

Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil Industrial



Diseño de una estrategia de circulación para Metro Valparaíso en horario punta, con el fin de satisfacer la demanda actual y futura.

Por

Daniela Isabel Aguirre Videla

Natalia Ester Marchant Aravena

Trabajo de Título para optar al Grado de
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de
Ingeniero Civil Industrial.

Prof. Guía: Luis Seccatore

Abril, 2018.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por su fidelidad al poder concluir este trabajo, y todo lo que este proceso conlleva.

A mi esposo Carlos por su paciencia y sus palabras de apoyo, por la dedicación y por todo el tiempo invertido en este proceso, Te amo mucho junto a nuestros hijos Joel y Lucas.

A mis padres Albina y German por toda su entrega en estos años de esfuerzo, por su amor y sus enseñanzas hasta el día de hoy.

A mi familia que siempre está para apoyar y animar en todo momento, mis hermanos Loammi, Natanael y Natalia.

A mis suegros Eliana y Javier por todo su apoyo en los momentos justos y por su amor hacia mi familia.

A nuestro profesor guía Luis Seccatore por todo su apoyo y disponibilidad en toda esta aventura dándose el tiempo cada vez que podía para aconsejarnos y encaminarnos en este proceso de ser ingenieras.

A mi compañera Daniela por todo el aguante en este trabajo, por la paciencia y disposición para finalizar de buena manera nuestra carrera.

Natalia Marchant Aravena

AGRADECIMIENTOS

Durante este proceso he recibido el cariño, la ayuda y el apoyo de muchas personas, se me hace imposible nombrarlas a todas, excedería el número de hojas permitidas. Sin embargo, algunas de ellas fueron imprescindibles en este camino.

Mi querida y adorada mamá, por su incondicionalidad, cariño, apoyo y amor. Al cascarrabias de mi padre y mi adorada hermana Cony.

Mi compañero de vida, mi esposo José, por su infinita paciencia y amor. Al motor de mi vida, mis pequeños bebés, Antonella y José Gabriel.

A mi suegr@, tí@s, prim@s, amig@s y profesor@s.

Al personal de Metro Valparaíso, Cristian y Francisco, por colaborarnos en el desarrollo de este trabajo.

Al siempre querido, único y grande profesor Luis Seccatore, gracias por compartir con nosotras sus conocimientos.

Y a mi compañera Natalia por la paciencia y dedicación en esta tarea.....

*.....A ellos y a tantos más **MUCHAS GRACIAS!!!***

Daniela Aguirre Videla

ÍNDICE GENERAL

Lista de Tablas.....	6
Lista de Ilustraciones.....	8
Glosario	13
Abreviaturas y siglas	15
Abreviatura de estaciones en orden de ruta.....	16
Resumen	17
Abstract.....	18
Introducción.....	19
Capítulo 1: Descripción de la empresa	20
1.1 Antecedentes generales.....	20
1.2 Antecedentes técnicos.....	20
1.3 Misión.....	21
1.4 Visión.....	21
1.5 Descripción de la organización.....	22
1.5.1 Estructura organizacional	22
Capítulo 2: Situación actual.....	24
2.1 Régimen operacional.....	24
2.2 Detección de los efectos indeseados	25
2.2.1 Atraso en la salida de las Estaciones Terminales Puerto y Limache	25
2.2.2 Irregularidad en los intervalos de frecuencia.....	26
2.2.3 Hacinamiento en los vagones	27
2.2.4 Mayor tiempo de detención en las estaciones.....	27
2.2.5 Disminución en la calidad del servicio.....	28
2.2.6 Resumen efectos indeseados.....	30
2.3 Identificación del problema	31
2.4 Estimación de la demanda.....	32

2.5	Objetivos	34
2.5.1	General.....	34
2.5.2	Específicos.....	34
Capítulo 3: Investigación bibliográfica		35
Capítulo 4: Desarrollo del modelo.....		43
4.1	Modelo de la situación actual.....	43
4.2	Verificación del modelo.....	55
4.3	Validación del modelo	55
4.4	Propuesta	59
4.4.1	Etapa I. Rutas expresas	59
4.4.2	Etapa II. Rutas expresas con 8 servicios dobles.	62
4.4.3	Etapa III. Rutas expresas con un tren acoplado.	64
4.5	Modelo de simulación de las rutas.	67
4.6	Comparación de resultados.....	75
4.6.1	Tiempos de viaje.....	75
4.6.2	Oferta de transporte	76
Conclusión.....		78
Bibliografía.....		80
Anexo 1.....		81
Anexo 2.....		83
Anexo 3.....		86
Anexo 4.....		101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Estructura accionaria.....	22
Tabla 2: Comparación entre la capacidad y lo efectivamente transportado.....	27
Tabla 3: Resumen EFI's.....	30
Tabla 4: Notación de colores para ARA.....	31
Tabla 5: Relación entre el número de pasajeros y el tiempo de estacionamiento en hora punta.	33
Tabla 6: Resumen de investigación bibliográfica.....	42
Tabla 7: Distribución del tiempo de viaje entre estaciones.....	44
Tabla 8: Distribución de los tiempos de detención en las estaciones.....	44
Tabla 9: Distribuciones de los tiempos de salida.....	44
Tabla 10: Límites superior e inferior del sistema real.....	57
Tabla 11: Límites superior e inferior del modelo.....	58
Tabla 12: Rutas expresas.....	60
Tabla 13: Detención de trenes.....	66
Tabla 14: Límites superior e inferior ruta expresa azul.....	70
Tabla 15: Límites ruta expresa naranja.....	74
Tabla 16: Comparación de la oferta de transporte solo en la ruta de alta demanda.....	76
Tabla 17: Número de pax diario, para los meses de estudio (HPM).....	81
Tabla 18: Número de pax diario, para los meses de estudio (HPT).....	82
Tabla 19: Número de pax, mes de Abril, según ascenso y descenso franja horaria de alto tráfico.....	83
Tabla 20: Número de pax, mes de Mayo, según ascenso y descenso franja horaria de alto tráfico.....	84

Tabla 21: Número de pax, mes de Junio, según ascenso y descenso franja horaria de alto tráfico.....	85
---	----

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: X'Trapolis Modular; X'Trapolis 100.....	20
Ilustración 2: Dimensiones de la vía.....	21
Ilustración 3: Administración Merval.	22
Ilustración 4: Mapa operacional Merval.	24
Ilustración 5: Promedio de los atrasos en la salida de Estación Puerto y Limache.....	25
Ilustración 6: Intervalos de frecuencia reales para los meses de estudio.....	26
Ilustración 7: Tiempo de detención en las estaciones de alto tráfico para HPT.	28
Ilustración 8: Tiempo de detención en las estaciones de alto tráfico para HPM.	28
Ilustración 9: Resultado encuesta pasajeros.	29
Ilustración 10: Árbol de la realidad actual (ARA).	31
Ilustración 11: Proyección de demanda.....	32
Ilustración 12: Ecuación de la recta.....	33
Ilustración 13: Rutas expresas Metro Santiago.	36
Ilustración 14: Trenes expresas Metro Santiago.	36
Ilustración 15: Tren de Paris, GoA4.	37
Ilustración 16: Puertas de andenes sistema GoA4.....	37
Ilustración 17: Andes de metro Montreal.....	39
Ilustración 18: Topología de estación modular genérica.....	40
Ilustración 19: Propuesta de Gérondeau.....	41
Ilustración 20: Modelo situación actual.....	45
Ilustración 21: Modulo Create.....	47
Ilustración 22: Módulo Hold	47

Ilustración 23: Despliegue módulo Hold.....	48
Ilustración 24: Módulo Station.....	49
Ilustración 25: Módulo Delay.....	49
Ilustración 26: Módulo Route.....	50
Ilustración 27: Modulo Create.....	50
Ilustración 28: Módulo Hold.....	51
Ilustración 29: Desglose módulo Hold.....	51
Ilustración 30: Cuadro de diálogo módulo Dispose.....	52
Ilustración 31: Cuadro de diálogo para iniciar el modelo.....	53
Ilustración 32: Reportes del modelo.....	54
Ilustración 33: Distribución del tiempo de viaje del sistema real.....	56
Ilustración 34: Distribución del tiempo de viaje del sistema real determinado con la técnica Bootstrap.....	56
Ilustración 35: : Distribución del tiempo de viaje del modelo.....	57
Ilustración 36: Distribución del tiempo de viaje del modelo.....	58
Ilustración 37: Intervalos de confianza.....	59
Ilustración 38: Capacidad actual v/s propuesta.....	61
Ilustración 39: Capacidad de la propuesta comparada con la proyección de demanda.....	62
Ilustración 40: Capacidad actual v/s propuesta.....	63
Ilustración 41: Capacidad de la propuesta comparada con la proyección de demanda.....	64
Ilustración 42: Propuesta de acoplar un tren extra.....	65
Ilustración 43: Estaciones de salida.....	65
Ilustración 44: Comparación de capacidad entre la situación actual y la propuesta.....	67
Ilustración 45: Modelo ruta expresa azul.....	68

Ilustración 46: Reportes ruta expresa azul.....	69
Ilustración 47: Distribución tiempos de viaje ruta azul.....	70
Ilustración 48: Intervalos de confianza ruta azul.....	71
Ilustración 49: Modelo ruta expresa naranja.	72
Ilustración 50: Reportes ruta expresa azul.....	73
Ilustración 51: Distribución tiempos de viaje ruta naranja.....	74
Ilustración 52: Limites superior e inferior de la ruta naranja v/s situación actual.....	75
Ilustración 53: Comparación de los tiempos de viaje ruta azul.....	76
Ilustración 54: Comparación de los tiempos de viaje ruta azul.....	76
Ilustración 55: Comparación de las etapas de la propuesta con la actualidad.....	77
Ilustración 56: Distribución tiempo de detención Estación Puerto.	86
Ilustración 57: Distribución tiempo de detención Estación Bellavista.....	86
Ilustración 58: Distribución tiempo de detención Estación Francia.....	87
Ilustración 59: Distribución tiempo de detención Estación Barón.....	87
Ilustración 60: Distribución tiempo de detención Estación Portales.....	87
Ilustración 61: Distribución tiempo de detención Estación Recreo	88
Ilustración 62: Distribución tiempo de detención Estación Miramar.....	88
Ilustración 63: Distribución tiempo de detención Estación Viña del Mar.	88
Ilustración 64: Distribución tiempo de detención Estación Hospital.	89
Ilustración 65: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Chorrillos	89
Ilustración 66: Distribución tiempo de estacionamiento Estación el Salto	89
Ilustración 67: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Quilpué	90
Ilustración 68: Distribución tiempo de estacionamiento Estación El Sol	90
Ilustración 69: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Belloto.....	90

Ilustración 70: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Las Américas	91
Ilustración 71: Distribución tiempo de estacionamiento Estación La Concepción	91
Ilustración 72: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Villa Alemana	91
Ilustración 73: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Sargento Aldea.....	92
Ilustración 74: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Peñablanca.	92
Ilustración 75: Distribución del tiempo en ruta desde Limache a Peñablanca.	93
Ilustración 76: Distribución del tiempo en ruta desde Peñablanca a Sargento Aldea	93
Ilustración 77: Distribución del tiempo en ruta desde Sargento Aldea a Villa Alemana.	94
Ilustración 78: Distribución del tiempo en ruta desde Villa Alemana a La Concepción.	94
Ilustración 79: Distribución del tiempo en ruta desde La Concepción a Las Américas.....	94
Ilustración 80: Distribución del tiempo en ruta desde Las Américas al Belloto.	95
Ilustración 81: Distribución del tiempo en ruta desde el Belloto al Sol.	95
Ilustración 82: Distribución del tiempo en ruta desde el Sol a Quilpué.	95
Ilustración 83: Distribución del tiempo en ruta desde Quilpué a El Salto.	96
Ilustración 84: Distribución de tiempo en ruta desde el Salto a Chorrillos.....	96
Ilustración 85: Distribución de tiempo en ruta desde Chorrillos a Hospital.	96
Ilustración 86: Distribución de tiempo en ruta desde Hospital a Viña del Mar.	97
Ilustración 87: Distribución del tiempo en ruta desde Viña del Mar a Miramar.....	97
Ilustración 88: Distribución del tiempo en ruta desde Miramar a Recreo.....	97
Ilustración 89: Distribución del tiempo en ruta desde Recreo a Portales.....	98
Ilustración 90: Distribución del tiempos de ruta desde Portales a Barón.....	98
Ilustración 91: Distribución del tiempo de ruta desde Barón a Francia.	98
Ilustración 92: Distribución del tiempo de ruta desde Francia y Bellavista.....	99
Ilustración 93: Distribución del tiempo de ruta desde Bellavista a Puerto.....	99

Ilustración 94: Distribución del tiempo de salida desde estación Limache.....	99
Ilustración 95: Distribución del tiempo de salida desde Estación Sargento Aldea.	100
Ilustración 96: Extracto memoria anual 2010 (MV, Memoria anual, 2010).....	101
Ilustración 97: Extracto memoria anual 2012 (MV, Memoria anual, 2012).....	101
Ilustración 98: Extracto memoria anual 2014 MV (MV, Memoria anual , 2014).....	102
Ilustración 99: Extracto memoria anual 2016 (MV, Memoria anual, 2016).....	102
Ilustración 100: Extracto informes de Gestión 2017 (MV, Informe de gestión , 2017).....	103
Ilustración 101: Análisis de la demanda.....	103

GLOSARIO

Acoplado: Unión de dos trenes.

