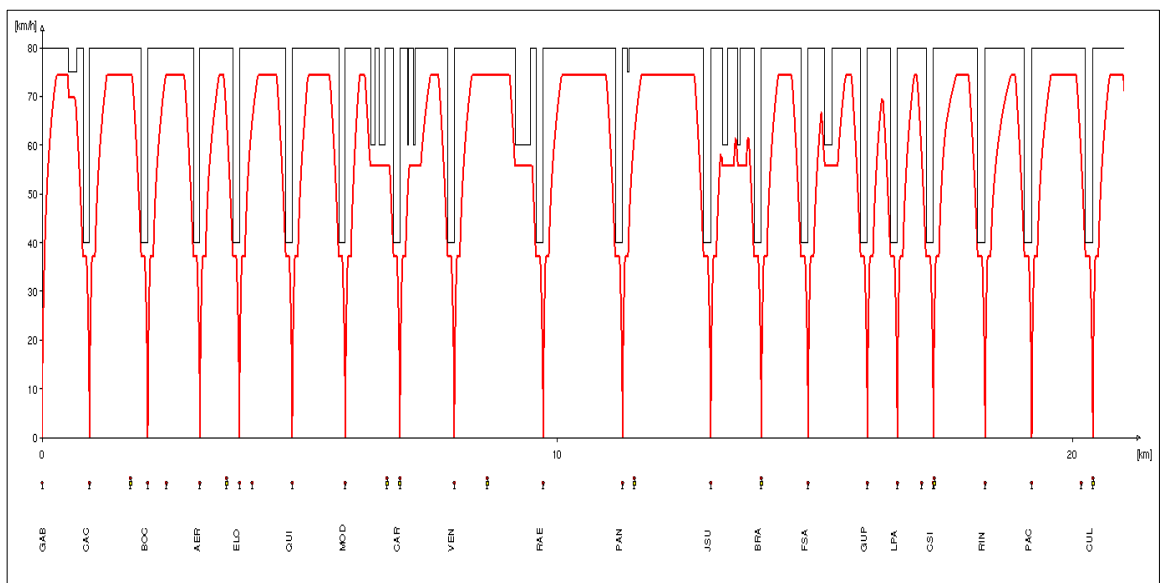
**Figura N° 67: Diagrama de marcha, dirección Mercado Santa Anita - Gambetta**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

**Figura N° 68: Diagrama de marcha, dirección Gambetta - Mercado Santa Anita**



Fuente: Opentrack

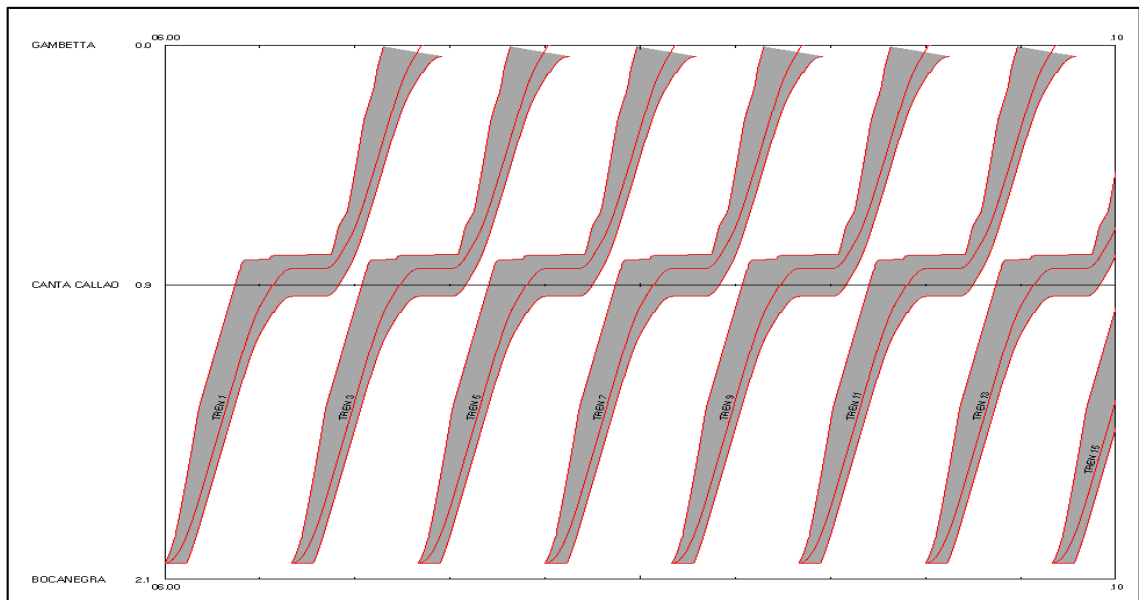
Elaboración: Propia

### b) Diagrama de ocupación

Los diagramas de bloqueo muestran en general, la sucesión de ocupaciones y liberaciones de la vía que hace el tren en las diferentes secciones de bloqueo y el tiempo que dura dicha ocupación.

En la fig. N° 69, se muestra la ocupación de la vía de Estación Bocanegra hasta Estación Gambetta a intervalos de paso de 80 segundos, dicha diagrama no muestra ninguna interferencia entre diagramas de ocupaciones de los trenes esto muestra la estabilidad del sistema de señalización CBTC.

**Figura N° 69: Esquema de ocupaciones Estación Bocanegra – Estación Gambetta a 80 segundos de intervalo de paso**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

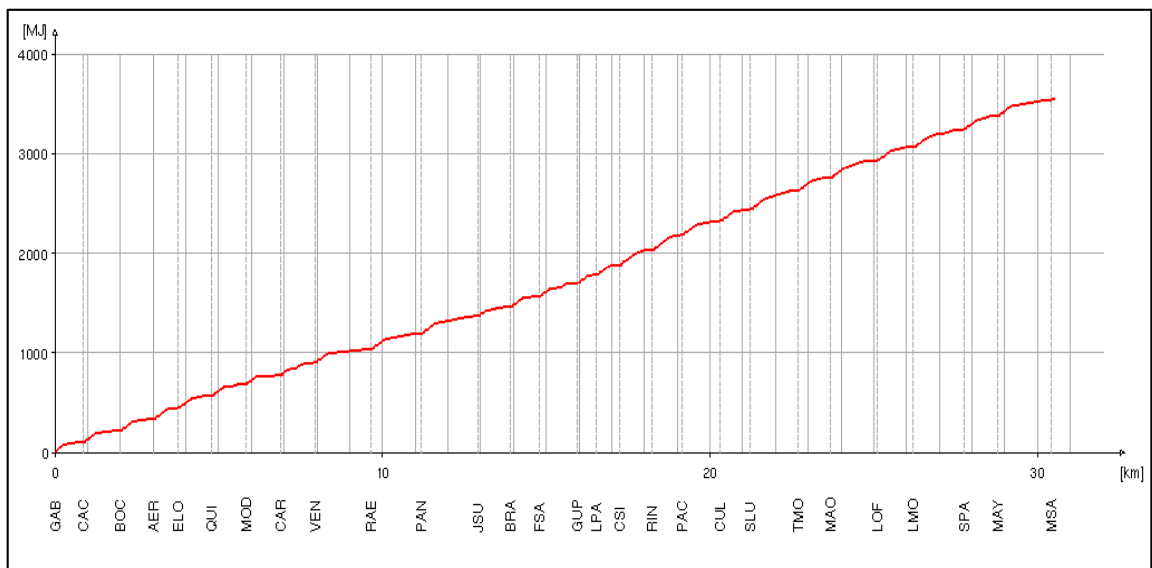
### c) Consumo de energía

El consumo de energía de tracción está relacionado al consumo de energía de los motores del tren y los elementos auxiliares (aire acondicionado). Cabe precisar que el consumo de energía estimado por la herramienta es sin regeneración. Además, representa la energía consumida en forma acumulada durante el recorrido del tren por

la vía férrea, este consumo viene expresado en Mega-Joules (MJ), este valor se divide entre 3.6 para convertirlo a kWh.

En la Fig. N° 70, la línea roja representa el consumo de energía del tren en su desplazamiento desde Estación Gambetta hasta Estación Mercado Santa Anita, en el sentido opuesto del movimiento del tren el consumo de energía de tracción se ilustra en la Fig. N° 71.

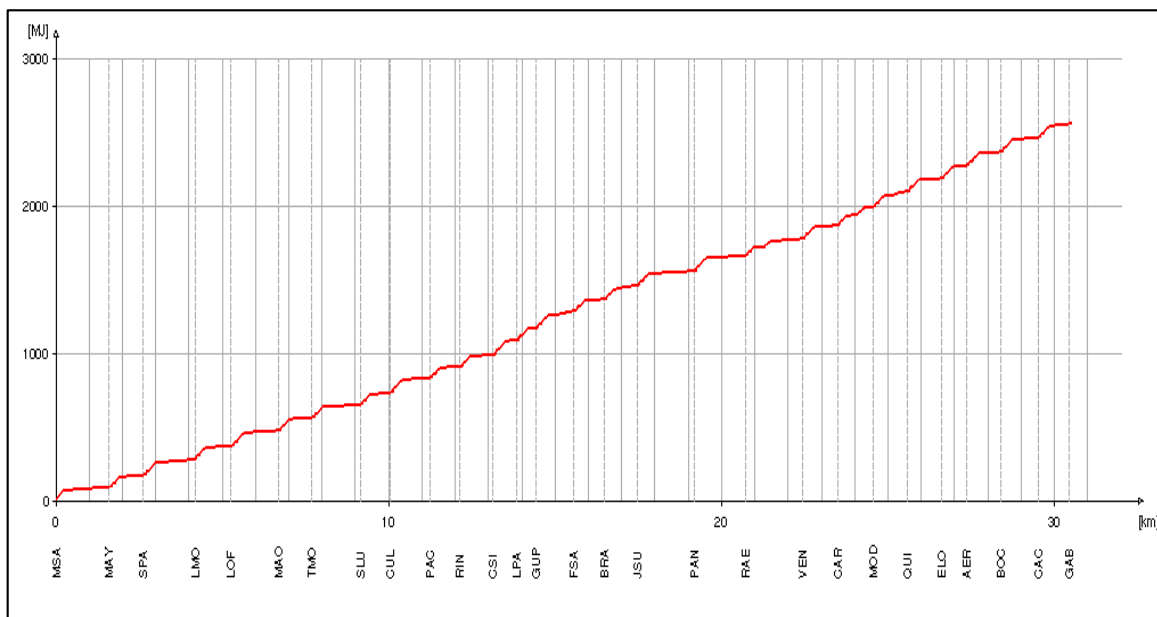
**Figura N° 70: Consumo de energía de tracción, dirección Gambetta - Mercado Santa Anita**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

**Figura N° 71: Consumo de energía, dirección Mercado Santa Anita - Gambetta**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

#### **4.5. Estimación de la flota de trenes para cada escenario de servicio ferroviario propuesto**

Luego de la estimación del tiempo de viaje de cada escenario de servicio ferroviario, el siguiente paso es el dimensionamiento de la flota, este se calcula para la hora punta máxima en cada escenario.

Como ya se proyectó los tiempos de viajes para ambas vías en cada escenario, el siguiente paso será estimar los tiempos de vuelta / cambio de cabina, en el caso de líneas Metro con GoA 4, se determinará los tiempos de vuelta automática en las estaciones terminales Gambetta y Mercado Santa Anita.

El tiempo de cambio de cabina o vuelta automática a través del andén de inversión de la Estación Gambetta es 68 segundos (ver la Tabla N° 27) a lo largo de 573 metros a una velocidad comercial de 30.33 km/h. En la Fig. N° 72 se muestra el perfil de movimiento del tren durante la vuelta automática.

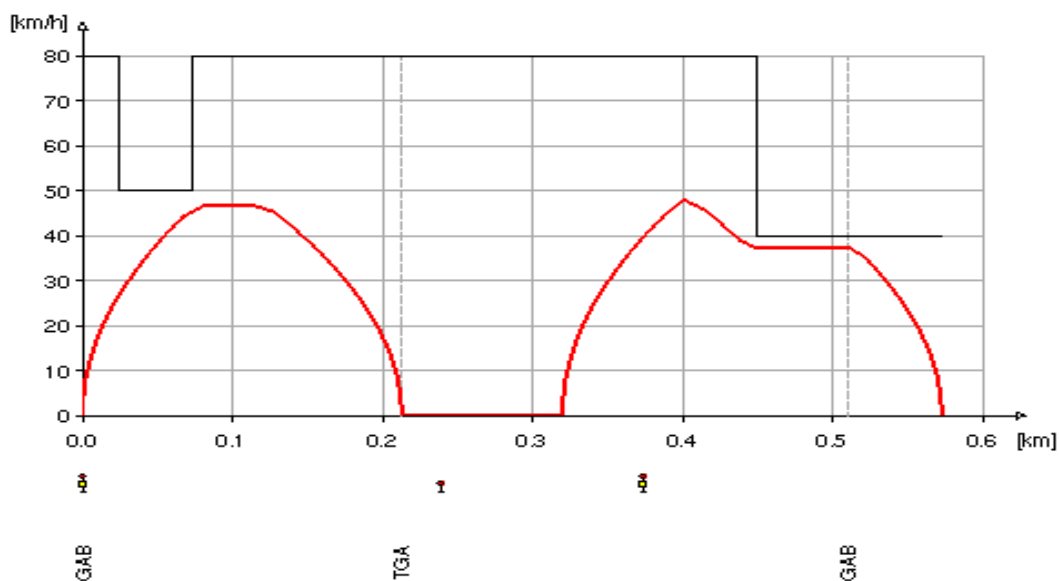
**Tabla N° 27: Tiempo de vuelta automática en el andén de inversión Estación Gambetta**

Desde	Hacia	Tiempo en segundos
GAMBETTA	Anden de Inversión GAB	30
Anden de Inversión GAB	Anden de Inversión GAB	2
Anden de Inversión GAB	GAMBETTA	36
<b>Total</b>		<b>68</b>

Elaboración: Propia

El tiempo de 2 segundos considerado en la tabla anterior es el tiempo de cambio de dirección del movimiento del tren (inversión de los motores y comandos en dirección contraria).

**Figura N° 72: Diagrama de marcha – vuelta automática en andén de inversión Gambetta**



Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

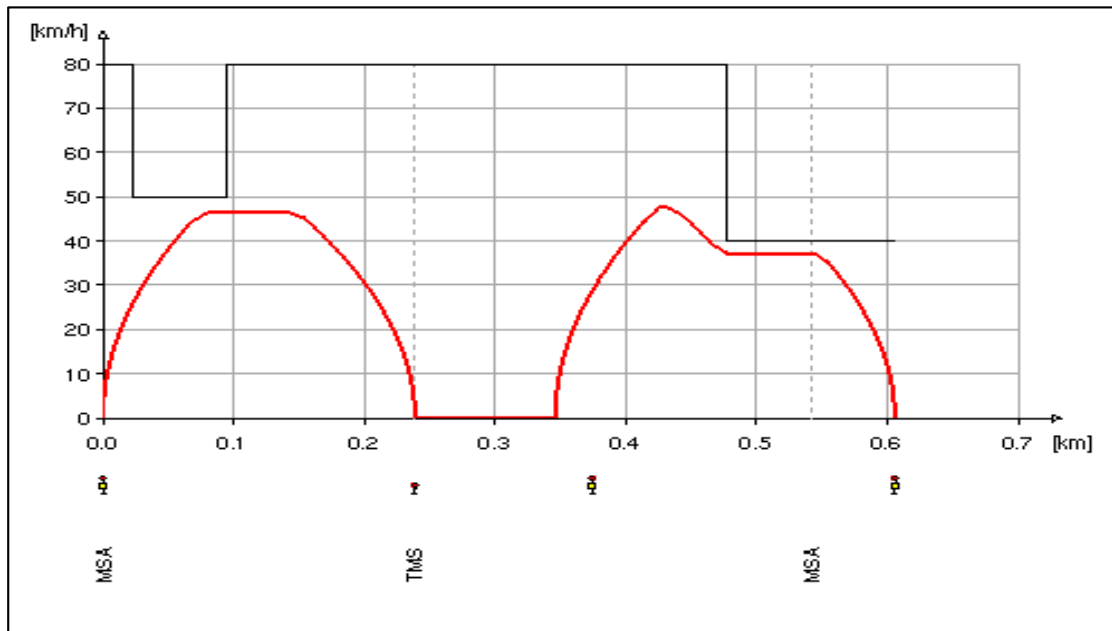
En el otro terminal, Estación Mercado de Santa Anita, el tiempo de vuelta automática estimado es 70 segundos (ver Tabla N° 28) a lo largo de 606 metros a una velocidad comercial de 31.17 km/h. Asimismo, en la Fig. N° 73 se muestra el perfil de movimiento del tren durante la vuelta automática.

**Tabla N° 28: Tiempo de vuelta automática en el andén de inversión Estación Mercado Santa Anita**

Desde	Hacia	Tiempo en segundos
MERCADO SANTA ANITA	Anden de Inversión MSA	32
Anden de Inversión MSA	Anden de Inversión MSA	2
Anden de Inversión MSA	MERCADO SANTA ANITA	36
<b>Total</b>		<b>70</b>

Elaboración: Propia

**Figura N° 73: Diagrama de marcha – vuelta automática en andén de inversión Mercado Santa Anita**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

Por lo tanto, el tiempo de vuelta automática en ambas estaciones terminales se estima en 138 segundos o 2.3 minutos.

La esquemática de operación en las estaciones terminales se presentará más adelante.

El tiempo de ciclo es la sumatoria de los tiempos de viajes en la vía 1, vía 2 y los tiempos de vuelta automática en las estaciones terminales. El número de trenes necesarios para atender la demanda en hora punta se determina dividiendo el tiempo ciclo entre intervalo de paso en hora punta.



Al número de trenes necesarios para prestar el servicio en una hora punta se le añade un 10% los cuales representan trenes de reserva y mantenimiento para determinar la flota total para cada escenario previsto. En ese sentido, la Línea 4 del Metro de Lima y Callao requiere una flota de 55 trenes para satisfacer la demanda prevista para el año 2055, tal como se ilustra en la siguiente tabla donde se ha estimado la flota de trenes para cada escenario de servicio ferroviario.

**Tabla N° 29: Dimensionamiento de la flota de trenes para cada escenario de servicio ferroviario**

Etapas	Vía	Desde	Hacia	Tiempo total de viaje (Vía 1 y vía 2) (minutos) (1)	Tiempo total de vuelta automática (minutos) (2)	ciclo (minutos)* (3) = (1) + (2)	Intervalo Hora Punta (4)	Número de trenes en operación en hora punta (5) = (3) / (4)	Trenes de reserva y mantenimiento (10%) (6) = (5) * 10%	Flota Total (7) = (5) + (6)
Funcionamiento parcial	Vía 1	Gambeta	Carmen de la Legua	22.2	2.3	25.2	8	4	1	5
	Vía 2	Carmen de la Legua	Gambeta							
	Vía 1	José de Sucre	La Molina	44.0	2.3	46.9	4	12	2	14
	Vía 2	La Molina	José de Sucre							
	Vía 1	Gambeta	Conde de San Isidro	55.7	2.3	58.7	5	12	2	14
	Vía 2	Conde de San Isidro	Gambeta							
	Vía 1	Gambeta	La Molina	84.8	2.3	87.8	2.5	36	4	40
	Vía 2	La Molina	Gambeta							
Funcionamiento total	Vía 1	Gambeta	Mercado Santa Anita	96.6	2.3	99.6	2	50	5	55
	Vía 2	Mercado Santa Anita	Gambeta							

\* Incluye 40 segundos para ascenso de usuarios en la estación terminal

Elaboración: Propia

Considerando que la Línea 4 del Metro de Lima y Callao tendrá 2 Patios Talleres, una ubicada por la Estación Bocanegra con una capacidad de 9 trenes (Contrato de Concesión de la Línea 2 del Metro de Lima y el Ramal de la Línea 4, 2014) y el otro Patio Taller propuesto se ubica entre estaciones La Molina y Santa Patricia, este último tendría la capacidad de 46 trenes. Sin embargo, según las especificaciones técnicas del Patio Taller de Bocanegra se indica que existe la posibilidad de incrementar la capacidad.

Suponiendo que se pueda duplicar la capacidad, es decir, 18 trenes la cual conllevaría a dimensionar la capacidad del otro Patio Taller en 37 trenes, otra alternativa es dimensionar

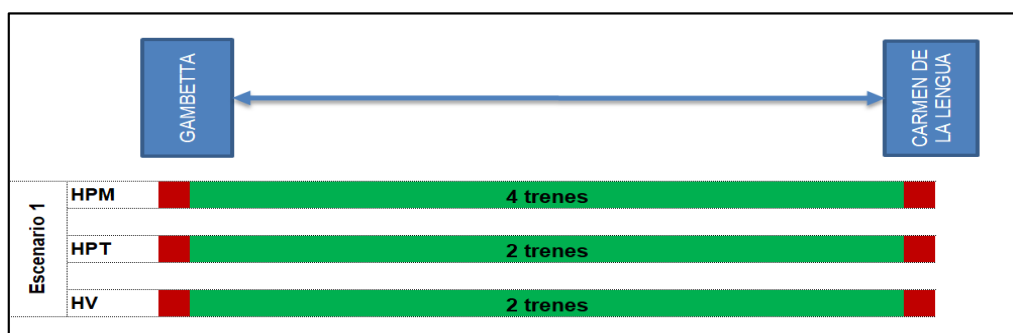
ambos patios con la misma capacidad, es decir, 26 trenes con la finalidad iniciar la operación por ambos extremos sin necesidad de enviar trenes vacíos antes del inicio de la operación comercial, en las siguientes páginas se procede con el análisis de cada modelo de operación ferroviaria.

#### 4.6. Análisis del servicio ferroviario de cada escenario de escenario propuesto

##### 4.6.1. Escenario 1: Operación Estación Gambetta – Estación Carmen de la Lengua

La demanda diaria estimada para el tramo Estación Gambetta – Estación Carmen de la Lengua es de 112,974 viajes. Para cubrir dicha demanda es necesaria la programación de trenes a intervalos de paso de 8 minutos en hora punta mañana, 15 minutos en hora punta tarde y 20 minutos en hora valle en función a la banda horaria para días laborables propuesta en el Tabla N° 24, esta programación da como resultado 134 carreras al día o una capacidad ofertada de 160,000 viajes, este valor cubre la demanda proyectada. En la siguiente figura se ilustra la cantidad de trenes en operación en una hora para cada banda horaria en días hábiles.

**Figura N° 74: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación Gambetta hasta Estación Carmen de la Lengua - Escenario 1**

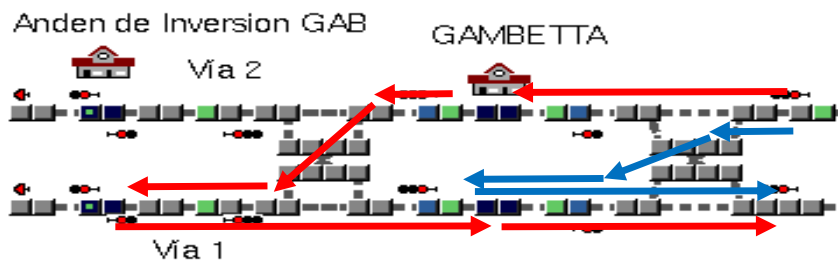


Elaboración: Propia

Las esquemas de operación en las estaciones terminales se muestran en las Figuras N° 75 y 77 donde las cambiavías tipo bretell dan una gran flexibilidad para realizar la inversión del tren tanto en operación en desviada con un solo andén (color azul) o en dos andenes con inversión en el andén de inversión (color rojo), el

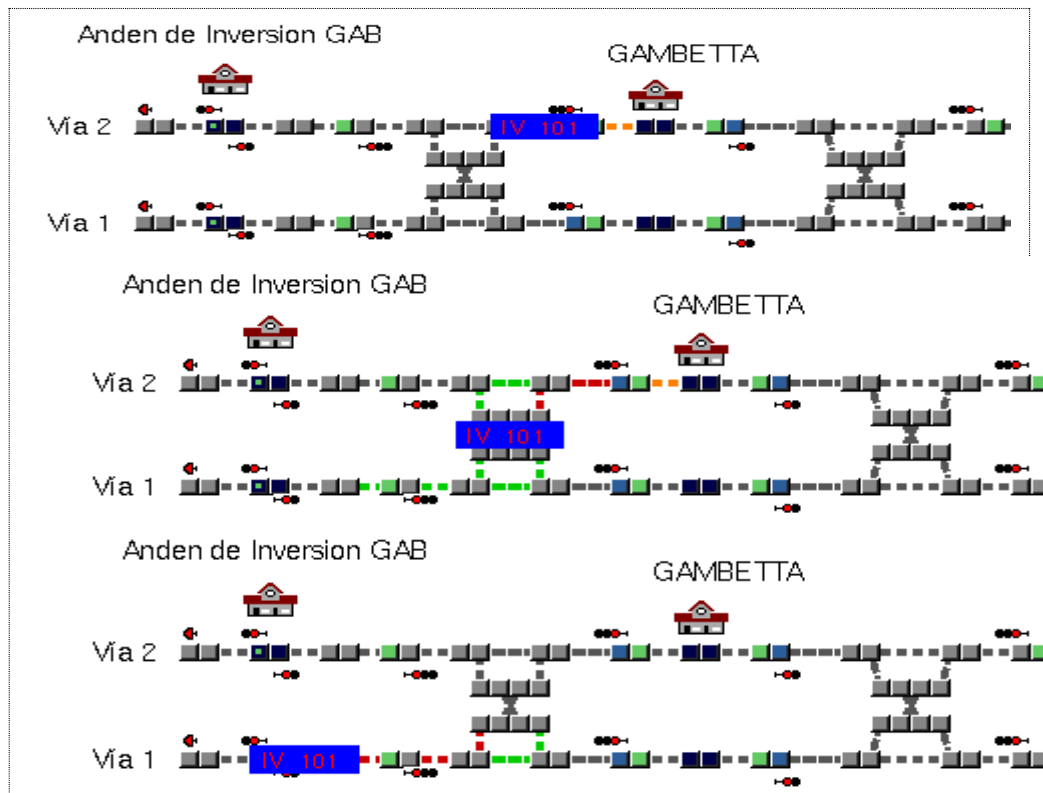
tiempo estimado de vuelta automática en la Estación Gambetta a través de andén de inversión se estimó en 68 segundos, por lo tanto, no habría ningún conflicto entre trenes para realizar la inversión en las estaciones terminales ya que el intervalo en hora punta es amplio (8 minutos). La secuencia de inversiones automáticas en la Estación Gambetta se ilustra en la Fig. 76 y en la Estación Carmen de la Lengua en la Fig. N° 78.

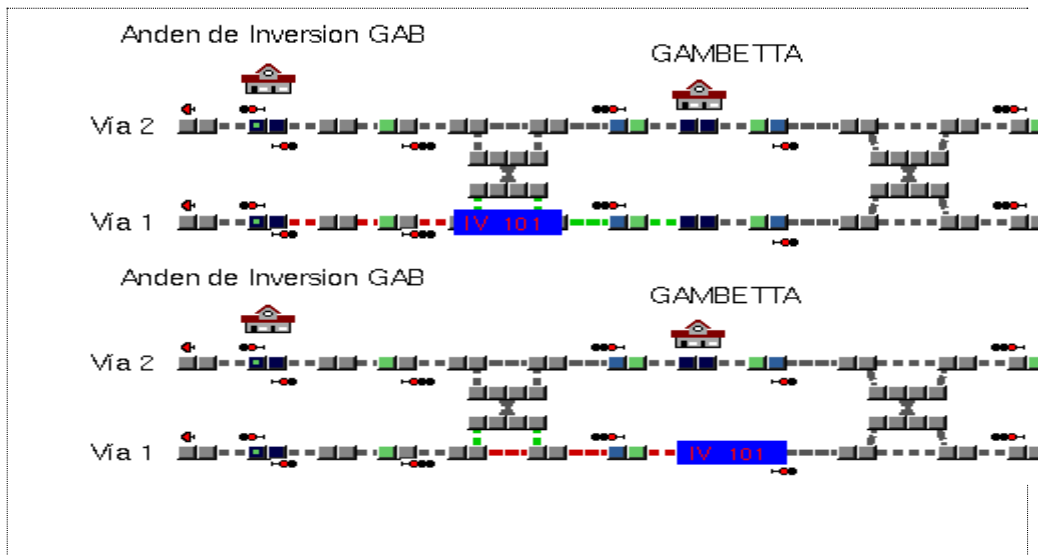
**Figura N° 75: Esquema de operación en la Estación Gambetta**



Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

**Figura N° 76: Secuencia de inversión automática en el andén de inversión en la Estación Gambetta**





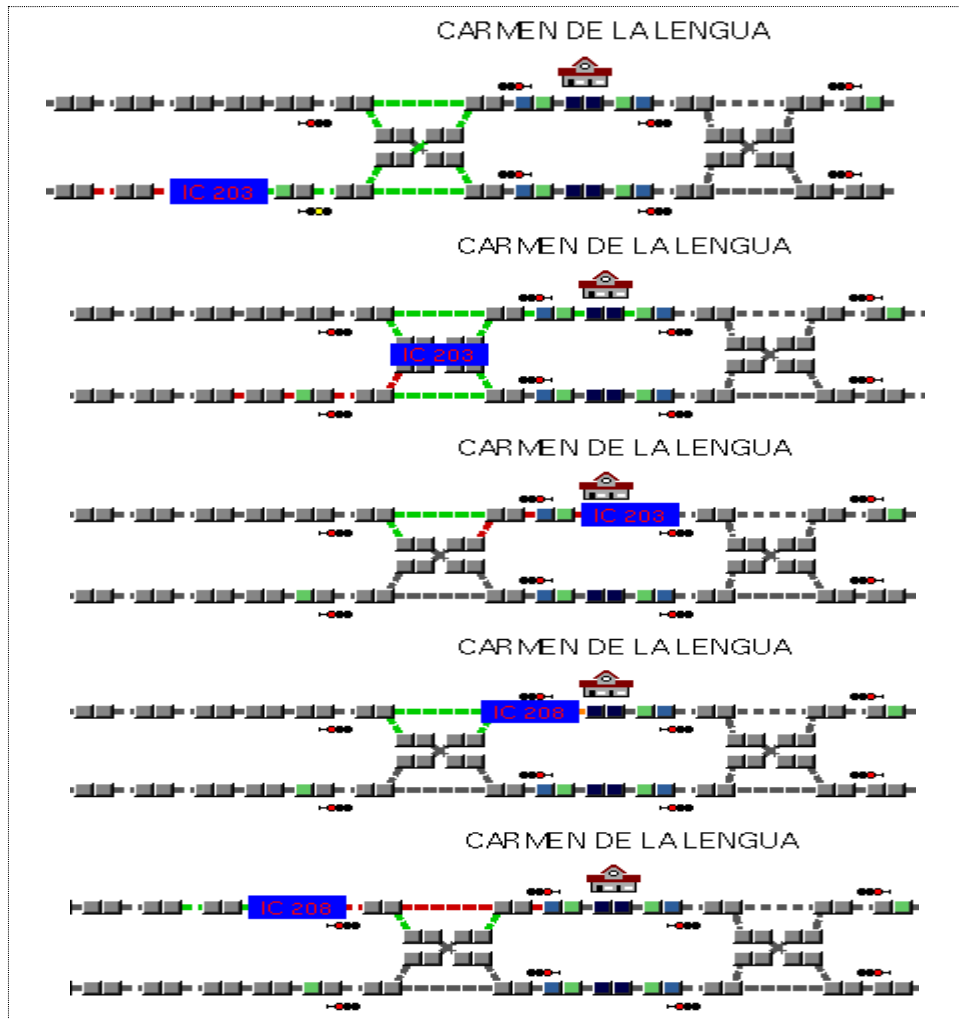
Fuente: Opentrack  
 Elaboración: Propia

Figura N° 77: Esquema de operación en la Estación Carmen de la Lengua



Fuente: Opentrack  
 Elaboración: Propia

**Figura N° 78: Secuencia de inversión automática en el andén de frontal en la Estación Carmen de la Lengua**



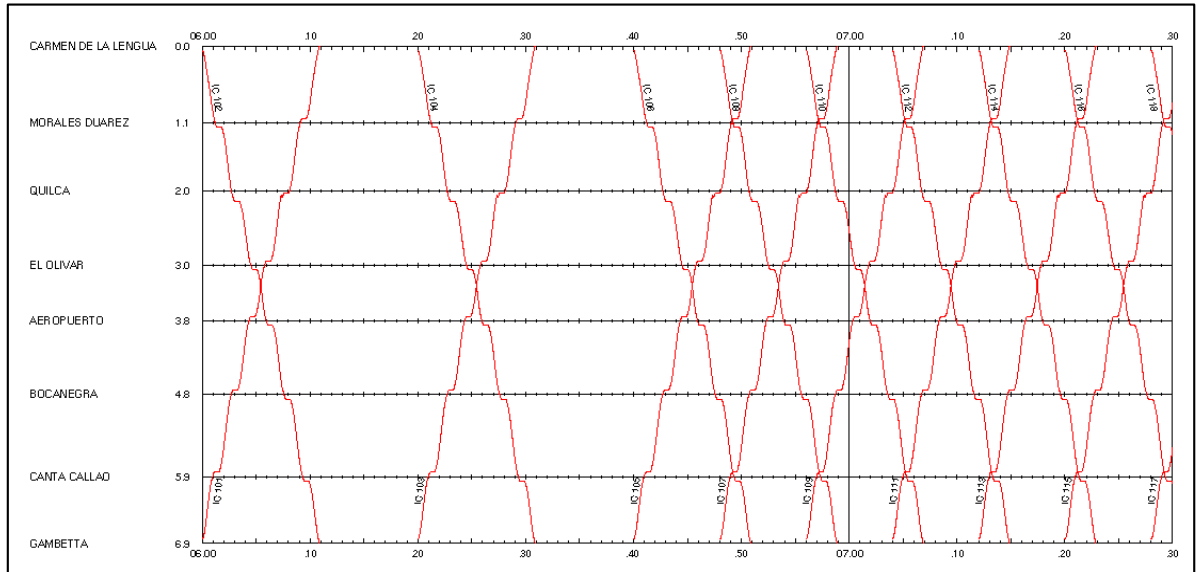
Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

En el Fig. N° 79, se muestra el diagrama de tráfico en el horario de 6:00 a.m. hasta 7:30 a.m. en día laborable.