Catenaria ferroviaria: Línea aérea que abastece de energía eléctrica.

Central de control de tráfico (CCT): Lugar físico donde se controla y regula la circulación de trenes del sistema de movilización vigente y desde donde se operan los dispositivos telecomandados de los sistemas control de tráfico centralizado (CTC).

Control de tráfico centralizado (CTC): Es un dispositivo a través del cual se controla el tráfico de trenes.

Hora programada de salida: Hora preestablecida en que debe iniciar el servicio.

Itinerario: Programación para el recorrido de un tren entre dos o más estaciones, con indicación de sus horarios de salida, pasada y llegada.

Puesto de mando local (PML): Sistema para la operación de estaciones CCT a nivel local cuando no se pueda o no convengan comandar desde la CCT, se ubica físicamente en los locales técnicos.

Telecomandado: Comandado a distancia.

Terminal Vía 1: Estación Limache.

Terminal Vía 2: Estación Puerto.

Tiempo de estacionamiento: tiempo que permanece detenido el tren en cada estación en espera del ascenso o descenso de pasajeros.

Trocha: Distancia entre rieles.

Vía 1: Situada al lado derecho, que permite la circulación normal de trenes desde estación Puerto a estación Limache (en el sentido ascendente del kilometraje).

Vía 2: Situada al lado izquierdo, que permite la circulación normal de trenes desde estación Limache a estación Puerto (en el sentido ascendente del kilometraje).

Vía Férrea: Es la unidad constituida por rieles, durmientes, sujeciones, cambios, desviadores, balastos y además elementos que por su naturaleza y destinación permiten el tránsito de vehículos ferroviarios.

ABREVIATURAS Y SIGLAS

ARA: Árbol de la realidad actual.

CCT: Central de control tráfico.

CTC: Control de tráfico centralizado.

HP: Hora punta mañana y hora punta tarde.

HPM: Hora punta mañana desde las 07:00 a las 09:00 Hrs., sin embargo, se ha considerado el periodo de mayor demanda desde las 07:00 a 08:00 Hrs.

HPT: Hora punta tarde desde las 17:00 a las 20:00 Hrs., sin embargo, se ha considerado el periodo de mayor demanda desde las 18:00 a 19:00 Hrs.

MV: Metro Valparaíso.

Pax: Pasajeros.

PK: Punto kilométrico.

PML: Puesto de mando local.

RTF: Reglamento de tráfico ferroviario.

THDR: Tabla horaria detallada real.

TDV: Tiempo de viaje.

ABREVIATURA DE ESTACIONES EN ORDEN DE RUTA

PUE : Estación Puerto.

BEL : Estación Bellavista.

FRA : Estación Francia.

BAR : Estación Barón.

POR : Estación Portales.

REC : Estación Recreo.

MIR : Estación Miramar.

VIN : Estación Viña del Mar.

HOS : Estación Hospital.

CHO : Estación Chorrillos.

SLT : Estación el Salto.

QUI : Estación Quilpué.

SOL : Estación el Sol.

BTO : Estación Belloto.

AME : Estación las Américas.

CON : Estación Concepción.

VAM : Estación Villa Alemana.

SGA : Estación Sargento Aldea.

PEN : Estación Peña Blanca.

LIM : Estación Limache.

RESUMEN

Los incrementos continuos de demanda han llevado a distintas empresas encargadas del transporte ferroviario de pasajeros a buscar nuevas estrategias de circulación. Metro Valparaíso no ha sido la excepción, en el transcurso de los últimos cinco años ha experimentado un aumento del 30% en el número de pasajeros. Esto ha llevado a la empresa a incurrir en una serie de efectos indeseados que deterioran la calidad del servicio.

En el siguiente trabajo de título se propone un diseño de circulación para Metro Valparaíso en hora punta, formulando un modelo alimentado con datos de los meses de abril, mayo y junio. Sólo se modela una vía, puesto que la vía contraria se comporta como espejo. Como solución a la situación actual se propone un diseño de circulación separado en tres etapas. La primera etapa consta de generar rutas expresas, la segunda, además de las rutas expresa, incorpora 8 servicios dobles y la tercera consta del acople de tres trenes con cada servicio sin la utilización de las rutas expresas.

Se realizó un modelo de simulación en el programa Rokwell Arena versión 15, con la propuesta de diseño de circulación para el horario punta. Los resultados obtenidos de la simulación arrojan que la propuesta, rutas expresas, tienen un tiempo total de viaje menor, permitiendo aumentar la oferta de transporte.

Palabras claves: Demanda, modelo, simulación, rutas expresas, propuesta de diseño de circulación.

ABSTRACT

The continuous increases in demand have led various companies responsible for passenger rail transport to seek new circulation strategies. Metro Valparaíso has not been the exception, in the course of the last five years it has experienced an increase of 30% in the number of passengers. This has led the company to incur in a series of undesired effects that deteriorate the quality of the service.

In the following title work, a circulation design for Metro Valparaíso during rush hour is proposed, formulating a model fed with data from the months of April, May and June. Only one way is modeled, since the opposite way behaves like a mirror. As a solution to the current situation, a separate circulation design is proposed in three stages. The first stage consists of generating express routes, the second, in addition to express routes, incorporates 8 double services and the third consists of the coupling of three trains with each service without the use of express routes.

A simulation model was carried out in the Rokwell Arena version 15 program, with the proposed circulation design for peak hours. The results obtained from the simulation show that the proposal, express routes, have a shorter total travel time, allowing to increase the supply of transport.

Keywords: Demand, model, simulation, express routes, circulation design proposal.

INTRODUCCIÓN

Metro Valparaíso es la empresa de transporte ferroviario de la Quinta Región. Actualmente transporta alrededor de 18 millones de pasajeros anuales, de los cuales el 30% corresponde a viajes realizados en hora punta. Así, el incremento en el número de pasajeros genera una serie de efectos indeseados los que se nombran a continuación.

EFI-1 Atraso en la salida de las estaciones terminales Puerto y Limache

EFI-2 Irregularidad en los intervalos de frecuencia

EFI-3 Hacinamiento en los vagones

EFI-4 Mayor tiempo de detención en las estaciones

EFI-5 Disminución en la calidad del servicio

Consecuencia de lo anterior, el estudio de causa - efecto (ilustración 10) permite concluir que la causa raíz o principal es que las estrategias operacionales de la empresa en hora punta no permite satisfacer los requerimientos de los clientes.

A través de Arena, un software de simulación, se estudió una nueva estrategia de circulación, conocida en algunas partes del mundo y en el Metro de Santiago como rutas expresas. Estas consisten en generar 2 rutas de viaje diferenciándose en las estaciones de detención. Lo que se espera es que el tiempo total de viaje disminuya y, por lo tanto, la disponibilidad de los trenes aumente, se amplía la capacidad de transporte, se acorten los tiempos de estacionamiento y los intervalos de frecuencia se regularicen.

En conclusión, la implementación de una nueva estrategia de circulación denominada rutas expresas, eliminaría los efectos indeseados.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

1.1 Antecedentes generales

En 1995, se constituye mediante escritura pública, la Sociedad Anónima Metro Regional de Valparaíso S. A. empresa filial de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE). La empresa brinda el servicio de transporte ferroviario de pasajeros atendiendo a las comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana y Limache.

En 1999, se decide desarrollar el denominado Proyecto IV Etapa, que no sólo consideró el hundimiento de la vía en Viña del Mar, sino la modernización global del servicio, con el fin de transformarlo en la columna vertebral del sistema de transporte público del Gran Valparaíso.

El servicio fue inaugurado el 23 de noviembre de 2005. Luego de un periodo de funcionamiento en «marcha blanca» de tres días, sus operaciones se iniciaron en plenitud el 24 de noviembre del mismo año.

1.2 Antecedentes técnicos

Actualmente la empresa cuenta con un total de 35 automotores, de los cuales 27 son automotores modelo X'Trapolis 100, ubicado a la derecha en la ilustración 1, y 8 automotores modelo X'Trapolis Modular, ubicado a la izquierda.

Estos se alimentan con una corriente continua de 3.000 Volt, provenientes de dos subestaciones eléctricas, una ubicada en Portales y la otra en Villa Alemana, la energía eléctrica se transporta a través de una línea aérea denominada catenaria, como se muestra en la ilustración 1.

Ilustración 1: X'Trapolis Modular; X'Trapolis 100.



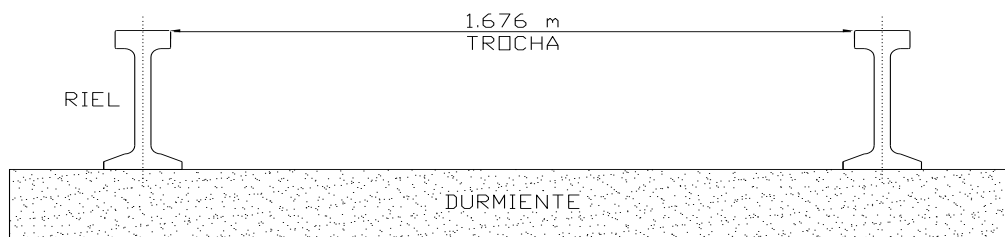
Fuente: Metro Valparaíso.

El inicio de la red comienza en el punto kilométrico (PK) 0,083 ubicado en la Estación Puerto y el terminó en PK 43,625 ubicado en el extremo oriente en la estación de Limache. Las estaciones intermedias se encuentran en los siguiente PK.

PUE : PK 0,133	BEL : PK 0,857	FRA : PK 1,561
BAR : PK 2,351	POR : PK 4,081	REC : PK 6,126
MIR : PK 7,535	VIN : PK 8,437	HOS : PK 9,302
CHO : PK 10,307	SLT : PK 11,848	QUI : PK 21,568
SOL : PK 23,339	BTO : PK 25,414	AME : PK 26,541
CON : PK 27,749	VAM : PK 28,610	SGA : PK 29,252
PEN : PK 30,550	LIM : PK 43,264	

En cuanto a las dimensiones, el andén mide 100 mt, este acoge como máximo a dos trenes de 48 mt cada uno. La distancia entre rieles (trocha) es de 1,676 mt. Como se muestra en la ilustración 2.

Ilustración 2: Dimensiones de la vía.



Fuente: Elaboración propia.

1.3 Misión

Entregar a los usuarios un servicio público de transporte integrado de pasajeros, mediante un sistema eficiente y confiable, que contribuya a mejorar la movilidad en la conurbación del Gran Valparaíso y la calidad de vida de sus habitantes.

1.4 Visión

Ser el articulador del sistema integrado de transporte público de la conurbación del Gran Valparaíso.

1.5 Descripción de la organización

Metro Valparaíso es administrado por Metro Regional de Valparaíso S.A., empresa filial de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE), quienes tienen el 99.99% de las acciones. La estructura accionaria se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Estructura accionaria.

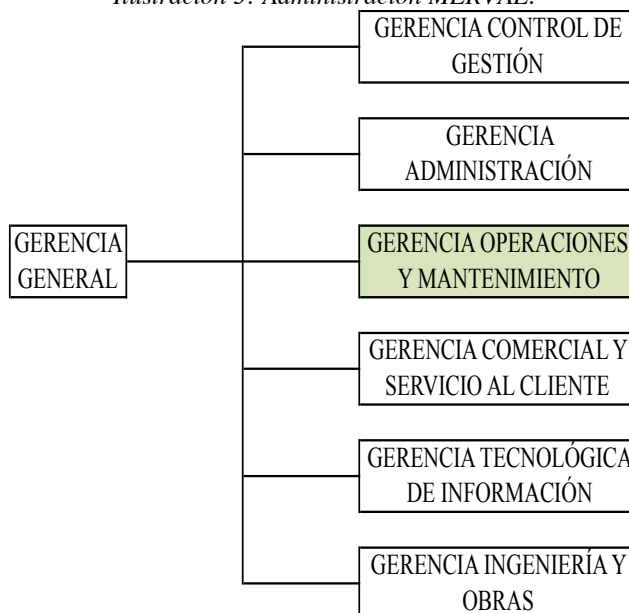
Accionista	Participación	Número de acciones
Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE)	99,99%	708.962.195
Servicio de Trenes Regionales S.A. (ex Ferrocarriles del Sur S.A.)	0,01%	300
Total	100 %	708.962.495

Fuente: Elaboración propia.

1.5.1 Estructura organizacional

Metro Valparaíso actualmente cuenta con 6 gerencias, las que se nombran en la ilustración 3, de estas, la encargada de velar por el correcto funcionamiento es Gerencia de Operaciones y mantenimiento.

Ilustración 3: Administración Merval.



Fuente: Metro Valparaíso.

Parte del personal de la Gerencia de Operaciones y mantenimiento es:

- **Controlador de tráfico:** Controla y/o regula la circulación de trenes en todos los sistemas de movilización vigente, operando además los dispositivos telecomandados (sistemas CTC u otros), desde la misma central de control de tráfico o desde un puesto de mando local.
- **Inspector de turno:** Supervisa y apoya la labor de los controladores de tráfico y/o movilizadores y de la gestión de seguridad del tráfico ferroviario.

Además, en situaciones de emergencia y anomalía coordinará las acciones que permitan tener el control de estas.

- **Maquinista:** Encargado de la conducción del tren que comanda, de acuerdo con lo establecido en el reglamento de tráfico ferroviario (RTF) y normativa complementaria vigente. Ostenta el mando operativo de la seguridad del tren.
- **Supervisor de operaciones:** Administra las labores de tráfico y mantenimiento en terreno (coordinando, dirigiendo, fiscalizando, controlando y / o instruyendo). También es uno de los encargados de velar por cumplimiento del reglamento RTF.

CAPÍTULO 2: SITUACIÓN ACTUAL

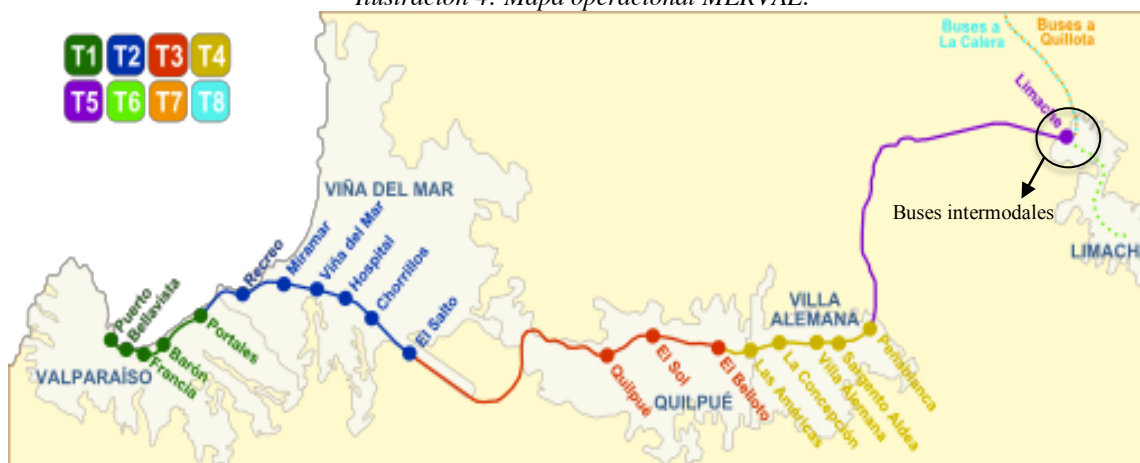
Para determinar la situación actual de la empresa se analizaron los días laborales de los meses de Abril, Mayo y Junio, ya que en estos meses el número de pasajeros es mayor.

2.1 Régimen operacional

Metro Valparaíso actualmente cuenta con 20 estaciones uniendo las comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa alemana y Limache, en esta última se suman buses intermodales, que conectan Quillota, Calera y Limache viejo. Entre estación Puerto y estación Limache hay 42 Km de vía.

La ilustración 4 es el mapa de acción de Metro Valparaíso.

Ilustración 4: Mapa operacional Merval.



Fuente: Metro Regional de Valparaíso.

Cuenta con dos vías, vía 1 que va de Estación Puerto en dirección a Estación Limache, y vía 2 que va de Estación Limache en dirección a Estación Puerto.

Operacionalmente por vía 1 se realizan 95 servicios, comenzando las operaciones a las 6:30 Hrs e iniciando el último servicio a las 22:25 Hrs, por vía 2 se realizan 98 servicios comenzando las operaciones a las 6:15 Hrs e iniciando el último servicio a las 22:15 Hrs. La empresa ha definido como hora punta mañana (HPM) desde las 07:00 a las 09:00 Hrs y hora punta tarde (HPT) desde las 17:00 a 20:00 Hrs., sin embargo, el mayor tráfico de pasajeros

se da en HPM desde las 07:00 a 08:00 Hrs y en HPT desde las 18:00 a 19:00 Hrs., para HPM la carga de pasajeros es superior en vía 2 y para HPT en vía 1.

Una de las estrategias utilizada por la empresa para satisfacer la demanda en las horas punta (HP) consiste en reducir los intervalos de frecuencia de 12 a 6 minutos, para cumplir con esto se generaron dos rutas, por vía 1 el primer servicio programado llega hasta Limache y el siguiente a Sargento Aldea. Del mismo modo por vía 2 el servicio que inicia operaciones en hora punta lo hace en Estación Limache y el que sigue en Sargento Aldea.

Durante los meses de estudio en promedio se transportó 1.8 millones de pasajeros de los cuales el 30% corresponden a viajes realizados en hora punta (HP)

Los antecedentes proporcionados por la empresa corresponden a la carga diaria de pasajeros por hora, no el detalle de pasajeros por servicio.

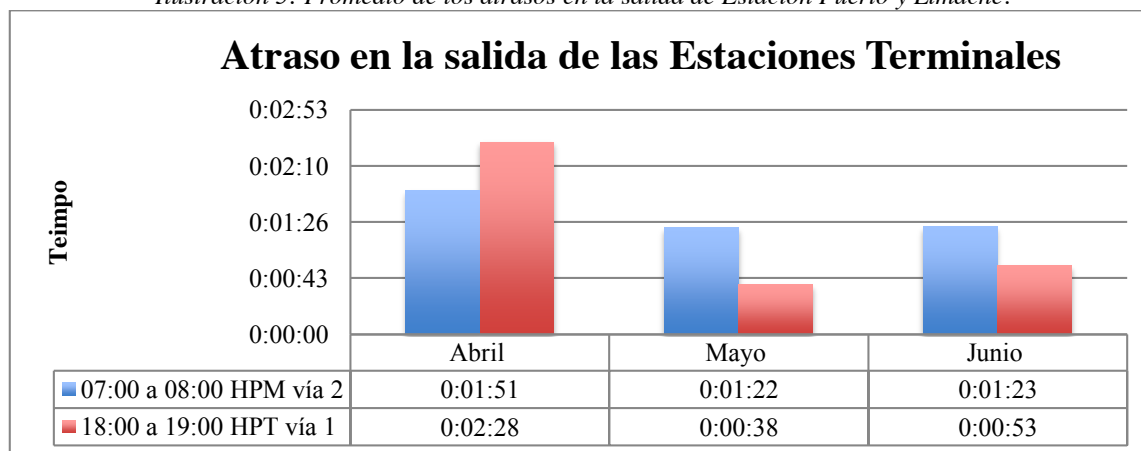
2.2 Detección de los efectos indeseados

El análisis de datos permitió determinar 5 efectos indeseados, los que se describen a continuación.

2.2.1 Atraso en la salida de las Estaciones Terminales Puerto y Limache

Cada tren que inicia sus servicios ya sea por vía 1 o 2, fuera del itinerario, es considerado un atraso. La ilustración 5 indica, para los meses de estudio, un promedio de los atrasos registrados.

Ilustración 5: Promedio de los atrasos en la salida de Estación Puerto y Limache.



Fuente: Elaboración propia.

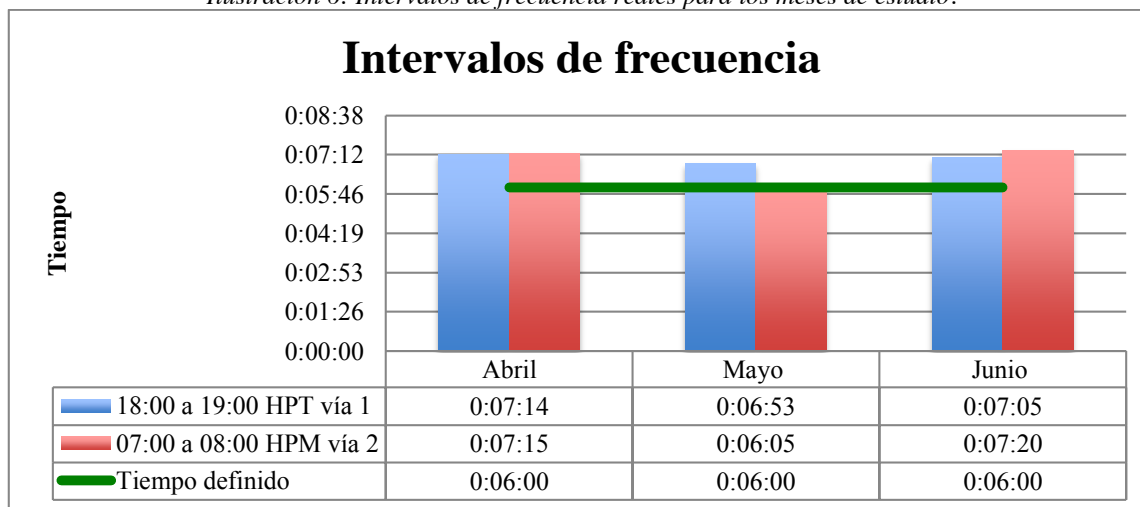
El 100% de los servicios inicia sus operaciones fuera de la hora programada, a causa de:

- El Maquinista no está en su posición, esto se debe al bajo control de sus obligaciones por parte del inspector de turno.
- Los pasajeros bloquean las puertas para ingresar a los vagones, ya que estos están a su capacidad completa, por lo tanto, el espacio físico para ingresar es mínimo y activa los sensores que no permiten el cierre de las mismas.
- El tren no está disponible a tiempo. Al aumentar los tiempos de estacionamiento el tiempo de viaje (TDV) es mayor, por lo tanto, su disponibilidad se ve reducida.

2.2.2 Irregularidad en los intervalos de frecuencia

Debe haber 6 minutos de diferencia entre un servicio y otro, cuando esto no se cumple se genera una irregularidad en los intervalos de frecuencia. La ilustración 6 muestra un promedio de los intervalos de frecuencia reales para los meses de estudio.

Ilustración 6: Intervalos de frecuencia reales para los meses de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

El 100% de los servicios presenta un intervalo de frecuencia irregular, esto debe su causa a:

- Mayor tiempo de detención en las estaciones, ya que hay un aumento de pasajeros en los andenes en espera por el servicio.

2.2.3 Hacinamiento en los vagones

Cada tren acoplado de Metro Valparaíso tiene una capacidad de transporte promedio de 800 pasajeros, de estos 200 van sentados y 600 de pie (4 pax mt²), sin embargo, en hora punta se estima que los pasajeros de pie aumentan a 752 (5 pax mt²). El anexo 1 y 2 permiten realizar dichos cálculos.

La comparación entre la capacidad de un servicio acoplado (dos trenes) y lo efectivamente transportado es posible revisarlo en la tabla 2.

Tabla 2: Comparación entre la capacidad y lo efectivamente transportado.

	Capacidad de un servicio acoplado	Efectivamente transportados
Pax sentados	200	200
Pax parados	600 (4 pax/m ²)	752 (5 pax/m ²)
Promedio	800	952

Fuente: Elaboración propia.