Considerando que la capacidad de Patio Taller de Bocanegra es de 9 trenes, para el inicio de operación lo ideal es dejar 2 trenes en las estaciones terminales para iniciar la operación sin necesidad de inyectar trenes vacíos con la finalidad de cumplir con el servicio ferroviario a las 6:00 a.m. desde estaciones terminales.

En el caso que no se realiza procedimiento anterior el primer tren debe salir a las 5:52 a.m. desde Patio Bocanegra hacia la Estación Carmen de la Lengua y 5:56 a.m. en dirección hacia la Estación Gambetta. Además, para cubrir el inicio de la hora punta se inyecta 2 trenes a las 6:39 a.m. y 6:43 a.m. respectivamente.

**Figura N° 79: Diagrama de tráfico desde 6:00 a.m. hasta 9:00 a.m. – Estación Carmen de la Lengua a Estación Gambetta**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

#### **4.6.2. Escenario 2: Operación Estación José de Sucre – Estación La Molina**

La demanda diaria proyectada para el tramo Estación José de Sucre – Estación La Molina es de 433,847 viajes. Para atender dicha demanda es necesaria la programación de trenes a 4 minutos de intervalo de paso en hora punta mañana y tarde, 10 minutos en hora valle en días laborables, siendo como resultado 304 carreras al día que da como capacidad ofertada de 437,760 viajes, este valor ya incluye el factor de renovación de pasajero, es este caso se utiliza el factor una línea en operación, Línea 1, (OSITRAN, 2016), donde el factor de renovación de pasajero tiene un valor de 1.2, dicho valor se utilizara para estimar la capacidad ofertada de aquí en adelante. Se aprecia que la capacidad ofertada cubre la demanda estimada. La Fig. 80 ilustra la cantidad de trenes en operación para cada banda horaria en días laborables.

**Figura N° 80: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación José de Sucre a La Molina - Escenario 1**

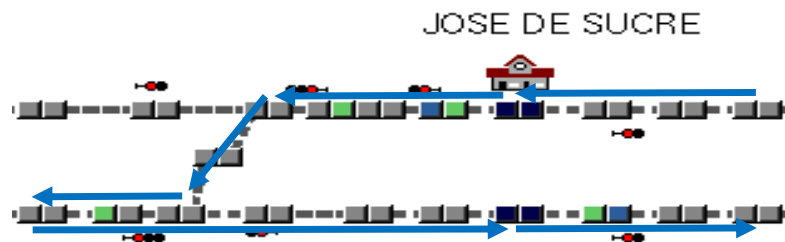


Elaboración: Propia

Respecto al tiempo de cambio de cabina en las estaciones terminales se muestran en las figuras N° 81 y 82, donde en la Estación José de Sucre solamente se tiene previsto una cambiavía posterior.

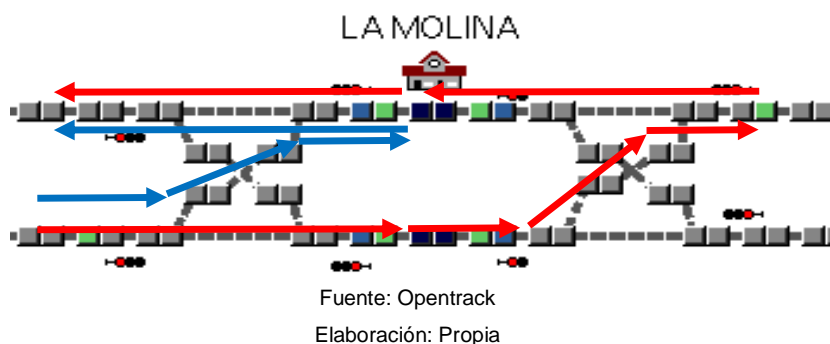
El tiempo estimado de cambio de cabina en la Estación José de Sucre es de 3 minutos y 2 segundos, mientras que, en la otra estación terminal, La Molina, el tiempo de vuelta automática es menor a 70 segundos aproximadamente (inversión en la cambiavía posterior). Por lo tanto, no habría conflictos entre trenes en las estaciones terminales para cubrir el intervalo de paso de 4 minutos en hora punta.

**Figura N° 81: Esquema de operación en la estación José de Sucre**



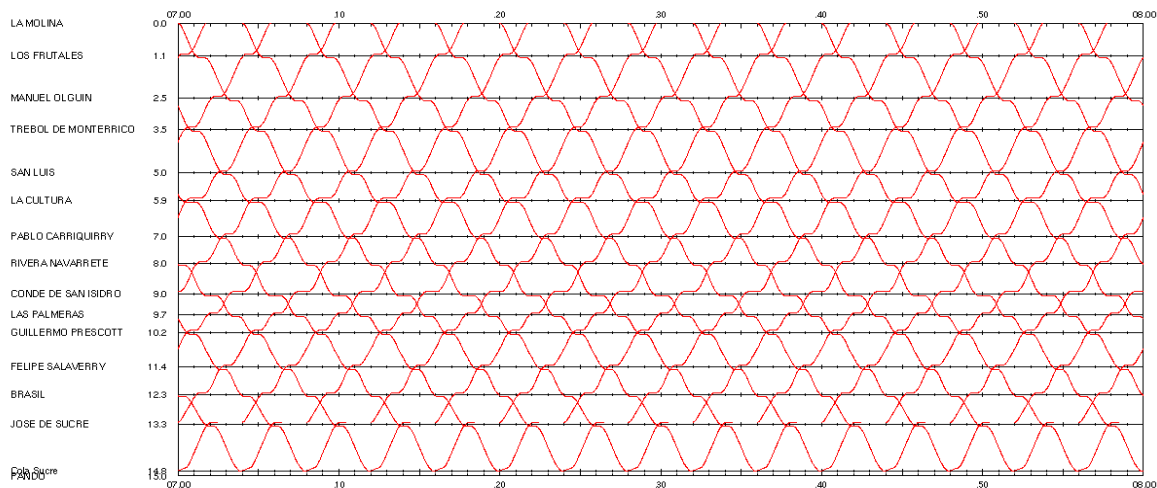
Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

**Figura N° 82: Esquema de Operación en la estación La Molina**



En la Fig. N° 83 se muestra el diagrama de tráfico para el escenario 1 en el horario de 7:00 a.m. hasta 8:00 a.m. en hora punta en días laborables.

**Figura N° 83: Diagrama de tráfico desde 7:00 a.m. hasta 8:00 a.m. - Estación José de Sucre a La Molina**

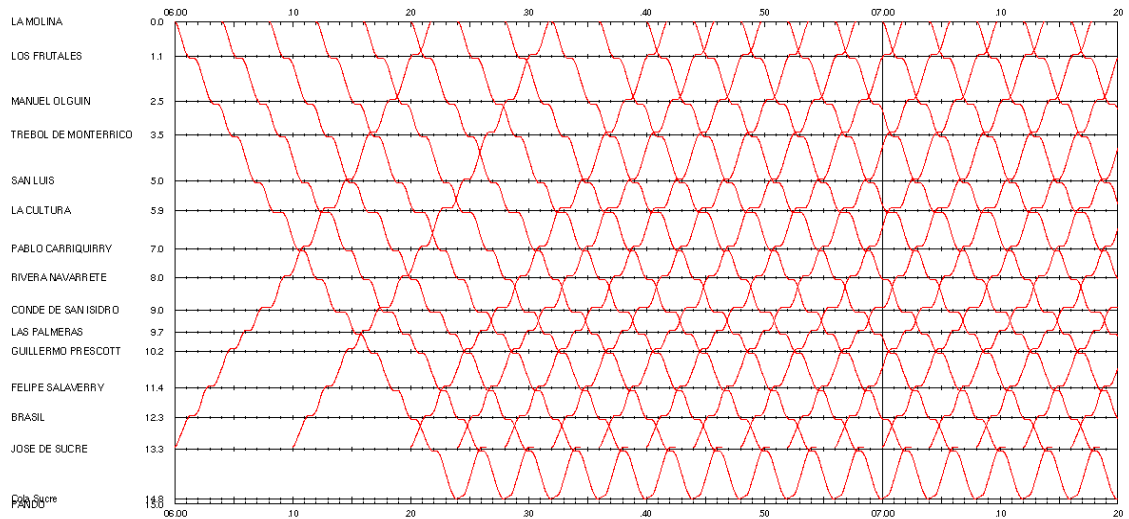


Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

Para el inicio de operación es necesario dejar 3 trenes en la Estación José de Sucre (2 en las vías de la estación y 1 en el andén de inversión) con la finalidad de cubrir el inicio del servicio ferroviario a las 6:00 a.m. Asimismo, cabe precisar que es esencial iniciar el servicio desde Estación La Molina a partir de 6:00 a.m. a intervalos de 4 minutos con esta propuesta se cubre la demanda en hora punta desde ambas estaciones terminales, lo indicado se ilustra en la Fig. N° 84.



**Figura N° 84: Diagrama de tráfico - Inicio de operación desde Patio Taller La Molina**



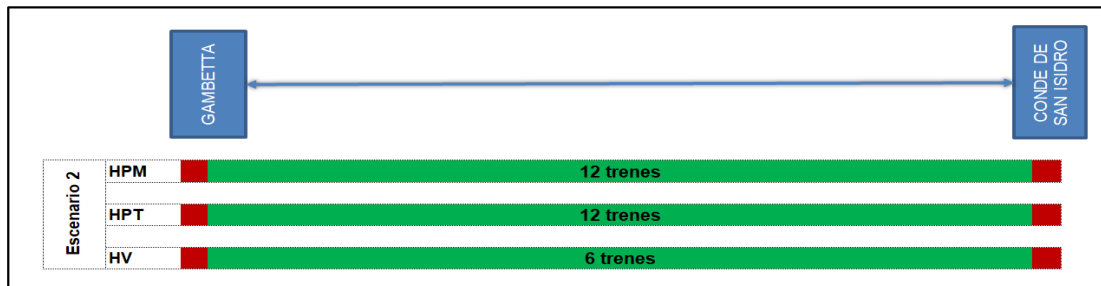
Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

#### 4.6.3. Escenario 3: Operación Estación Gambetta – Estación Conde de San Isidro

La demanda diaria proyectada para el tramo Estación Gambetta – Estación Conde de San Isidro es de 387,996 viajes. Dicha demanda puede ser atendida con la programación de trenes a intervalos de paso 5 minutos en hora punta mañana y tarde, 10 minutos en hora valle en días laborables. Esta programación da como resultado 268 carreras al día que ofrecen una capacidad de 385,920 viajes la cual cubre la demanda estimada, en la Fig. N° 85 se muestra la cantidad de trenes en operación para cada banda horaria.

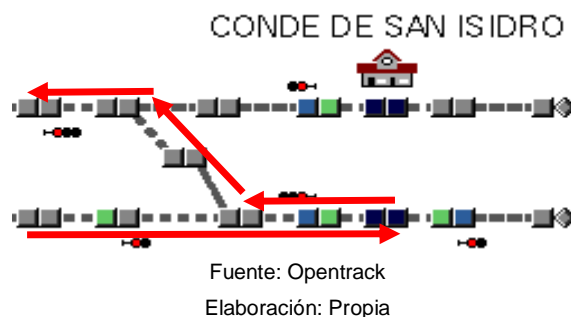
**Figura N° 85: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación Gambetta a Conde de San Isidro - Escenario 2**



Elaboración: Propia

El tiempo de vuelta automática estimada en la Estación Gambetta se indicó que es 68 segundos. En la otra estación terminal, Conde de San Isidro (ver Fig. N° 86), el tiempo de vuelta automática debería ser igual a 2 segundos, es decir, solo se considera el tiempo de cambio de dirección del movimiento del tren (inversión de los motores y comandos en dirección contraria), se adiciona a ello los tiempos de ascensos y descensos, siendo que el intervalo en hora punta de 5 minutos no habría ningún conflicto entre las carreras a ejecutarse en ambas estaciones terminales.

**Figura N° 86: Esquema de operación en la estación Conde de San Isidro**

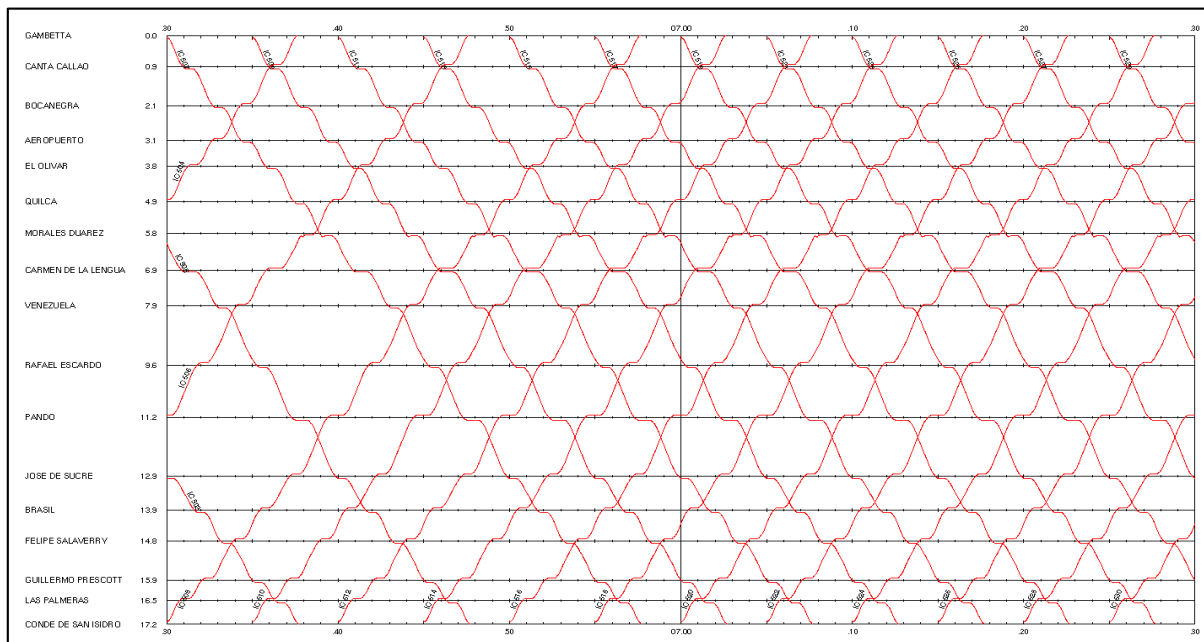


En el Fig. N° 87 se muestra el diagrama de tráfico en una hora (6:30 a.m. – 7:30 a.m.) en días laborables.

Como se ha indicado la capacidad de Patio Taller de Bocanegra es de 9 trenes, para este escenario de servicio dicho Patio Taller tiene que ampliarse hasta una capacidad de 14 trenes.

Para el inicio del servicio el tren debe salir del Patio Taller de Bocanegra a las 5:38 a.m. con dirección hacia la Estación Conde de San Isidro y 5:56 a.m. en dirección hacia la Estación Gambetta o dejar 3 trenes en la Estación Gambetta (2 en cada vía de la estación y 1 en el andén de inversión), en la Fig. N° 88 se muestra los movimientos de los trenes desde el inicio de operación hasta el inicio de hora punta, las líneas color limón del gráfico son los trenes insertados para cumplir con la oferta en función a las bandas horarias.

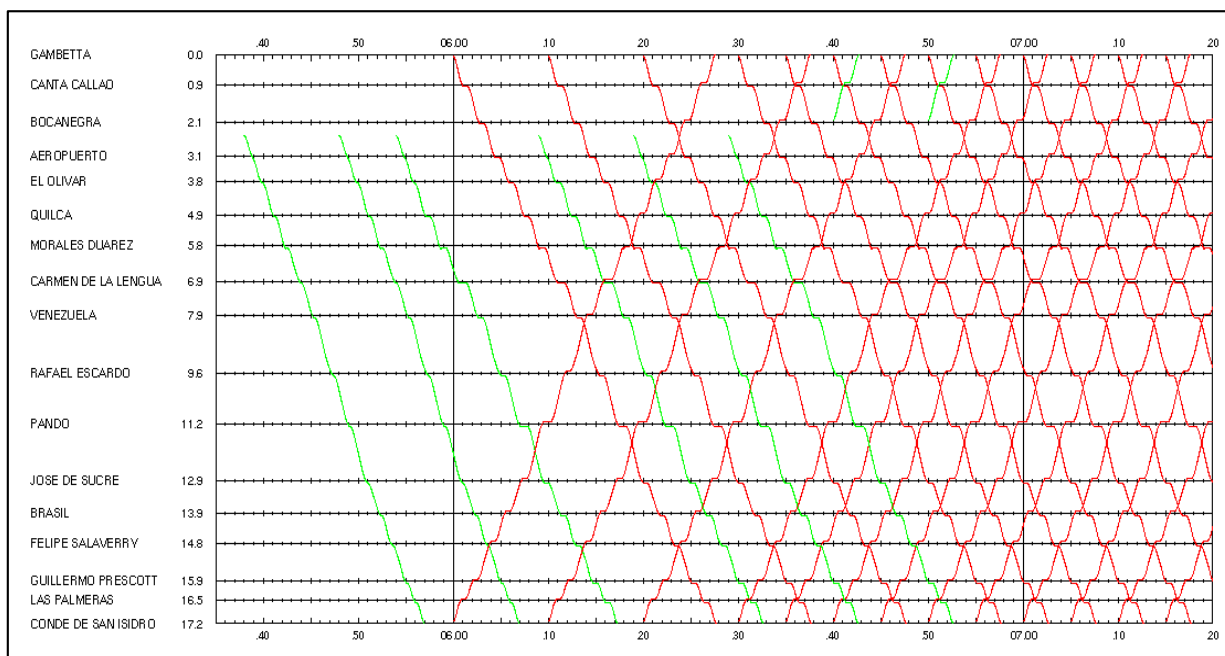
**Figura N° 87: Diagrama de tráfico desde 6:30 a.m. hasta 7:30 a.m. - Estación Gambetta hasta Conde de San Isidro**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

**Figura N° 88: Diagrama de tráfico del escenario 2- Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra**



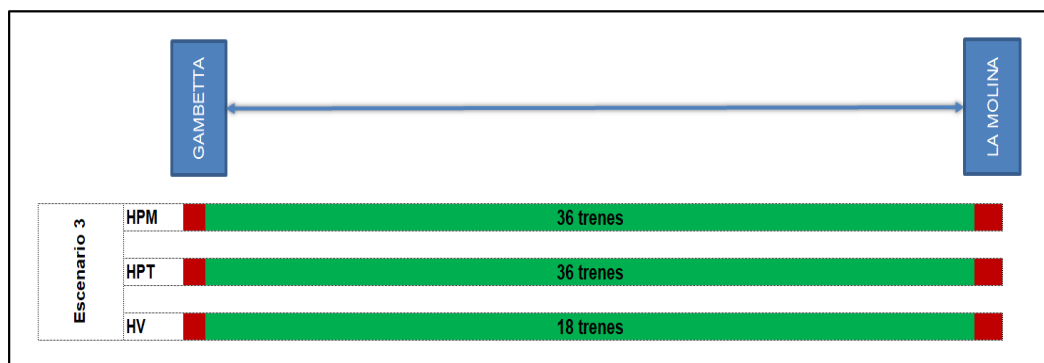
Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

#### 4.6.4. Escenario 4: Operación Estación Gambetta – Estación La Molina

La demanda diaria estimada para el tramo Estación Gambetta – Estación La Molina es 814,974 viajes. Para atender dicha demanda se requiere la programación de trenes a intervalos de 2.5 minutos en hora punta mañana y tarde, 5 minutos en hora valle en días laborable, este esquema tiene como resultado 532 carreras las cuales ofrecen una capacidad 766,080 viajes, dicha cantidad ofertada se aproxima a la demanda estimada, en la siguiente Fig. N° 89 se ilustra la cantidad de trenes en operación para cada banda horaria del escenario 3.

**Figura N° 89: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación Gambetta a La Molina - Escenario 3**

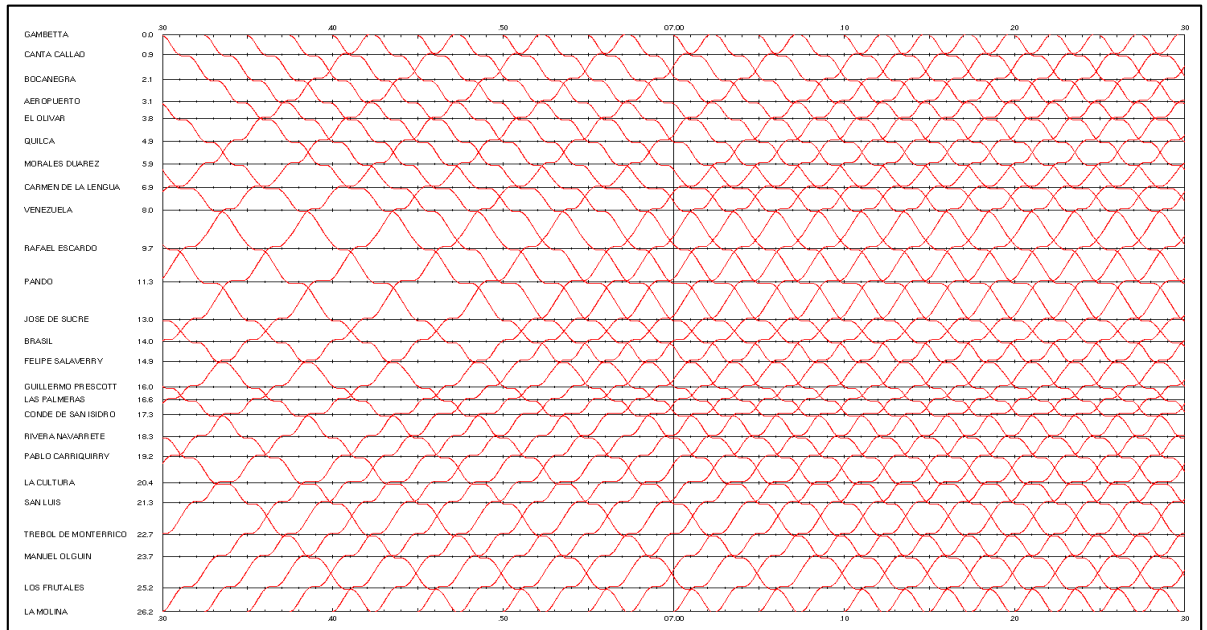


Elaboración: Propia

Los tiempos de vueltas automáticas en las estaciones terminales Gambetta y La Molina ya fueron analizados en los escenarios anteriores, siendo que el intervalo de paso mínimo en este tramo es 2.5 minutos, no se generara ningún problema de conflictos entre las carreras programadas.

En el Fig. N° 90 se muestra el diagrama de tráfico en una hora punta (6:30 a.m. – 7:30 a.m.) en días hábiles.

**Figura N° 90: Diagrama de tráfico desde 6:30 a.m. hasta 7:30 a.m. - Estación Gambetta hasta la Estación La Molina**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

Considerando que la capacidad de Patio Taller de Bocanegra es de 9 trenes, se plantean 2 escenarios de inicio de servicio:

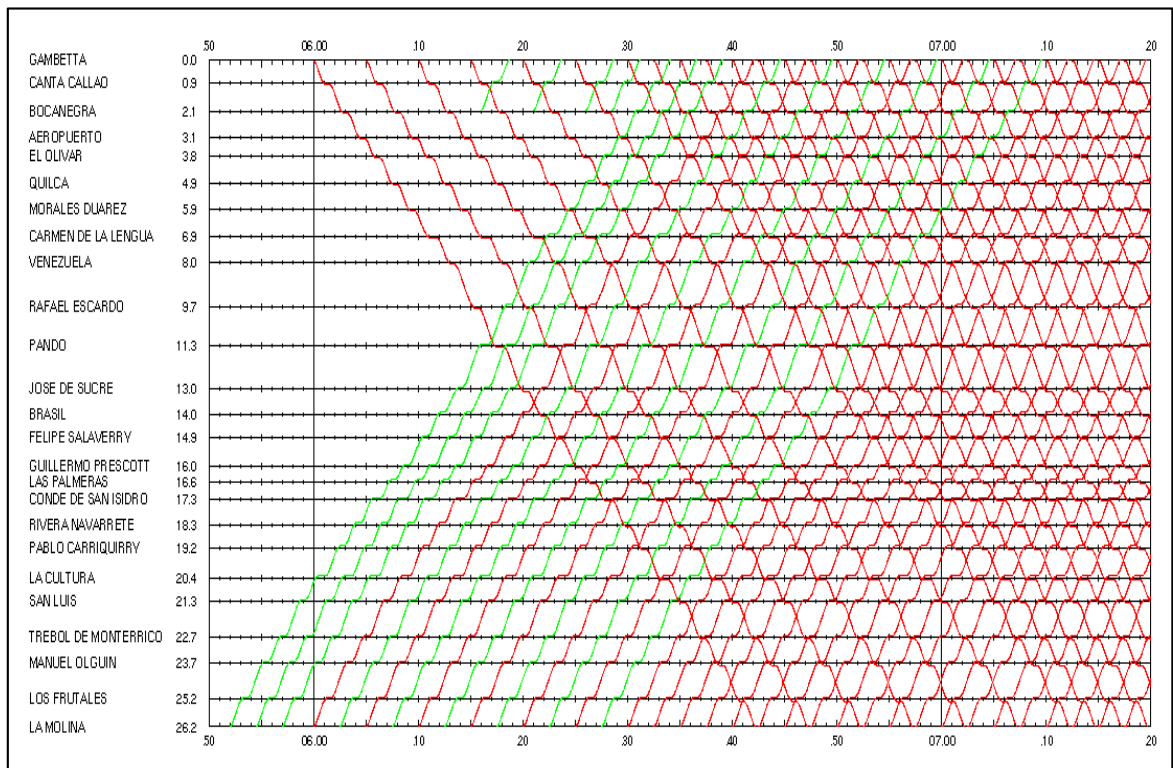
1. Sin ampliación de la capacidad del Patio Taller de Bocanegra

Para el inicio de operación sin necesidad de enviar trenes vacíos se debe dejar 4 trenes en la Estación Gambetta (2 en las vías de la estación y 2 en el andén de inversión). Desde la otra estación terminal, La Molina, el inicio de operación debe iniciar a las 5:52 a.m. a intervalos de 2.5 con la finalidad de cubrir la demanda en horas punta mañana desde estación Gambetta, la Fig. N° 91 ilustra el inicio de operación de ambas estaciones terminales, donde las líneas de color limón son las carreras insertadas para cumplir con la demanda en hora punta en ambos sentidos.

2. Con ampliación de la capacidad del Patio Taller de Bocanegra hasta 18 trenes

Si se amplía la capacidad del patio de Bocanegra la inserción de trenes solo se realiza desde Estación Bocanegra hacia Estación Gambetta, tal como se aprecia en la Fig. N° 92.

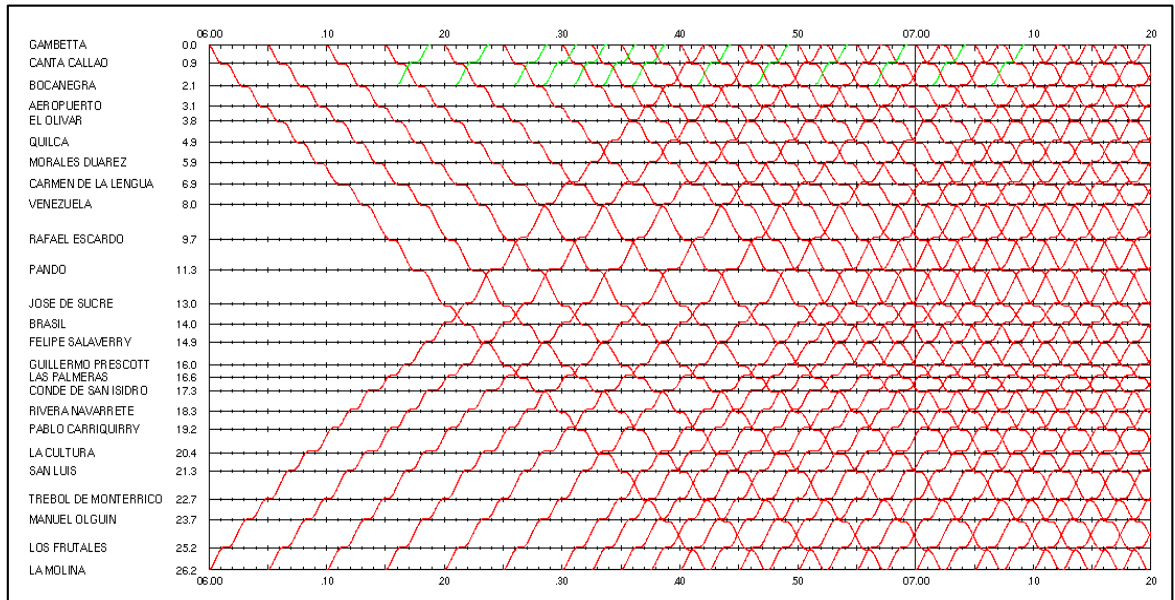
**Figura N° 91: Diagrama de tráfico del escenario 3 - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (sin ampliación de capacidad) y La Molina**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

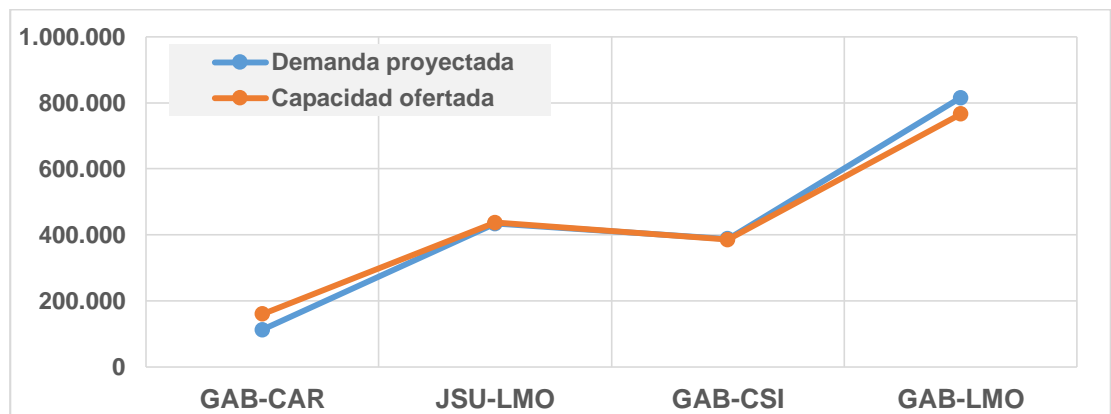
**Figura N° 92: Diagrama de tráfico del escenario 3 - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (con ampliación de capacidad) y La Molina**



Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

Finalmente, en la Fig. N° 93 se muestra que la capacidad ofertada diaria versus la demanda estimada diaria para cada escenario del funcionamiento parcial de la Línea 4, donde se aprecia que la capacidad ofertada diaria cubre la demanda diaria proyectada.

**Figura N° 93: Comparativo de la demanda diaria estimada versus capacidad ofertada en Hora punta mañana - Funcionamiento parcial de la Línea 4**



Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4  
Elaboración: Propia

#### 4.6.5. Escenario Operación Estación Gambetta – Estación Mercado Santa Anita

Para el escenario de funcionamiento total de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao, la capacidad ofertada con los intervalos de paso propuestos en el punto 3.5.5 del presente trabajo no cubren la demanda proyectada diaria tal como se ilustra en la Tabla N° 30 y la Fig. N° 94, por lo que se calcula la capacidad ofertada ajustada la cual implica en fijar los intervalos de paso desde el año 2025 hasta 2055 en hora punta en 2 minutos y en hora valle 4 minutos, con dicha propuesta la capacidad ofertada se aproxima a la demanda proyectada. Cabe precisar que los trenes son de 1200 (6 coches) de capacidad hasta el año 2034, a partir del siguiente año se adicional el séptimo con la finalidad de tener la capacidad de cada tren en 1400 (7 coches) pasajeros.

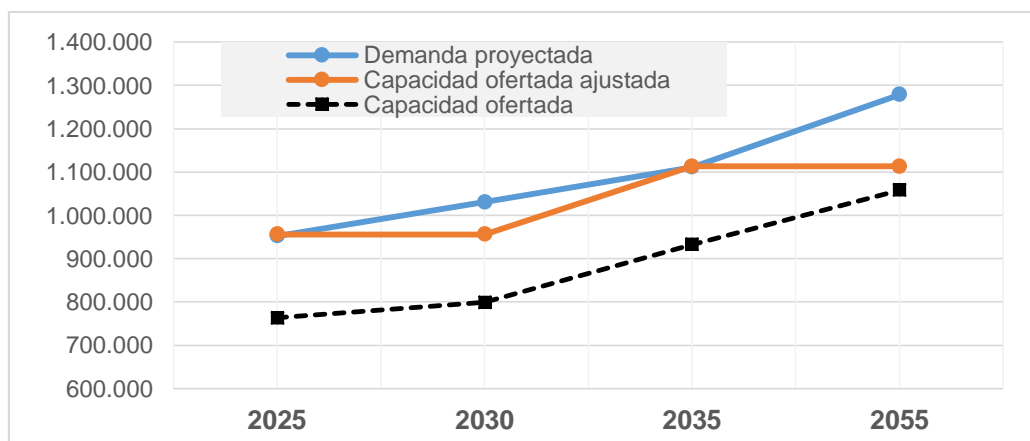
**Tabla N° 30: Comparación de la demanda diaria proyectada versus la capacidad ofertada diaria**

Año	Demanda proyectada	Capacidad ofertada	Capacidad ofertada ajustada
2025	952,440	763,200	956,160
2030	1,030,774	799,200	956,160
2035	1,111,269	932,400	1,113,120
2055	1,278,490	1,058,400	1,113,120

Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia

**Figura N° 94: Comparación de la demanda diaria proyectada versus la capacidad ofertada**



Fuente: Estudio de Demanda - Línea 4

Elaboración: Propia



En la Fig. N° 95, se muestra la cantidad de trenes en operación para una hora de servicio en cada banda horaria para el periodo 2025 hasta 2055.

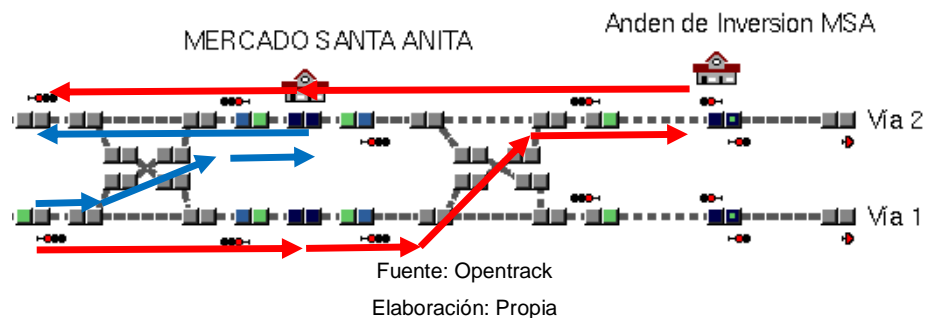
**Figura N° 95: Estimación de número de trenes en operación según banda horaria – Estación Gambetta hasta Estación Mercado Santa Anita**



Elaboración: Propia

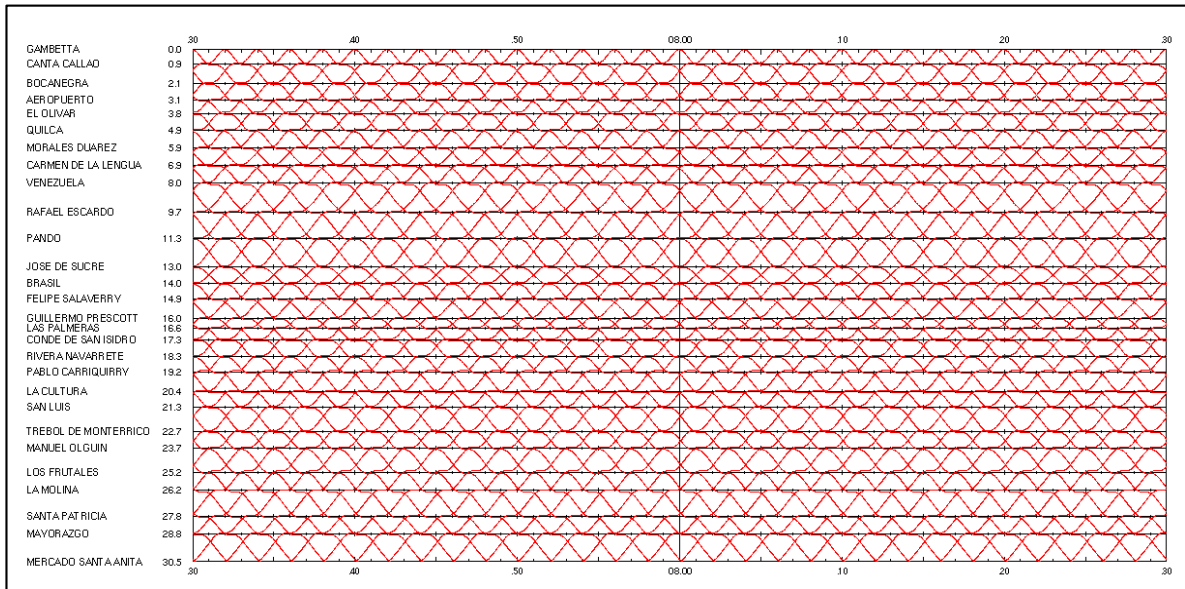
Los tiempos de vueltas automáticas en ambas estaciones terminales son respectivamente 68 y 70 segundos, por lo que no habría ningún problema de conflicto al momento de realizar la inversión tanto por el andén frontal o andén posterior ya que el intervalo mínimo en hora punta es 2 minutos. En la Fig. N° 96 se muestra el esquema de operación o vuelta automática en la estación terminal Mercado Santa Anita.

**Figura N° 96: Esquema de operación en la Estación Mercado de Santa Anita**



En el Fig. N° 97 se ilustra el diagrama de tráfico en una hora punta (7:30 a.m. – 8:30 a.m.) en días laborables.

**Figura N° 97: Diagrama de tráfico desde 7:30 a.m. hasta 8:30 a.m. - Estación Gambetta a Mercado Santa Anita**



Fuente: Opentrack

Elaboración: Propia

Respecto al inicio de operación comercial, teniendo en cuenta que la capacidad del Patio Taller de Bocanegra es 9 trenes, se va considerar tres escenarios:

1. Sin ampliación del Patio Taller Bocanegra

Para el inicio de operación comercial se debe dejar 4 trenes en ambas estaciones terminales (2 en cada vía de la estación y 2 en el andén de inversión). En adición a lo indicado, los trenes deben iniciar el servicio desde Patio La Molina a las 5:52 a.m. en dirección hacia la Estación Gambetta con la finalidad de cubrir la demanda en hora punta desde esta estación. En el otro sentido de circulación de los trenes se deben inyectar trenes desde Patio Taller La Molina hacia estación Mercado San Anita desde 6:10 a.m., tal como se muestra en la Fig. N° 98, donde las líneas de color limón son los trenes insertados para cubrir el servicio a 2 minutos en hora punta y 4 minutos en hora valle en ambos sentidos.

2. Ampliación del Patio Taller Bocanegra hasta una capacidad de 18 trenes

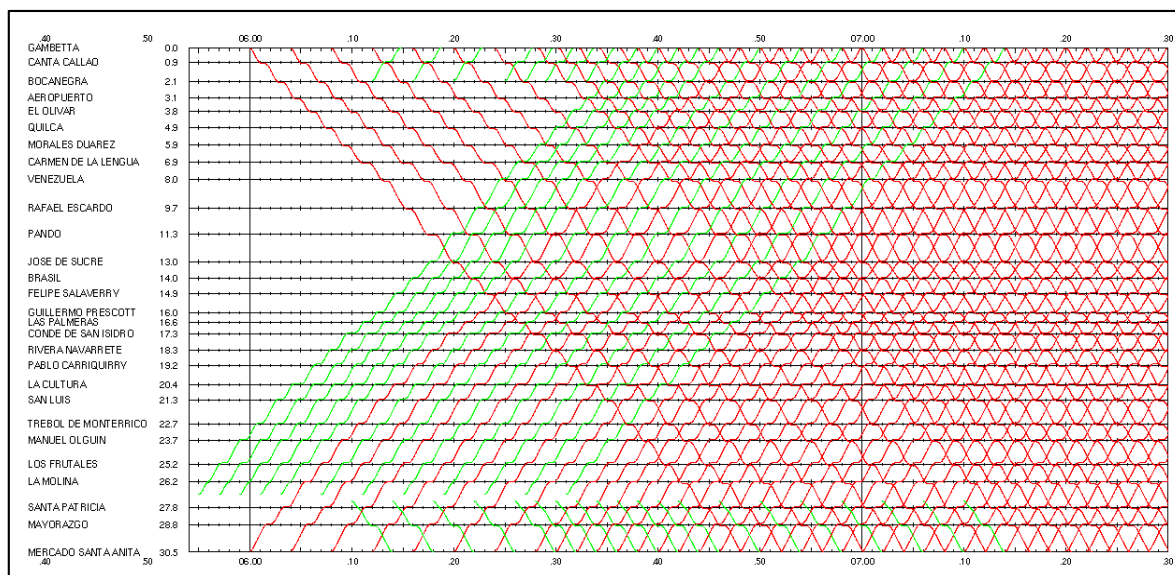
Para este escenario el inicio de operación comercial se debe dejar 4 trenes en ambas estaciones terminales (2 en cada vía de la estación y 2 en el andén de

inversión). La inyección de trenes se realiza desde Patio Taller Bocanegra hacia Estación Gambetta desde 6:12 a.m. Asimismo, desde Patio taller La Molina se debe inyectar trenes desde 6:10 a.m. en dirección hacia Estación Mercado Santa Anita, además es necesario la inyección de 3 trenes a intervalos de 4 minutos desde Estación La Molina hacia Estación Gambetta desde 6:23 a.m. para cubrir la demanda en hora punta desde Estación Gambetta, tal como se ilustra en la Fig. N° 99.

### 3. Ampliación del Patio Taller Bocanegra hasta una capacidad de 26 trenes

Finalmente, en caso de ampliar la capacidad del Patio Bocanegra hasta 26 trenes, lo cual implicaría también dimensionar el Patio Taller ubicado entre Estación La Molina y Santa Patricia para 26 trenes, en este escenario para iniciar el servicio se requiere dejar 4 trenes en cada una de las estaciones terminales y luego se inyecta trenes desde Estación Bocanegra hacia Estación Gambeta y desde otro Patio Taller hacia Estación Mercado Santa Anita, tal como se aprecia en la Fig. N° 100.

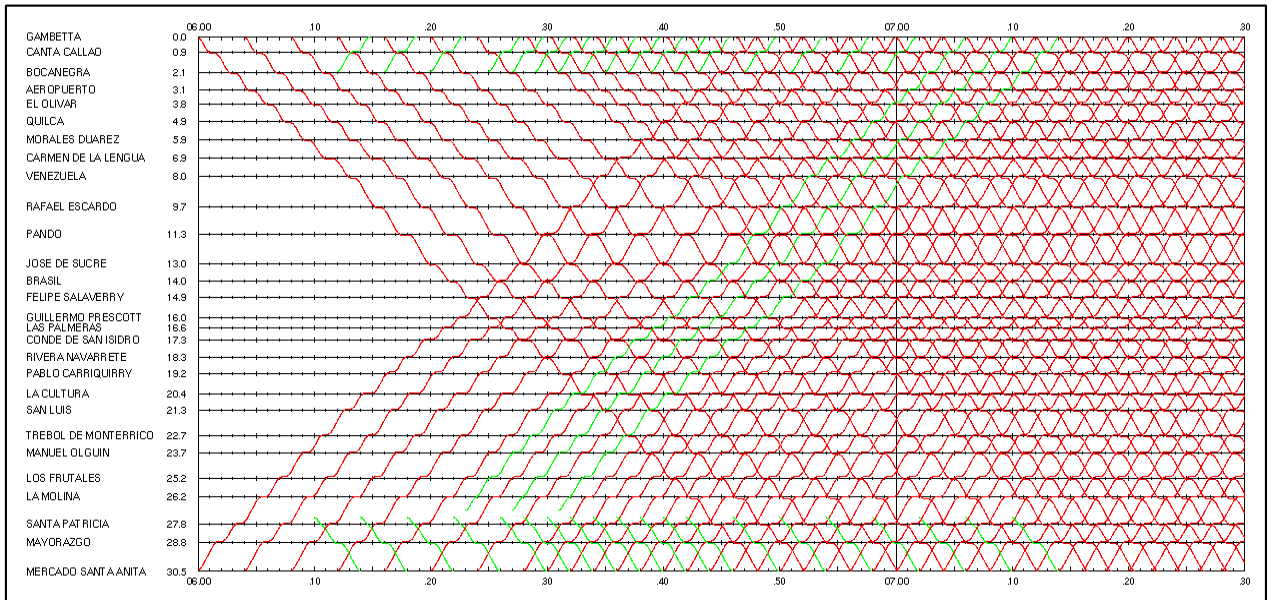
**Figura N° 98: Diagrama de tráfico - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (sin ampliación) y La Molina**



Fuente: Opentrack

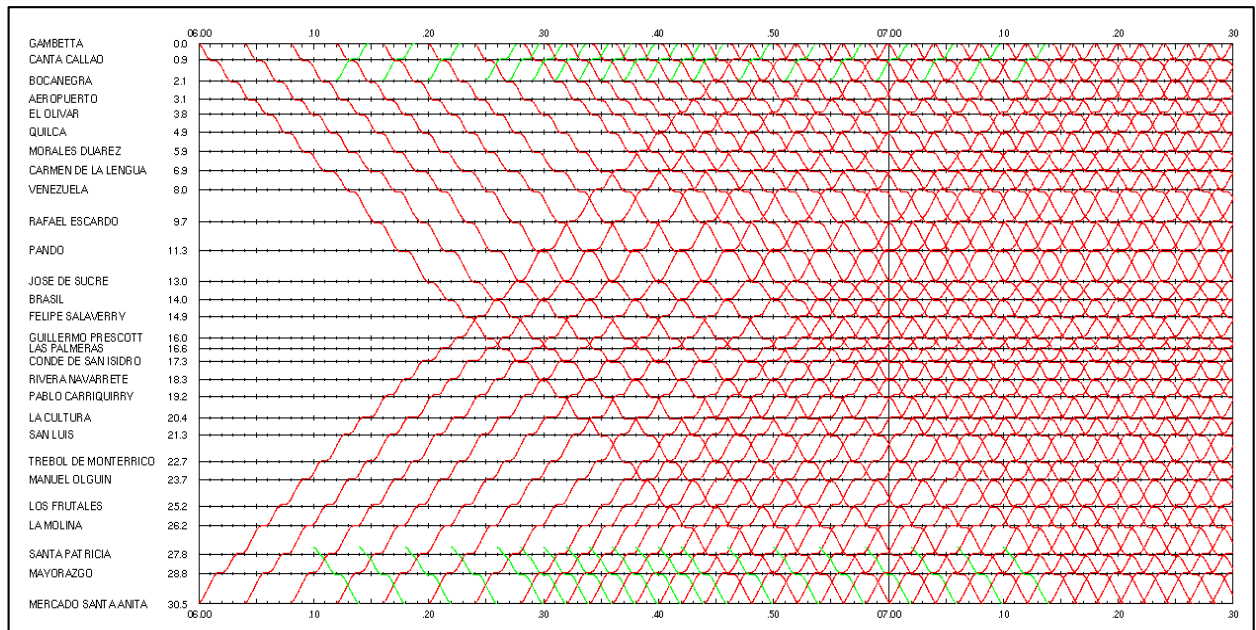
Elaboración: Propia

**Figura N° 99: Diagrama de tráfico - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (con ampliación de capacidad hasta 18 trenes) y La Molina**



Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

**Figura N° 100: Diagrama de tráfico - Inicio de operación desde Patio Taller Bocanegra (con ampliación de capacidad hasta 26 trenes) y La Molina**



Fuente: Opentrack  
Elaboración: Propia

#### **4.7. Resumen de modelos o escenarios de operaciones ferroviarias para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao**

Finalmente, en el Tabla N°31 se muestra el resumen de los modelos o escenarios de operaciones ferroviarias para la línea 4 del Metro de Lima y Callao, para la estimación de algunos parámetros ha considerado lo siguiente:

- Para la estimación de la demanda en días sábados y domingos y feriados se ha considerado el patrón de comportamiento de la demanda de la Línea 1 del Metro de Lima actualmente en operación (donde se tiene que la demanda en días sábados representa un 96% respecto a la demanda en días laborables, mientras que en días domingos y feriados representa un 55% respecto a la demanda en días laborables) para ajustar la demanda proyectada en el estudio de la Línea 4.
- Se considera 251 días laborables, 52 días sábados y 62 días domingos o feriados al año.
- El total de horas de servicio considerado fue 16 horas desde 6:00 a.m. hasta 10:00 p.m., siendo 6 horas punta (6:30 a.m. – 9:30 a.m. y 5:30 p.m. – 8:30 p.m.) y 10 horas valle (6:00 a.m. – 6:30 a.m., 9:30 a.m. – 5:30 p.m. y 8:30 p.m. – 10:00 p.m.), similar a la banda horaria de la Línea 1 del Metro de Lima.
- Se consideró los kilómetros recorridos extra (fuera de los kilómetros comerciales) entre 3% a 5% valores que dan en la Línea 1 del Metro de Lima en los años 2015 a 2017. Estos kilómetros extra son debidos a inyección, retirada o transición en hora punta y hora valle.

**Tabla N° 31: Resumen de modelos de operaciones ferroviarias para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao**

Parámetros		Operación parcial				Operación total			
		Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
		Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Capacidad de un tren (pax)		1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,400	1,400	
Número de coches por tren		6	6	6	6	6	7	7	
Número de estaciones		8	14	17	25	28	28	28	
Distancia comercial (km)		6.9	13.3	17.3	26.2	30.5	30.5	30.5	
Tiempo de viaje (minutos)		11.10	22.05	27.90	42.50	48.42	48.42	48.42	
Velocidad comercial (km / h)		37.55	36.13	37.20	37.06	37.79	37.79	37.79	
Consumo de energía promedio (kWh / viaje)		203.78	401.72	478.17	744.00	848.95	848.95	944.26	
Tiempo de vuelta automática total (minutos)		2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	
Ciclo (tiempo de vuelta)		27	49	60	90	101	101	101	
Número de días al año	Lunes a Viernes	251	251	251	251	251	251	251	
	Sábados	52	52	52	52	52	52	52	
	Domingos y Feriados	62	62	62	62	62	62	62	
Demanda proyectada	Carga máxima en hora punta / sentido	8,172	17,640	13,189	24,040	28,010	30,462	35,103	40,384
	Demanda diaria - Lunes a Viernes	112,974	433,847	387,996	814,974	952,440	1,030,774	1,111,269	1,278,490
	Demanda diaria - Sábados	108,455	416,493	372,476	782,375	914,342	989,543	1,066,818	1,227,350
	Demanda diaria - Domingos y Feriados	62,136	238,616	213,398	448,236	523,842	566,926	611,198	703,170

Parámetros			Operación parcial				Operación total				
			Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita				
			Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055	
Estimación de demanda anual			37,848,549	145,347,422	129,986,420	273,032,589	319,086,449	345,329,905	372,297,340	428,319,720	
Intervalos de paso (minutos)	Lunes a Viernes	HPM	8	4	5	2.5	2	2	2	2	
		HPT	15	4	5	2.5	2	2	2	2	
		HV	20	10	10	5	4	4	4	4	
	Sábados	HPM	15	5.4	6	3	2.5	2.5	2.5	2.5	
		HPT	15	5.4	6	3	2.5	2.5	2.5	2.5	
		HV	20	10	11	5.2	4.3	4.3	4.3	4.3	
	Domingos y feriados	HV	20	11.5	13	6.2	5.2	5.2	5.2	5.2	
	Número de trenes en operación / hora	Lunes a Viernes	HPM	4	12	12	36	50	50	50	50
			HPT	2	12	12	36	50	50	50	50
HV			2	5	6	18	25	25	25	25	
Sábados		HPM	2	9	10	30	40	40	40	40	
		HPT	2	9	10	30	40	40	40	40	
		HV	2	4	6	17	24	24	24	24	
Domingos y feriados		HV	2	4	5	15	20	20	20	20	
Flota de trenes en operación (hora punta)			4	12	12	36	50	50	50	50	
Flota de trenes para mantenimiento y reserva (10%)			1	2	2	4	5	5	5	5	
<b>Flota total de trenes</b>			<b>5</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>40</b>	<b>55</b>	<b>55</b>	<b>55</b>	<b>55</b>	
Número de viajes de trenes	Lunes a Viernes		134	304	268	532	664	664	664	664	
	Sábados		115	289	261	530	637	637	637	637	

Parámetros		Operación parcial				Operación total			
		Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
		Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
	Domingos y feriados	96	167	148	310	369	369	369	369
Factor de renovación de pasaje		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Capacidad ofertada diaria	Capacidad hora punta / sentido	9,000	18,000	14,400	28,800	36,000	36,000	42,000	42,000
	Lunes a Viernes	160,800	437,760	385,920	766,080	956,160	956,160	1,115,520	1,115,520
	Sábados	138,000	416,320	375,709	763,200	917,849	917,849	1,070,824	1,070,824
	Domingos y feriados	115,200	240,417	212,677	445,935	531,692	531,692	620,308	620,308
<b>Capacidad ofertada anual</b>		<b>82,018,800</b>	<b>219,648,417</b>	<b>194,383,143</b>	<b>389,430,720</b>	<b>481,033,870</b>	<b>481,033,870</b>	<b>561,206,182</b>	<b>561,206,182</b>
<b>Kilómetros recorridos anuales comerciales</b>		<b>316,547</b>	<b>1,350,126</b>	<b>1,556,505</b>	<b>4,732,485</b>	<b>6,791,263</b>	<b>6,791,263</b>	<b>6,791,263</b>	<b>6,791,263</b>
<b>Porcentaje de recorrido no comercial*</b>		<b>2.0%</b>	<b>3.0%</b>	<b>3.0%</b>	<b>4.0%</b>	<b>5.0%</b>	<b>5.0%</b>	<b>5.0%</b>	<b>5.0%</b>
<b>Kilómetros recorridos anuales extra servicio *</b>		<b>6,331</b>	<b>40,504</b>	<b>46,695</b>	<b>189,299</b>	<b>339,563</b>	<b>339,563</b>	<b>339,563</b>	<b>339,563</b>
<b>Kilómetros recorridos anuales</b>		<b>322,878</b>	<b>1,390,630</b>	<b>1,603,200</b>	<b>4,921,784</b>	<b>7,130,826</b>	<b>7,130,826</b>	<b>7,130,826</b>	<b>7,130,826</b>
<b>Consumo de energía de tracción anual (kWh)</b>		<b>9,285,439</b>	<b>40,850,538</b>	<b>43,031,862</b>	<b>134,137,629</b>	<b>189,061,198</b>	<b>189,061,198</b>	<b>210,286,465</b>	<b>210,286,465</b>

Elaboración: Propia



#### **4.8. Evaluación económica y financiera del proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao**

Para realizar la evaluación económica y financiera del proyecto se requiere estimar los costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, la financiación, así como también ingresos y los beneficios que generara el proyecto durante su vida útil.

##### **4.8.1. Costo de inversiones (CAPEX)**

Se ha estimado la inversión a nivel de macro-precios para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao basado en el “Estudio de Preinversión a Nivel de Perfil de la Línea 2 y Tramo de la Línea 4 del Metro de Lima” ANEXO 9 – PRESUPUESTO DE INVERSIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO - INFORME N°02.

Es así que se tiene la siguiente configuración de costos de inversión:

###### Obra civil:

- Túnel entre estaciones
- Estaciones
- Pozos de ventilación
- Terceras y cuartas vías
- Patios y talleres

###### Equipamiento ferroviario y no ferroviario:

- Superestructura ferroviaria
- Alimentación eléctrica
- Subestaciones eléctricas
- Instalaciones de sistema
- Instalaciones electromecánicas

###### Gestión de proyecto:

- Ingeniería de proyecto
- Supervisión de obra
- Gestión de proyecto

Manejo ambiental:

- Monitoreo ambiental y arqueológico
- Integración ambiental

Costo de material rodante

- Trenes
- Coches

Otros conceptos:

- Expropiaciones
- Interferencias y servicios afectados

Los precios unitarios a nivel macro para cada elemento, se ha considera tomando en cuenta la integración con el Ramal de la Línea 4, por lo que, los costos se estiman para todo el proyecto la cual resulta 5879 millones de dólares. Estos, se distribuyen en 1329 millones de dólares para el Ramal de la Línea 4 y 4550 millones de dólares para la Línea 4, en la siguiente tabla se muestra el detalle de costos por componente a nivel macro precios:

**Tabla N° 32: Costos de inversión a nivel de macro precios**

	ELEMENTO		RAMAL DE LÍNEA 4 ( E. Gambetta - E. Carmen de la Lengua)		LÍNEA 4 ( E. Venezuela - E. Mercado Santa Anita)			
			Medición	ud	Importe	Medición	ud	Importe
INFRAESTRUCTURA	<b>Obra Civil</b>							
	<b>Túnel entre estaciones</b>							
	Túnel excavado con TBM	24,000 US\$/m	6,947	m	166,728,000	21,429	m	514,288,320
	Túnel excavado NATM	22,000 US\$/m	250	m	5,500,000	2,119	m	46,625,040
	Subtotal (a)				<b>172,228,000</b>			<b>560,913,360</b>
	<b>Estaciones</b>							
	Estación en C&C	30 M US\$/ud.	6	ud	180,000,000	8.00	ud	240,000,000
	Estación en caverna	40 M US\$/ud.	2	ud	80,000,000	12.00	ud	480,000,000
	Conexión L1	5 M US\$/ud.	0	ud	0	1.00	ud	5,000,000
	Conexión L2	5 M US\$/ud.	1	ud	5,000,000	0.00	ud	0
	Conexión L6	5 M US\$/ud.	0	ud	0	1.00	ud	5,000,000
	Conexión COSAC	5 M US\$/ud.	0	ud	0	1.00	ud	5,000,000
	Conexión L3	4 M US\$/ud.	0	ud	0	1.00	ud	4,000,000
	Subtotal (b)				<b>265,000,000</b>			<b>739,000,000</b>
	<b>Pozos y otros manufactos especiales</b>							
	Pozos de Ventilación	3 M US\$/ud.	8	ud	24,000,000.00	23	ud	69,000,000
	Terceras y cuartas vías (425m)	20 M US\$/ud.	0	ud	0.00	3	ud	60,000,000
	Patios y talleres de operación	80 M US\$/ud.	1	ud	40,000,000.00	1	ud	80,000,000
	Subtotal (c)				<b>64,000,000.00</b>			<b>209,000,000</b>
	<b>Equipamientos ferroviarios y no ferroviarios</b>							
	Alimentación eléctrica	500 US\$/m	6,947	m	3,473,500	23,548	m	11,774,000
	Superestructura ferroviaria	6,000 US\$/m	6,947	m	41,682,000	23,548	m	141,288,000
	Instalaciones de sistema	12,000 US\$/m	6,947	m	83,364,000	23,548	m	282,576,000
Alimentación eléctrica	1,500 US\$/m	6,947	m	10,420,500	23,548	m	35,322,000	
Subestaciones eléctricas	1 M US\$/ud.	2	ud	2,000,000	2	ud	2,000,000	
Subtotal (d)				<b>140,940,000</b>			<b>472,960,000</b>	
<b>Manejo ambiental</b>								
Monitoreo Ambiental	2.5 M US\$/ud.	1	ud	2,500,000	1	ud	2,500,000	
Monitoreo Arqueológico	3.3 M US\$/ud.	1	ud	3,250,000	1	ud	3,250,000	
Integración Ambiental	100.0 US\$/m	6,947	m	694,700	23,548	m	2,354,800	
Subtotal (e)				<b>6,444,700</b>			<b>8,104,800</b>	
<b>Total (f = a+b+c+d+e)</b>				<b>648,612,700</b>			<b>1,989,978,160</b>	
Gastos generales y utilidad (g)	20.0%			<b>129,722,540</b>			<b>397,995,632</b>	
Costo total infraestructura (h = f+g)				<b>778,335,240</b>			<b>2,387,973,792</b>	
MATERIAL RODANTE	<b>Material rodante</b>							
	Material rodante	10.8 M US\$/ud (6 c)	8	ud	86,400,000	47	ud	507,600,000
	Coches	1.8 M US\$/coche	8	ud	14,400,000	47	ud	84,600,000
	Subtotal (i)				<b>100,800,000</b>			<b>592,200,000</b>
	Gastos generales y utilidad (j)	20.0%			<b>20,160,000</b>			<b>118,440,000</b>
Costo total Material Rodante (k = i+j)				<b>120,960,000</b>			<b>710,640,000</b>	
<b>Costo Total Infraestructura y Material Rodante (l = h+k)</b>				<b>899,295,240</b>			<b>3,098,613,792</b>	
OTROS GASTOS	<b>Imprevistos</b>							
	Imprevistos (m)	10.00 %			89,929,524		309,861,379	
	<b>Gestión del proyecto</b>							
	Ingeniería de proyecto	3.50 %			31,475,333		108,451,483	
	Supervisión de obra	3.50 %			31,475,333		108,451,483	
Gestión	1.00 %			8,992,952		30,986,138		
Subtotal imprevisto y gestión del proyecto (n)				<b>161,873,143</b>			<b>557,750,483</b>	
PREDIOS	<b>Otros conceptos</b>							
	Expropiaciones	Variable	Variable	50,000,000	Variable	166,000,000		
	Interferencia y Servicios Afectados	Variable	Variable	15,000,000	Variable	34,000,000		
Subtotal (o)				<b>65,000,000</b>			<b>200,000,000</b>	
IMPUESTOS	<b>Total base imponible ( p = l+n+o)</b>				<b>1,126,168,383</b>		<b>3,856,364,275</b>	
	IGV (q)	18.00 %			<b>202,710,309</b>		<b>694,145,569</b>	
	<b>Total Inversión con IGV ( r = p+q)</b>				<b>1,328,878,692</b>		<b>4,550,509,844</b>	
<b>Total inversión (Línea 4 + Ramal de la Línea 4)</b>						<b>5,879,388,536</b>		

Elaboración: Propia

#### **4.8.2. Costo de operación y mantenimiento (OPEX)**

El procedimiento seguido para la estimación de Costo de Operación y Mantenimiento en el presente trabajo tiene como referencia en los Costos de Operación y Mantenimiento de la Línea 2 del Metro de Lima desarrollado por el Consorcio GEODATA, ESAN y SERCONSULT en el marco del “Estudio de Preinversión a Nivel de Perfil de la Línea 2 y el Tramo de la Línea 4 del Metro de Lima” y se ha basado en el formato excel de estructura de Costo de Operación y Mantenimiento, presentado por el Consorcio L-4-L en el marco de “Consultoría Integral del Concurso de Proyectos Integrales para la Concesión de la Línea 4 de la Red Básica del Metro de Lima y Callao”, se adaptó el formato excel para los modelos o escenarios de servicios planteados la Tabla N° 31 del presente trabajo (la metodología se muestra en el **Anexo 4**).

Para la estimación de costos de operación y mantenimiento se considera las características o parámetros de la Línea 4 del Metro de Lima para cada escenario o modelo de operación planteado en la Tabla N° 31, por lo tanto, se revisó los siguientes parámetros:

- Longitud de la línea
- Número de estaciones
- Número de trenes y sus características
- Demanda en horas punta
- Kilómetros recorridos
- Banda horaria eléctrica
- Número de patios talleres

Los costos de cada escenario ferroviario estarán divididos en variables y fijos, a continuación, se enuncia los componentes de cada tipo de costo.

##### **i) Costos variables**

Estos costos tienen relación directa con la producción del servicio ferroviario, es decir, kilómetros recorridos y la demanda, se considera los siguientes rubros:

- a) Energía
- b) Mantenimiento de la infraestructura
- c) Mantenimiento de material rodante
- d) Personal de mantenimiento y operación

e) Personal de estaciones

A continuación, se enuncia cada componente de cada costo variable:

**a) Costos de energía**

Los costos de energía se componen de:

- Consumo energía eléctrica para tracción de material rodante
- Consumo energía eléctrica para instalaciones
- Potencia por generación
- Potencia por transmisión

**b) Costos de mantenimiento de infraestructura**

Estos costos comprenden el mantenimiento de los sistemas ferroviarios, excepto el material rodante, la composición de los costos de mantenimiento de la infraestructura es la siguiente:

- Mantenimiento de estaciones
- Mantenimiento de túneles y pozos
- Mantenimiento de catenaria
- Mantenimiento de sub-estaciones de energía de tracción
- Mantenimiento de vías férreas
- Mantenimiento de infraestructura y equipamiento de patios y talleres
- Mantenimiento de señalización y telecomunicaciones
- Mantenimiento de infraestructura de recaudo
- Mantenimiento de centro de control

**c) Costos de mantenimiento de material rodante**

Los costos de mantenimiento de los trenes se componen de:

- Costo de limpieza de trenes
- Costo de mantenimiento preventivo de trenes

**d) Costos de personal variable de mantenimiento y operación**

Se ha considerado el personal de operación que depende de la producción de kilómetros recorridos tales como personal a bordo del tren y conductores, el personal de mantenimiento corresponde a los técnicos de mantenimiento de sistemas ferroviarios, el detalle de plantilla del personal se describe en el Anexo 4.

#### **e) Costos de personal de estaciones**

Personal de estación tiene relación directa con la demanda en hora punta se encargarán de atender a los usuarios, por lo tanto, de acuerdo a la demanda en hora punta se dimensionó para cada estación la cantidad de personal que se compone de:

- Supervisores de estaciones
- Orientadores
- Boleteros
- Vigilantes

#### **ii) Costes fijos**

Los costos fijos son aquellas que no dependen la producción de kilómetros recorridos ni la demanda, tiene la siguiente composición:

- a) Personal fijo de gestión
- b) Costos tercerizados
- c) Gastos generales
- d) Utilidad

A continuación, se enuncia cada componente de cada costo variable:

##### **a) Personal fijo de gestión**

El personal fijo no participa directamente en las estaciones ya que son personal con cargos administrativos en las oficinas y talleres, por lo tanto, no depende de los kilómetros recorridos o la demanda, el detalle de la cantidad de personal necesario se encuentra en el **Anexo 4**.