Para un 100% de los servicios programados en hora punta hay pasajeros de pie por sobre la capacidad de las especificaciones, esto debe su causa a:

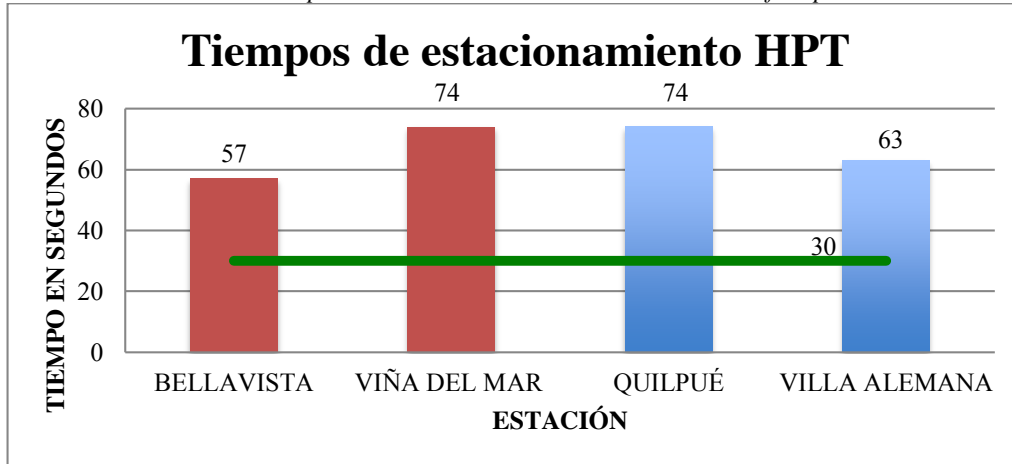
- Aumento de la cantidad de pasajeros en los andenes, ya que el tiempo de espera de los pasajeros es elevado. Un pasajero que viaja a PEN o LIM o alguna de las estaciones combinadas de la zona interior, debe esperar 12 min como mínimo y solo los pasajeros que viajan hasta la estación SGA esperan 6 min.

2.2.4 Mayor tiempo de detención en las estaciones

Metro Valparaíso ha definido el tiempo de detención en las estaciones en 30 segundos, esto incluye la apertura y cierre de puerta y el ascenso y descenso de pasajeros.

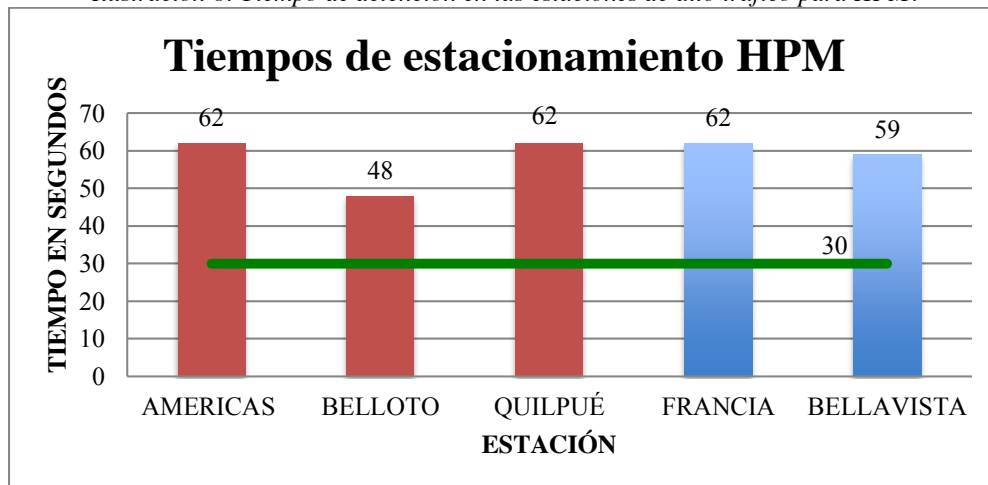
Las ilustraciones 7 y 8 son un promedio del tiempo de detención en las estaciones de alto tráfico para hora punta en los meses en estudio.

Ilustración 7: Tiempo de detención en las estaciones de alto tráfico para HPT.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 8: Tiempo de detención en las estaciones de alto tráfico para HPM.



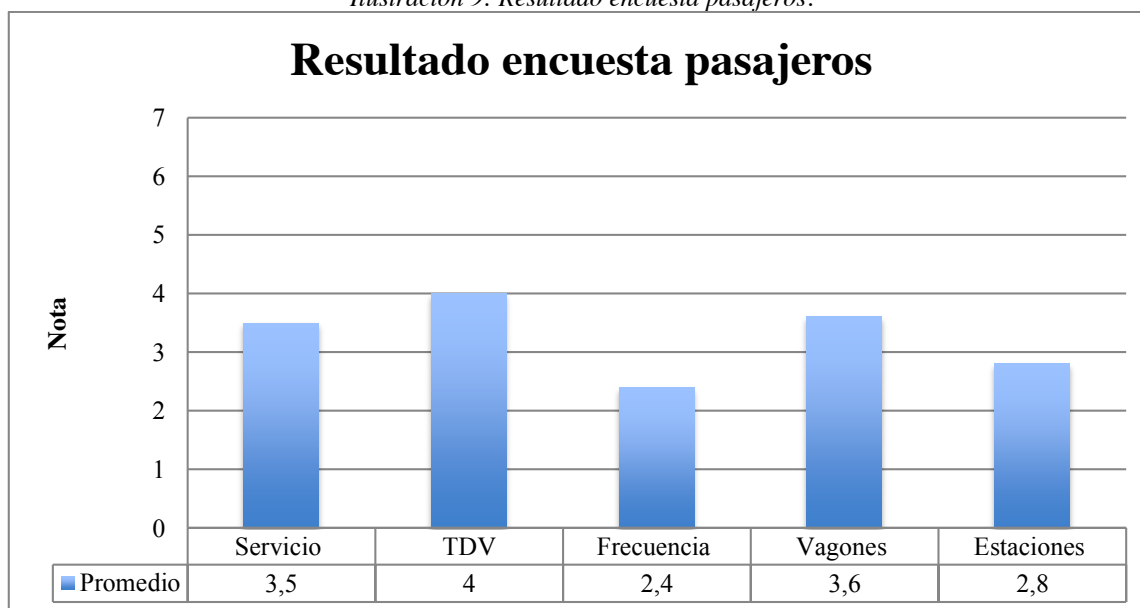
Fuente: Elaboración propia.

Para la totalidad de los servicios realizados en hora punta, el tiempo de estacionamiento es mayor que el programado.

2.2.5 Disminución en la calidad del servicio

Según la investigación de campo realizada por el movimiento social “Indignado con Merval”, donde se evaluó en una escala de 1 a 7 el servicio, el tiempo de viaje, la frecuencia, los vagones y las estaciones, la empresa obtuvo en promedio una calificación de 3,3. La ilustración 9 es un resumen de los promedios obtenidos para cada aspecto evaluado.

Ilustración 9: Resultado encuesta pasajeros.



Fuente: "Indignados con Merval", Elaboración propia.

La evaluación deja en evidencia la insatisfacción del usuario. La frecuencia que tiene directa relación con las operaciones y las estrategias de la empresa presenta la peor calificación.

2.2.6 Resumen efectos indeseados

La tabla 3 es un resumen de los efectos indeseados con la frecuencia con que ocurre cada uno y las causas que lo generan.

Tabla 3: Resumen EFI's.

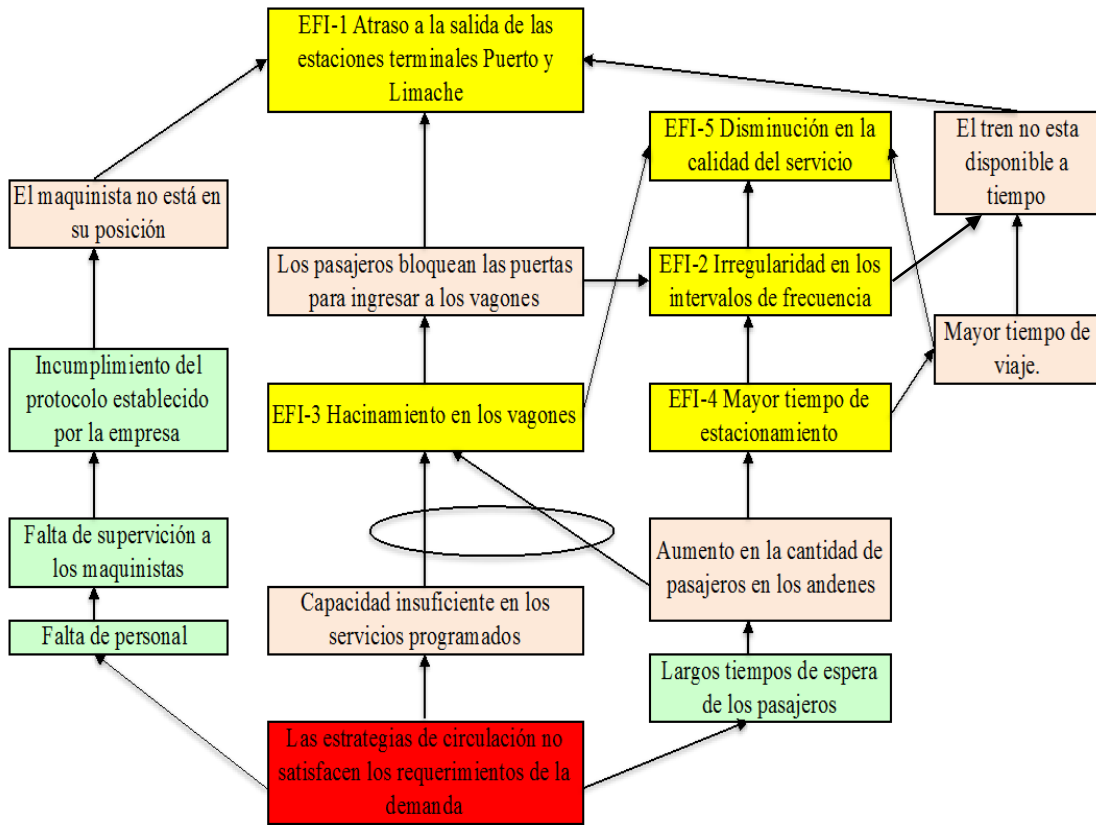
Efectos Indeseados (EFI's)	Frecuencia de ocurrencia	Causas y sub-causas
EFI-1 Atrasos en la salida de las estaciones terminales (Puerto y Limache)	100%	-Maquinista no está en su posición a tiempo. - El tren no está disponible a tiempo. - Pasajeros bloquean las puertas para ingresar a los vagones.
EFI-2 Irregularidad en los intervalos de frecuencia	100%	-Pasajeros bloquean las puertas para ingresar a los vagones. -Mayor tiempo de detención en las estaciones.
EFI-3 Hacinamiento en los vagones	100%	-Capacidad insuficiente en el servicio programado. -Aumento en la cantidad de pasajeros en los andenes.
EFI-4 Mayor tiempo de detención en las estaciones	100%	-Aumento en la cantidad de pasajeros en los andenes.
EFI-5 Disminución en la calidad de servicio		-Mayor tiempo de viaje que el programado. -Irregularidad en los intervalos de frecuencia. -Hacinamiento en los vagones.

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Identificación del problema

El estudio de causa-efecto permite identificar la causa principal que elimina la cadena de efectos indeseados, el árbol de la realidad actual (ARA) es la metodología aplicada para determinar dicha causa. La ilustración 10 muestra el desarrollo del ARA.

Ilustración 10: Árbol de la realidad actual (ARA).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4: Notación de colores para ARA.