##### **b) Costos tercerizados**

Se considera como como costos tercerizadas los costos del servicio de seguridad para las instalaciones del sistema ferroviario, así como también la limpieza de las instalaciones.

##### **c) Gastos generales**

En los gastos generales se consideran lo siguiente:

- Costos de seguros
- Costo de suministro de servicios (agua, luz, teléfono, internet, etc.)

- Costos de utilices de oficina
- Costos de capacitación del personal
- Costo de mantenimiento de vehículos administrativos
- Costos de licencias de software
- Imprevistos

**d) Utilidad**

Se considera una utilidad de 10% respecto a los costos directos.

En la Tabla N° 33, se muestra el resumen de los costos de operación y mantenimiento para cada escenario de servicio ferroviario planteado:

**Tabla N° 33: Resumen de costo de operación y Mantenimiento en soles para cada escenario de operación en millones de soles**

Estructura de costos	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
PERSONAL (a)	26.55	42.62	47.86	77.04	91.75	103.81	120.82	197.97
ENERGÍA (b)	9.83	21.55	23.78	53.80	70.17	79.39	100.42	164.55
MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURA (c)	17.45	30.47	33.75	54.19	62.39	69.29	77.09	120.00
MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE (d)	5.92	16.55	16.55	47.30	65.04	73.59	83.26	136.44
SERVICIOS TERCERIZADOS (e)	0.84	0.98	1.15	1.83	2.01	2.27	2.57	4.21
TOTAL COSTO DIRECTO (f)= (a)+(b)+(c)+(d)+ (e)	<b>60.59</b>	<b>112.17</b>	<b>123.09</b>	<b>234.15</b>	<b>291.36</b>	<b>328.35</b>	<b>384.16</b>	<b>623.17</b>
TOTAL GASTOS GENERALES (g)	<b>8.79</b>	<b>12.28</b>	<b>13.04</b>	<b>23.48</b>	<b>28.52</b>	<b>31.05</b>	<b>35.05</b>	<b>49.95</b>
UTILIDAD (h)	<b>6.06</b>	<b>11.22</b>	<b>12.31</b>	<b>23.41</b>	<b>29.14</b>	<b>32.83</b>	<b>38.42</b>	<b>62.32</b>
COSTO TOTAL (i) = (f) +(g) + (h)	<b>75.43</b>	<b>135.68</b>	<b>148.45</b>	<b>281.05</b>	<b>349.02</b>	<b>392.23</b>	<b>457.62</b>	<b>735.44</b>
LONGITUD DE LA LÍNEA (km) (j)	6.95	13.28	17.30	26.25	30.50	30.50	30.50	30.50
KILÓMETROS RECORRIDOS ANUALES en Millones (k)	<b>0.32</b>	<b>1.39</b>	<b>1.60</b>	<b>4.92</b>	<b>7.13</b>	<b>7.13</b>	<b>7.13</b>	<b>7.13</b>
PRECIO POR KILÓMETRO TREN (S/) (l)= (i)/(k)	<b>233.62</b>	<b>97.56</b>	<b>92.59</b>	<b>57.10</b>	<b>48.94</b>	<b>55.01</b>	<b>64.18</b>	<b>103.14</b>
PRECIO POR KILÓMETRO TREN (USD) (l)= (i)/(k)	<b>71.88</b>	<b>30.02</b>	<b>28.49</b>	<b>17.57</b>	<b>15.06</b>	<b>16.92</b>	<b>19.75</b>	<b>31.73</b>

Elaboración: Propia

Del cuadro anterior, se puede observar que para hacer circular un tren cuesta S/ 48.94 por kilómetro para el año 2025, entonces para realizar un test de escenario de servicio ferroviario en la vía férrea en operación real, modelo de físico experimental, a un intervalo de paso de 2 minutos por un lapso de 3 horas, en horas punta, el costo total sería S/ 268,663, tal como se muestra en el siguiente cuadro:

**Tabla N° 34: Costo de ejecutar escenarios de servicios ferroviarios en operación real**

<b>Concepto</b>	<b>1 hora</b>	<b>3 horas</b>	<b>Un día Servicio</b>
Precio por Kilómetro Tren (S/)	48.94	48.94	48.94
Distancia Comercial	30.50	30.50	30.50
Cantidad de carreras en Hora Punta	60	180	664
Costo total por hora punta servicio (S/)	89,554	268,663	991,070

Elaboración: Propia

Por otro lado, para realizar un test de escenario de servicio ferroviario mediante simulación con el mismo intervalo de paso y periodo de tiempo el costo estimado resultaría S/ 133,750 de los cuales el S/ 113,750 es el costo de una licencia del software de simulación (Opentrack). Por lo tanto, la utilización de herramientas de ayuda en la operación ferroviaria, como los softwares de simulación en un método eficiente económicamente para elaborar y evaluar diferentes escenarios de servicios ferroviarios.

**Tabla N° 35: Costo de ejecutar escenarios de servicios ferroviarios mediante simulación**

<b>Concepto</b>	<b>Costos (S/)</b>
Especialista en simulación ferroviaria	10,000
Asistente	5,000
Costo de licencia de software (Opentrack)	113,750
Costo de materiales y útiles de oficina	5,000
<b>Costo total</b>	<b>133,750</b>

Elaboración: Propia

Finalmente, mediante simulaciones los horarios, la señalización, la infraestructura pueden ser cambiados y modificados de diferentes formas, así como también las diferentes combinaciones de trenes pueden ser creados y



los resultados evaluados y analizados antes de efectuarlos el servicio ferroviario.

#### **4.8.3. Evaluación del proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao**

Respecto a la evaluación de un proyecto, Fontaine (2008) indica que “La evaluación de proyectos consiste en comparar los costos con los beneficios que éstos generan, para así decidir sobre la conveniencia de llevarlos a cabo. [...]” (pág.349).

Respecto a la identificación de los costos y beneficios de un proyecto:

[...] Para identificar los costos y beneficios pertinentes de un proyecto, debe primeramente definirse la llamada “situación base”, o *situación “sin proyecto”*; para ello, el evaluador debe establecer qué sucedería –con la empresa, el sector o el país– *durante el horizonte de evaluación* en el caso de que no se ejecute el o los proyectos que se considerarán en la *situación “con proyecto”*. La tarea del evaluador será estimar –para un horizonte de evaluación– los flujos de costos y beneficios de cada una de las alternativas “con proyecto”, y restar de éstos los flujos estimados para la situación “sin proyecto” (Fontaine, 2008, pág. 4).

Los proyectos de inversión tienen distintas evaluaciones. Al respecto, Fontaine (2008) señala lo siguiente:

[...] Las evaluaciones financiera, económica y social se efectúan “conjuntamente” con la que podríamos llamar evaluación técnica del proyecto, que consiste en cerciorarse de la factibilidad técnica del mismo:  
[...]

La evaluación privada de proyectos incluye (i) una evaluación financiera y (ii) una evaluación económica. La primera contempla, en su análisis, todos los flujos financieros del proyecto, distinguiendo entre capital “propio” y prestado. Esta evaluación es pertinente para determinar la llamada “capacidad financiera” del proyecto y la rentabilidad de capital propio invertido en el proyecto. La evaluación económica, en cambio, supone que todas las compras y las ventas son al contado riguroso y que todo el capital

es “propio”; es decir, la evaluación privada económica desestima el problema financiero.

Para la evaluación social o socioeconómica, interesa el flujo de recursos reales (de los bienes y servicios) utilizados y producidos por el proyecto. Para la determinación de los costos y beneficios pertinentes, la evaluación social definirá la situación del país “con” versus “sin” la ejecución del proyecto en cuestión. Así, los costos y beneficios sociales podrán ser distintos de los contemplados por la evaluación privada económica, porque: (i) los valores (precios) sociales de bienes y servicios difieren del que paga o recibe el inversionista privado, o (ii) parte de los costos o beneficios recae sobre terceros (el caso de las llamadas externalidades o efectos indirectos) (pág. 40).

Por lo tanto, la evaluación de un proyecto se realiza desde un punto de vista privado y social. La primera busca generar ganancias para el inversionista mientras que la segunda busca generar beneficio social para los usuarios y la población del área de influencia del proyecto.

#### **4.8.3.1. Evaluación Social**

Según lo descrito en los párrafos anteriores para la evaluación social se requiere determinar los costos y beneficios sociales “con proyecto” versus “sin proyecto”.

Ahora, respecto a los beneficios sociales de un proyecto de inversión pública (en adelante, PIP) El Ministerio de Economía y Finanzas (2015) indica lo siguiente:

[...] el *beneficio social* se refiere al valor que representa para la *población usuaria* el acceso al bien o al servicio que ofrece el PIP, que contribuirá con su bienestar. Asimismo, es posible que los beneficios del PIP se proyecten a *agentes distintos a la población a la cual está dirigida el proyecto*. [...]

Mediante los PIP se generan tres tipos de beneficios para la sociedad (directos, indirectos y externalidades positivas), por eso se les denomina beneficios sociales.

Veamos a continuación el significado de cada uno de estos conceptos.

a) *Beneficios directos*. Se refieren al efecto inmediato que ejerce el acceso al bien o al servicio intervenido por el proyecto. Se relacionan con el mercado del servicio y pueden provenir de las siguientes fuentes:

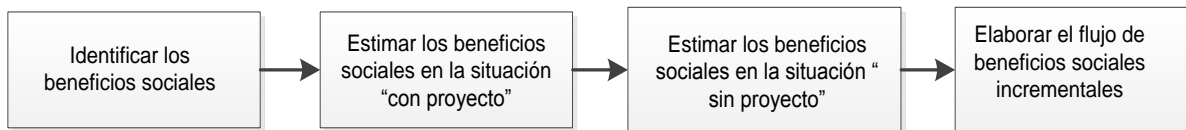
- El ahorro o la liberación de recursos consecuencia del acceso al bien y/o al servicio. Por ejemplo, el ahorro en el tiempo que demanda el acarreo de agua, o el no consumo de velas, al tener acceso a servicios de agua potable o energía, respectivamente.
- El excedente del consumidor que se genera por un mayor consumo del bien o el servicio, debido a su menor precio y mayor disponibilidad; por ejemplo, al tener el servicio de agua potable en el domicilio los usuarios consumen más y pagan un menor precio del que están dispuestos a gastar.
- El excedente del productor que se genera por un mayor valor neto de la producción como resultado de un incremento en la productividad, en la producción y/o en la calidad de los productos, o también por la disminución de los costos de producción. En los proyectos de riego o de apoyo al desarrollo productivo se pueden ver estos efectos.

b) *Beneficios indirectos*. Son aquellos que se producen en otros mercados relacionados con el bien o el servicio que se provee; por ejemplo, si la población cuenta con agua potable disminuirán las enfermedades y, por tanto, los costos en la atención de la salud. [...]

c) *Externalidades positivas*. Se generan sobre terceros quienes no están vinculados con el mercado del servicio, ni directa ni indirectamente; por ejemplo, cuando se mejora una vía urbana o se instalan los servicios de saneamiento sube el valor de la propiedad inmueble. (págs. 188-190).

Finalmente, el autor establece el procedimiento para la estimación de beneficios

**Figura N° 101: Pasos para la estimación de los beneficios sociales**



Fuente: Adaptado de MEF (2015)

Respecto a los indicadores de rentabilidad social, MEF (2015) estableció la metodología de costo beneficio a través del VAN y TIR ambos sociales, a continuación describe la definición de cada una y las fórmulas de cálculo:

#### **i) Valor actual neto social (VANS)**

Refleja el valor, en nuevos soles de hoy o momento inicial (comienzo del primer año del horizonte de evaluación), del conjunto de beneficios netos de cada una de las alternativas; es decir, la diferencia entre los beneficios sociales y los costos sociales considerando la preferencia intertemporal expresada a través de la tasa social de descuento (TSD) vigente en el SNIP.

Para calcular el VANS aplicamos la siguiente fórmula:

$$VANS = \sum_{t=1}^n \frac{(BSI - CSI)_t}{(1 + TSD)^t}$$

Donde:

BSI = Beneficio social incremental

CSI = Costo social incremental

n = Horizonte de evaluación del proyecto

TSD = Tasa social de descuento

**ii) Tasa interna de retorno social (TIRS)**

Refleja la rentabilidad promedio de una inversión. Operativamente, es la tasa de descuento que hace cero el valor del VANS, es decir:

$$VANS = \sum_{t=1}^n \frac{(BSI - CSI)_t}{(1 + TSD)^t} = 0$$

Donde:

BSI = Beneficio social incremental

CSI = Costo social incremental

n = Horizonte de evaluación del proyecto (Pág. 211).

Finalmente, el criterio de decisión para escoger si un proyecto es rentable socialmente es la siguiente:

- $VANS \geq 0$
- $TIRS \geq$  Tasa social de descuento

A partir de estudio a nivel de perfil de la Línea 4 del Metro de Lima, se identificaron los siguientes parámetros para la evaluación social:

**a) Los beneficios directos:**

- Ahorro en tiempo de viaje de los pasajeros transportados y de los autos privados
- Ahorro en costos de operación vehicular en el transporte de pasajeros y en los autos privados

**b) Las externalidades positivas o beneficios indirectos:**

- Ahorro en los efectos de los accidentes vehiculares atribuibles al transporte público

- Ahorro en los efectos de la contaminación atribuible al transporte público y privado

**c) Los costos relacionados al proyecto estimados en los ítems 4.8.1 y 4.8.2 del presente documento:**

- Costos de inversión (CAPEX)
- Costos de operación y mantenimiento (OPEX)

Es así que, en el presente estudio se ha procedido a realizar los ajustes a los precios privados para obtener los correspondientes precios sociales, teniendo en cuenta los dispositivos legales y directivas vigentes que se fijan en el Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones (INVIERTE.PE). Bajo esta perspectiva, y según MEF (2017) publicó el ANEXO N° 3: PARÁMETROS DE EVALUACIÓN SOCIAL, tales parámetros de ajuste o factores de conversión se resumen enseguida:

- Factor de conversión del Tipo de Cambio (Soles/USD): 1.02
- Valor social del tiempo de viaje: S/ 6.81 por hora por persona (aplicable al transporte público urbano de pasajeros en Lima metropolitana) o USD 2.05
- Valor social del tiempo de privado: S/ 7.83 por hora por persona que no migra a Línea 4 o USD 2.36
- Tasa social de descuento general: 8.00% anual en USD
- Factor de conversión para los costos de inversión (CAPEX): 0.79
- Factor de conversión para costos de operación y mantenimiento (OPEX): 0.75

Asimismo, MEF (2011) a través de la Directiva General del Sistema Nacional de Inversión Pública mediante la Resolución Directoral N° 003-2011-EF/68.01 estableció el Anexo SNIP 10: PARÁMETROS DE EVALUACIÓN, a partir de ella se estimó los siguientes datos:

- Ahorro en Costo de operación vehicular buses: 0.572 USD/Km-vehículo
- Ahorro en Costo de operación vehicular BRT: 0.622 USD/Km-vehículo
- Ahorro en Costo de operación vehicular Auto: 0.260 USD/Km-vehículo
- Ahorro en costo de accidentes de tránsito público: 0.16 USD/Km-vehículo
- Beneficio por efectos de contaminación ambiental : 0.007 USD/Km-vehículo

Los valores estimados de los beneficios sociales, los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento, que finalmente resulta en flujo de beneficios sociales incrementales se muestran en el siguiente cuadro:

**Tabla N° 36: Flujo de beneficios sociales incrementales (millones de dólares)**

Año	Ahorro Tiempo de viaje Público	Ahorro Tiempo de Viaje Privado Migra L4	Ahorro en Costo de Operación Vehicular Buses	Ahorro en Costo de Operación Vehicular BRT	Ahorro en Costo de Operación Auto	Ahorro en costos en Accidentes	Ahorro por efectos de Contaminación	CAPEX L4	OPEX L4	Flujo de Caja
2020	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-868.3	0.0	-868.3
2021	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-868.3	0.0	-868.3
2022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-868.3	0.0	-868.3
2023	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-708.1	0.0	-708.1
2024	307.3	47.4	31.0	2.4	45.7	13.0	1.6	-543.7	-48.7	-143.9
2025	322.1	50.4	32.0	2.5	46.0	13.4	0.7	0.0	-80.5	386.5
2026	337.5	53.6	32.9	2.6	46.3	13.8	0.7	0.0	-82.5	404.8
2027	353.5	56.9	33.9	2.7	46.5	14.2	0.7	0.0	-84.6	423.8
2028	370.2	60.4	34.9	2.8	46.8	14.6	0.7	0.0	-86.7	443.7
2029	387.6	64.0	35.9	2.9	47.0	15.0	0.7	0.0	-88.8	464.4
2030	405.7	67.9	37.0	3.0	47.3	15.5	0.8	0.0	-90.5	486.5
2031	414.0	73.1	37.5	3.0	48.7	15.7	0.8	0.0	-93.5	499.3
2032	422.5	78.5	38.0	3.1	50.2	15.9	0.8	0.0	-96.7	512.3
2033	431.2	84.1	38.5	3.1	51.7	16.1	0.8	0.0	-99.9	525.6
2034	439.9	89.8	39.0	3.2	53.2	16.4	0.8	0.0	-103.2	539.2
2035	448.9	95.7	39.6	3.2	54.8	16.6	0.9	-79.5	-105.6	474.4
2036	458.0	101.7	40.1	3.3	56.4	16.8	0.9	0.0	-109.0	568.1
2037	467.2	108.0	40.6	3.3	58.0	17.0	0.9	0.0	-112.6	582.5
2038	476.6	114.4	41.2	3.4	59.7	17.3	0.9	0.0	-116.2	597.2
2039	486.2	121.0	41.7	3.5	61.3	17.5	0.9	0.0	-120.0	612.2
2040	495.9	127.8	42.3	3.5	63.0	17.7	1.0	0.0	-123.9	627.4
2041	502.4	129.9	42.5	3.5	64.2	17.8	1.0	0.0	-127.9	633.4
2042	509.0	132.1	42.7	3.6	65.3	17.9	1.0	0.0	-132.1	639.4
2043	515.6	134.3	42.9	3.6	66.4	18.0	1.0	0.0	-136.4	645.4
2044	522.3	136.5	43.1	3.6	67.6	18.1	1.0	0.0	-136.5	655.7
2045	529.1	138.8	43.3	3.6	68.7	18.2	1.0	0.0	-139.5	663.2
2046	535.9	141.1	43.5	3.6	69.9	18.2	1.1	0.0	-142.6	670.7
2047	542.9	143.4	43.7	3.7	71.1	18.3	1.1	0.0	-145.8	678.4
2048	549.9	145.8	43.9	3.7	72.3	18.4	1.1	0.0	-149.0	686.1

Año	Ahorro Tiempo de viaje Público	Ahorro Tiempo de Viaje Privado Migra L4	Ahorro en Costo de Operación Vehicular Buses	Ahorro en Costo de Operación Vehicular BRT	Ahorro en Costo de Operación Auto	Ahorro en costos en Accidentes	Ahorro por efectos de Contaminación	CAPEX L4	OPEX L4	Flujo de Caja
2049	557.0	148.2	44.1	3.7	73.6	18.5	1.1	0.0	-152.3	693.8
2050	564.2	150.6	44.3	3.7	74.8	18.6	1.1	0.0	-155.7	701.6
2051	571.4	153.1	44.5	3.8	76.1	18.7	1.1	0.0	-159.1	709.5
2052	578.8	155.7	44.7	3.8	77.3	18.7	1.2	0.0	-162.6	717.5
2053	586.2	158.2	44.9	3.8	78.6	18.8	1.2	0.0	-166.2	725.5
2054	593.7	160.8	45.1	3.8	79.9	18.9	1.2	0.0	-169.9	733.5
2055	601.3	163.5	45.3	3.8	81.2	19.0	1.2	0.0	-169.7	745.6

Elaboración: Propia

A partir de la aplicación del VANS a flujo de caja del cuadro anterior a una tasa de descuento social de 8%, la Línea 4 del Metro de Lima y Callao se tiene los siguientes indicadores de rentabilidad social:

**Tabla N° 37: Indicadores de rentabilidad social**

VANS	1,214.82
TIRS	10.85%

Elaboración: Propia

Del cuadro anterior, el VANS resulta 1,215.82 millones de dólares y el TIR resulta 10.85% superior a la tasa de descuento social, por lo tanto, el proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao es rentable socialmente.

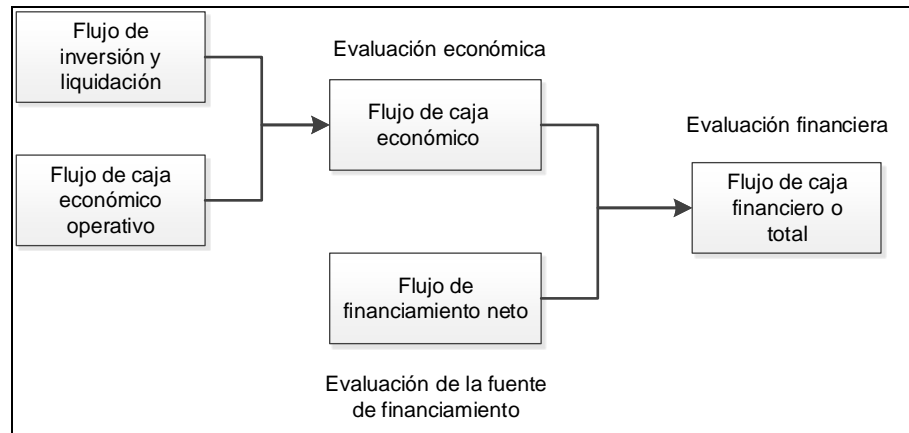
#### 4.8.3.2. Evaluación Privada

Como se ha indicado, en el presente trabajo en la evaluación privada de proyectos el inversionista busca generar ganancias con la ejecución del proyecto. Beltran y Cueva (2018) señala que para realizar análisis económicos y financieros existen tres diferentes flujos de caja: flujo de caja económico, flujo de financiamiento neto y flujo de caja financiero.

Los autores indican que con el primer flujo se realiza la evaluación económica del proyecto con el fin de determinar la rentabilidad del proyecto sin incluir financiamiento, es decir, el inversionista pone todo el capital. Con el segundo flujo se evalúa la bondad del financiamiento y finalmente con el tercer flujo se determina la rentabilidad global del proyecto, en la siguiente figura se muestra un esquema de los flujos:



**Figura N° 102: Estructura de diferentes flujos de caja para la evaluación privada de un proyecto**



Fuente: Adaptado de Beltran y Cueva (2018)

Asimismo, Beltran y Cueva (2018) señala los componentes de caja uno de los flujos de caja, es así que el flujo de caja económico está compuesto de:

#### **a) Flujo de inversión y liquidación**

El flujo de inversión y liquidación recoge aquellos costos de inversión que son necesarios para el financiamiento de la empresa y sus respectivos valores de liquidación. Estos, a su vez, pueden dividirse en:

- Adquisición de activos
- Gastos preoperativos
- Cambios en el capital de trabajo

[...]

#### **b) Flujo de caja económico operativo**

El flujo de caja operativo es el segundo componente del flujo de caja económico. Contiene dos rubros:

- Ingresos: Componentes principalmente por aquellos propios del giro del negocio (ventas) y por otros que se espera recibir durante la vida útil del proyecto, como la venta de un activo fijo. Es importante recordar que esta cuenta incluye los ingresos efectivos de dinero (no los ingresos devengados)

- Egresos. Los egresos se refieren a las salidas de efectivo ocasionadas por la actividad operativa del proyecto. Estos egresos se originan, principalmente, en los costos de producción (mano de obra, insumos, etc.), administración y en el pago de impuestos. Otros egresos pueden provenir del gasto en ventas ocasionado, por ejemplo, por el pago de comisiones sobre ventas y fletes (págs. 209 y 224).

Finalmente, Beltran y Cueva (2018) indican lo siguiente respecto al flujo de financiamiento neto:

### **c) Flujo de financiamiento neto**

En el flujo de financiamiento neto se registra la alternativa de financiamiento que tiene el proyecto fuera de la inversión en capital propio. El caso más común es el de los préstamos que recibe el proyecto.

[...]

El flujo de financiamiento neto incluye cuatro rubros principales:

- El desembolso del principal (que se consigna en el momento que se recibió el crédito).
- La amortización de la deuda.
- Los intereses o gastos financieros asociados.
- El escudo fiscal o escudo tributario.

[...](Pág.233).

Por lo tanto, de la suma de flujo de caja económico y flujo de financiamiento neto se obtiene el flujo de caja financiero.

Los indicadores más utilizados en la evaluación de proyectos son: El valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

El VAN “mide, en moneda de hoy, cuanto más rico es el inversionista si realiza el proyecto en vez de colocar su dinero en la actividad que le brinda como rentabilidad la tasa de descuento” (Beltran & Cueva, 2011, p.69).

En términos matemáticos el VAN tiene la siguiente presentación:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$$

Donde:

$FC_t$ : Flujo de caja del periodo (t)

$i$  : Tasa de descuento (tasa de interés o costo de oportunidad del capital)

$n$ : Vida útil del proyecto

Los criterios decisión en la evaluación del proyecto a través del VAN es:

- $VAN > 0$ . Es recomendable realizar la inversión en el proyecto analizado.
- $VAN = 0$ . Es indiferente realizar el proyecto u optar por la mejor alternativa.
- $VAN < 0$ . El proyecto no es recomendable realizar.

Respecto al TIR, Beltran y Cueva (2018) indica “La tasa interna de retorno es una tasa porcentual que indica la rentabilidad promedio por periodo que genera el capital que permanece invertido en el proyecto” (pág. 309).

La TIR tiene la siguiente representación matemática:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} = 0$$

Donde:

$FC_t$ : Flujo de caja del periodo (t)

$i$ : Tasa de descuento (tasa de interés o costo de oportunidad del capital)

$n$ : Vida útil del proyecto

Para establecer los criterios de evaluación de un proyecto a través del TIR, primero se explicará la definición del costo de oportunidad del capital (COK). Al respecto, Beltran y Cueva (2018) define “El costo

de oportunidad de capital es una tasa de interés referencial que sirve para determinar los beneficios extraordinarios de un proyecto de inversión respecto de la mejor alternativa especulativa de igual riesgo” (pág. 503).

Los criterios para evaluación de un proyecto a través del TIR son:

- TIR>COK. Es recomendable realizar el proyecto.
- TIR=COK. Es indiferente realizar el proyecto u optar por la mejor alternativa.
- TIR<COK. No es recomendable realizar el proyecto.

Finalmente, de acuerdo a Beltran y Cueva (2018) se puede interpretar también la TIR como el máximo costo al cual un inversionista podría tomar prestado dinero para financiar la totalidad de un proyecto y ser capaz de repagar tanto el capital como los intereses del financiamiento con su producción sin perder dinero.

Ahora bien, para la evaluación financiera del proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao se ha elaborado un modelo económico financiero a nivel macro precios (Excel modelo financiero), el modelo tiene los siguientes parámetros como inputs:

**Tabla N° 38: Parámetros Generales**

Impuesto General a las Ventas	18%
Impuesto a la Renta	30%
Participación de Trabajadores	10%
Año inicio del Proyecto	2020
Vida útil del Proyecto	35

Elaboración: Propia

**Tabla N° 39: Parámetros de Inversión**

Etapas	Monto (USD millones)	Longitud de túnel (km)	Año de ejecución
Etapa 1	3,891	20.60	2020 al 2022
Etapa 2	1,058	5.60	2023
Etapa 3	812	4.30	2024
Etapa 4*	119	0.00	2035
Total	5,879	30.50	

\* Integración del séptimo coche

Elaboración: Propia

**Tabla N° 40: Parámetros de financiamiento**

Capital	75%
Deuda	25%
Plazo de deuda (años)	15

Etapas	Capital (USD millones)	Deuda (USD millones)
Etapa 1	2,918	973
Etapa 2	793	264
Etapa 3	609	203
Etapa 4*	89	30
Total	4,410	1,470

Elaboración: Propia

**Tabla N° 41: Tasa de descuento**

Costo de oportunidad de capital (Ke) - CAPM	11%
Costo de la deuda (Kd)*	8%

\* Similar a la Línea 2

CAPM: Modelo de fijación de precios de activos de capital, considera el riesgo y rentabilidad

Elaboración: Propia

**Tabla N° 42: Parámetros de operación**

Etapas	Longitud (km)	Estaciones	Año
Inicio de operación (E. Gambetta- E. Carmen de la Lengua y E. José de Sucre - E. La Molina)	20.2	22	2024
Inicio de operación (E. Gambetta - E. Mercado Santa Anita)	30.5	28	2025

Tipo de día	Total días/año	% Demanda respecto a día laborable*	Equivalente en día laborables
Lunes a viernes	251	100%	251
Sábados	52	96%	50
Domingos y feriados	62	55%	34
Total anual	365		335

\* Caso Línea 1

Distribución de usuarios según tipo de tarifa	Porcentaje
Adultos	93.0%
Medios	7.0%

Tipo de usuario	Tarifa (USD)
Adultos	1.0
Medios	0.5

Similar Línea 2

<b>Tarifa Equivalente</b>	<b>0.97</b>
---------------------------	-------------

Elaboración: Propia

Por lo tanto, al ingresar los parámetros en el modelo financiero (Excel), se tiene obtuvo los flujos de caja para la evaluación económica y financiera del proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao:

**Tabla N° 43: Flujo de Caja Económico, Flujo de Financiamiento Neto y Flujo de Caja Financiero del proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao (USD millones)**

Año	Flujo de Caja Económico	Flujo de Financiamiento Neto	Flujo de Caja Financiero
2020	-1259	324	-934
2021	-1259	296	-963
2022	-1259	267	-991
2023	-1245	178	-1066
2024	-792	93	-699
2025	221	-129	91
2026	223	-131	91
2027	224	-133	91
2028	226	-135	91
2029	229	-138	91
2030	230	-140	90
2031	231	-143	88
2032	232	-146	86
2033	233	-149	83
2034	234	-153	82
2035	82	-127	-45
2036	238	-125	113
2037	238	-91	147
2038	237	-55	181
2039	236	-26	210
2040	235	-3	232
2041	233	-3	231
2042	232	-3	229
2043	231	-3	228
2044	236	-3	233
2045	236	-3	233
2046	206	-3	202
2047	195	-3	192
2048	193	-3	190
2049	191	-3	188
2050	189	-3	186
2051	188	0	188
2052	186	0	186
2053	184	0	184
2054	182	0	182
2055	598	0	598

Elaboración: Propia

A los flujos de caja del cuadro anterior, se le aplicó el VAN a una tasa de 11% para el valor actual neto económico y 8% para el valor actual neto financiero, indicados en los parámetros del modelo financiero, se obtiene los siguientes indicadores de rentabilidad:

**Tabla N° 44: Indicadores de rentabilidad privada**

	VAN	TIR
Económico	-3217	1.1%
Financiero	-2762	0.5%

Elaboración: Propia

Del cuadro anterior, se observa que los valores actuales netos son menores que cero, así como también las tasas de retorno son muy bajas, por lo tanto, el proyecto no es rentable con una tarifa de un (1) dólar como pasaje.

Se realizó el análisis de punto crítico para la variable tarifa de tal manera que el valor actual neto económico sea cero, siendo el resultado que la tarifa mínima debe ser 4.16 dólares para que el proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao sea autosostenible.

Ahora bien, considerando que el transporte en líneas metro es un servicio público, por lo tanto, la tarifa debe ser social, esta se implementaría a través de mecanismo de subsidios del Estado, con la finalidad de incentivar el uso de los sistemas de transporte masivo, es así que la Línea 4 del Metro de Lima y Callao debe ser un proyecto subsidiado. Ya que este tipo de sistema de transporte permitirá reducir las principales externalidades negativas asociados al transporte como la contaminación, los accidentes y congestión vehicular.

## CONCLUSIONES

- Las teorías descritas en el presente trabajo han sido útiles para entender el proceso de diseño y construcción de servicios ferroviarios mediante simulaciones.
- El software de simulación ferroviaria, Opentrack, es una herramienta eficiente para la elaboración de servicio ferroviario, pues permite el modelamiento de infraestructura, definición del material rodante, definición de horarios y simulación de diferentes escenarios de servicios ferroviarios; convirtiéndose en una herramienta útil para la planificación de la operación de un sistema de transporte masivo como el metro, tanto en líneas metro en operación o en el proyecto de nuevas líneas metro.
- El tiempo de viaje estimado para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao, que recorrerá una distancia de 30.5 km a lo largo de 28 estaciones, resulta 48.42 minutos con una velocidad comercial de 37.79 km/h (superior al mínimo 36 km/h) y un consumo promedio de energía de tracción de 848.95 kWh por el recorrido entre estaciones terminales; asimismo, el costo estimado de un servicio ferroviario, operación y mantenimiento, resulta S/ 48.94 por kilómetro tren recorrido para el año 2025. Por lo tanto, los resultados de la simulación indican que la infraestructura de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao deben dimensionarse para una flota total de 55 trenes, de los cuales 50 estarán en operación en la línea a intervalos de 2 minutos en hora punta, y una capacidad de 26 trenes en el Patio Taller de La Molina y de 26 en Bocanegra los cuales permitirán garantizar la funcionalidad operativa de la Línea 4.
- El Proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao resulta rentable socialmente, pero no es desde el punto de vista de evaluación privada para una tarifa de un dólar como pasaje. Para que sea autosostenible la tarifa debe ser de al menos 4.16 dólares. Este valor resultaría muy caro para un servicio público de transporte como el metro, por lo que la tarifa debe ser social o subsidiado.



## RECOMENDACIONES

- La elaboración de servicios ferroviarios mediante simulaciones involucra conocer las teorías tales como: principio de diseño de horarios, modelamiento de la infraestructura, dinámica del tren y la simulación, por lo tanto, se recomienda a las universidades involucradas en formación de profesionales en transportes, en operaciones ferroviarias, la enseñanza en forma integral.
- Es de suma importancia el uso de herramientas de simulación para la planificación de operaciones ferroviarias debido que ayudan en la elaboración y evaluación de los servicios de diferentes ferroviarios, el análisis del comportamiento de diferentes trenes en operación, análisis de diferentes alternativas de señalización, cambiavías y la modificación o cambios en la infraestructura en forma eficiente para la toma de decisiones, por ello se recomienda la aplicación de softwares de simulación a las empresas que prestan servicio ferroviario en nuestro país, así como también a las universidades para temas de investigación.
- Se recomienda considerar los resultados obtenidos en el presente trabajo para la evaluación del informe relacionado a la funcionalidad operativa de la Línea 4 que presentará el Consorcio L-4-L en el marco de la Consultoría Integral del Concurso de Proyectos Integrales para la Concesión de la Línea 4 de la Red Básica del Metro de Lima y Callao.
- Se recomienda la realización del proyecto de la Línea 4 del Metro de Lima y Callao, ya que este sistema apunta a reducir las principales externalidades negativas asociados al transporte como la contaminación, los accidentes y congestión vehicular. Asimismo, con el desarrollo del proyecto los usuarios tendrán beneficios directos tales como ahorro en tiempos de viajes. Por lo tanto, se mejorará la calidad de vida de los usuarios de Lima Metropolitana y Callao. El Estado deberá incentivar, mediante subsidios, la ejecución de proyectos que generen beneficios directos, indirectos y externalidades positivas, tal es el caso de una línea metro.

## BIBLIOGRAFÍA

- Autoridad Autónoma del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao. (2015). *Opinión Técnica respecto a la Adenda N° 4 al Contrato de Concesión de la Línea 1 (Informe N° 135 -2015-MTC/33.9)*. Lima.
- Bachiller, A. (2014). *Módulo 3: Explotación Ferroviaria [Diapositivas en PowerPoint]*. Obtenido de [http://www.camins.cat/emailings/Cursos/Curs\\_ferrovieri\\_2014/ponencies\\_web/25.4.14/Senyalizacion\\_ATO\\_Bachiller\\_25.4.14.pdf](http://www.camins.cat/emailings/Cursos/Curs_ferrovieri_2014/ponencies_web/25.4.14/Senyalizacion_ATO_Bachiller_25.4.14.pdf)
- Beltrán Barco, A., & Cueva Beteta, H. (2018). *Evaluación Privada de Proyectos* (4 ed.). Lima: Universidad del Pacífico.
- Consortio Geodata Esan y Serconsult. (2013). *Informe 4 - Anexo 02 - Dimensionamiento Anteproyecto - 2.02 - Simulación de la operación ferroviaria*. Lima.
- Contrato de Concesión de la Línea 2 del Metro de Lima y el Ramal de la Línea 4. (2014). *Anexo 6*. Lima.
- Cosandy, E., & Joris, P. (2016). *Using simulation to predict the impact of upgrades [Usando simulación para predecir el impacto de las actualizaciones]*. SMA and Partners Ltd, Zurich. Obtenido de [http://sma-partner.com/images/Downloads/SMA\\_Metro\\_Report\\_Dec2016.pdf](http://sma-partner.com/images/Downloads/SMA_Metro_Report_Dec2016.pdf)
- Euroestudios, Geocontrol Andina, Geocontrol, Tec-Cuatro, Consultoria Kapak, Logit Eng. Cons. y Cursor [Consortio L-4-L]. (2017). *Estudio de Preinversión a nivel de Factibilidad (Informe N° 3 : DF-I03-ANX-01-v03 - Anexo 01: Estudio de Demanda)*. Lima.
- Ferruccio, C. (2013). *Bottura Effetti Della Manutenzione Del Gestore Dell Infrastruttura Ferroviaria Sulla Circolazione dei Treni [Efectos de Gestión de Mantenimiento de la Infraestructura en la Circulación de los Trenes]*. (Master Thesis). Politecnico di Milano, Milan. Obtenido de [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/85305/5/2013\\_10\\_Bottura.PDF.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/85305/5/2013_10_Bottura.PDF.pdf)
- Fontaine, E. R. (2008). *Evaluación social de proyectos* (13 ed.). México: Pearson. Educación de México S.A. Obtenido de <http://www.economicas.unsa.edu.ar/iie/Archivos/Fontaine.pdf>
- Ghaemi, N. (2011). *Railway Microscopic Simulation Framework for Simulation and Gaming Studies [Esquema de simulación microscópica ferroviaria para estudios de simulación y juegos]*. (Master Thesis). TU Delft, Delf, The Netherlands. Obtenido

de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A770eb833-0801-4b89-b337-d54d2756bcac>

- Goverde, R. M. (2005). Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis [Puntualidad de las operaciones ferroviarias y análisis de estabilidad del tiempo]. (*PhD Thesis*). TU Delft, Delft, The Netherlands. Obtenido de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a40ae4f1-1732-4bf3-bbf5-fdb8dfd635e7?collection=research>
- Krause, C. (2014). Simulation of dynamic station dwell time delays on high frequency rail transport systems. (*Master Thesis*). KTH Royal Institute of Technology, Stockholm. Obtenido de [https://www.kth.se/polopoly\\_fs/1.491069%21/X14\\_016\\_report.pdf](https://www.kth.se/polopoly_fs/1.491069%21/X14_016_report.pdf)
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2011). Recuperado el 12 de 11 de 2018, de [https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv\\_publica/docs/anexos/2014/Anexo-SNIP%2010-Parámetros-de-Evaluaci-actualizado-VST-setiembre%202014.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/anexos/2014/Anexo-SNIP%2010-Parámetros-de-Evaluaci-actualizado-VST-setiembre%202014.pdf)
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2015). Recuperado el 2018 de 12 de 15, de [https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv\\_publica/docs/novedades/2015/guia\\_general.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/novedades/2015/guia_general.pdf)
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2017). Recuperado el 2018 de 12 de 15, de [https://www.mef.gob.pe/contenidos/archivos-descarga/anexo3\\_directiva002\\_2017EF6301.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/archivos-descarga/anexo3_directiva002_2017EF6301.pdf)
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2010). Obtenido de [http://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_ferrocarriles/documentos/D.S.%20039-2010-MTC%20RNSETPVFSFN.PDF](http://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_ferrocarriles/documentos/D.S.%20039-2010-MTC%20RNSETPVFSFN.PDF)
- Nan, H. (2011). Modelling Driving behavior in OpenTrack [Modelado del comportamiento de la conducción en OpenTrack]. (*Master Thesis*). TU Delft, Delft, The Netherlands. Obtenido de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a3e57a00-a76c-4981-b643-01cc4ad92992?collection=education>
- Opentrack. (2018). *Opentrack*. Obtenido de [http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack\\_e/opentrack\\_e.html](http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html)
- OSITRAN. (2016). *Informe de Desempeño - Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1*. Lima. Obtenido de [https://www.ositran.gob.pe/joomlatoools-files/docman-files/RepositorioAPS/0/0/par/000001-TEMP/INFORMES/ID2016\\_LINEA1\\_GYM.pdf](https://www.ositran.gob.pe/joomlatoools-files/docman-files/RepositorioAPS/0/0/par/000001-TEMP/INFORMES/ID2016_LINEA1_GYM.pdf)

- Pachl, J. (2014). Timetable Design Principles [Principio de diseño de horarios]. En I. A. Hansen, J. Pachl, & (eds.), *Railway Timetabling & Operations [Horarios y Operaciones Ferroviarias]* (2 ed., págs. 14-45). Hamburg, Germany: Eurailpress.
- Proinversión. (2014). *Bases Integradas: Concurso Público N° 016-2014 - Contratación de un Consultor Integral del Concurso de Proyectos Integrales para la Concesión de la Línea 4 de la Red Básica del Metro de Lima y Callao*. Lima.
- Radtke, A. (2014). Infrastructure Modelling [Modelamiento de la Infraestructura]. En I. A. Hansen, J. Pachl, & (eds.), *Railway Timetabling & Operations [Horarios y Operaciones Ferroviarias]* (2 ed., págs. 48-57). Hamburg, Germany: Eurailpress.
- Railssystem. (2018). Recuperado el 2018 de 3 de 25, de <http://www.railssystem.net/european-rail-traffic-management-system/>
- Railssystem. (2018). Recuperado el 2018 de 3 de 25, de <http://www.railssystem.net/metro-automation/>
- Siefer, T. (2008). Simulation [Simulación]. En I. A. Hansen, J. Pachl, & (eds.), *Railway Timetable & Traffic [Horario Ferroviario y Tráfico]* (pág. 155). Hamburg: Eurailpress.
- Soublette, G. A. (2011). Sistemas de Recuperación de Energía para la Línea 1 del Metro de Santiago. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Chile, Santiago de Chile. Obtenido de [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-soublette\\_gc/pdfAmont/cf-soublette\\_gc.pdf](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-soublette_gc/pdfAmont/cf-soublette_gc.pdf)
- Transit Cooperative Research Program. (2013). Rail Transit Capacity. En T. C. Program, *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (3 ed., pág. 91). Transportation Research Board. Obtenido de [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp\\_rpt\\_165ch-08.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_165ch-08.pdf)
- Watson, R., & Medeossi, G. (2014). Simulation [Simulación]. En I. A. Hansen, J. Pachl, & (eds.), *Railway Timetabling & Operations [Horarios y Operaciones Ferroviarias]* (2 ed., págs. 191-199). Hamburg, Germany: Eurailpress.
- Wikipedia. (2018). Recuperado el 3 de 25 de 2018, de [https://en.wikipedia.org/wiki/International\\_Union\\_of\\_Railways](https://en.wikipedia.org/wiki/International_Union_of_Railways)

# ANEXOS

## INDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1: Modelo de Transporte .....	2
Anexo N° 2: Documentación fuente para la modelación de la infraestructura y definición del .....	24
Anexo N° 3: Libro de vías de Línea 4 del Metro de Lima y Callao .....	26
Anexo N° 4: Estimación de costos de operación y mantenimiento para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao – OPEX.....	34

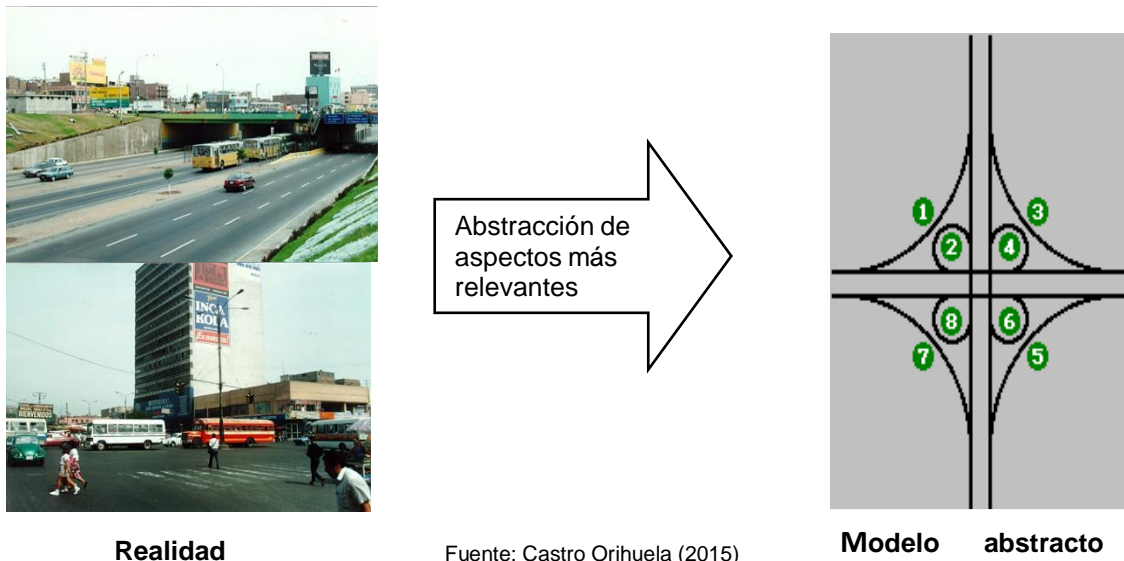
## Anexo N° 1: Modelo de Transporte

El objetivo del siguiente documento es explicar la aplicación del modelo de transporte para la estimación de la demanda en la Línea 4 del Metro de Lima, el desarrollo está basado en las presentaciones (diapositivas) denominado “Modelación de Transporte” en 2012 para la Universidad Nacional Federico Villareal por parte del ingeniero Ivo D. Díaz Ortega y las presentaciones (diapositivas) denominado “Seminario-Taller: Modelo de Demanda de Transporte” en 2015 para la Unidad Gerencial de Desarrollo de la Autoridad Autónoma del Tren Eléctrico presentado por el Ing. Alfonso Castro Orihuela así como también de la tesis para optar del título de ingeniero civil denominado “Modelación de una red de transporte universitaria mediante el software VISUM 15” de María Teresa Ruiz Salinas en el año 2017 en la Pontificia Universidad Católica del Perú.

### MODELO DE TRANSPORTE

Los modelos son instrumentos que permiten predecir el comportamiento de ciertas variables. El modelo de transporte es un modelo abstracto en la cual la situación real se representa por símbolos (digitales - computacional) y no por mecanismos físicos. De este modo son muchos más útiles para el planificador, ya que trasladan su atención desde los aspectos tridimensionales del diseño a la representación de relaciones funcionales y a los procesos básicos de cambio en los sistemas analizados. Por lo tanto, el modelo de transporte es una herramienta de apoyo y/o complemento en las labores planificación, por lo que se utiliza para estimar la demanda.

Figura N° 1: Esquema de representación de la realidad mediante modelo



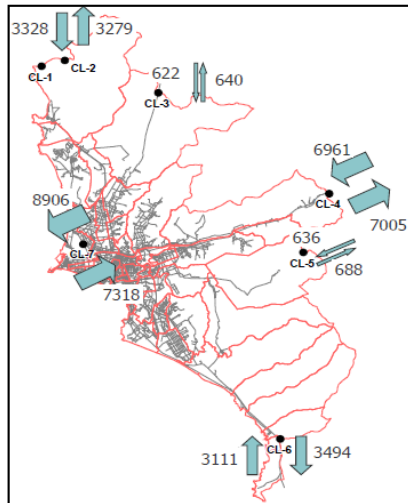
Fuente: Castro Orihuela (2015)

1.

## 2. COMPONENTES DEL MODELO DE TRANSPORTE

**Área de estudio:** Es el área de representación de modelo de transporte, generalmente es un área de influencia de diferentes modos de transporte. El área de estudio se fragmenta en diferentes zonas dentro del modelo de transporte para poder realizar con mayor precisión las estimaciones de la demanda.

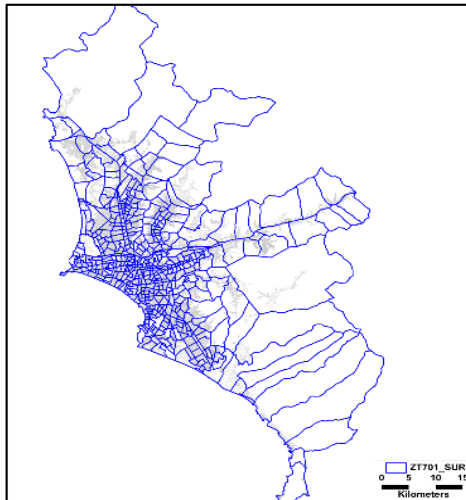
**Figura N° 2: Representación del área de estudio**



Fuente: Díaz Ortega (2012)

**Zonificación:** La zonificación consiste en la división del área de estudio en áreas menores de características homogéneas. Se usa criterios como: barreras físicas existentes (manzanas, avenidas, etc.), características socioeconómicas de las áreas, accesibilidad de las áreas, etc.

**Figura N° 3: Representación de la zonificación**

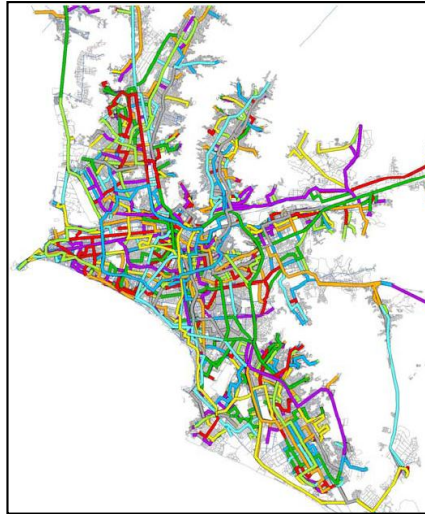




Fuente: Díaz Ortega (2012)

**Sistema de Rutas:** Representa el trazado de los recorridos de los sistemas de transporte tales como: Metro, BTR, corredores complementarios, buses, etc. mediante líneas de ida y vuelta.

**Figura N° 4: Representación del Sistema de Rutas**

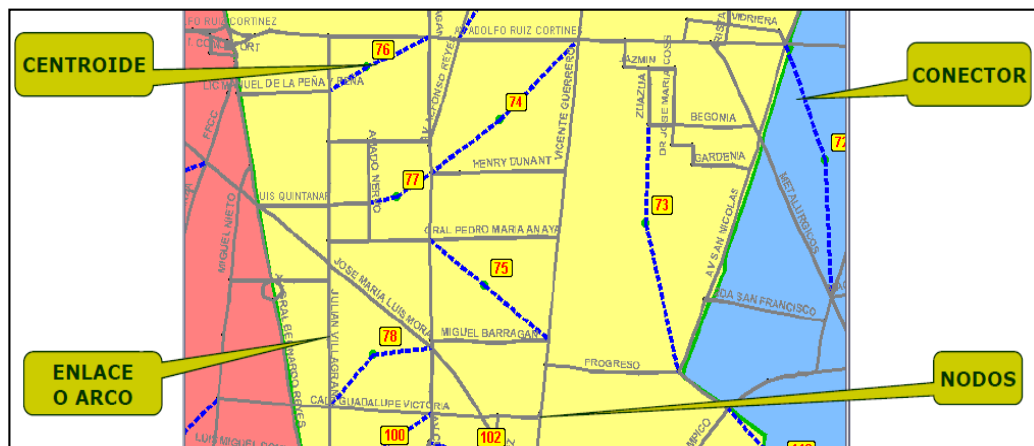


Fuente: Díaz Ortega (2012)

**Red Vial:** Es la representación sistema de rutas de servicio privado y público de sistemas de transporte con las siguientes características:

- Itinerario de la línea y paradas.
- Frecuencia de servicio reflejada como tiempo de espera (min) en HPM, HPT y HV.
- Tarifas de viaje según tipo de sistema de transporte
- Tiempos y velocidad por tipo de sistema de transporte

**Figura N° 5: Representación de la Red Vial**



### 3. INFORMACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA

**LA INFORMACIÓN PRIMARIA:** Se requiere información de los usuarios, oferta de rutas, vial y la información para la realización de pronósticos, a continuación se enuncia el componente de cada tipo de información requerida:

#### De los usuarios

- **Encuestas Origen-Destino en hogares (EODH)**

Esta encuesta domiciliaria, cubre todos los desplazamientos efectuados por todos los miembros del hogar en uno o más días de encuesta. Por su naturaleza son muy eficientes para generar datos que permitan estimar posteriormente modelos de generación de viajes y partición modal; además entregan buena información sobre la distribución de longitudes de viajes en la ciudad, elemento importante en la estimación de modelos de distribución.

- **Encuestas Origen-Destino de interceptación (EODI)**

Estas son encuestas más breves, realizadas en un punto que intercepta desplazamientos de las personas. Las más comunes son las encuestas a la vera del camino, a bordo de vehículos de transporte público o en puntos de intercambio modal (por ejemplo, estaciones de buses o aeropuertos); a menudo se organizan en torno a cordones externos y líneas pantalla (aprovechando barreras naturales como ríos, ferrocarriles o autopistas). Por su naturaleza sólo entregan información sobre un desplazamiento (el observado al momento en que cada persona es encuestada), pero son un importante elemento de apoyo al proceso de generación de matrices de viajes. Además, las EODI constituyen la mejor fuente de información sobre viajes de personas que no residen en el área de estudio.

- **Encuestas de Preferencias Declaradas**

Esta encuesta permite la obtención de las preferencias de los usuarios de ómnibus, BTR, metro, taxis y automóviles privados. Así como también la determinación del perfil socioeconómico de los usuarios.

Mediante esta encuesta se obtiene la estimación de los parámetros de las funciones de utilidad (U) de cada modo con base en las preferencias de los usuarios, considerando la influencia del precio del pasaje (o del costo percibido por el usuario del vehículo privado), del tiempo de viaje y del tiempo de espera.

Finamente la estimación de las probabilidades de seleccionar cada modo, a través de la utilización del modelo Logit.

#### **Oferta Vial**

- Características de Red Vial
- Vialidad de caminata
- Capacidad Vial
- Conteos vehiculares
- Tiempos de Viaje

#### **Oferta de Rutas**

- Cantidad de Rutas
- Flota de transporte
- Tipos de vehículos
- Frecuencia de Paso

#### **INFORMACIÓN SECUNDARIA:**

##### **Información para Pronósticos**

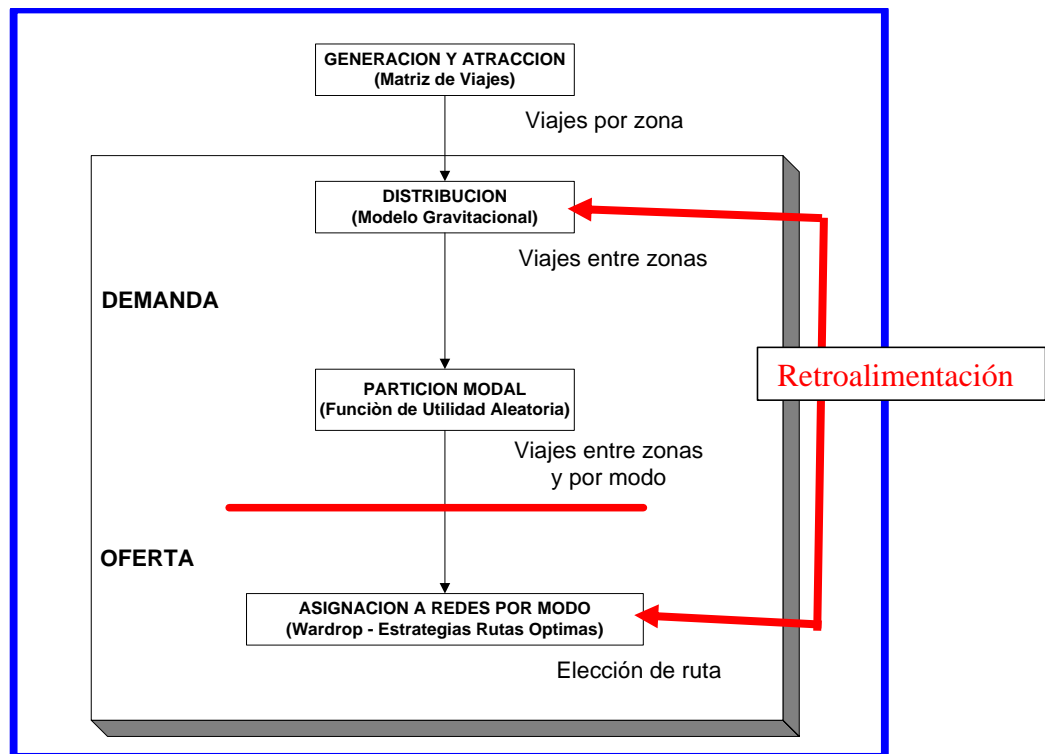
- Datos socioeconómicos (población, empleo, educación, etc.)
- Tasa de motorización
- Uso de suelo
- Actividades económicas y productivas
- Equipamiento Urbano
- Tendencias
- Proyectos viales

### Información histórica de transportes

- Estudios de planes de transporte
- Estudios viales y movilidad
- Información de las Instituciones del Estado y Privadas (datos espaciales y locales)

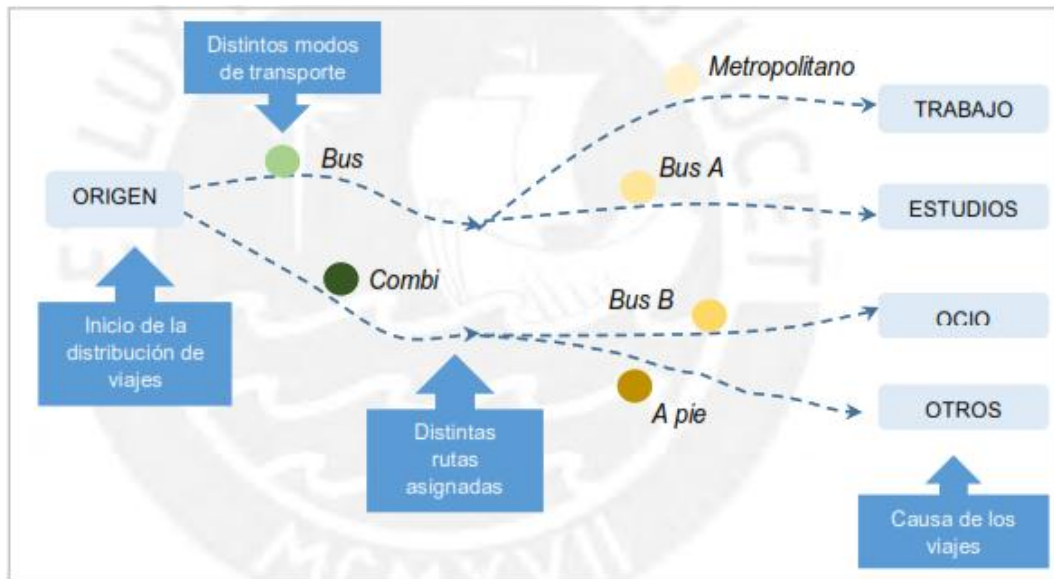
## 4. MODELO CLASICO DE TRANSPORTE DE 4 ETAPAS

Figura N° 6: Esquema de representación del modelo de transporte clásico de transporte de 4 etapas



Fuente: Castro Orihuela (2015)

Figura N° 7: Esquema de las 4 etapas del Modelo Clásico de planificación del Transporte



Fuente: Ruiz Salinas (2017)

### ETAPA 1: GENERACIÓN Y ATRACCIÓN

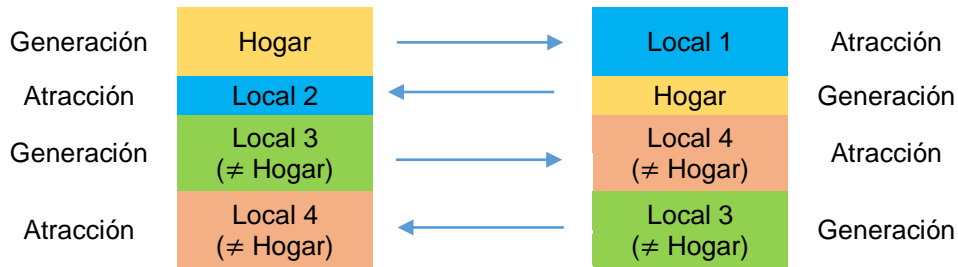
Los viajes en un sistema de transporte ocurren entre dos entes determinantes: un origen (O) y un destino (D), por la existencia de múltiples orígenes y destinos, se emplea la notación:  $O_i$  y  $D_j$ ; sin embargo, la palabra clave que define a estos dos entes, son “generación” y “atracción”. Generación hace referencia al lugar desde donde se originan los viajes, y atracción se refiere al lugar de destino que provocó el viaje.

La primera etapa del modelo de transportes se centra en estimar la frecuencia de viajes que ocurren entre distintas zonas, lo cual, a su vez, permite conocer los principales polos generadores de viajes dentro del área de estudio. Por lo que, resulta muy importante el muestreo y la toma de datos representativos de la realidad del área de estudio.

Las variables que se considera para la toma de información son generalmente:

- El número de viajes
- Tiempo de viaje
- Costo de viajes
- Numero de transbordos
- Propósito de viajes
- Propiedad vehicular
- Variables socioeconómicas y demográficas.

**Figura N° 8: Esquema de generación y atracción de viajes**



Fuente: Adaptado de Ruiz Salinas (2017)

## ETAPA 2: DISTRIBUCIÓN

Como se ha indicado en la primera etapa se identificó los principales polos generadores con sus respectivas frecuencias de viajes, por lo que el siguiente paso es distribuir esta data entre pares de zonas, con un origen y destino específico.

Para la distribución de viajes la variable relevante es el costo de viaje, el cual puede ser un costo en términos monetarios o de tiempo de viaje mediante esta variable se logra obtener un reflejo más fiel del patrón de viajes, entre cada par origen-destino.

El objetivo de la distribución se centra en determinar la cantidad de viajes producidos y atraídos en cada una de las zonas del área de estudio, para un periodo futuro.

Se utilizan varios métodos tales como:

- Ley de Gravedad
- Factor de crecimiento
- Ley de oportunidades intervinientes
- Furness
- Etc.

De esta repartición de viajes, se genera una Matriz de Demanda llamada también Matriz Origen-Destino (OD), cuya composición es la siguiente:

**Figura N° 9: Matriz de demanda**

Generaciones (Orígenes)	Atracciones (Destinos)							$\sum_j T_{ij}$
	1	2	3	...	j	...	J	
1	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	...	$T_{1j}$	...	$T_{1J}$	$O_1$
2	$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{23}$	...	$T_{2j}$	...	$T_{2J}$	$O_2$
3	$T_{31}$	$T_{32}$	$T_{33}$	...	$T_{3j}$	...	$T_{3J}$	$O_3$
:	:	:	:					:
i	$T_{i1}$	$T_{i2}$	$T_{i3}$	...	$T_{ij}$	...	$T_{iJ}$	$O_i$
:	:	:	:					:
I	$T_{I1}$	$T_{I2}$	$T_{I3}$	...	$T_{Ij}$	...	$T_{IJ}$	$O_I$
$\sum_i T_{ij}$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	...	$D_j$	...	$D_J$	$\sum_i \sum_j T_{ij} = T$

Fuente: Adaptado de Ruiz Salinas (2017)

A continuación se describen los métodos indicados como resumen:

### Factor de crecimiento

A partir de una matriz de demanda predecesora “t” se obtiene la matriz “T”, mediante la aplicación de un factor de crecimiento, el cual puede ser:

**Factor uniforme de crecimiento:** Se aplica para periodos cortos de estudio, entre uno a dos años, en que se ha estimado la razón de crecimiento general del número de viajes.

**Factor de restricción simple:** Se conoce el crecimiento final, en un determinado periodo, de los viajes de origen i o de los viajes con llegada a j, por lo que, se afecta el total parcial de una de dichas variables, buscando lograr el crecimiento final indicado.

**Factor de restricción doble:** Se conoce el crecimiento final tanto de los viajes atraídos a cada destino j como los viajes originados de cada zona i, por lo tanto, para cumplir las dos condiciones simultáneamente, la matriz final T se logra mediante iteración.

### Método de Furness

Análogo al factor de crecimiento doble, pero incorpora dos factores de balance denominados:  $A_i$  y  $B_j$ , por lo que la matriz se calcula mediante la fórmula:

$$T_{ij} = t_{ij} * A_i * \frac{O_i}{o_i} * B_j * \frac{D_j}{d_j}$$

Donde  $\frac{O_i}{o_i}, \frac{D_j}{d_j}$  son los factores de crecimiento y

$$A_i = \frac{o_i}{\sum_j d_j * t_{ij} * B_j * \frac{D_j}{d_j}}$$

$$B_j = \frac{d_j}{\sum_i o_i * t_{ij} * A_i * \frac{O_i}{o_i}}$$

### Ley de Gravedad

Este método se diferencia de los métodos de factor de crecimiento ya que considera los posibles cambios que pueden existir en la red de transporte, a través de una función de denominado “Costo Generalizado de viaje”.

La ley de gravedad emplea la cantidad de viajes finales en las zonas de origen y destino y se insertan las variables  $O_i$  y  $D_j$ . La función “Deterrence Function”  $f(C_{ij})$ , muestra la disminución del deseo de realizar un viaje cuando la distancia hacia el destino y el costo aumentan.

Finalmente, para incluir las condiciones de simple y doble restricción cuando se cuenta con la estimación del crecimiento de viajes, se incorporó los factores de balance, vistos en el Método de Furness.

A continuación, se ilustra las variaciones de la ley de gravedad:

**Figura N° 10: Variaciones de la ley de gravedad**



Ley de Gravedad Inicial	Ley de Gravedad con Deterrence Function	Ley de Gravedad con Doble Restricción
$T_{ij} = \frac{\alpha * P_i * P_j}{d_{ij}^2}$	$T_{ij} = \alpha * O_i * D_j * f(C_{ij})$	$T_{ij} = A_i * O_i * B_j * D_j * f(C_{ij})$
P <sub>i</sub> : Población de la zona de origen i P <sub>j</sub> : Población de la zona de destino j d <sub>ij</sub> : Distancia entre zona i y j α: Constante de proporcionalidad	Variaciones de Deterrence Function  $f(C_{ij}) = \begin{cases} e^{-\beta * C_{ij}} \\ C_{ij}^{-\eta} \\ C_{ij}^{\eta} * e^{-\beta * C_{ij}} \end{cases}$ C <sub>ij</sub> : Costo generalizado del viaje de i a j β y η: Constantes de proporcionalidad	Factores de Balance  $A_i = \frac{1}{\sum_j B_j * D_j * f(C_{ij})}$ $B_j = \frac{1}{\sum_i A_i * O_i * f(C_{ij})}$

Fuente: Ruiz Salinas (2017)

### Ley de Oportunidades Intervinientes

Bajo esta ley se relaciona la probabilidad de viaje entre un punto de origen y uno de destino con la población de la zona de origen y las posibilidades de que ocurra el viaje entre el punto de origen al punto de destino en base a las oportunidades presentes en la zona de destino, lo que antes llamamos de “atracción”, por ejemplo, oportunidades laborales, académicas, comerciales, etc.