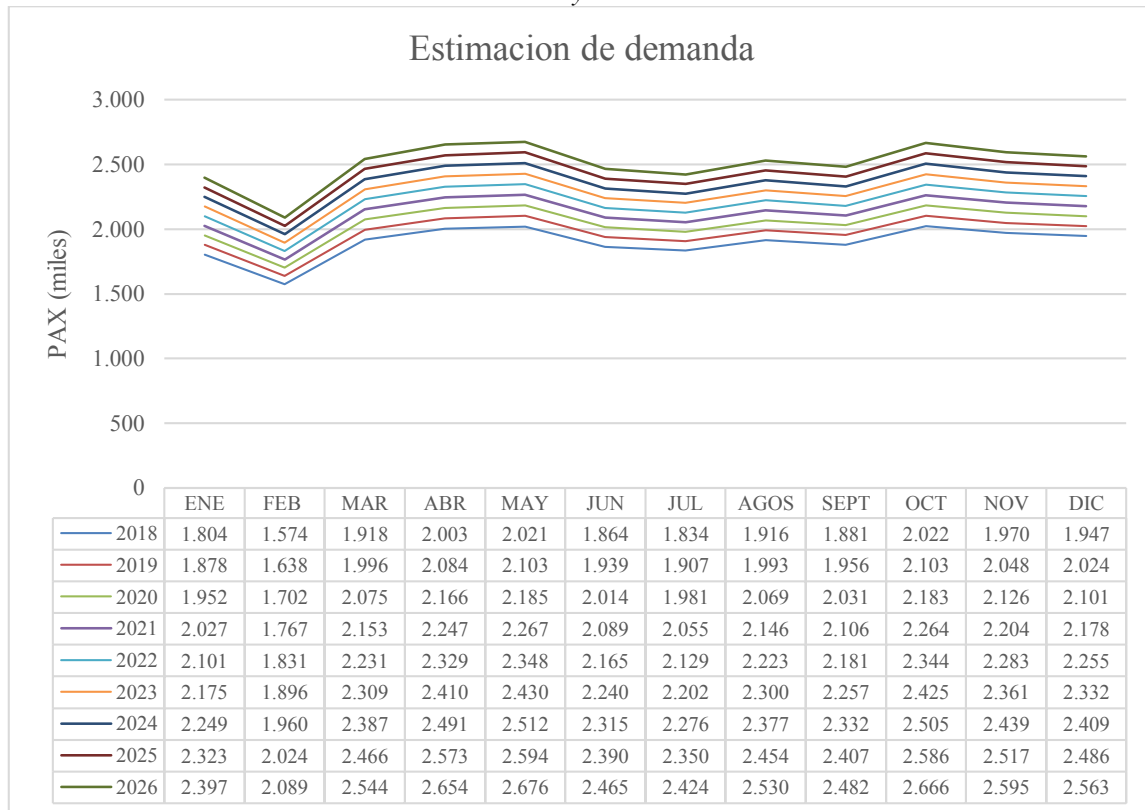
Abreviatura	Significado	Color
EFI	Efectos indeseados	Amarelo
	Causa	Bege
	Sub-Causa	Verde
	Causa raíz	Verde

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Estimación de la demanda

La ilustración 11 es la proyección de demanda desde el año 2018 hasta 2026, la que se determinó mediante la información publicada en las memorias anuales del año 2010, 2012, 2014, 2016 y los informes de gestión del año 2017, disponibles en el Anexo 5. El aumento creciente de demanda llevará a Metro Valparaíso a transportar en diciembre del 2026 2.563.000 pasajeros, un 44% más que lo transportado actualmente.

Ilustración 11: Proyección de demanda.



Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de transporte actual en HP es de 6.000 pasajeros con 5 trenes dobles con capacidad para 800 pasajeros cada uno y 4 trenes simples con capacidad de 400 pasajeros cada uno.

Como es conocido el número de pasajeros transportados en hora punta y el tiempo de detención en las estaciones es posible realizar un modelo de regresión lineal, donde la variable dependiente es el tiempo de detención en las estaciones y la independiente el número

de pasajeros transportados. Estos antecedentes pueden ser revisados en la tabla 5. Sólo se consideró las estaciones con mayor flujo de pasajeros.

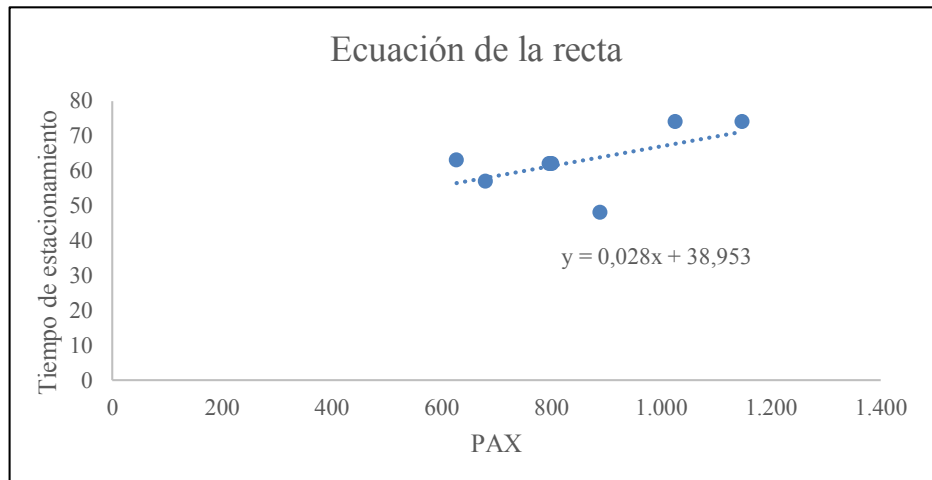
Tabla 5: Relación entre el número de pasajeros y el tiempo de estacionamiento en hora punta.

ESTACIÓN	PAX	TIEMPO DE DETENCIÓN
Bellavista	680	57
Francia	801	62
Viña del mar	1,026	74
Quilpué	1,148	74
Belloto	889	48
Villa Alemana	627	63
Las Américas	796	62

Fuente: Elaboración propia.

La ilustración 12 muestra una ecuación de la recta, la que permite determinar el tiempo de detención del tren entre 627 y 1148 pasajeros.

Ilustración 12: Ecuación de la recta.



Fuente: Elaboración propia.

A mayor número de pasajeros, mayor tiempo de estacionamiento, por lo tanto, debe ser mejorada la oferta de transporte, con el fin de satisfacer el aumento de demanda.

2.5 Objetivos

2.5.1 General

Diseño de una estrategia de circulación para Metro Valparaíso en horario punta, con el fin de satisfacer la demanda actual y futura.

2.5.2 Específicos

- Identificar los procesos de circulación de los trenes para describir sus operaciones.
- Determinar un modelo operacional para modelar la estrategia a proponer.
- Proponer las estrategias de circulación.

CAPÍTULO 3: INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

La oferta ofrecida por los trenes metropolitanos se ve superada por la demanda en las horas de alto tráfico, esta es una realidad que se vive día a día en muchas partes del mundo, entre ellas Tokio, Boston, Nueva York, Caracas, y sin ir más lejos el Metro de Santiago. Las soluciones dadas en los metros de Santiago, Medellín y París son:

Metro de Santiago

En el transcurso de los últimos años el Metro de Santiago se ha visto enfrentado a un aumento en el número de pasajeros, en horario punta, esto ha llevado a que una gran cantidad de personas sufran diversas incomodidades, una de estas es la aglomeración en los andenes. Lo anterior genera atrasos del servicio, produciendo una irregularidad de los horarios, que a su vez provoca que los trenes permanezcan detenidos entre las estaciones, a la espera de ingresar al andén.

Caroca (Caroca, 2011) propone mejorar la frecuencia de los trenes a través de la formulación de un modelo matemático, con el cual se obtendrán los tiempos óptimos de detención en las estaciones para la subida y bajada de pasajeros, esto reduciría el tiempo de detención en las inter-estaciones y los costos de operación y estandarización del régimen operacional.

Metro de Santiago y Medellín

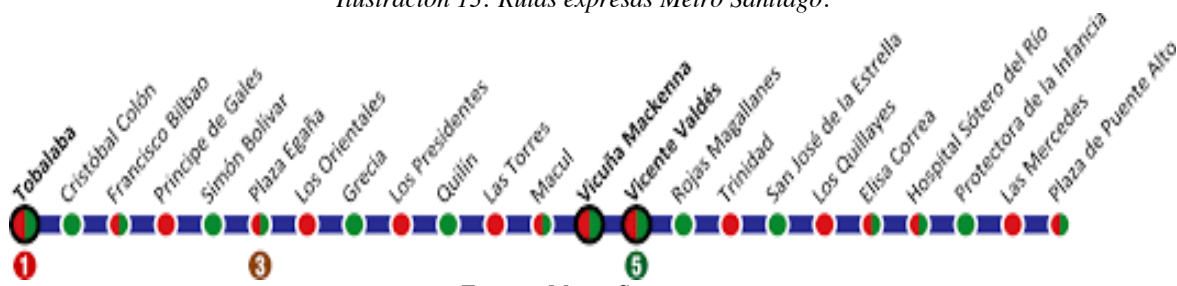
Metro de Santiago y Metro de Medellín (metro.cl, 2017) han implementado, para dar satisfacción a la demanda, el uso de las rutas expresas, las que permiten aumentar la oferta de transporte y reducir los tiempos de viaje.

Estas rutas consisten en la detención alternada de los trenes en las estaciones que están designadas previamente por colores, sin embargo, hay estaciones comunes en las cuales se detienen todos los servicios, ya que son de gran afluencia de público o se encuentran las intermodales de conexión con otras líneas u otros medios de transporte.

Específicamente para el Metro de Santiago las dos rutas de viaje (verde y roja) operan en ambas vías y en las HP establecidos por la empresa 06:00 - 09:00 de 12:00 - 15:00 y de

18:00 - 21:00. Los trenes están debidamente señalizados en cabina por el color que les corresponde además de la parte externa de los vagones. A continuación, la ilustración 13 y 14, son un ejemplo de la línea 4 de Metro de Santiago, que indican la estaciones de paradas de cada ruta según su color y la posición de los colores en los vagones.

Ilustración 13: Rutas expresas Metro Santiago.



Fuente: Metro Santiago

Ilustración 14: Trenes expresas Metro Santiago.



Fuente: Metro de Santiago.

La implementación de las rutas expresas permite:

- Aumentar la oferta de transporte
- Reducir los tiempos de viaje.

Metro de París

En el metro de París, para dar satisfacción a la creciente demanda, se construyó la línea 14 bajo la modalidad de conducción automática GoA4 (sin tripulación, como es posible ver en la ilustración 15) y paulatinamente se implementó a las líneas ya existentes.

Ilustración 15: Tren de Paris, GoA4.



Fuente: Google académico

Gracia (Gracia, 2016) indica que un sistema de metro automático GoA4 debe contar con rodadura de acero, frenado regenerativo, vías banalizadas totalmente reservados, sistema centralizado de mando y control de línea, todas características necesarias para la operación, de la misma manera se debe contar con puertas de andén (mamparas de altura 1.8 metros aproximadamente, con 2 puertas corredizas y automáticas que están sincronizadas con la de los trenes) en cada estación, como se muestra en la ilustración 16.

Ilustración 16: Puertas de andenes sistema GoA4.



Fuente: Google académico

La conducción automática permite:

- La salida de los trenes de las estaciones terminales sin retraso.
- Tiempos de viaje total y entre las estaciones homogéneos.
- Regulación en los tiempos de detención.
- Reducción en los tiempos de maniobras.

- Cambio de dirección automático.
- Flexibilidad operativa sin costo adicional de personal.
- Acoplamiento automático de los trenes.

Este tipo de operación ha sido replicado en grandes ciudades del mundo, ejemplo de ello son el Metro de Madrid, España y el Metro de San Francisco, EE. UU.

El metro de Santiago utiliza un sistema de operación GoA3, este es un sistema automático, pero que requiere de tripulación a bordo, sin embargo, la Línea 6 inaugurada el 2 de noviembre de 2017 cuenta con sistema GoA4 igualando a las grandes ciudades del mundo.

Metros del mundo

Virgili (Virgili, 1970) en su informe “El metro como sistema de transporte” habla de la importancia del tamaño de los andenes en las distintas partes del mundo.

“Una de las soluciones que han implementado a lo largo del tiempo la gran cantidad de metros existentes en el mundo, es aumentar el tamaño de sus estaciones, en un principio el largo de los andenes era de 60 o 70 m y algunos de 90 m, actualmente la mayoría ha decidido y Roma a agrandar sus estaciones, por ejemplo: Milán a 106 m, Múnich a 120 m, Londres a 130 m, Montreal, México, Moscú 152 m.

La longitud de los andenes viene determinada para dar cabida a un número mayor de coches, este aumento condiciona aún más la longitud de los andenes ya que los trenes están constituidos por 2 o 3 coches, ambas cosas tanto la longitud máxima de los trenes que debe circular como el largo del andén se determinan por 2 factores: la máxima capacidad de transporte de la línea en pasajero-hora y el confort que se quiera dar a los mismos, considerando la proporción de pasajeros sentados y parados en el tren, la que repercute en tener una mayor capacidad”

La ilustración 17 representa el metro de Montreal.

Ilustración 17: Andes de metro Montreal



Fuente: MetrodeMontreal.com

La longitud de los andenes viene determinada para dar cabida a un número mayor de coches, este aumento condiciona aún más la longitud de los andenes ya que los trenes están constituidos por 2 o 3 coches, ambas cosas tanto la longitud máxima de los trenes que debe circular como el largo del andén se determinan por 2 factores: la máxima capacidad de transporte de la línea en pasajero-hora y el confort que se quiera dar a los mismos, considerando la proporción de pasajeros sentados y parados en el tren, la que repercute en tener una mayor capacidad.

Diseño de estaciones

La movilidad de los pasajeros en las dependencias de las estaciones es fundamental para obtener un régimen operacional regular, por lo tanto, contar con las plataformas de andenes adecuadas debe ser una prioridad para las empresas de transporte ferroviario de pasajeros.

López (López, 2016, págs. 2,3) plantea que la principal restricción a la capacidad del sistema Metro se ocasiona en sus estaciones, donde la velocidad de transferencia de pasajeros impacta directamente en la capacidad de transporte del sistema. Por lo tanto, un modelo de estación modular genérica, que sea capaz de adaptarse a la demanda creciente de pasajeros en el largo plazo, puede duplicar su capacidad de flujo de forma planificada y eficiente.

La ilustración 18 son tres tipos de estaciones que incorporan pasarelas peatonales y tres posibles estructuras de andenes que favorecen la velocidad de transferencia de los pasajeros.

Ilustración 18: Topología de estación modular genérica.



Fuente: Ariel López

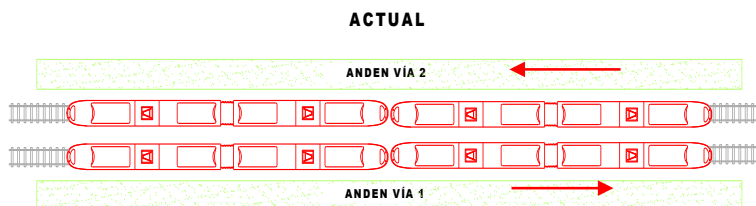
Aumentar la capacidad

La propuesta de Gérondeau (Gérondeau, 1965), un investigador francés, busca acoplar un tren más independiente de la capacidad del andén. Esto implica un alto costo operativo.

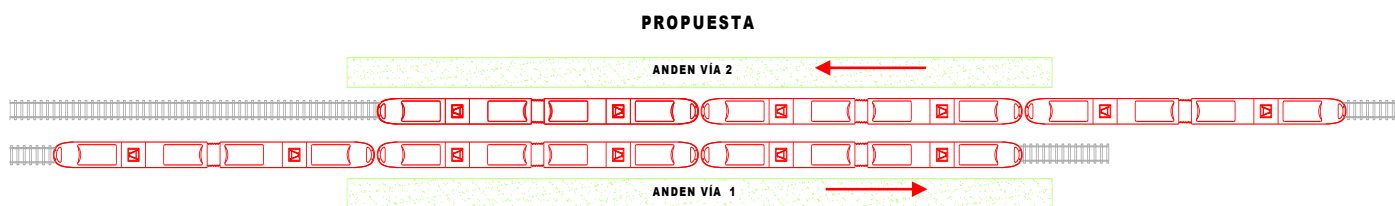
En Londres, donde surgió esta nueva estrategia sólo se realizó un plan piloto, comercialmente este no se llevó a cabo.

La implementación de esta estrategia aumentaría la capacidad de transporte del servicio. En efecto los tiempos de estacionamiento disminuirían, los intervalos de frecuencia se regularizan, se termina el hacinamiento, por lo tanto, el tren estaría disponible a tiempo para iniciar sus operaciones. La ilustración 19 compara la situación actual y la estrategia planteada Gérondeau.

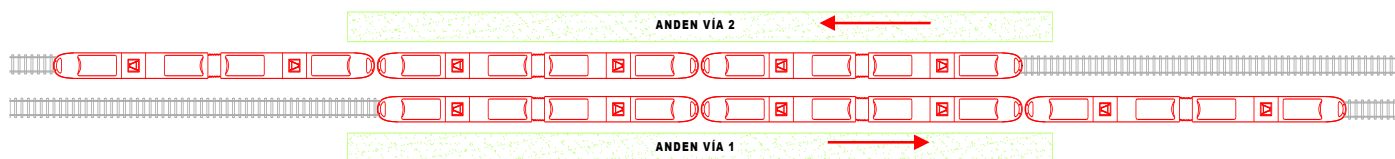
Ilustración 19: Propuesta de Gérondeau



En la situación actual se observan dos trenes en servicio que utilizan la totalidad del andén, esto se da tanto en vía 1 como en vía 2.



En la propuesta de Gérondeau, el acople de un tren más implica que este queda fuera del área de cobertura de los andenes. Por lo tanto, la detención dependerá de la infraestructura de las estaciones. Por ejemplo, en el tramo subterráneo el tren donde va el maquinista no puede quedar dentro del túnel.



Fuente: Elaboración propia.

La tabla 6 es un resumen de la investigación bibliográfica que incorpora las ventajas, desventajas y la viabilidad de cada estrategia en el Metro de Valparaíso.

Tabla 6: Resumen de investigación bibliográfica.

Opción	Ventajas	Dificultad	Factibilidad
1.-Metro de Santiago (Caroca, 2011)	Disminución de los tiempos de detención en las inter estaciones y la estandarización de las detenciones en las estaciones.	Los pasajeros activan las puertas por lo tanto el tiempo estandarizado de detención no se cumplirá.	Inviabile.
2.-Metro de Santiago y Medellín (metro.cl, 2017)	Aumenta la capacidad de transporte de pasajeros y disminuye el tiempo de viaje.	Adaptación del usuario.	Viable.
3.-Metro de París (Virgili, 1970)	La automatización produce un tiempo de detención exacto y controlado en las estaciones, una disminución de la frecuencia de los trenes.	Se necesita un cambio de flota y poner mamparas de altura en todas las estaciones.	Inviabile.
4.-Metros del mundo (López, 1967)	Se pueden acoplar mayor cantidad de vagones en un mismo servicio, por lo tanto, puede transportar mayor cantidad de pasajeros.	La ampliación de las estaciones subterráneas conlleva a una gran inversión.	Viable en las estaciones superficiales.
5.-Diseño de estaciones (López, 2016)	Maximiza el flujo de pasajeros entre los andenes y el tren en el menor tiempo posible.	La transformación de las estaciones subterráneas.	Viable en las estaciones superficiales.
6.-Propuesta de aumentar la capacidad (Gérondeau, 1965)	No se necesita modificar las estaciones y aumenta la capacidad de transporte de pasajeros.	Compleja operación y difícil maniobra de puertas.	Viable.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL MODELO

Como fue posible ver en el capítulo anterior, existen tres estrategias posibles, sin embargo, solo una es viable sin restricción, por lo tanto, a través de la simulación se estudiará su factibilidad operacional.

La simulación permite visualizar las operaciones del sistema de manera de demostrar su viabilidad o inviabilidad, mejora el entendimiento de cómo opera el sistema y disminuye los costos asociados a la experimentación en el sistema real. Esta será realizada a través del software Arena Rockwell básico.

4.1 Modelo de la situación actual

El modelo desarrollado representa la situación actual del servicio en hora punta desde la 07:00 hrs a las 8:00 hrs saliendo de Estación Limache. Sólo se modeló una vía, ya que el comportamiento de la vía contraria es reflejo de la modelada, esto porque los pasajeros que ingresan en hora punta mañana en ciertas estaciones, en hora punta tarde descenden en las mismas estaciones.

Para el desarrollo del modelo, es necesario determinar las distribuciones del tiempo que permanece detenido el tren en cada estación, el tiempo de viaje entre estaciones y los tiempos de salida de los trenes, todas en hora punta y obtenidas con la herramienta Input Analyzer de Arena Rockwell y disponibles gráficamente en el Anexo 3. La tabla 7, 8 y 9 son las distribuciones obtenidas.

Tabla 7: Distribución del tiempo de viaje entre estaciones.

Ruta	Distribución	Expresión
Limache-Peñablanca	Gamma	10 + GAMM(0.182, 1.26)
Peñablanca-Sgto. Aldea	Lognormal	1.16 + LOGN(0.214, 0.104)
Sgto Aldea-Villa Alemana	Lognormal	1 + LOGN(0.217, 0.219)
Villa Alemana- Concepción	Uniform	UNIF(0.41, 0.56)
Concepción-Las Américas	Beta	1.02 + 0.15 * BETA(1.68, 1.83)
Las Américas-El Belloto	Lognormal	0.45 + LOGN(0.284, 0.312)
El Belloto- El Sol	Beta	2 + 0.181 * BETA(0.909, 1.78)
El sol-Quilpué	Lognormal	1.32 + LOGN(0.184, 0.0826)
Quilpué-El Salto	Normal	NORM(11.2, 0.174)
El Salto-Chorrillos	Triangular	TRIA(1.23, 1.27, 1.35)
Chorrillos-Hospital	Exponential	1 + EXPO(0.0522)
Hospital-Viña del mar	Lognormal	1 + LOGN(0.0489, 0.0359)
Viña del mar-Miramar	Weibull	0.999 + WEIB(0.0452, 1.27)
Miramar-Recreo	Beta	1.37 + 0.12 * BETA(1.69, 1.54)
Recreo-Portales	Lognormal	2.34 + LOGN(0.3, 0.255)
Portales-Barón	Beta	2 + 1.65 * BETA(0.152, 0.989)
Barón-Francia	Lognormal	1.17 + LOGN(0.12, 0.0836)
Francia-Bellavista	Normal	NORM(0.54, 0.0217)
Bellavista-Puerto	Lognormal	1.46 + LOGN(0.0966, 0.0463)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8: Distribución de los tiempos de detención en las estaciones.

Ruta	Distribución	Expresión
Puerto	Beta	0.34+0.91*BETA(0.878,1.17)
Bellavista	Weibull	0.61+WEIB(0.362,5.74)
Francia	Beta	0.95+0.19*BETA(1.46,1.86)
Barón	Normal	NORM(1.07,0.0527)
Portales	Normal	NORM(1.05,0.0542)
Recreo	Exponential	1+EXPO(0.0517)
Miramar	Weibull	0.77+WEIB(0.0)
Viña del Mar	Weibull	0.8+WEIB(0.45,5.39)
Hospital	Erlang	1.02+ERLA(0.0296,4)
Chorrillos	Erlang	1+ERLA(0.0456,3)
El Salto	Beta	0.65+0.51*BETA(0.501,1.62)
Quilpué	Normal	NORM(1.06,0.0471)
El Sol	Normal	NORM(1.04,0.0278)
Belloto	Lognormal	0.68+LOGN(0.118,0.0658)
Las Américas	Lognormal	0.72+LOGN(0.0974,0.0444)
La Concepción	Lognormal	0.75+LOGN(0.0951,0.0558)
Villa Alemana	Exponential	0.86+EXPO(0.176)
Sargento Aldea	Beta	1+0.33*(1.57,1.75)
Peñablanca	Lognormal	0.96+LOGN(0.0766,0.0453)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Distribuciones de los tiempos de salida.

Terminal	Distribución	Expresión
Limache	Weibull	WEIB(0.00878,879)
Sargento Aldea	Lognormal	LOGN(0.00853,0.00142)

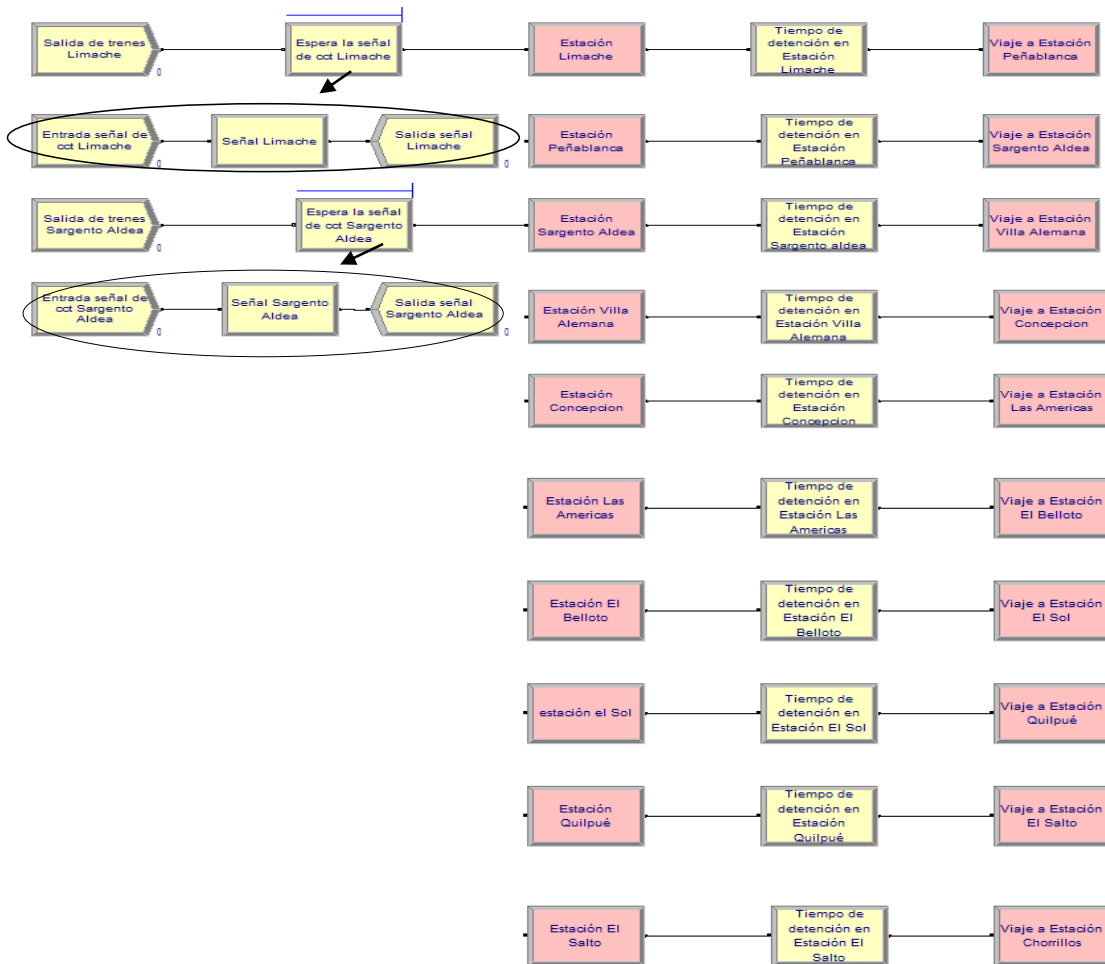
Fuente: Elaboración propia.