### ETAPA 3: PARTICIÓN MODAL

Como en las primeras dos etapas ya se ha definido la frecuencia de viajes y los pares de zonas O-D, ahora se busca asociar esta información a las posibilidades de elección de modos de transportes para realizar el trayecto.

Los modelos que se utilizan en esta etapa para la partición modal son:

- Partición Modal de Final de viaje
- Partición Modal de Intercambio de viaje
- Demanda Directa.
- Sintéticos

**El Modelo de Fin de viaje**, introduce la partición modal luego de la generación de viajes, el input de información resulta limitado a las características de la población en estudio.

**El Modelo de Intercambio de Viaje**, introduce la partición modal luego de la distribución de viajes, pierde la relevancia de las características de la población.

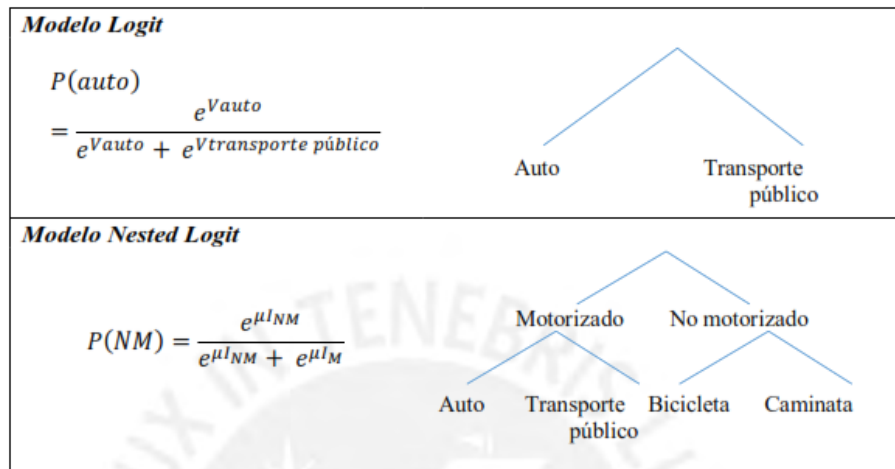
**El Modelo de Demanda Directa**, carece de las mismas limitaciones que los modelos anteriores debido a que son modelos agregados, es decir la unidad de estudio son el conjunto de entes a tomar la decisión, usualmente zonas.

**Los Modelos Sintéticos**, son modelos desagregados donde la unidad de estudio es individualmente la persona a tomar la decisión del modo de transporte que empleará y se apoyan en procedimientos estadísticos para prever la probabilidad para un sujeto de estudio de elegir un modo de transporte frente a distintas alternativas y con características que intervienen en su comportamiento y su decisión. Los modelos utilizados son los modelos logit:

- Modelo **estándar logit**, se usa para dos alternativas excluyentes de elección.
- Modelo **Multinomial Logit**, se usa para alternativas que son independientes, y además los residuos están idénticamente distribuidos, por lo tanto, la probabilidad de elegir algún modo de transporte dependerá básicamente del número de opciones, sin alguna ponderación.
- Modelo **Hierarchical or Nested Logit**, surge especialmente para los casos en que las preferencias entre personas cambian o cuando las alternativas no son completamente independientes entre sí, sino más bien, la probabilidad de elegir entre distintas alternativas de transportes que guardan relación o similitudes, de modo que es posible de que sean agrupadas.

Por lo tanto, los modelos de elección discreta describen el proceso de selección de dos o más alternativas de tal manera que la alternativa seleccionada en cada caso será aquella que maximice la utilidad esperada. La utilidad de cada alternativa es estimada por una parte determinística y otra estocástica.

**Figura N° 11: Modelos de elección discreta**



Fuente: Ruiz Salinas (2017)

#### ETAPA 4: ASIGNACIÓN DE VIAJES

Es la última etapa del modelo de transporte en la cual se elige la ruta, las variables relevantes en esta etapa es el *tiempo de viaje* y el *costo monetario*, el cual, a su vez, generalmente se expresa en relación a la distancia de viaje. Se parte de que todos los usuarios buscan encontrar la ruta con el menor costo generalizado, el principio que rige esta etapa será el punto de equilibrio, lo que implica que todas las rutas utilizadas para un determinado par O-D tienen igual menor costo.

La condición de este equilibrio ha sido desarrollada bajo tres métodos: determinístico, estocástico y dinámico.

La diferencia radica en que los métodos estocásticos incorporan la variabilidad en percepción del menor costo de viaje que poseen las personas. A continuación, se presenta una breve descripción de algunos de los métodos.

##### **Todo o Nada o El camino más corto (Determinístico)**

Se asume que todos escogerán aquella ruta con el menor costo generalizado de viaje.

Este método no considera la restricción de la capacidad de cada vía. Es irreal pues omite la selección de ruta como una variable aleatoria entre las personas.

##### **Equilibrio de Wardrop**

Modelo determinista, pero incorpora, la restricción generada por la capacidad de las vías. Por lo tanto, las personas cambiarán de ruta a medida que sobrepasan la capacidad de la elegida inicialmente.

Cuando esta situación ocurre, se está viendo afectado el costo generalizado de la ruta. En un principio, la ruta preferida será la de menor costo en unidades de tiempo o unidades monetarias. En base a esta dinámica, se determina la condición de equilibrio, según los dos principios enunciados por Wardrop (1952):

**Primer Principio:** Cada conductor se encuentra en aquella ruta que significa su menor costo, por ende, el tiempo de viaje en todas las rutas es el mínimo de modo que a su vez sea el mismo para todos.

**Segundo Principio:** El costo general promedio en la red de transporte es el mínimo, es decir, el equilibrio ocurrirá cuando la suma de los tiempos empleados por los vehículos en las distintas rutas sea el menor. Por lo tanto, no todas las rutas tendrán el mismo tiempo de viaje.

**Figura N°12: Ejemplo de principios de Wardrop**

PRIMER PRINCIPIO	SEGUNDO PRINCIPIO
<p> <math>T_a = 12 + 0.005V_a</math>                      Ruta 1                      Ruta 2  <math>T_b = 18 + 0.004V_b</math>  <math>V=3000\text{veh}</math> </p>	<p> <math>T_a = 12 + 0.005V_a</math>                      Ruta 1                      Ruta 2  <math>T_b = 18 + 0.004V_b</math>  <math>V=3000\text{veh}</math> </p>
$T_a = T_b \wedge V_a + V_b = 3000 \Rightarrow V_a = 2000 \wedge V_b = 1000, T_a = T_b = 22 \text{ minutos}$	$V_a * T_a + V_b * T_b = \text{MÍN} \wedge V_a + V_b = 3000 \Rightarrow V_a = 1500 \wedge V_b = 1500, T_a = 19.5 \wedge T_b = 24 \text{ minutos}$
Costo generalizado = $3000 * 22 = 66000 \text{veh-min}$	Costo generalizado = $1500 * 19.5 + 1500 * 24 = 65250 \text{-min}$ (menor en 750 veh-min)

Fuente: Ruiz Salinas (2017)

**Modelo Estocástico.**

El modelo incorpora la percepción de las personas frente a la acción de realizar un viaje y convierte al tiempo de viaje en una variable aleatoria distribuida en el grupo de estudio. La diferencia de apreciaciones por parte de los viajeros, implica que entre dos puntos de origen y destino no existe una única posibilidad de ruta, sino varias alternativas.

Uno de los primeros modelos es el de Asignación en trayectos múltiples. Este modelo considera cinco especificaciones prácticas. Primero, que las múltiples posibilidades de rutas deben tener una probabilidad distinta de cero de ser elegidas, es decir, alternativas razonables. Segundo, que rutas iguales tendrán una misma posibilidad de ser elegidas. Tercero, a mayor longitud de ruta se alejará

de ser una de las rutas preferidas por las personas. Cuarto, las curvas de desviación pueden ser controladas por el ingeniero modelando. Por último, no se enumeran las rutas posibles, ya que complicaría el trabajo de procesamiento.

Los modelos de asignación de tráfico se utilizan para estimar el flujo de tráfico en una red y permiten establecer los patrones de viajes y analizar los puntos de congestión. Los modelos de asignación toman como input una matriz de flujos que indica el volumen de tráfico entre pares origen-destino. Los flujos para cada par O-D se cargan en la red basándose en el tiempo de viaje o la impedancia de los caminos alternativos del viaje.

La asignación es un elemento fundamental en el proceso de previsión de la demanda de transporte urbano. El objetivo principal de la asignación es la estimación de los flujos en los diversos enlaces de la red de transporte, con base en las matrices de viajes por modo para cada par O/D considerado.

Como resultado de las tres etapas anteriores se tienen matrices de viajes totales por período, para cada uno de los modos analizados: público, carro, taxi. Para asignar los modos individuales a la red vial se deben tener sus matrices convertidas para el total de vehículos. Para esto se utilizan los factores de ocupación, los cuales fueron obtenidos a través de los aforos de ocupación de privado.

Los viajes se asignan en la red buscando el equilibrio.

## **5. CALIBRACIÓN**

La calibración tiene por objetivo reproducir la situación real de tiempos y volúmenes vehiculares en la red vial, verificando que los caminos en el modelo corresponden a las alternativas que efectivamente los usuarios utilizan para realizar sus desplazamientos.

Figura N° 13: Calibración de modelo de transporte



- El modelo debe tener causal adecuada
- Debe haber exactitud de replicación de los datos del año base (Calibración)
- Constancia en el tiempo de los parámetros. Es una hipótesis correcta? , Se mantendrá como el año base?...etc.

Fuente: Díaz Ortega (2012)

Mediante la calibración se busca:

*Vehículos Transporte Público Modelo ≈ Vehículos Transporte Público Reales*

*Aforos Autos Modelo ≈ Aforos Autos Reales*

*Tiempo Recorrido Modelo ≈ Tiempo Recorrido Reales*

*Caminos Modelo ≈ Caminos Reales*

### Métodos para validar los resultados:

#### Indicador GEH:

$$GEH(i) = \sqrt{\frac{(C_i - A_i)^2}{(C_i + A_i)/2}}$$

Dónde:  $C_i$  es el dato observado y  $A_i$  es el dato asignado por el modelo en el enlace  $i$ .

- El valor de  $GEH \leq 4$  para líneas cortinas, un corredor de interés de estudio.
- Al menos el 60% tengan  $GEH \leq 5$ .
- El 90% de casos el  $GEH \leq 10$
- El 100% de casos menor  $GEH \leq 12$

Finalmente, en el siguiente cuadro se muestra el tipo de observación o encuesta y su uso común en modelos de transporte:

<b>Tipo de observación o encuesta</b>	<b>Universo tipo para muestreo</b>	<b>Uso común de los datos en modelación</b>
Encuesta en Hogares	Hogares en un área determinada o personas en esa área	Modelos de generación, distribución, elección de modo y hora, modelos de comportamiento y actividades
Encuestas de Interceptación de Automóviles	Viajes en auto o flujo de autos en un segmento de la carretera	Matrices O-D de vehículos o personas, modelos de distribución, validación de modelos
Encuestas a Usuarios de Transporte Público (interceptación en vehículos o estaciones/paradas)	Viajes de pasajeros en un conjunto pre-especificado de servicios	Matrices O-D, elección modal
Encuesta a Vehículos de Carga/Comerciales	Vehículos de carga basados en un área y sus desplazamientos.	Matrices O-D, modelos de generación, distribución, hora del día, carga
Encuesta en Lugares de Trabajo y Grandes Generadores	Empleados y sus desplazamientos	Modelos de atracción
Encuestas a Instituciones, Hoteles y Visitantes	Residentes en instituciones, huéspedes de hotel y visitantes y sus desplazamientos en sectores pre-especificados	Matrices O-D, a veces modelos de visitantes
Aforos de Tráfico y Pasajeros	Desplazamientos de vehículos y/o personas en un sector pre-especificado	Validación de modelos y observaciones; actualización de matrices de viaje
Observaciones de Vehículo Flotante, Viajeros-Testigo	Desplazamientos de vehículos y/o personas en un sector pre-especificado	Calibración de redes, validación de modelos
Encuestas de Estacionamiento	Vehículos estacionados y su duración en un área predeterminada	Costos y duración de estacionamiento, modelos de estacionamiento

El Trabajo de campo para la toma de información lo realizó el Consorcio L-4-L (EUROESTUDIOS, GEOCONTROL ANDINA, GEOCONTROL, TEC-CUATRO, CONSULTORIA KAPAK, LOGIT ENG. CONS. Y CUSOR) en el marco de la “Consultoría Integral del Concurso de Proyectos Integrales para la Concesión de la Línea 4 de la Red Básica del Metro de Lima y Callao” presentó en agosto de 2016 el “INFORME N°2.1: ESTUDIO DE DEMANDA, ANÁLISIS DE TRÁFICO Y DESVÍOS, ESTUDIOS DE INGENIERÍA BÁSICA, ESTUDIO DE RIESGO SÍSMICO, IDENTIFICACIÓN DE PREDIOS AFECTADOS E IDENTIFICACIÓN DE INTERFERENCIAS / DF-I02\_1-ANX-01-V02 /ANEXO 01: ESTUDIO DE DEMANDA”, a continuación se resumen la información presentada:

## **CAMPAÑA DE TOMA DE INFORMACIÓN DE MOVILIDAD – LÍNEA 4 DEL METRO DE LIMA**

### **Conteos vehiculares y aforos de ocupación**

#### **Conteos vehiculares**

Fueron realizados conteos vehiculares y aforos de ocupación en diferentes puntos de corredor, cortina y cordón.

El estudio fue realizado durante 4 días (2 días atípicos y 2 días típicos), durante 16 horas por cada día, en ejes viales principales del proyecto, en 2 líneas de cortina y línea de cordón. Los puntos de conteo son clasificados de la siguiente forma:

1. **Conteos a lo largo del corredor:** Puntos de conteo que caracterizan el comportamiento de los ejes que componen las alternativas planteadas.
2. **Cortina:** Puntos de conteo que en su conjunto permiten dimensionar el total de viajes que pasan de una región interna a otra de la ciudad. Se realizaron dos líneas de cortina en este estudio.
3. **Cordón:** Puntos de conteo que permiten dimensionar el total de viajes externos que ingresan al área de estudio, así como viajes internos que salen de esta área.

En total fueron levantados 33 puntos de conteo, de los cuales 12 son de conteos a lo largo del corredor, 5 para Líneas de Cordón y 16 para Líneas de Cortina.

#### **Ocupación vehicular de particulares y taxis**

Los aforos de ocupación tuvieron por objetivo determinar el número promedio de pasajeros que viajan en cada tipo de vehículo, para poder determinar la carga de pasajeros en puntos determinados de la red dentro de un período de tiempo definido.

Planeación:

- **Muestra:** se realizó el inventario a todos los vehículos privados, taxi, moto lineal y moto taxi.
- **Periodo:** los registros se agrupan en periodos de cada 15 minutos.
- **Tiempo:** se desarrolló durante 1 día en horario partido de 07:00 horas a 10:00 horas, de 12:00 horas a 15:00 horas y de 17:00 horas a 20:00 horas.



- Lugar: Se desarrolló en 10 puntos de control.

#### **a) Frecuencia de paso y ocupación visual de rutas de transporte colectivo**

Se usó el método de inspección o contraste visual, el cual consiste en hacer una estimación del número de pasajeros transportados, comparando el nivel de ocupación que presenta el colectivo en el instante de paso por el punto de control con un patrón típico previamente definido en función de la capacidad nominal del vehículo.

La frecuencia y ocupación visual para el transporte colectivo se realizó al 100% de los vehículos de transporte colectivo, en 37 puntos, entre estaciones de cortina, cordón y de eje vial en los mismos periodos y horarios de los conteos vehiculares.

#### **b) Encuestas Origen Destino (EOD) a los usuarios del transporte colectivo, privado y taxi**

El estudio de campo de origen y destino tuvo como objetivo obtener datos del número y tipo de viajes en un área, incluyendo movimientos de vehículos y pasajeros, de varias zonas de origen a varias zonas de destino.

#### **OD para transporte colectivo**

Para usuarios de transporte colectivo, se realizaron encuestas dentro de las rutas de transporte colectivo que circulan en el eje vial de la línea 4 y en los paraderos.

Los ejes viales de la línea 4 se dividen en tramos estratégicos. Los aforadores abordan los vehículos y registran, adicional a la información indicada anteriormente, el tramo por donde circula la ruta, igualmente, cada parada encuestada también se clasifica dentro de su correspondiente tramo.

De esta forma, para cada encuesta se obtiene la información de origen y destino, y el tramo donde fue realizada la encuesta, lo que facilita los procesos de muestreo y expansión de la información.

En total se realizaron 7000 encuestas

Las preguntas realizadas fueron las siguientes:

- Tramo de encuesta
- Hora de encuesta
- Fecha de encuesta
- Ruta utilizada y sentido
- Sexo
- Domicilio

- Motivo de viaje
  - Trabajo
  - Estudios
  - Ocio
  - Otros
- Origen del viaje
- Destino del viaje
- Frecuencia de viaje
- Tiempo total de viaje
- Número de transbordos
- Costo total del viaje

### **OD para transporte individual (privado y taxi)**

Se realizó a través de la técnica de interceptación en intersecciones estratégicas de las vías del área de influencia de la Línea 4. La encuesta fue aplicada a usuarios de vehículo privado y taxi, durante un día útil.

En total se realizaron 3742 encuestas.

Las preguntas fueron las siguientes:

- Lugar de encuesta
- Hora de encuesta
- Fecha de encuesta
- Sexo
- Número de ocupantes del vehículo
- Motivo de viaje
  - Trabajo
  - Estudios
  - Ocio
  - Otros
- Origen del viaje
- Destino del viaje
- Tiempo de viaje

### **c) Velocidad y tiempo de viaje**

#### **Transporte Colectivo**

La metodología básica incluye el registro de los tiempos de viaje sobre las rutas en que se realizó los conteos de sube y baja de pasajeros. Para el desarrollo de esta actividad se contó con GPS Etrex30 de la marca Garmin.

#### **Transporte Individual**

Para la determinación de la velocidad de vehículos particulares se utilizó la metodología de vehículo flotante. El mismo consiste en la determinación del tiempo de viaje circulando con un auto dentro del flujo de tránsito, siguiendo el “pelotón” de vehículos que conforma la corriente de tránsito, es decir, sin sobrepasar ni dejarse sobrepasar por vehículos que conforman el flujo vehicular. Los vehículos iniciaron en los extremos del corredor durante los periodos punta. Para el desarrollo de esta actividad se contó con GPS Etrex30 de la marca Garmin.

#### **d) Sondeo de tarifas en rutas de transporte en los ejes de las alternativas planteadas**

El sondeo se realizó durante un día típico, mediante la interceptación de usuarios de transporte público en paradas a lo largo del corredor.

Los aforadores se distribuyeron en los paraderos preseleccionados. Se encuestó a los usuarios de transporte colectivo, indagando la ruta que van a tomar, la frecuencia del viaje, el punto de origen (correspondiente a la parada) y la parada de destino, así como la tarifa que normalmente pagan.

#### **e) Conteos sube y baja de pasajeros en líneas de transporte colectivo**

La metodología básica de elaboración de este estudio es la siguiente.

El aforador ingresa al vehículo, registra la ruta, periodo de aforo, número de pasajeros en el inicio del aforo.

En cada uno de los puntos de control se registran los pasajeros que suben y/o bajan

La recolección de información se realizó en los ejes viales del proyecto y en los ejes de alimentación. Para el desarrollo de esta actividad se consideró el recorrido de las rutas que cubrían el mayor tramo de los ejes evaluados. Dependiendo del tipo de vehículo se determinaba el número de personas a bordo para realizar el control del embarque y desembarque de pasajeros. El control se hizo durante un periodo de 16 horas comenzando a las 06:00 horas hasta las 22:00 horas.

Se realizó en los tramos de las rutas a lo largo de los ejes viales de las alternativas de la Línea 4.

#### **f) Encuestas de preferencias declaradas (EPD)**

La realización de las encuestas de preferencia declarada ocurre de forma conjunta con la realización de las encuestas origen-destino, de tal forma que es posible la correlación entre las variables obtenidas en la encuesta origen-destino (tales como el nivel de ingresos y la propiedad de automóviles) con las opciones de las alternativas por parte del entrevistado.

De esta manera, las preguntas referentes a la encuesta de preferencia declarada son realizadas al entrevistado así que él termine de responder las preguntas referentes a la encuesta origen-destino. Como ya se mencionó, el experimento consiste en presentar a los entrevistados pares de alternativas y el usuario debe elegir la alternativa que considere más ventajosa en función del conjunto de valores de atributos presentados. El experimento termina cuando el usuario realiza las escogencias de todos los escenarios del bloque o cuando no quiera responder más, por cansancio u otro motivo.

Las opciones por escenario son anotadas en formulario en papel o electrónico para la posterior tabulación de los datos, análisis y calibración de la elección del modelo. Es importante anotar claramente para cada entrevistado el grupo de preguntas, un código identificador del bloque, escenario y la alternativa seleccionada (Tabla).

Como en el experimento son adoptados diferentes conjuntos de escenarios por franja de tiempo de viaje, es necesario también anotar en el formulario de respuestas el identificador del grupo de preguntas presentado al entrevistado (viaje corta, media o larga duración).

La muestra prevista fue de 1200 entrevistas válidas.

Suponiendo un error máximo en la estimación de proporciones inferior al 5 % y valores de 50% para los parámetros  $p$  y  $q$ , así como nivel de significación 95%, se puede observar que la muestra requerida para la realización de la encuesta de preferencia declarada es de 385 encuestas. La fórmula usada para la estimación de esta muestra es la siguiente:

$$n = p * \frac{q}{\left(\frac{e}{Z}\right)^2}$$

En donde:

n = Tamaño de la muestra del estrato

Z = Z-score

e = Error aceptado (%)

p = probabilidad de acierto

q = probabilidad de fracaso

Fue planteada la realización de la encuesta orientada a la observación de los motivos de viaje.

Así la realización de 385 encuestas para cada uno de los tres principales motivos de viaje significa un total de 1185 encuestas a ser realizadas, valor que está dentro de la propuesta cuyo objetivo era realizar hasta 1200 encuestas.

## **Anexo N° 2: Documentación fuente para la modelación de la infraestructura y definición del Material Rodante**

### **LINEA 4 RAMAL**

Documentación presentada por la Sociedad Concesionaria Metro de Lima Línea 2 – abril 2017

Planos: Túnel línea 4

### **Trazado de vía**

Planimetría

- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0201-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0202-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0203-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0204-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0205-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0206-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0207-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0208-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0209-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0210-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0211-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0212-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0213-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0214-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0215-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0216-E

- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0217-E

#### Altimetría

- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0301-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0302-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0303-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0304-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0305-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0306-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0307-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0308-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0309-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0310-E
- ML2-CML-2L4-D-004-TTL4-OCTRZ-DIS-PL-0311-E

#### **Material Rodante**

Propuesta técnica del Concesionario

Concesión del Proyecto “Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao “- Documento N° 4: Propuesta Técnica– N° documento D.1.1 – Diseño, Fabricación y Pruebas del Material Rodante.

#### **LÍNEA 4 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO**

CONSULTORÍA INTEGRAL DEL CONCURSO DE PROYECTOS INTEGRALES PARA LA CONCESIÓN DE LA LÍNEA 4 DE LA RED BÁSICA DEL METRO DE LIMA Y CALLAO

CONTRATO 007-2015-PROINVERSION

#### **Anexo 7. Geometría y Trazado**

INFORME N° 4.2  
ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE FACTIBILIDAD – INGENIERÍA  
DF-I04\_2-ANX-07-v00  
ANEXO 07  
GEOMETRÍA Y TRAZADO (peraltes y velocidades)

#### **Anexo 18. Superestructura Ferroviaria**

INFORME N° 4.2  
ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE FACTIBILIDAD  
INGENIERÍA  
DF-I04.2-ANX-18-v00  
ANEXO 18  
SUPERESTRUCTURA FERROVIARIA (Contiene el esquema de vías y las ubicaciones de las cambiavías)  
**Planos de planimetría y altimetría**

INFORME N° 4.2

ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE FACTIBILIDAD – INGENIERÍA  
 DF-I04\_2-PLA-v00  
 PLANOS  
 TRAZADO

INFORME N° 4.2  
 ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE FACTIBILIDAD – INGENIERÍA  
 DF-I04\_2-PLA-v00  
 PLANOS  
 SUPERESTRUCTURA DE VÍA

**Anexo N° 3: Libro de vías de Línea 4 del Metro de Lima y Callao**

Estación	Progresiva		Rampa pendiente (o/oo)	Curva cambiavías desvio	Radio de Curvatura (m)	Restricción de velocidad (km/h)
	Desde (m)	Hacia (m)				
	0.072670	0.187960				80.00
	0.187960	0.235793		Bretelle		80.00
	0.235793	0.260793				80.00
GAMBETTA	0.260793	0.323043				50.00
	0.323043	0.385293				50.00
	0.385293	0.410295				80.00
	0.410295	0.480853		Bretelle		80.00
	0.480853	0.510852				80.00
	0.510852	0.903178	9.250			80.00
	0.903178	1.051698	9.250	C1	350.00	75.00
	1.051698	1.105429	9.250			80.00
	1.105429	1.180429				80.00
CANTA CALLAO	1.180429	1.242679				50.00
	1.242679	1.304929				50.00
	1.304929	1.379929				80.00
	1.379929	2.159440	4.030			80.00
	2.159440	2.192882	4.030	Desvio		80.00
	2.192882	2.237963	4.030			80.00
	2.237963	2.312963				80.00
BOCANEGRA	2.312963	2.375213				50.00
	2.375213	2.437463				50.00
	2.437463	2.512463				80.00
	2.512463	2.540956	7.660			80.00
	2.540956	2.574398	7.660	Desvio		80.00
	2.574398	2.892436	7.660			80.00
	2.892436	3.053660	7.660	C2	2000.00	80.00

Estación	Progresiva		Rampa pendiente (o/oo)	Curva cambiavías desvio	Radio de Curvatura (m)	Restricción de velocidad (km/h)
	Desde (m)	Hacia (m)				
	3.053660	3.252776	7.660			80.00
	3.252776	3.327776				80.00
AEROPUERTO	3.327776	3.390026				50.00
	3.390026	3.452276				50.00
	3.452276	3.507595				80.00
	3.507595	3.527276		C3	600.00	80.00
	3.527276	3.650570	13.900		600.00	80.00
	3.650570	3.747458	13.900			80.00
	3.747458	3.859428	13.900	C4	600.00	80.00
	3.859428	3.967518	13.900			80.00
	3.967518	3.997518				80.00
	3.997518	4.068077		Diagonal		80.00
	4.068077	4.093077				80.00
EL OLIVAR	4.093077	4.155327				50.00
	4.155327	4.217577				50.00
	4.217577	4.271827				80.00
	4.271827	4.279367		C5	600.00	80.00
	4.279367	4.345367				80.00
	4.345367	4.460000	13.810			80.00
	4.460000	4.530558	13.810	Diagonal		80.00
	4.530558	4.656311	13.810			80.00
	4.656311	4.715950	13.810	C6	1000.00	80.00
	4.715950	4.967821	13.810			80.00
	4.967821	5.017334	13.810	C7	450.00	80.00
	5.017334	5.044174	13.810			80.00
	5.044174	5.119174				80.00
QUILCA	5.119174	5.181425				50.00
	5.181425	5.243676				50.00
	5.243676	5.341676				80.00
	5.341676	5.389779	32.000			80.00
	5.389779	5.434736	32.000	C8	430.00	80.00
	5.434736	5.640287	32.000			80.00
	5.640287	5.698895	24.530			80.00
	5.698895	5.764973	24.530	C9	430.00	80.00
	5.764973	5.931832	24.530			80.00
	5.931832	5.992674	24.530	C10	600.00	80.00
	5.992674	6.060368	24.530			80.00



Estación	Progresiva		Rampa / pendiente (o/oo)	Curva / cambiavías desvio	Radio de Curvatura (m)	Restricción de velocidad (km/h)
	Desde (m)	Hacia (m)				
	6.060368	6.147166				80.00
MORALES DUAREZ	6.147166	6.209417				50.00
	6.209417	6.271667				50.00
	6.271667	6.368167				80.00
	6.368167	6.561296	31.000			80.00
	6.561296	6.760766	5.000			80.00
	6.760766	6.843432	5.000	C11	300.00	60.00
	6.843432	6.935679	5.000			80.00
	6.935679	7.046428	5.000	C12	300.00	60.00
	7.046428	7.083895	5.000			80.00
	7.083895	7.113895				80.00
	7.113895	7.184453		Bretelle		80.00
	7.184453	7.209454				80.00
CARMEN DE LA LENGUA	7.209454	7.271704				50.00
	7.271704	7.333954				50.00
	7.333954	7.358954				80.00
	7.358954	7.429512		Bretelle		80.00
	7.429512	7.483511				80.00
	7.483511	7.496977		C13	300.00	60.00
	7.496977	7.588459				80.00
	7.588459	7.629689		C14	300.00	60.00
	7.629689	7.649187				80.00
	7.649187	7.654383		C1	2400.00	80.00
	7.654383	7.680836	14.750		2400.00	80.00
	7.680836	8.120145	14.750			80.00
	8.120145	8.185740	14.750	C2	2000.00	80.00
	8.185740	8.188552	14.750			80.00
	8.188552	8.262188				80.00
VENEZUELA	8.262188	8.326338				50.00
	8.326338	8.390488				50.00
	8.390488	8.453844				80.00
	8.453844	8.464694		C3	1000.00	80.00
	8.464694	8.525404	4.530		1000.00	80.00
	8.525404	8.901633	4.530			80.00
	8.901633	8.993201	4.530	C4	600.00	80.00
	8.993201	9.027608	4.530			80.00
	9.027608	9.067694				80.00

Estación	Progresiva		Rampa / pendiente (o/oo)	Curva / cambiavías desvio	Radio de Curvatura (m)	Restricción de velocidad (km/h)
	Desde (m)	Hacia (m)				
	9.067694	9.138694		Bretelle		80.00
	9.138694	9.149694				80.00
	9.149694	9.432694		Tercera vía		80.00
	9.432694	9.469894				80.00
	9.469894	9.573942	4.100			80.00
	9.573942	9.870470	4.100	C5	280.00	60.00
	9.870470	9.908918	4.100			80.00
	9.908918	9.977488				80.00
RAFAEL ESCARDO	9.977488	10.046338				50.00
	10.046338	10.115188				50.00
	10.115188	10.184694				80.00
	10.184694	10.422204	10.930			80.00
	10.422204	10.691118	10.930	C6	700.00	80.00
	10.691118	11.447274	10.930			80.00
	11.447274	11.516491				80.00
PANDO	11.516491	11.585339				50.00
	11.585339	11.654191				50.00
	11.654191	11.723694				80.00
	11.723694	11.742106	12.030			80.00
	11.742106	11.777881	12.030	C7	350.00	75.00
	11.777881	11.888694	12.030			80.00
	11.888694	11.958694	12.03	Diagonal		80.00
	11.958694	13.159272	12.030			80.00
	13.159272	13.228488				80.00
JOSE DE SUCRE	13.228488	13.297338				50.00
	13.297338	13.366188				50.00
	13.366188	13.435563				80.00
	13.435563	13.594687	-4.14			80.00
	13.594687	13.695841	-4.14	C8	280.00	60.00
	13.695841	13.895841	-4.14			80.00
	13.895841	13.931689	-4.14	C9	280.00	60.00
	13.931689	14.140877	-4.14			80.00
	14.140877	14.207946				80.00
BRASIL	14.207946	14.278198				50.00
	14.278198	14.348450				50.00
	14.348450	14.365694				80.00
	14.365694	14.435694		Bretelle		80.00

Estación	Progresiva		Rampa pendiente (o/oo)	Curva cambivías desvío	Radio de Curvatura (m)	Restricción de velocidad (km/h)
	Desde (m)	Hacia (m)				
	14.435694	14.447694				80.00
	14.447694	14.730694		Tercera vía		80.00
	14.730694	14.785294				80.00
	14.785294	15.063865	35.000			80.00
	15.063865	15.116491				80.00
FELIPE SALAVERRY	15.116491	15.185341				50.00
	15.185341	15.254191				50.00
	15.254191	15.324427				80.00
	15.324427	15.580791	3.000			80.00
	15.580791	15.714755	3.000	C10	300.00	60.00
	15.714755	16.093125	3.000			80.00
	16.093125	16.133340				80.00
	16.133340	16.257930		C11	4000.00	80.00
	16.257930	16.275905				80.00
GUILLERMO PRESCOTT	16.275905	16.340606				50.00
	16.340606	16.405305				50.00
	16.405305	16.591236				80.00
	16.591236	16.855995	3.000			80.00
LAS PALMERAS	16.855995	16.920694				50.00
	16.920694	16.985393				50.00
	16.985393	17.408929				80.00
	17.408929	17.456694				80.00
	17.456694	17.527694		Diagonal		80.00
	17.527694	17.544256				80.00
CONDE DE SAN ISIDRO	17.544256	17.619509				50.00
	17.619509	17.684760				50.00
	17.684760	17.70				80.00
	17.701694	17.772694		Diagonal		80.00
	17.772694	17.839381				80.00
	17.839381	17.937472	35.000			80.00
	17.937472	18.004017	35.000	C12	2000.00	80.00
	18.004017	18.257789	35.000			80.00
	18.257789	18.324335	35.000	C13	2000.00	80.00
	18.324335	18.485770	35.000			80.00
	18.485770	18.546870				80.00
RIVERA NAVARRETE	18.546870	18.617123				50.00
	18.617123	18.687374				50.00

Estación	Progresiva		Rampa pendiente (o/oo)	Curva cambiavías desvío	Radio de Curvatura (m)	Restricción de velocidad (km/h)
	Desde (m)	Hacia (m)				
	18.687374	18.745271				80.00
	18.745271	18.896924	35.000			80.00
	18.896924	18.937193	35.000	C14	5000.00	80.00
	18.937193	19.191839	35.000			80.00
	19.191839	19.232108	35.000	C15	5000.00	80.00
	19.232108	19.396195	35.000			80.00
	19.396195	19.453129				80.00
PABLO CARRIQUIRRY	19.453129	19.523382				50.00
	19.523382	19.593633				50.00
	19.593633	19.670640				80.00
	19.670640	19.816037	15.000			80.00
	19.816037	19.856307	15.000	C16	5000.00	80.00
	19.856307	20.509628	15.000			80.00
	20.509628	20.552694				80.00
	20.552694	20.622694		Diagonal		80.00
	20.622694	20.639980				80.00
LA CULTURA	20.639980	20.710233				50.00
	20.710233	20.780484				50.00
	20.780484	20.797694				80.00
	20.797694	20.867694		Bretelle		80.00
	20.867694	20.880694				80.00
	20.880694	21.163694		Tercera vía		80.00
	21.163694	21.219058				80.00
	21.219058	21.234001	35.00			80.00
	21.234001	21.297983	35.00	C17	1500.00	80.00
	21.297983	21.426386	35.00			80.00
	21.426386	21.488455	35.00	C18	1500.00	80.00
	21.488455	21.490379			1500.00	80.00
	21.490379	21.553575				80.00
SAN LUIS	21.553575	21.618275				50.00
	21.618275	21.682975				50.00
	21.682975	21.752972				80.00
	21.752972	22.222487	24.00			80.00
	22.222487	22.278408	24.00	C19	800.00	80.00
	22.278408	22.854920	24.00			80.00
	22.854920	22.905301	24.00	C20	500.00	80.00
	22.905301	22.944043	24.00			80.00

Estación	Progresiva		Rampa pendiente (o/oo)	Curva cambias desvio	Radio de Curvatura (m)	Restricción de velocidad (km/h)
	Desde (m)	Hacia (m)				
	22.944043	23.000636				80.00
TREBOL DE MONTERRICO	23.000636	23.065336				50.00
	23.065336	23.130036				50.00
	23.130036	23.198750				80.00
	23.198750	23.425131	16.50			80.00
	23.425131	23.597009	16.50	C21	1500.00	80.00
	23.597009	23.635694	16.50			80.00
	23.635694	23.706694	16.50	Bretelle		80.00
	23.706694	23.953444	16.50			80.00
	23.953444	24.007163				80.00
MANUEL OLGUIN	24.007163	24.077416				50.00
	24.077416	24.147667				50.00
	24.147667	24.234529				80.00
	24.234529	24.448626	24.72			80.00
	24.448626	24.551421	24.72	C22	400.00	75.00
	24.551421	24.808895	24.72			80.00
	24.808895	25.004323	24.72	C23	600.00	80.00
	25.004323	25.341474	24.72			80.00
	25.341474	25.422386				80.00
LOS FRUTALES	25.422386	25.491235				50.00
	25.491235	25.560086				50.00
	25.560086	25.620060				80.00
	25.620060	25.629406		C24	600.00	80.00
	25.629406	25.886648	16.22		600.00	80.00
	25.886648	26.347286	16.22			80.00
	26.347286	26.400537	16.22	C25	600.00	80.00
	26.400537	26.424228	16.22			80.00
	26.424228	26.464694				80.00
	26.464694	26.534694		Bretelle		80.00
	26.534694	26.553495				80.00
LA MOLINA	26.553495	26.572345				50.00
	26.572345	26.691195				50.00
	26.691195	26.709694				80.00
	26.709694	26.780694		Bretelle		80.00
	26.780694	26.933292				80.00
	26.933292	27.219006	35.00			80.00
	27.219006	27.276694				80.00

Estación	Progresiva		Rampa pendiente (o/oo)	Curva cambiavías desvio	Radio de Curvatura (m)	Restricción de velocidad (km/h)
	Desde (m)	Hacia (m)				
	27.276694	27.324694		Diagonal		80.00
	27.324694	27.460330				80.00
	27.460330	27.517694	35.00			80.00
	27.517694	27.565694		Diagonal		80.00
	27.565694	27.632279	35.00			80.00
	27.632279	27.687770	35.00	C26	600.00	80.00
	27.687770	27.746045	35.00			80.00
	27.746045	27.800694				80.00
	27.800694	27.848694		Diagonal		80.00
	27.848694	27.920694				80.00
	27.920694	27.968694		Diagonal		80.00
	27.968694	28.061702				80.00
SANTA PATRICIA	28.061702	28.130552				50.00
	28.130552	28.199402				50.00
	28.199402	28.277903				80.00
	28.277903	28.517048	22.78			80.00
	28.517048	28.838989	22.78	C27	400.00	75.00
	28.838989	29.014426	22.78			80.00
	29.014426	29.083203				80.00
MAYORAZCO	29.083203	29.152053				50.00
	29.152053	29.220903				50.00
	29.220903	29.289822				80.00
	29.289822	30.048263	9.75			80.00
	30.048263	30.182502	9.75	C28	600.00	80.00
	30.182502	30.379995	9.75			80.00
	30.379995	30.556092	9.75	C29	350.00	75.00
	30.556092	30.620929	9.75			80.00
	30.620929	30.660694				80.00
	30.660694	30.731694		Bretelle		80.00
	30.731694	30.754760				80.00
MERCADO SANTA ANITA	30.754760	30.818910				50.00
	30.818910	30.883060				50.00
	30.883060	30.905694				80.00
	30.905694	30.976694		Bretelle		80.00
	30.976694	31.269636				80.00

Fuente: Planos de altimetría, planimetría

## Anexo N° 4: Estimación de costos de operación y mantenimiento para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao – OPEX

### 1. COSTO DE ENERGÍA

#### 1.1. COSTO DE CONSUMO DE ENERGÍA DE TRACCIÓN

El costo de energía de tracción depende del peso bruto de cada tren y los kilómetros recorridos del tren, las cuales se expresan en toneladas kilómetros (ton-km). El precio de la energía es diferente en hora punta eléctrica (6:00 p.m. hasta 11:00 p.m.) que en hora valle eléctrica, por lo que se calculó los ton-km para ambas franjas horarias eléctricas, luego de lo cual se estimó el consumo de energía de tracción correspondiente, el cual resultó de considerar un consumo promedio de energía de tracción (kWh/ton-km) igual a 0.075 y un ajuste por regeneración eléctrica estimada en 30%.

Cabe mencionar que el precio de la provisión de servicio de electricidad o costo de energía (PEN/kW-h) se aplicó considerando el precio que cobraría un generador de energía a la salida de sus transformadores más los cargos por transmisión principal y sub transmisión, para obtener el costo de suministro a media tensión, y el Valor Agregado de Distribución (VAD).

**TABLA N° 1: CALCULO DE COSTO ENERGÍA TRACCIÓN (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Peso promedio pax (Ton)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Pax / tren FP	163	163	163	491	650	650	700	700
Pax / tren HP	340	340	340	732	550	550	600	600
N° coches / tren	6	6	6	6	6	6	7	7
Peso promedio coche (Ton)	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4
Peso tren (Ton)	188.4	188.4	188.4	188.4	188.4	188.4	219.8	219.8
<b>Peso Tren movilizado en FP Eléctrica - Toneladas</b>	<b>199.81</b>	<b>199.81</b>	<b>199.81</b>	<b>222.77</b>	<b>233.90</b>	<b>233.90</b>	<b>268.80</b>	<b>268.80</b>
<b>Peso Tren movilizado en HP Eléctrica - Toneladas</b>	<b>212.20</b>	<b>212.20</b>	<b>212.20</b>	<b>239.64</b>	<b>226.90</b>	<b>226.90</b>	<b>261.80</b>	<b>261.80</b>
<b>Ton-km en FP eléctrica (millones)</b>	<b>45.16</b>	<b>194.50</b>	<b>224.23</b>	<b>767.50</b>	<b>1167.53</b>	<b>1167.53</b>	<b>1341.74</b>	<b>1341.74</b>
<b>Ton-km en HP eléctrica (millones)</b>	<b>20.55</b>	<b>88.53</b>	<b>102.06</b>	<b>353.84</b>	<b>485.40</b>	<b>485.40</b>	<b>560.06</b>	<b>560.06</b>
Consumo Promedio Energía Tracción (kWh / Ton-Km)	0.0750	0.0750	0.0750	0.0750	0.0750	0.0750	0.0750	0.0750
Ajuste por regeneración eléctrica	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%
<b>Consumo Energía Tracción Hora Valle (GW-h)</b>	<b>2.37</b>	<b>10.21</b>	<b>11.77</b>	<b>40.29</b>	<b>61.30</b>	<b>61.30</b>	<b>70.44</b>	<b>70.44</b>
<b>Consumo Energía Tracción Hora Punta (GW-h)</b>	<b>1.08</b>	<b>4.65</b>	<b>5.36</b>	<b>18.58</b>	<b>25.48</b>	<b>25.48</b>	<b>29.40</b>	<b>29.40</b>
Costo de Energía FP (PEN/KW-h)	0.1396	0.1396	0.1396	0.1396	0.1396	0.15794	0.1787	0.2928
Costo de Energía HP (PEN/KW-h)	0.1592	0.1592	0.1592	0.1592	0.1592	0.18012	0.2038	0.3339
Costo Consumo Energía Tracción FP (PEN millones/año)	0.33	1.43	1.64	5.62	8.56	9.68	12.59	20.63
Costo Consumo Energía Tracción HP (PEN millones/año)	0.17	0.74	0.85	2.96	4.06	4.59	5.99	9.82
<b>COSTO CONSUMO ENERGÍA TRACCIÓN (PEN millones/año)</b>	<b>0.50</b>	<b>2.17</b>	<b>2.50</b>	<b>8.58</b>	<b>12.61</b>	<b>14.27</b>	<b>18.58</b>	<b>30.45</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

#### 1.2. COSTO CONSUMO ENERGÍA INSTALACIONES

se definió la demanda máxima de energía (kW/espacio/día) por cada instalación (patios-talleres y estaciones), luego se calculó el consumo promedio, el cual se estimó equivalente al 70% de la

demanda máxima, a continuación se obtuvo el consumo distribuido en hora punta (HP) y hora fuera de punta (FP), expresado en GW-h/día, y finalmente, teniendo en cuenta un descuento estimado de 10% por gran consumidor, tales descuentos se afectaron por los correspondientes precios (PEN/kW-h) en HP y FP para obtener este costo. En relación a la demanda máxima se consideró que en estaciones esta llega a 700 kW/estación/día y en patios a 865 kW/patio-taller/día.

**TABLA N° 2: CÁLCULO DE COSTO DE ENERGÍA PARA INSTALACIONES  
(PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Demanda máxima de energía patios (kW / espacio / día)	865	865	865	865	865	865	865	865
Demanda máxima de energía estaciones (kW / espacio / día)	700	700	700	700	700	700	700	700
Número de talleres y patios	1	1	1	2	2	2	2	2
Número de estaciones	8	14	17	25	28	28	28	28
Consumo máximo energía instalaciones (GW / día)	0.0065	0.0107	0.0128	0.0192	0.0213	0.0213	0.0213	0.0213
Factor consumo energía instalaciones (%)	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Consumo promedio energía instalaciones (GW / día)	0.0045	0.0075	0.0089	0.0135	0.0149	0.0149	0.0149	0.0149
No. de horas punta (FP) de consumo de energía eléctrica por día	14	14	14	14	14	14	14	14
No. de horas punta (HP) de consumo de energía eléctrica por día	6	6	6	6	6	6	6	6
Consumo energía instalaciones FP (GW-h) / día	0.0634	0.1045	0.1251	0.1885	0.2090	0.2090	0.2090	0.2090
Consumo energía instalaciones HP (GW-h) / día	0.0272	0.0448	0.0536	0.0808	0.0896	0.0896	0.0896	0.0896
Número de días típicos por año	335	335	335	335	335	335	335	335
Consumo energía instalaciones FP (GW-h) / año	21.22	35.01	41.91	63.13	70.03	70.03	70.03	70.03
Consumo energía instalaciones HP (GW-h) / año	9.10	15.01	17.96	27.06	30.01	30.01	30.01	30.01
Costo de Energía FP (PEN/KW-h)	0.1396	0.1396	0.1396	0.1396	0.1396	0.15794	0.1787	0.2928
Costo de Energía HP (PEN/KW-h)	0.1592	0.1592	0.1592	0.1592	0.1592	0.18012	0.2038	0.3339
Descuento por gran consumidor	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%
Costo consumo energía instalaciones FP (PEN Millones)	2.67	4.40	5.27	7.93	8.80	9.95	11.26	18.45
Costo consumo energía instalaciones HP (PEN Millones)	1.30	2.15	2.57	3.88	4.30	4.87	5.50	9.02
<b>COSTO CONSUMO ENERGÍA INSTALACIONES (PEN millones/año)</b>	<b>3.97</b>	<b>6.55</b>	<b>7.84</b>	<b>11.81</b>	<b>13.10</b>	<b>14.82</b>	<b>16.77</b>	<b>27.47</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

### 1.3. COSTO POTENCIA GENERACIÓN

El costo de potencia de generación resultó de calcular la potencia requerida para la tracción de los trenes (kW) y la potencia para las instalaciones (kW), la cual se multiplicó por el precio promedio de generación (PEN/kW). La potencia requerida para tracción se asoció al número de coches, considerando una potencia unitaria de 0.4005 MW/coche y la potencia requerida para instalaciones provino de la estimación de consumo máximo de energía visto anteriormente para estaciones y patios-taller.



**TABLA N° 3: CÁLCULO DE POTENCIA DE GENERACIÓN (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
<b>Potencia requerida para instalaciones (kW)</b>	<b>6,465</b>	<b>10,665</b>	<b>12,765</b>	<b>19,230</b>	<b>21,330</b>	<b>21,330</b>	<b>21,330</b>	<b>21,330</b>
Número de trenes	5	14	14	40	55	55	55	55
Número de coches / tren	6	6	6	6	6	6	7	7
Número de coches	30	84	84	240	330	330	385	385
Potencia requerida por coche (MW)	0.4005	0.4005	0.4005	0.4005	0.4005	0.4005	0.4005	0.4005
<b>Potencia requerida para tracción (kW)</b>	<b>12,015</b>	<b>33,643</b>	<b>33,643</b>	<b>96,122</b>	<b>132,168</b>	<b>132,168</b>	<b>154,196</b>	<b>154,196</b>
% HFP Eléctrica en el mes	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
% HP Eléctrica en el mes	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
Costo Potencia por generación HFP (S/ por KW-mes)	13.03	13.03	13.03	13.03	13.03	14.74	16.68	27.33
Costo Potencia por generación HP (S/ por KW-mes)	21.18	21.18	21.18	21.18	21.18	23.96	27.11	44.43
Costo promedio Potencia por generación S/ por KW-mes	15.48	15.48	15.48	15.48	15.48	17.51	19.81	32.46
Potencia total requerida (kW)	18,480	44,308	46,408	115,352	153,498	153,498	175,526	175,526
<b>Costo potencia por generación PEN millones por mes</b>	<b>0.29</b>	<b>0.69</b>	<b>0.72</b>	<b>1.79</b>	<b>2.38</b>	<b>2.69</b>	<b>3.48</b>	<b>5.70</b>
<b>COSTO POTENCIA GENERACIÓN (PEN millones/año)</b>	<b>3.43</b>	<b>8.23</b>	<b>8.62</b>	<b>21.42</b>	<b>28.50</b>	<b>32.25</b>	<b>41.72</b>	<b>68.37</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

#### 1.4. COSTO POTENCIA DE TRANSMISIÓN

La potencia de transmisión, se calculó multiplicando la potencia ya determinada para generación por el precio correspondiente a la de transmisión.

**TABLA N° 4: CÁLCULO DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
% HFP Eléctrica en el mes	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
% HP Eléctrica en el mes	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
Costo Potencia por transmisión HFP (S/ por KW-mes)	8.75	8.75	8.75	8.75	8.75	9.90	11.20	18.35
Costo Potencia por transmisión HP (S/ por KW-mes)	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45	9.56	10.82	17.72
<b>Costo promedio Potencia por transmisión S/ por KW-mes</b>	<b>8.66</b>	<b>8.66</b>	<b>8.66</b>	<b>8.66</b>	<b>8.66</b>	<b>9.80</b>	<b>11.09</b>	<b>18.16</b>
Potencia total requerida (kW)	18,480	44,308	46,408	115,352	153,498	153,498	175,526	175,526
<b>COSTO POTENCIA TRANSMISIÓN (PEN millones/año)</b>	<b>1.92</b>	<b>4.60</b>	<b>4.82</b>	<b>11.99</b>	<b>15.95</b>	<b>18.05</b>	<b>23.35</b>	<b>38.26</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

## 2. COSTES DE MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURA

### 2.1. COSTO MANTENIMIENTO EDIFICACIONES ESTACIONES

Este costo está compuesto por el costo de mantenimiento del equipamiento dispuesto en las estaciones (aire acondicionado, ascensores, escaleras eléctricas, equipos de prevención de fuego, infraestructura de drenaje, etc.), el costo de mantenimiento de la propia infraestructura y el de limpieza de las instalaciones, lo cual incluye eliminación de grafitis, control de plagas, etc. Los

factores utilizados para calcular estos costos se han estimado basados en el costo real en la línea M1 en Milán ajustado a precios locales.

**TABLA N° 5: CÁLCULO DEL COSTO DE MANTENIMIENTO DE EDIFICACIONES DE ESTACIONES DE PASAJEROS (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Valor promedio de equipamiento en estaciones (PEN millones/estación)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
Valor total de equipamiento en estaciones (PEN millones)	120.0	210.0	255.0	375.0	420.0	420.0	420.0	420.0
Costo unitario estimado de mantenimiento de equipamiento (% inversión en equipamiento)	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%
<b>Costo de mantenimiento de equipamiento de estaciones (PEN millones/año)</b>	<b>1.20</b>	<b>2.10</b>	<b>2.55</b>	<b>3.75</b>	<b>4.20</b>	<b>4.20</b>	<b>4.20</b>	<b>4.20</b>
Valor promedio de infraestructura en estaciones (PEN millones/estación)	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0
Valor total de infraestructura en estaciones (PEN millones)	280.0	490.0	595.0	875.0	980.0	980.0	980.0	980.0
Costo unitario estimado de mantenimiento (% inversión en infraestructura)	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%
<b>Costo de mantenimiento de infraestructura de estaciones (PEN millones/año)</b>	<b>0.70</b>	<b>1.23</b>	<b>1.49</b>	<b>2.19</b>	<b>2.45</b>	<b>2.45</b>	<b>2.45</b>	<b>2.45</b>
Rendimiento de personal de limpieza (m2/día/persona)	1,200.0	1,200.0	1,200.0	1,200.0	1,200.0	1,200.0	1,200.0	1,200.0
Número de personas de limpieza de estaciones	72.0	128.0	153.0	225.0	252.0	252.0	252.0	252.0
Costo mensual de limpieza de estaciones (PEN/mes/persona)	1,200.0	1,200.0	1,200.0	1,200.0	1,200.0	1,357.7	1,536.1	2,517.1
<b>Costo anual de limpieza de estaciones (PEN millones/año)</b>	<b>1.04</b>	<b>1.81</b>	<b>2.20</b>	<b>3.24</b>	<b>3.63</b>	<b>4.11</b>	<b>4.65</b>	<b>7.61</b>
Área promedio techada m2/estación	10,800.0	10,800.0	10,800.0	10,800.0	10,800.0	10,800.0	10,800.0	10,800.0
Número de estaciones	8	14	17	25	28	28	28	28
Área de edificación de estaciones a mantener (m2 área techada)	86,400.0	151,200.0	183,600.0	270,000.0	302,400.0	302,400.0	302,400.0	302,400.0
<b>Costo de mantenimiento edificación estaciones (PEN/m2/año)</b>	<b>33.99</b>	<b>33.99</b>	<b>33.99</b>	<b>33.99</b>	<b>33.99</b>	<b>35.57</b>	<b>37.35</b>	<b>47.16</b>
<b>COSTO MANTENIMIENTO EDIFICACIONES ESTACIONES (PEN millones/año)</b>	<b>2.94</b>	<b>5.14</b>	<b>6.24</b>	<b>9.18</b>	<b>10.28</b>	<b>10.76</b>	<b>11.30</b>	<b>14.26</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

## 2.2. COSTO MANTENIMIENTO TÚNELES Y POZOS

El costo del mantenimiento de túneles y pozos, se estimó según la longitud correspondiente.

**TABLA N° 6: CÁLCULO DEL COSTO DE MANTENIMIENTO DE TÚNELES Y POZOS (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Costo unitario de mantenimiento de pozos (USD/m/año)	12,000.00	12,000.00	12,000.00	12,000.00	12,000.00	13,576.90	15,361.01	25,170.81
Longitud promedio de pozos (m)	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
<b>Costo de mantenimiento de pozos (USD millones/año)</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>	<b>0.41</b>	<b>0.46</b>	<b>0.76</b>
Gastos generales en mantenimiento de túneles (USD/km/año)	7,000.00	7,000.00	7,000.00	7,000.00	7,000.00	7,919.86	8,960.59	14,682.97
Costo de repuestos en mantenimiento de túneles (USD/km/año)	3,500.00	3,500.00	3,500.00	3,500.00	3,500.00	3,959.93	4,480.30	7,341.49
Costo de equipamiento en mantenimiento de túneles (USD/km/año)	14,000.00	14,000.00	14,000.00	14,000.00	14,000.00	15,839.71	17,921.18	29,365.95
Costo de materiales en mantenimiento de túneles (USD/km/año)	10,500.00	10,500.00	10,500.00	10,500.00	10,500.00	11,879.79	13,440.89	22,024.46
Costo de personal directo en mantenimiento de túneles (USD/km/año)	35,000.00	35,000.00	35,000.00	35,000.00	35,000.00	39,599.29	44,802.96	73,414.87
Costo unitario de mantenimiento de túneles (USD/km/año)	70,000.0	70,000.0	70,000.0	70,000.0	70,000.0	79,198.6	89,605.9	146,829.7
Longitud de túneles (km)	6.95	13.28	17.30	26.25	30.50	30.50	30.50	30.50
<b>Costo de mantenimiento de túneles (USD millones/año)</b>	<b>0.49</b>	<b>0.93</b>	<b>1.21</b>	<b>1.84</b>	<b>2.13</b>	<b>2.42</b>	<b>2.73</b>	<b>4.48</b>
<b>Costo de mantenimiento de túneles y pozos (USD millones/año)</b>	<b>0.85</b>	<b>1.29</b>	<b>1.57</b>	<b>2.20</b>	<b>2.49</b>	<b>2.82</b>	<b>3.19</b>	<b>5.23</b>
Tipo de cambio	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
<b>COSTO MANTENIMIENTO TÚNELES Y POZOS (PEN millones/año)</b>	<b>2.75</b>	<b>4.19</b>	<b>5.10</b>	<b>7.14</b>	<b>8.11</b>	<b>9.17</b>	<b>10.38</b>	<b>17.01</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

### 2.3. COSTO MANTENIMIENTO CATENARIA

El costo de mantenimiento de la catenaria se determinó sumando el costo fijo de este rubro como el variable, el cual está asociado a los km-tren recorridos.

**TABLA N° 7: CÁLCULO DEL COSTO DE MANTENIMIENTO DE CATENARIA (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Longitud de catenaria (km)	6.95	13.28	17.30	26.25	30.50	30.50	30.50	30.50
Costo unitario fijo de mantenimiento de catenaria (PEN/km/mes)	3,600.00	3,600.00	3,600.00	3,600.00	3,600.00	4,073.07	4,608.30	7,551.24
Costo unitario fijo de mantenimiento de catenaria (PEN/km/año)	43,200.00	43,200.00	43,200.00	43,200.00	43,200.00	48,876.83	55,299.65	90,614.92
<b>Costo fijo de mantenimiento de catenaria (PEN millones/año)</b>	<b>0.30</b>	<b>0.57</b>	<b>0.75</b>	<b>1.13</b>	<b>1.32</b>	<b>1.49</b>	<b>1.69</b>	<b>2.76</b>
km-tren recorridos por año	322,878	1,390,630	1,603,200	4,921,784	7,130,826	7,130,826	7,130,826	7,130,826
Costo unitario variable de mantenimiento de catenaria (PEN/km/mes)	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.41	1.60	2.62
<b>Costo variable de mantenimiento de catenaria (PEN millones/año)</b>	<b>0.40</b>	<b>1.74</b>	<b>2.00</b>	<b>6.15</b>	<b>8.91</b>	<b>10.08</b>	<b>11.41</b>	<b>18.70</b>
<b>COSTO MANTENIMIENTO CATENARIA (PEN millones/año)</b>	<b>0.70</b>	<b>2.31</b>	<b>2.75</b>	<b>7.29</b>	<b>10.23</b>	<b>11.58</b>	<b>13.10</b>	<b>21.46</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

### 2.4. COSTO MANTENIMIENTO SUB-ESTACIONES

El costo de mantenimiento de la sub-estación, se estimó según el número de sub-estaciones.

**TABLA N° 8: CÁLCULO DEL COSTO DE MANTENIMIENTO DE SUBESTACIONES (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Número de sub-estaciones de energía	2	4	6	9	10	10	10	10
Costo unitario de mantenimiento por sub-estación (PEN/año)	25,000.00	25,000.00	25,000.00	25,000.00	25,000.00	28,285.21	32,002.11	52,439.19
<b>COSTO MANTENIMIENTO SUB-ESTACIONES (PEN millones/año)</b>	<b>0.06</b>	<b>0.11</b>	<b>0.14</b>	<b>0.22</b>	<b>0.25</b>	<b>0.29</b>	<b>0.33</b>	<b>0.53</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

### 2.5. COSTO MANTENIMIENTO VÍA FÉRREA

El costo de mantenimiento de la vía férrea, este resultó de multiplicar el costo promedio de mantenimiento por km por la longitud correspondiente. Siendo el costo de mantenimiento unitario un valor de 10.000 USD por km de vía por mes, el cual incluye el mantenimiento preventivo y correctivo, el personal, los materiales y el trabajo subcontratado que fuera necesario.

**TABLA N° 9: CÁLCULO DEL COSTO DE MANTENIMIENTO DE VÍA FÉRREA (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Gastos generales en mantenimiento de vía férrea (USD/km/año)	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,131.41	1,280.08	2,097.57
Costo de repuestos en mantenimiento de vía férrea (USD/km/año)	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	565.70	640.04	1,048.78
Costo de equipamiento en mantenimiento de vía férrea (USD/km/año)	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,262.82	2,560.17	4,195.14
Costo de materiales en mantenimiento de vía férrea (USD/km/año)	1,500.00	1,500.00	1,500.00	1,500.00	1,500.00	1,697.11	1,920.13	3,146.35
Costo de personal directo en mantenimiento de vía férrea (USD/km/año)	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,657.04	6,400.42	10,487.84
Costo unitario de mantenimiento vía férrea (USD/km/mes)	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	11,314.08	12,800.85	20,975.68
Costo unitario de mantenimiento vía férrea (USD/km/año)	120,000.00	120,000.00	120,000.00	120,000.00	120,000.00	135,768.99	153,610.15	251,708.11
Longitud de vía férrea (km)	6.95	13.28	17.30	26.25	30.50	30.50	30.50	30.50
<b>Costo de mantenimiento de vía férrea (USD millones/año)</b>	<b>0.83</b>	<b>1.59</b>	<b>2.08</b>	<b>3.15</b>	<b>3.66</b>	<b>4.14</b>	<b>4.68</b>	<b>7.68</b>
Tipo de cambio	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
<b>COSTO MANTENIMIENTO VÍA FÉRREA (PEN millones/año)</b>	<b>2.71</b>	<b>5.18</b>	<b>6.75</b>	<b>10.24</b>	<b>11.89</b>	<b>13.46</b>	<b>15.22</b>	<b>24.95</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

## 2.6. COSTO MANTENIMIENTO INFRAESTRUCTURA Y EQUIPAMIENTO DE PATIOS TALLERES

El costo de mantenimiento de infraestructura y equipamiento de patios y talleres, esta variable se calculó considerando como base el valor del equipamiento y el área de la edificación.

**TABLA N° 10: CÁLCULO DEL COSTO DE MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURA Y EQUIPAMIENTO DE PATIOS-TALLERES (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Valor equipamiento instalado en patios y talleres (USD millones)	3.0	17.0	3.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Costo unitario de mantenimiento anual de equipamiento de patios y talleres (% va	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
<b>Costo mantenimiento equipamiento de patios y talleres (USD millones/año)</b>	<b>0.15</b>	<b>0.85</b>	<b>0.15</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>
Área techada de patios y talleres (m2)	19,800.00	19,800.00	19,800.00	19,800.00	19,800.00	19,800.00	19,800.00	19,800.00
Costo unitario de mantenimiento de edificación de patios y talleres (USD/m2/año)	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	56.57	64.00	104.88
<b>Costo mantenimiento de edificación de patios y talleres (USD millones/año)</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>1.12</b>	<b>1.27</b>	<b>2.08</b>
<b>Costo de mantenimiento de patios y talleres (USD millones/año)</b>	<b>1.14</b>	<b>1.84</b>	<b>1.14</b>	<b>1.99</b>	<b>1.99</b>	<b>2.12</b>	<b>2.27</b>	<b>3.08</b>
Tipo de cambio	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
<b>COSTO MANTEN INFRAEST Y EQUIP PATIOS TALLERES (PEN millones/año)</b>	<b>3.71</b>	<b>5.98</b>	<b>3.71</b>	<b>6.47</b>	<b>6.47</b>	<b>6.89</b>	<b>7.37</b>	<b>10.00</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

## 2.7. COSTO MANTENIMIENTO DE SEÑALIZACIÓN Y TELECOMUNICACIONES

El costo de mantenimiento de señalización y telecomunicaciones se estima considerando el número de enclavamientos y longitud de la línea férrea, respectivamente, cada una de las cuales fue multiplicada por sus correspondientes costos unitarios:

**TABLA N° 11: CÁLCULO DEL COSTO DE MANTENIMIENTO DE SEÑALIZACIÓN Y TELECOMUNICACIONES (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Longitud de línea (km)	6.95	13.28	17.30	26.25	30.50	30.50	30.50	30.50
Costo unitario de mantenimiento de telecomunicaciones (USD/km/año)	2,537.00	2,537.00	2,537.00	2,537.00	2,537.00	2,870.38	3,247.57	5,321.53
<b>Costo mantenimiento de telecomunicaciones (USD millones/año)</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>	<b>0.16</b>
N° de enclavamientos	1.00	1.00	2.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Costo unitario de mantenimiento de señalización (USD/enclavamiento/año)	536.00	536.00	536.00	536.00	536.00	606.43	686.13	1,124.30
<b>Costo mantenimiento de señalización (USD millones/año)</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>Costo mantenim señalización y telecomunicac (USD millones/año)</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>	<b>0.17</b>
Tipo de cambio	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
<b>COSTO MANTEN SEÑALIZACIÓN Y TELECOMUNICACIONES (PEN millones/año)</b>	<b>0.06</b>	<b>0.11</b>	<b>0.15</b>	<b>0.22</b>	<b>0.26</b>	<b>0.29</b>	<b>0.33</b>	<b>0.54</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

## 2.8. COSTO MANTENIMIENTO RECAUDO

El costo de mantenimiento de equipamiento de recaudo se obtuvo considerando el número promedio de accesos en las estaciones multiplicadas por el costo unitario de USD/5,000 por acceso por año.

**TABLA N° 12: CÁLCULO DEL COSTO DE MANTENIMIENTO DE RECAUDO (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Costo unitario de mantenimiento de recaudo (USD/acceso/año)	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,657.04	6,400.42	10,487.84
Número de estaciones	8.00	14.00	17.00	25.00	28.00	28.00	28.00	28.00
N° promedio de accesos por estación de pasajeros	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
<b>Costo mantenimiento de recaudo (USD millones/año)</b>	<b>1.20</b>	<b>2.10</b>	<b>2.55</b>	<b>3.75</b>	<b>4.20</b>	<b>4.75</b>	<b>5.38</b>	<b>8.81</b>
Tipo de cambio	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
<b>COSTO MANTENIMIENTO RECAUDO (PEN millones/año)</b>	<b>3.90</b>	<b>6.83</b>	<b>8.29</b>	<b>12.19</b>	<b>13.65</b>	<b>15.44</b>	<b>17.47</b>	<b>28.63</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

## 2.9. COSTO MANTENIMIENTO CENTRO DE CONTROL

El costo de mantenimiento de centro de control, se estimó multiplicando el número de este tipo de centros por un costo unitario de mantenimiento estimado en USD 192,634.

**TABLA N° 13: CÁLCULO DEL COSTO DE CENTRO DE CONTROL (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Costo unitario de mantenimiento de centro de control (USD/centro de control)	192,634.0	192,634.0	192,634.0	192,634.0	192,634.0	217,947.7	246,587.8	404,062.8
N° de Centros de control	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
<b>Costo mantenimiento PCO (USD millones/año)</b>	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>	<b>0.39</b>	<b>0.39</b>	<b>0.44</b>	<b>0.49</b>	<b>0.81</b>
Tipo de cambio	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
<b>COSTO MANTENIMIENTO CENTRO DE CONTROL (PEN millones/año)</b>	<b>0.63</b>	<b>0.63</b>	<b>0.63</b>	<b>1.25</b>	<b>1.25</b>	<b>1.42</b>	<b>1.60</b>	<b>2.63</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

### 3. COSTES DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE

#### 3.1. COSTO LIMPIEZA TRENES

Se sumaron los costos de equipamiento de limpieza, costos de materiales y costos de personal, tal como se ve en la siguiente tabla.