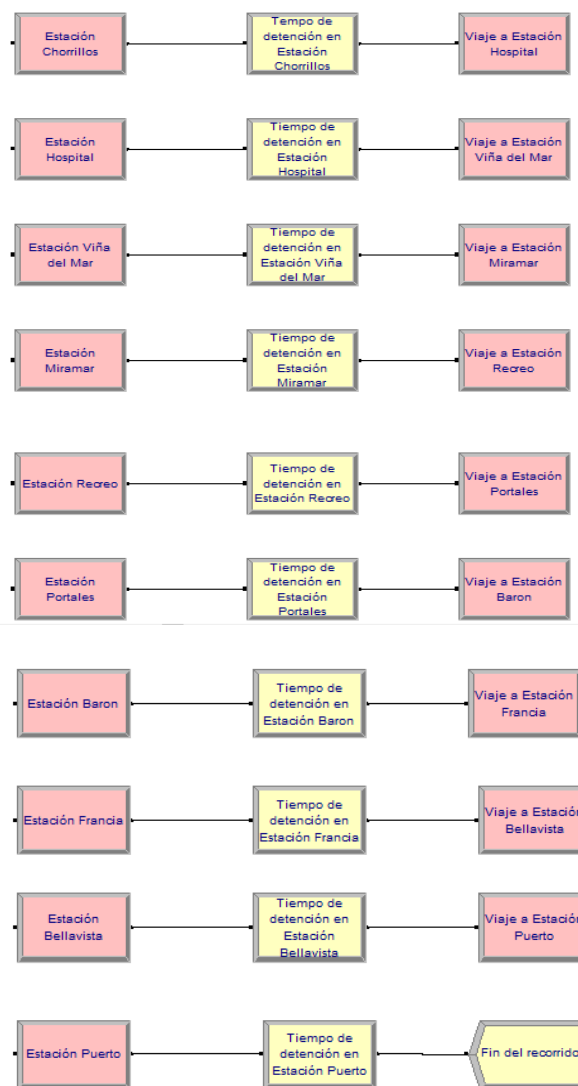
El servicio actual en hora punta inicia su operación en el minuto 0 desde Sargento Aldea y 6 minutos después desde Limache, al minuto 12 vuelve a salir un servicio desde Sargento Aldea y al minuto 18 uno desde la terminal Limache y así sucesivamente. El tren demora alrededor de 12 minutos desde la estación Limache a Estación Sargenta Aldea, de este modo se cumple el intervalo de 6 minutos propuesto por la empresa.

Desde Estación Limache salen trenes dobles con capacidad máxima de 800 pasajeros y desde Estación Sargento Aldea trenes simple con capacidad máxima de 400 pasajeros, ambos se detienen en todas las estaciones disponibles en la vía. La ilustración 20 es el modelo computarizado de la situación actual.

Ilustración 20: Modelo situación actual.

Situación Actual

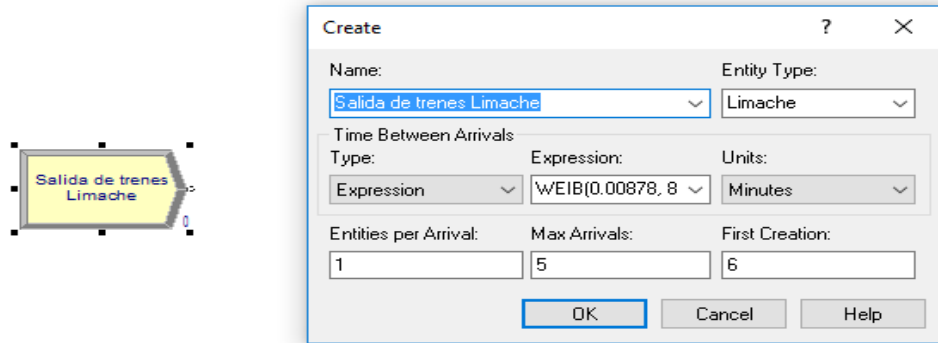




Fuente elaboración propia

Desglosando el modelo, el módulo Create “salida de trenes Limache” representa la salida de los trenes desde la Estación Terminal Limache, aquí se crea la entidad “Limache”. El primer servicio inicia en el minuto 6 y el siguiente 12 minutos después, por lo tanto, en una hora salen 5 trenes todos en unidad doble, debe ser considerado el atraso mediante una distribución ingresada en el recuadro tiempo entre llegadas (Time Between Arrivals). La ilustración 21 es el cuadro de diálogo del módulo Create.

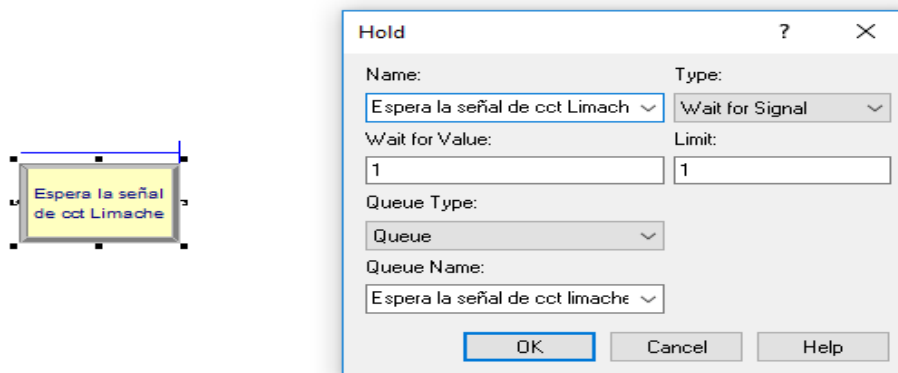
Ilustración 21: Modulo Create.



Fuente: Elaboración propia

El módulo Hold es el que retiene la entidad “Limache” hasta que una señal enviada por el módulo Signal lo libere, esto permite que el tren pueda entrar a la estación y activar su servicio. La ilustración 22 es el cuadro de diálogo desplegado del módulo Hold.

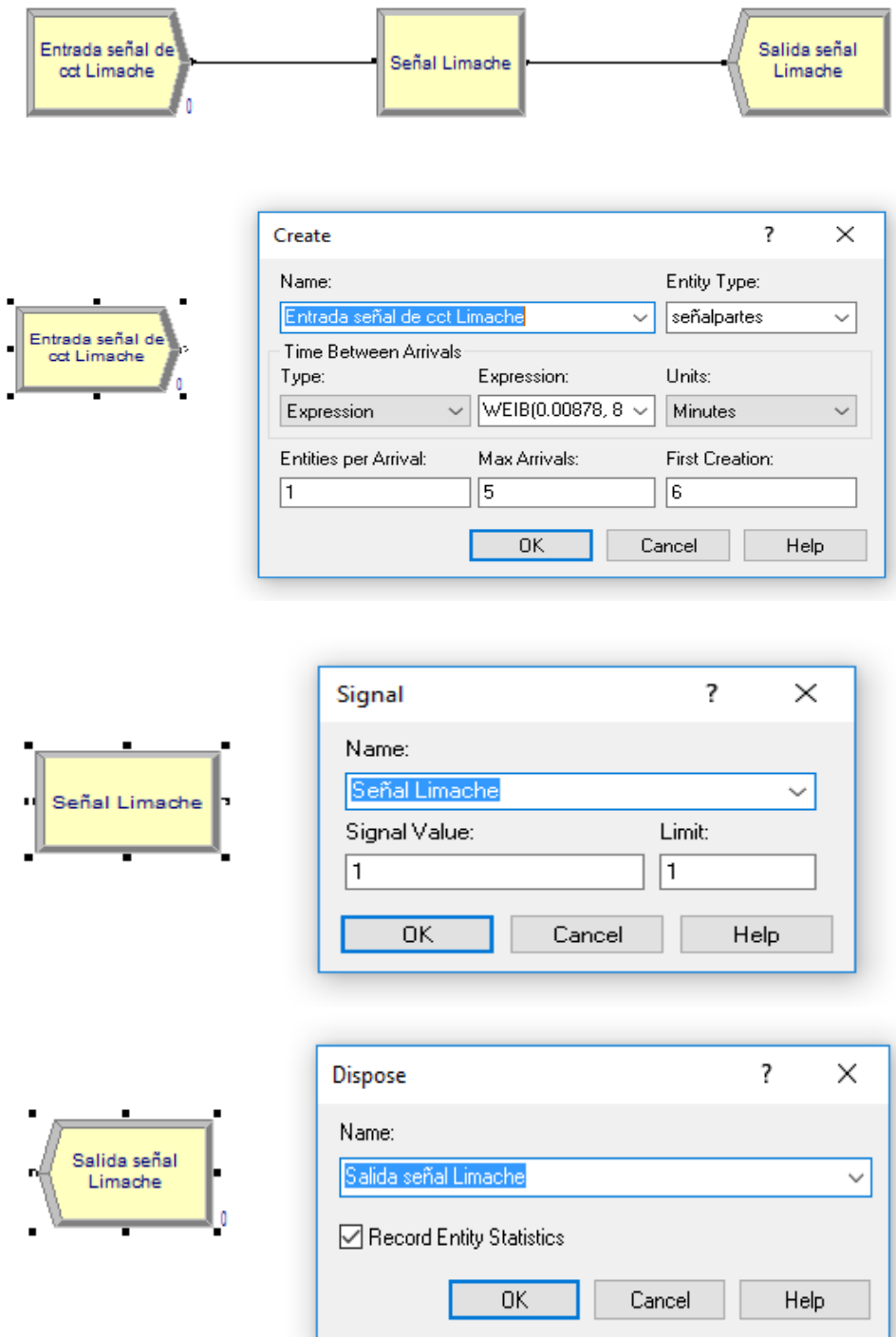
Ilustración 22: Módulo Hold



Fuente: Elaboración propia.

Automáticamente el módulo Hold despliega tres cuadros de diálogo, necesarios para la emisión de la señal. El primer cuadro de dialogo desplegado es el módulo Create “entrada señal de cct Limache”, que es la señal interna emitida por la Central de Control de Tráfico autorizando el inicio del servicio. Esta es emitida de forma constante cada 12 minutos, sin embargo, se debe considerar el atraso por lo que se hace necesarios ingresar una distribución. El segundo cuadro de diálogo es el módulo Signal “señal Limache” que indica al operador del tren la habilitación del sistema para iniciar el servicio. Finalmente, el módulo Dispose “salida de la señal del sistema” indica la eliminación de la señal, la ilustración 23 indica lo antes mencionado.