**TABLA N° 14: CÁLCULO DEL COSTO DE LIMPIEZA DE TRENES (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
N° de trenes	5	14	14	40	55	55	55	55
Costo unitario mensual de equipamiento de limpieza (USD/tren/mes)	800.00	800.00	800.00	800.00	800.00	905.13	1,024.07	1,678.05
Costo de material de equipamiento de limpieza (USD/mes)	4,000.0	11,200.0	11,200.0	32,000.0	44,000.0	49,782.0	56,323.7	92,293.0
<b>Costo de equipamiento de limpieza (USD millones/año)</b>	<b>0.05</b>	<b>0.13</b>	<b>0.13</b>	<b>0.38</b>	<b>0.53</b>	<b>0.60</b>	<b>0.68</b>	<b>1.11</b>
N° de trenes	5	14	14	40	55	55	55	55
Costo unitario mensual de materiales de limpieza (USD/tren/mes)	3,000.00	3,000.00	3,000.00	3,000.00	3,000.00	3,394.22	3,840.25	6,292.70
Costo de material de limpieza (USD/mes)	15,000.0	42,000.0	42,000.0	120,000.0	165,000.0	186,682.4	211,213.9	346,098.7
<b>Costo de materiales de limpieza (USD millones/año)</b>	<b>0.18</b>	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	<b>1.44</b>	<b>1.98</b>	<b>2.24</b>	<b>2.53</b>	<b>4.15</b>
N° de trenes	5	14	14	40	55	55	55	55
N° personas de limpieza por tren por día	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
N° de personas requeridas para limpieza	8.00	21.00	21.00	60.00	83.00	83.00	83.00	83.00
Costo unitario mensual de personal de limpieza (USD/persona/mes) - Técnico 3	650.00	650.00	650.00	650.00	650.00	735.42	832.05	1,363.42
Costo de personal de limpieza (USD/mes)	5,200.0	13,650.0	13,650.0	39,000.0	53,950.0	61,039.5	69,060.6	113,163.8
<b>Costo de personal de limpieza (USD millones/año)</b>	<b>0.06</b>	<b>0.16</b>	<b>0.16</b>	<b>0.47</b>	<b>0.65</b>	<b>0.73</b>	<b>0.83</b>	<b>1.36</b>
<b>Costo de limpieza de trenes (USD millones/año)</b>	<b>0.29</b>	<b>0.80</b>	<b>0.80</b>	<b>2.29</b>	<b>3.16</b>	<b>3.57</b>	<b>4.04</b>	<b>6.62</b>
Tipo de cambio	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
<b>COSTO LIMPIEZA TRENES (PEN millones/año)</b>	<b>0.94</b>	<b>2.61</b>	<b>2.61</b>	<b>7.45</b>	<b>10.26</b>	<b>11.60</b>	<b>13.13</b>	<b>21.51</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

#### 3.2. COSTO MANTENIMIENTO PREVENTIVO TRENES

Los costos de mantenimiento preventivo, se calcularon teniendo como referencia las actividades incluidas en el plan de mantenimientos evaluados por el departamento técnico ATM (Azienda

Trasporti Milanesi). Así, tal como se muestra en la siguiente tabla, se infiere que el costo promedio anual de mantenimiento de un tren tipo del proyecto es igual a USD 306,516.92 por año.

**TABLA N° 15: CÁLCULO DE COSTO UNITARIO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE UN TREN, SEGÚN PROGRAMA**

<b>COSTO DE MANTENIMIENTO DE TREN</b>			
<b>Frecuencia de mantenimiento por tren</b>	<b>USD/vez</b>	<b>Veces/año</b>	<b>USD/año</b>
Cada 1 mes	1,511.80	12.00	<b>18,141.65</b>
Cada 2 meses	69.24	6.00	<b>415.46</b>
Cada 4 meses	3,198.83	3.00	<b>9,596.50</b>
Cada 6 meses	36.20	2.00	<b>72.41</b>
Cada 1 año	4,179.34	1.00	<b>4,179.34</b>
Cada 2 años	55.38	0.50	<b>27.69</b>
Cada 3 años	4,294.02	0.33	<b>1,431.34</b>
Cada 6 años	913,605.56	0.17	<b>152,267.59</b>
Cada 10 años	122,683.57	0.10	<b>12,268.36</b>
Cada 15 años	34,778.80	0.07	<b>2,318.59</b>
Cada 20 años	2,115,960.00	0.05	<b>105,798.00</b>
<b>TOTAL USD/tren/año</b>			<b>306,516.92</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Sobre esta base y teniendo en cuenta el programa de incorporación de trenes en el proyecto se determinó el costo de este rubro, tal como se resume a continuación.

**TABLA N° 16: CÁLCULO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE TRENES (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
Costo unitario de mantenimiento USD millones/tren/año	0.3065	0.31	0.31	0.31	0.31	0.35	0.39	0.64
Número de trenes	5	14	14	40	55	55	55	55
Costo mantenimiento trenes USD millones	1.53	4.29	4.29	12.26	16.86	19.07	21.58	35.36
Tipo de cambio	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
<b>COSTO MANTENIMIENTO PREVENTIVO TRENES (PEN millones/año)</b>	<b>4.98</b>	<b>13.95</b>	<b>13.95</b>	<b>39.85</b>	<b>54.79</b>	<b>61.99</b>	<b>70.14</b>	<b>114.93</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

#### 4. COSTOS DE PERSONAL DE ESTACIONES

El personal de las estaciones depende de la cantidad de servicio prestado y la demanda en hora punta, para determinar la cantidad de personal se utilizó el siguiente criterio:

Por cada 10 mil pasajeros se requieren 2 orientadores, 1.5 vigilantes, 1 supervisor de estación y 2 boleteros.

En la siguiente tabla se muestra la estimación de la cantidad de personal por estación para la operación de la Línea 4 del Metro de Lima para el año 2025.

**TABLA N° 17: PERSONAL PARA ESTACIONES: TRAMO GAMBETTA – MERCADO SANTA ANITA AÑO 2025**

Estación	Demanda pax/hora punta	Personal por estación			
		Orientadores	Vigilantes	Supervisor de estación	Boletero
Gambetta	5,573	1.0	1.0	1.0	2.0
Canta Callao	3,746	1.0	1.0	1.0	2.0
Bocanegra	1,676	1.0	1.0	1.0	2.0
Aeropuerto	4,059	1.0	1.0	1.0	2.0
El Olivar	1,569	1.0	1.0	1.0	2.0
Quilca	4,752	1.0	1.0	1.0	2.0
Morales Duárez	1,711	1.0	1.0	1.0	2.0
Carmen de la Legua	10,607	2.0	2.0	1.0	2.0
Venezuela	6,606	1.0	1.0	1.0	2.0
Rafael Escardó	6,246	1.0	1.0	1.0	2.0
Pando	5,292	1.0	1.0	1.0	2.0
José de Sucre	5,260	1.0	1.0	1.0	2.0
Brasil	7,669	2.0	1.0	1.0	2.0
Felipe Salaverry	5,844	1.0	1.0	1.0	2.0
Guillermo Prescott	3,381	1.0	1.0	1.0	2.0
Las Palmeras	4,889	1.0	1.0	1.0	2.0
Conde de San Isidro	23,503	5.0	4.0	1.0	2.0
Rivera Navarrete	4,815	1.0	1.0	1.0	2.0
Pablo Carriquiry	3,782	1.0	1.0	1.0	2.0
La Cultura	24,161	5.0	4.0	1.0	2.0
San Luis	3,542	1.0	1.0	1.0	2.0
Monterrico	4,735	1.0	1.0	1.0	2.0
Manuel Olgún	2,611	1.0	1.0	1.0	2.0
Los Frutales	2,254	1.0	1.0	1.0	2.0
La Molina	13,925	3.0	2.0	1.0	2.0
Santa Patricia	10,794	2.0	2.0	1.0	2.0
Mayorazgo	961	1.0	1.0	1.0	2.0
Mercado Santa Anita	11,125	2.0	2.0	1.0	2.0
<b>Total</b>		<b>42</b>	<b>38</b>	<b>28</b>	<b>56</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4  
Elaboración: Propia

En la siguiente tabla se muestra el personal variable de operación y mantenimiento y su criterio de dimensionalmente, ya se incorporó el personal indicado en la tabla anterior.



**TABLA N° 18: PERSONAL VARIABLE EN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PARA LA LÍNEA 4 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO**

Criterio	Área	Cargo	Gambetta - Mercado Santa Aniat
2 personal de seguridad por tren	Operaciones	Personal a bordo del tren	100
Calculo en hoja Personal de estaciones		Supervisor Estaciones	28
1 Jefe por estación		Jefe de Estación	28
Calculo en hoja Personal de estaciones		Boletero	56
Calculo en hoja Personal de estaciones		Orientador	42
1 por tren para actuar en situación de emergencia		Conductores	55
1 técnico por coche		Mantenimiento	Técnicos de mantenimiento de material rodante
1 tecnico x km	Técnicos de mantenimiento de vía férrea		30
	Técnicos de mantenimiento de catenaria		30
	Técnicos de mantenimiento de alimentación eléctrica		30
	Técnicos de mantenimiento señalización		30
	Técnicos de mantenimiento de telecomunicaciones		30
	Técnicos de mantenimiento de elementos auxiliares		30
	Técnicos de mantenimiento de obras menores		30
Calculo en hoja Personal de estaciones	Vigilantes	38	
	<b>Total</b>	<b>890</b>	

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

En la tabla N° 19 se muestra la escala remunerativa, estos sueldos ya incluyen las cargas sociales, utilizado para las estimaciones costos de personal de estaciones y personal variable de operación y mantenimiento y personal fijo.

**TABLA N° 19: NIVEL DE REMUNERACIÓN PARA LA LÍNEA 4 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO**

Nivel	Sueldo USD/mes
Ejecutivo 1	15,000.00
Ejecutivo 2	12,000.00
Ejecutivo 3	10,000.00
Profesional 1	5,000.00
Profesional 2	3,500.00
Profesional 3	2,000.00
Técnico 1	1,500.00
Técnico 2	1,000.00
Técnico 3	650.00

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

El detalle de sueldos del personal variable de operación y mantenimiento se muestra en la siguiente tabla:

**TABLA N° 20: NIVEL REMUNERATIVO PARA EL PERSONAL VARIABLE EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

<b>Cargo</b>	<b>Nivel remunerativo</b>	<b>Sueldo UDS/ Mes</b>
Personal a bordo del tren	Técnico 2	1,000
Supervisor Estaciones	Profesional 1	5,000
Jefe de Estación	Profesional 1	5,000
Boletero	Técnico 2	1,000
Orientador	Técnico 3	650
Conductores	Profesional 2	3,500
Técnicos de mantenimiento de material rodante	Técnico 2	1,000
Técnicos de mantenimiento de vía férrea	Técnico 2	1,000
Técnicos de mantenimiento de catenaria	Técnico 2	1,000
Técnicos de mantenimiento de alimentación eléctrica	Técnico 2	1,000
Técnicos de mantenimiento señalización	Técnico 2	1,000
Técnicos de mantenimiento de telecomunicaciones	Técnico 2	1,000
Técnicos de mantenimiento de elementos auxiliares	Técnico 2	1,000
Técnicos de mantenimiento de obras menores	Técnico 2	1,000
Vigilantes	Técnico 1	1,500

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

El detalle de turnos y los montos totales se describe en el Excel – OPEX Línea 4

## 5. COSTOS FIJOS

Los costos fijos no dependen la producción de kilómetros recorridos ni la demanda

### 5.1. COSTOS DE PERSONAL FIJO

El personal fijo y el detalle de la escala de remuneración, ya incluye las cargas laborables, se muestra en la siguiente tabla:

**TABLA N° 21: PERSONAL DE COSTOS FIJOS Y SU ESCALA REMUNERATIVA**

<b>Área</b>	<b>Cargo</b>	<b>Nivel remunerativo</b>	<b>Sueldo UDS/ Mes</b>
Dirección	Gerente General	Ejecutivo 1	15,000
	Secretaría de la dirección	Profesional 2	3,500
	Asesor Financiero	Ejecutivo 2	12,000
	Asesor Legal	Ejecutivo 2	12,000
Operaciones	Gerente de Operaciones	Ejecutivo 3	10,000

Área	Cargo	Nivel remunerativo	Sueldo UDS/ Mes
	Jefe de Departamento Operaciones	Profesional 1	5,000
	Secretaria	Técnico 1	1,500
	Jefe de Movimiento	Profesional 1	5,000
	Regulador de Tráfico	Profesional 2	3,500
	Jefe de Patio	Profesional 1	5,000
	Programador de Tráfico	Profesional 2	3,500
	Supervisor de control y regulación	Profesional 3	2,000
	Supervisor de Limpieza	Profesional 3	2,000
	Jefe de Centro de calidad y Regulación	Profesional 2	3,500
	Jefe de ingeniería para operaciones	Profesional 1	5,000
	Técnicos de ingeniería para operaciones	Profesional 3	2,000
Mantenimiento	Gerente de Mantenimiento	Ejecutivo 3	10,000
	Jefe Departamento de Mantenimiento	Profesional 1	5,000
	Secretaria	Técnico 1	1,500
	Profesionales de Planificación y control Mantenimiento	Profesional 2	3,500
	Programador Mantenimiento	Profesional 2	3,500
	Supervisor de Mantenimiento de la Infraestructura ferroviaria	Profesional 1	5,000
	Supervisor de Mantenimiento de Material Rodante	Profesional 1	5,000
	Supervisor de Mantenimiento de obras civiles	Profesional 1	5,000
	Jefe de Mantenimiento de obras civiles	Profesional 1	5,000
	Jefe de Mantenimiento de vía férrea	Profesional 1	5,000
	Jefe de Mantenimiento de instalaciones eléctricas	Profesional 1	5,000
	Jefe de Mantenimiento de instalaciones mecánicas	Profesional 1	5,000
	Jefe de Mantenimiento señalización y comunicaciones	Profesional 1	5,000
	Jefe de Mantenimiento de Material rodante	Profesional 1	5,000
	Técnicos de mantenimiento de obras civiles	Técnico 2	1,000
Jefe Reparaciones Mayores	Profesional 1	5,000	
Seguridad y Riesgos	Jefe Seguridad y SS.GG.	Profesional 1	5,000
	Profesional en análisis de riesgos	Profesional 2	3,500
	Supervisor de Seguridad	Profesional 3	2,000
Ingeniería	Jefe de Ingeniería	Profesional 1	5,000
	Secretaria	Técnico 1	1,500
	Profesional en gestión de proyectos	Profesional 2	3,500
	Jefe Obras Civiles	Profesional 1	5,000
	Supervisor Obras Civiles	Profesional 3	2,000
	Capacitación	Profesional 2	3,500
	Calidad del Servicio	Profesional 2	3,500

Área	Cargo	Nivel remunerativo	Sueldo UDS/ Mes
	Investigación y Desarrollo	Profesional 2	3,500
Administración	Gerente Administración y Finanzas	Ejecutivo 2	12,000
	Secretaria	Técnico 1	1,500
	Asesor Legal de Administración	Profesional 1	5,000
	Jefe Recursos Humanos	Profesional 1	5,000
	Secretaria	Técnico 1	1,500
	Jefe de Personal	Profesional 1	5,000
	Profesionales de capacitación	Profesional 3	2,000
	Profesionales de Planillas	Profesional 3	2,000
	Profesionales en Riesgos laborales	Profesional 3	2,000
	Jefe Logística	Profesional 1	5,000
	Secretaria	Técnico 1	1,500
	Comprador	Técnico 1	1,500
	Técnicos de almacenes	Técnico 2	1,000
	Jefe de Tesorería	Profesional 1	5,000
	Secretaria	Técnico 1	1,500
	Técnicos en Tesorería	Técnico 1	1,500
	Contador	Profesional 2	3,500
	Técnicos de pagos a proveedores	Técnico 1	1,500
	Profesionales de control de ingresos, ctas bancos y Fiduciaria	Profesional 3	2,000
	Jefe de Informática	Profesional 1	5,000
	Secretaria	Técnico 1	1,500
	Técnicos de Informática	Técnico 1	1,500
	Profesionales de informática	Profesional 3	2,000
Choferes	Técnico 2	1,000	
Área de comunicación	Jefe del área de comunicación	Profesional 1	5,000
	Secretaría	Técnico 1	1,500
	Profesional en Atención al cliente y Comunicaciones	Profesional 1	5,000
	Técnicos de encuestas y estadísticas de pasajeros	Profesional 3	2,000
	Profesionales de comunicaciones	Profesional 3	2,000
	Diseñadores gráficos	Técnico 1	1,500

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

El detalle de turnos y los montos totales se describe en el Excel – OPEX Línea 4

## 5.2. COSTO SEGURIDAD TERCERIZADA

Se consideró como costo tercerizada a los servicios de seguridad requeridos para las instalaciones. Se estimó según el número de personas necesarias para brindar seguridad a tales instalaciones multiplicado por el costo unitario:

**TABLA N° 22: CÁLCULO DEL COSTO DE SEGURIDAD TERCERIZADA (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
No. de Sub-estaciones	2	4.43	5.77	8.75	10.17	10.17	10.17	10.17
No. de Estaciones de telecomunicaciones	1.00	1.00	2.00	3.00	4.00	4.00	4.00	4.00
No. de Talleres	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
No. de Patios	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
No. de instalaciones de Sede central	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
No. personas de Sub-estaciones	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
No. personas por Estación de telecomunicaciones	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
No. de personas por Taller	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
No. personas por Patio	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
No. personas por Sede central	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Número total de personas de seguridad/turno	10.3	12.4	14.8	23.7	26.2	26.2	26.2	26.2
Número de turnos	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Número total de personas de seguridad	30.9	37.3	44.3	71.2	78.5	78.5	78.5	78.5
Costo de seguridad tercerizada (PEN/persona/mes)	1,500.00	1,500.00	1,500.00	1,500.00	1,500.00	1,697.11	1,920.13	3,146.35
Costo de seguridad tercerizada (PEN/mes)	0.046	0.056	0.066	0.107	0.118	0.133	0.151	0.247
<b>COSTO SEGURIDAD TERCERIZADA (PEN millones/año)</b>	<b>0.557</b>	<b>0.671</b>	<b>0.797</b>	<b>1.282</b>	<b>1.413</b>	<b>1.599</b>	<b>1.809</b>	<b>2.964</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

## 5.3. COSTO LIMPIEZA TERCERIZADA

Se consideró el costo de limpieza como tercerizada, la cual comprende el costo de personas necesarias para limpiar las instalaciones no consideradas anteriormente.

**TABLA N° 23: CÁLCULO DEL COSTO DE LIMPIEZA TERCERIZADA (PEN millones/año)**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
No. de Sub-estaciones	2	4	6	9	10	10	10	10
No. de Estaciones de telecomunicaciones	1.00	1.00	2.00	3.00	4.00	4.00	4.00	4.00
No. de Talleres	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
No. de Patios	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
No. de instalaciones de Sede central	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
No. personas limpieza de Sub-estaciones	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
No. personas limpieza por Estación de telecomunicaciones	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
No. de personas limpieza por Taller	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
No. personas limpieza por Patio	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
No. personas limpieza por Sede central	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Número total de personas de limpieza/turno	19.3	21.4	24.8	37.7	41.2	41.2	41.2	41.2
Número de turnos	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Número total de personas de limpieza	19.3	21.4	24.8	37.7	41.2	41.2	41.2	41.2
Costo de limpieza tercerizada (PEN/persona/mes)	1,200.00	1,200.00	1,200.00	1,200.00	1,200.00	1,357.69	1,536.10	2,517.08
Costo de limpieza tercerizada (PEN/mes)	0.023	0.026	0.030	0.045	0.049	0.056	0.063	0.104
<b>COSTO LIMPIEZA TERCERIZADA (PEN millones/año)</b>	<b>0.278</b>	<b>0.309</b>	<b>0.357</b>	<b>0.544</b>	<b>0.593</b>	<b>0.671</b>	<b>0.759</b>	<b>1.243</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

Con toda la información indicada anteriormente se obtiene el costo total directo que se muestra en la tabla siguiente:

**TABLA N° 24: TOTAL COSTO DIRECTO - PEN MILLONES**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
<b>COSTO DE PERSONAL</b>	<b>26.55</b>	<b>42.62</b>	<b>47.86</b>	<b>77.04</b>	<b>91.75</b>	<b>103.81</b>	<b>120.82</b>	<b>197.97</b>
Costo de personal fijo	12.50	14.80	14.80	14.96	14.96	16.92	19.15	31.37
Costo de personal variable	14.05	27.82	33.06	62.08	76.79	86.88	101.67	166.60
<b>COSTO DE ENERGÍA</b>	<b>9.83</b>	<b>21.55</b>	<b>23.78</b>	<b>53.80</b>	<b>70.17</b>	<b>79.39</b>	<b>100.42</b>	<b>164.55</b>
Costo de consumo energía eléctrica para tracción de material rodante	0.50	2.17	2.50	8.58	12.61	14.27	18.58	30.45
Costo de consumo energía eléctrica para instalaciones	3.97	6.55	7.84	11.81	13.10	14.82	16.77	27.47
Costo de potencia por generación	3.43	8.23	8.62	21.42	28.50	32.25	41.72	66.37
Costo de potencia por transmisión	1.92	4.60	4.82	11.99	15.95	18.05	23.35	38.26
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURA</b>	<b>17.45</b>	<b>30.47</b>	<b>33.75</b>	<b>54.19</b>	<b>62.39</b>	<b>69.29</b>	<b>77.09</b>	<b>120.00</b>
Costo de mantenimiento de estaciones de pasajeros	2.94	5.14	6.24	9.18	10.28	10.76	11.30	14.26
Costo de mantenimiento de túneles y pozos	2.75	4.19	5.10	7.14	8.11	9.17	10.38	17.01
Costo de mantenimiento de catenaria	0.70	2.31	2.75	7.29	10.23	11.58	13.10	21.46
Costo de mantenimiento de sub-estaciones de energía de tracción	0.06	0.11	0.14	0.22	0.25	0.29	0.33	0.53
Costo de mantenimiento de vías férreas	2.71	5.18	6.75	10.24	11.89	13.46	15.22	24.95
Costo de mantenimiento de infraestructura y equipamiento de patios y talleres	3.71	5.98	3.71	6.47	6.47	6.89	7.37	10.00
Costo de señalización y telecomunicaciones	0.06	0.11	0.15	0.22	0.26	0.29	0.33	0.54
Costo de mantenimiento de infraestructura de recaudo	3.90	6.83	8.29	12.19	13.65	15.44	17.47	28.63
Costo de mantenimiento de centro de control	0.63	0.63	0.63	1.25	1.25	1.42	1.60	2.63
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE</b>	<b>5.92</b>	<b>16.55</b>	<b>16.55</b>	<b>47.30</b>	<b>65.04</b>	<b>73.69</b>	<b>83.26</b>	<b>136.44</b>
Costo de limpieza de trenes	0.94	2.61	2.61	7.45	10.26	11.60	13.13	21.51
Costo de mantenimiento preventivo de trenes	4.98	13.95	13.95	39.85	54.79	61.99	70.14	114.93
<b>COSTO DE SERVICIOS TERCERIZADOS</b>	<b>0.84</b>	<b>0.98</b>	<b>1.15</b>	<b>1.83</b>	<b>2.01</b>	<b>2.27</b>	<b>2.57</b>	<b>4.21</b>
Costo de seguridad tercerizada de instalaciones	0.56	0.67	0.80	1.28	1.41	1.60	1.81	2.96
Costo de limpieza tercerizada de instalaciones	0.28	0.31	0.36	0.54	0.59	0.67	0.76	1.24
<b>TOTAL COSTO DIRECTO - PEN MILLONES</b>	<b>60.59</b>	<b>112.17</b>	<b>123.09</b>	<b>234.15</b>	<b>291.36</b>	<b>328.35</b>	<b>384.16</b>	<b>623.17</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

#### 5.4. GASTOS GENERALES

Estos gastos comprendieron los siguientes:

- Costos de seguros
- Costos de suministros (agua, luz, teléfono, internet, etc.)

- Costos de materiales y útiles de oficina
- Costos de capacitación de personal
- Costos de mantenimiento de vehículos administrativos
- Costos de licencias de software
- Imprevistos
- utilidad

Los gastos generales representan un porcentaje de costos directos el detalle de cálculo de los mismos se puede apreciar en la tabla:

**TABLA N° 25: CÁLCULO DE GASTOS GENERALES (PEN millones/año)**

GASTOS GENERALES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
<b>COSTO DE SEGUROS (PEN millones/año)</b>	4.35	4.35	4.35	7.56	8.78	8.78	8.78	8.78
CAPEX - USD millones	1,785.0	1,785.0	1,785.0	3,100.0	3,600.0	3,600.0	3,600.0	3,600.0
Tipo de cambio	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
CAPEX - PEN millones	5,801.3	5,801.3	5,801.3	10,075.0	11,700.0	11,700.0	11,700.0	11,700.0
Pérdida probable (% inversión)	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%
Prima de seguro	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%
<b>COSTO SUMINISTROS (LUZ, AGUA, TELEFONO, INTERNET, ETC.)</b>	0.91	1.68	1.85	3.51	4.37	4.37	4.53	4.53
Costo directo	60.59	112.17	123.09	234.15	291.36	291.36	302.08	302.08
% Costo directo	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%
<b>COSTO DE MATERIALES Y ÚTILES DE OFICINA</b>	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.00
Costo Personal fijo de gestión	12.50	14.80	14.80	14.96	14.96	14.96	14.96	0.00
% Costo personal fijo de gestión	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%
<b>COSTO DE CAPACITACIÓN DE PERSONAL</b>	0.12	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Costo Personal fijo de gestión	12.50	14.80	14.80	14.96	14.96	14.96	14.96	14.96
% Costo personal fijo de gestión + personal estaciones	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO DE VEHICULOS</b>	0.02	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Número de vehículos	4.00	8.00	8.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Costo de mantenimiento de vehículo (PEN/vehículo/año)	6,000.00	6,000.00	6,000.00	6,000.00	6,000.00	6,000.00	6,000.00	6,000.00
<b>COSTO DE LICENCIAS DE SOFTWARE</b>	0.10	0.15	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30
Inversión en equipos de informática PEN millones	10.00	15.00	20.00	20.00	30.00	30.00	30.00	30.00
% de inversión	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%
<b>Utilidad</b>	6.06	11.22	12.31	23.41	29.14	29.14	30.21	30.21
Costo directo total	60.59	112.17	123.09	234.15	291.36	291.36	302.08	302.08
% de utilidad	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia

Por todo lo expuesto, en la tabla siguiente se muestra los costos de operación y mantenimiento para la Línea 4 del Metro de Lima y Callao:

**TABLA N° 26: COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA LÍNEA 1 DEL METRO DE LIMA Y CALLAO – MILLONES DE SOLES ANUALES**

COMPONENTES	Operación parcial				Operación total			
	Escenario 1		Escenario 2	Escenario 3	Gambetta - Mercado Santa Anita			
	Gambetta - Carmen de la Legua	José de Sucre - La Molina	Gambetta - Conde de San Isidro	Gambetta - La Molina	2025	2030	2035	2055
<b>COSTO DE PERSONAL</b>	<b>26.55</b>	<b>42.62</b>	<b>47.86</b>	<b>77.04</b>	<b>91.76</b>	<b>103.81</b>	<b>120.82</b>	<b>197.97</b>
Costo de personal fijo	12.50	14.80	14.80	14.96	14.96	16.92	19.15	31.37
Costo de personal variable	14.05	27.82	33.06	62.08	76.79	86.88	101.67	166.60
<b>COSTO DE ENERGÍA</b>	<b>9.83</b>	<b>21.55</b>	<b>23.78</b>	<b>53.80</b>	<b>70.17</b>	<b>79.39</b>	<b>100.42</b>	<b>164.55</b>
Costo de consumo energía eléctrica para tracción de material rc	0.50	2.17	2.50	8.58	12.61	14.27	18.58	30.45
Costo de consumo energía eléctrica para instalaciones	3.97	6.55	7.84	11.81	13.10	14.82	16.77	27.47
Costo de potencia por generación	3.43	8.23	8.62	21.42	28.50	32.25	41.72	68.37
Costo de potencia por transmisión	1.92	4.60	4.82	11.99	15.95	18.05	23.35	38.26
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURA</b>	<b>17.45</b>	<b>30.47</b>	<b>33.75</b>	<b>54.19</b>	<b>62.39</b>	<b>69.29</b>	<b>77.09</b>	<b>120.00</b>
Costo de mantenimiento de estaciones de pasajeros	2.94	5.14	6.24	9.18	10.28	10.76	11.30	14.26
Costo de mantenimiento de túneles y pozos	2.75	4.19	5.10	7.14	8.11	9.17	10.38	17.01
Costo de mantenimiento de catenaria	0.70	2.31	2.75	7.29	10.23	11.58	13.10	21.46
Costo de mantenimiento de sub-estaciones de energía de tracción	0.06	0.11	0.14	0.22	0.25	0.29	0.33	0.53
Costo de mantenimiento de vías férreas	2.71	5.18	6.75	10.24	11.89	13.46	15.22	24.95
Costo de mantenimiento de infraestructura y equipamiento de pasajeros	3.71	5.98	3.71	6.47	6.47	6.89	7.37	10.00
Costo de señalización y telecomunicaciones	0.06	0.11	0.15	0.22	0.26	0.29	0.33	0.54
Costo de mantenimiento de infraestructura de recaudo	3.90	6.83	8.29	12.19	13.65	15.44	17.47	28.63
Costo de mantenimiento de centro de control	0.63	0.63	0.63	1.25	1.25	1.42	1.60	2.63
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE</b>	<b>5.92</b>	<b>16.55</b>	<b>16.55</b>	<b>47.30</b>	<b>65.04</b>	<b>73.59</b>	<b>83.26</b>	<b>136.44</b>
Costo de limpieza de trenes	0.94	2.61	2.61	7.45	10.26	11.60	13.13	21.51
Costo de mantenimiento preventivo de trenes	4.98	13.95	13.95	39.85	54.79	61.99	70.14	114.93
<b>COSTO DE SERVICIOS TERCERIZADOS</b>	<b>0.84</b>	<b>0.98</b>	<b>1.15</b>	<b>1.83</b>	<b>2.01</b>	<b>2.27</b>	<b>2.57</b>	<b>4.21</b>
Costo de seguridad tercerizada de instalaciones	0.56	0.67	0.80	1.28	1.41	1.60	1.81	2.96
Costo de limpieza tercerizada de instalaciones	0.28	0.31	0.36	0.54	0.59	0.67	0.76	1.24
<b>TOTAL COSTO DIRECTO - PEN MILLONES</b>	<b>60.59</b>	<b>112.17</b>	<b>123.09</b>	<b>234.15</b>	<b>291.36</b>	<b>328.35</b>	<b>384.16</b>	<b>623.17</b>
COSTO DE SEGUROS	4.35	4.35	4.35	7.56	8.78	8.78	8.78	8.78
COSTO SUMINISTROS (LUZ, AGUA, TELÉFONO, INTERNET, ETC)	0.91	1.68	1.85	3.51	4.37	4.93	5.76	9.35
COSTO DE MATERIALES Y ÚTILES DE OFICINA	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30	0.38	0.63	0.00
COSTO DE CAPACITACIÓN DE PERSONAL	0.12	0.15	0.15	0.15	0.15	0.19	0.31	0.31
COSTO DE MANTENIMIENTO DE VEHÍCULOS	0.02	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COSTO DE LICENCIAS DE SOFTWARE	0.10	0.15	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30
IMPREVISTOS	3.03	5.61	6.15	11.71	14.57	16.42	19.21	31.16
<b>TOTAL GASTOS GENERALES - PEN MILLONES</b>	<b>8.79</b>	<b>12.28</b>	<b>13.04</b>	<b>23.48</b>	<b>28.52</b>	<b>31.05</b>	<b>35.05</b>	<b>49.95</b>
<b>UTILIDAD (10%)</b>	<b>6.06</b>	<b>11.22</b>	<b>12.31</b>	<b>23.41</b>	<b>29.14</b>	<b>32.83</b>	<b>38.42</b>	<b>62.32</b>
<b>COSTO TOTAL - PEN MILLONES</b>	<b>75.43</b>	<b>135.68</b>	<b>148.45</b>	<b>281.05</b>	<b>349.02</b>	<b>392.23</b>	<b>457.62</b>	<b>735.44</b>
<b>LONGITUD DE LA LÍNEA (km)</b>	<b>6.95</b>	<b>13.28</b>	<b>17.30</b>	<b>26.25</b>	<b>30.50</b>	<b>30.50</b>	<b>30.50</b>	<b>30.50</b>
<b>KILÓMETROS RECORRIDOS ANUALES (km)</b>	<b>322,877.94</b>	<b>1,390,629.72</b>	<b>1,603,200.17</b>	<b>4,921,784.10</b>	<b>7,130,826.05</b>	<b>7,130,826.05</b>	<b>7,130,826.05</b>	<b>7,130,826.05</b>
<b>PRECIO POR KILÓMETRO TREN (\$/)</b>	<b>233.62</b>	<b>97.56</b>	<b>92.59</b>	<b>57.10</b>	<b>48.94</b>	<b>55.01</b>	<b>64.18</b>	<b>103.14</b>

Fuente: Estructura de Costo de Operación y Mantenimiento - Línea 4

Elaboración: Propia