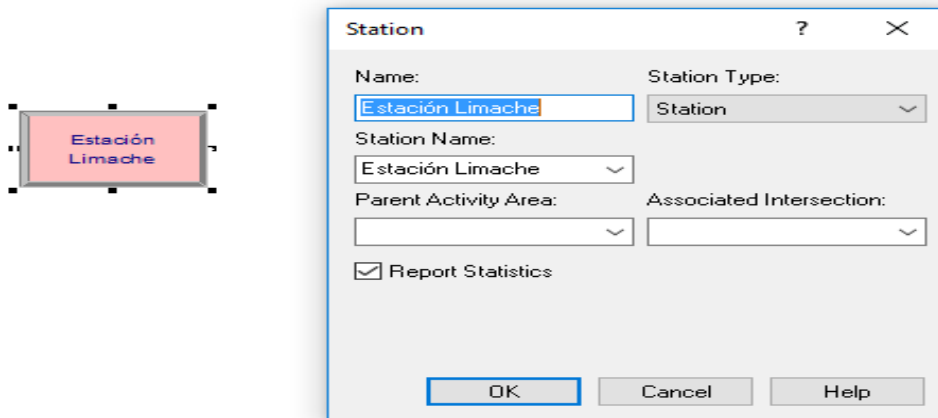
Ilustración 23: Despliegue módulo Hold.



Fuente: Elaboración propia.

El módulo Station ubica al tren que inicia sus operaciones en Limache en cada una de las estaciones de la línea. Este módulo debe ser replicado para cada estación del sistema, por lo tanto, hay 20 módulos Station en el modelo. La ilustración 24 es el cuadro de diálogo desplegado.

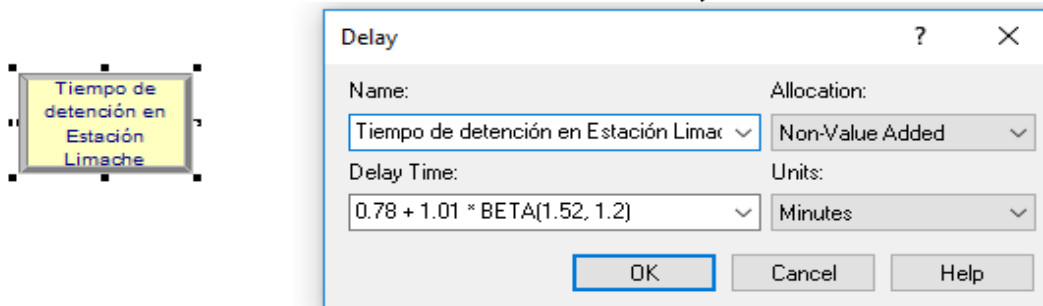
Ilustración 24: Módulo Station.



Fuente: Elaboración propia.

El módulo Delay retiene la entidad que llega a él por un tiempo determinado. El tiempo de detención varía en función de la cantidad de pasajeros tanto en descenso o ascenso como fue posible ver en el capítulo 2 punto 2.4, por esto es necesario usar distribuciones de probabilidad por cada estación, disponibles en el anexo 3. La ilustración 25 es el cuadro de diálogo donde se ingresa la información del módulo. Como en todas las estaciones del sistema hay un tiempo de detención, por cada una de estas se debe crear un módulo Delay.

Ilustración 25: Módulo Delay.

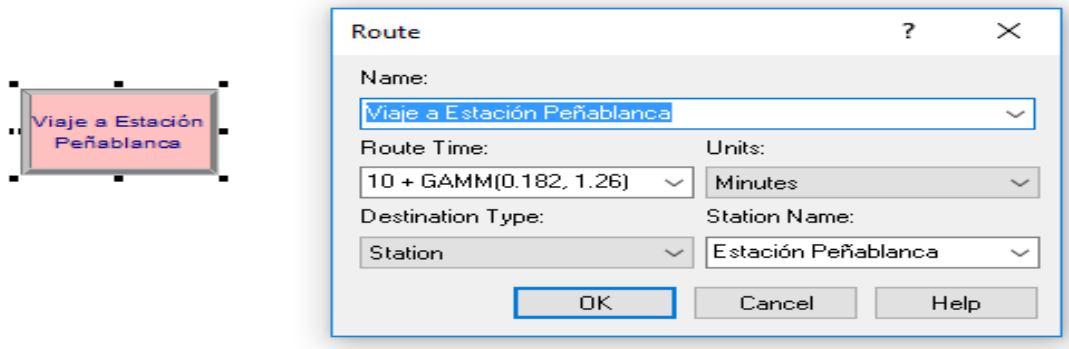


Fuente: Elaboración propia.

El módulo Route permite vincular dos estaciones, en otras palabras, es el tiempo que se demora el tren desde que sale de una estación e ingresa a la siguiente. Puesto que es

variable, es necesario ingresar distribuciones las que se encuentran disponible en el anexo 3. La ilustración 26 es el cuadro de diálogo desplegado en el módulo Route.

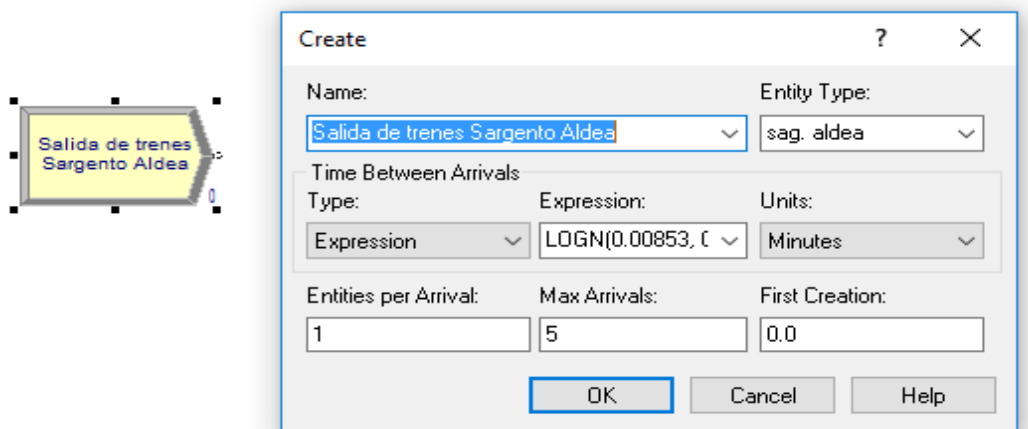
Ilustración 26: Módulo Route.



Fuente: Elaboración propia.

Como fue mencionado al inicio del capítulo, un servicio inicia su operación en Limache y el siguiente en Estación Sargento Aldea, por lo tanto, es necesario crear un nuevo módulo Create donde nace la entidad “sag. aldea” que inicia sus operaciones al minuto 0 el que sigue lo hace 12 minutos después, como la salida no es constante y presenta atrasos se debe ingresar una distribución en el recuadro tiempo entre llegadas (Time Between Arrivals). La ilustración 27 es el nuevo módulo Create, para los trenes salientes desde Sargento Aldea.

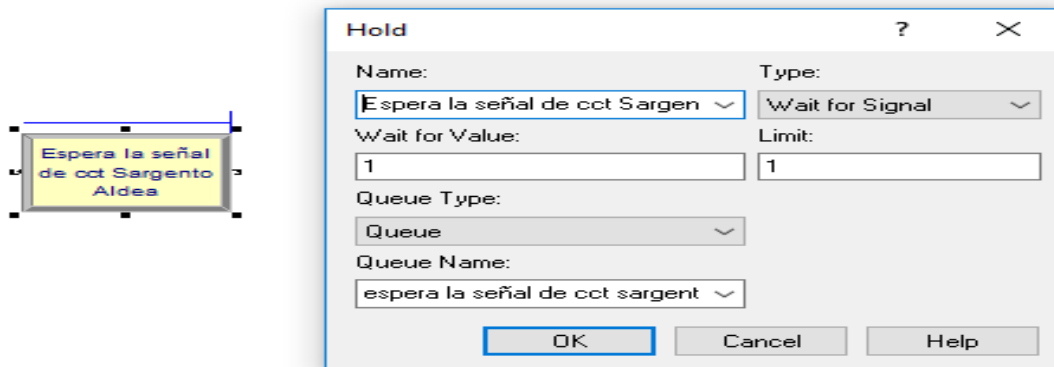
Ilustración 27: Modulo Create



Fuente: Elaboración propia.

Se debe crear un nuevo módulo Hold que retiene el tren saliente desde Sargento Aldea hasta que se emita la señal enviada CCT. La ilustración 28 es el cuadro de diálogo desplegado.

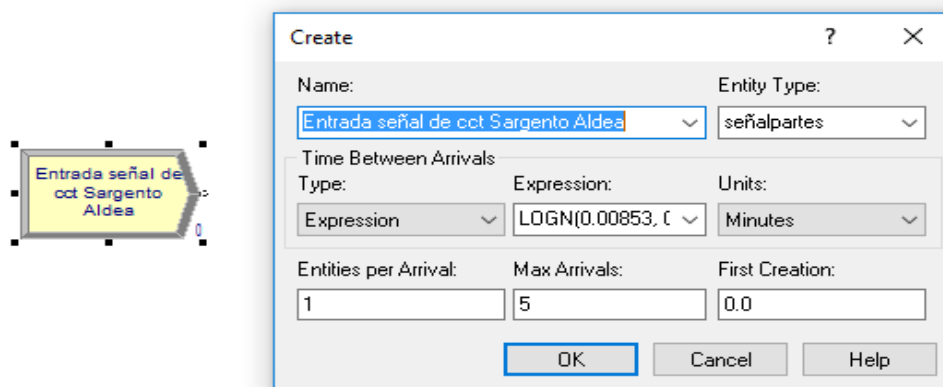
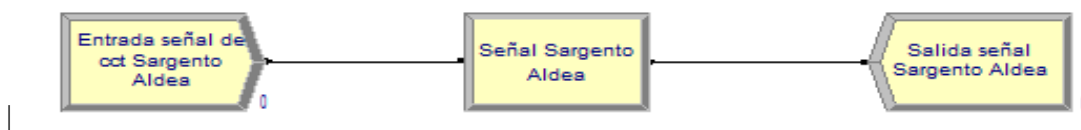
Ilustración 28: Módulo Hold.

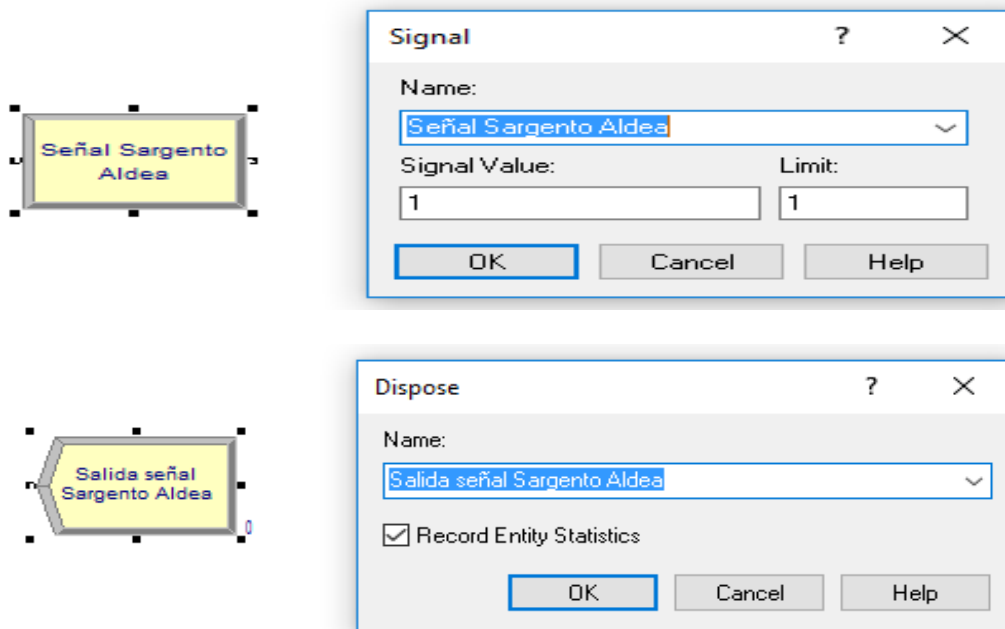


Fuente: Elaboración propia

Automáticamente el módulo Hold despliega tres cuadros de diálogo, necesarios para la emisión de la señal. El primer cuadro de diálogo desplegado es el módulo Create “Entrada señal de cct Sargento Aldea”, que es la señal interna emitida por la Central de Control de Tráfico autorizando el inicio del servicio. Esta es emitida de forma constante cada 12 minutos, sin embargo, se debe considerar el atraso por lo que se hace necesario ingresar una distribución. El segundo cuadro de diálogo es el módulo Signal “Señal Sargento Aldea” que indica al operador del tren la habilitación del sistema para iniciar el servicio. Finalmente, el módulo Dispose “Salida señal Sargento Aldea” indica la eliminación de la señal. La ilustración 29 es el desglose del módulo Hold.

Ilustración 29: Desglose módulo Hold.

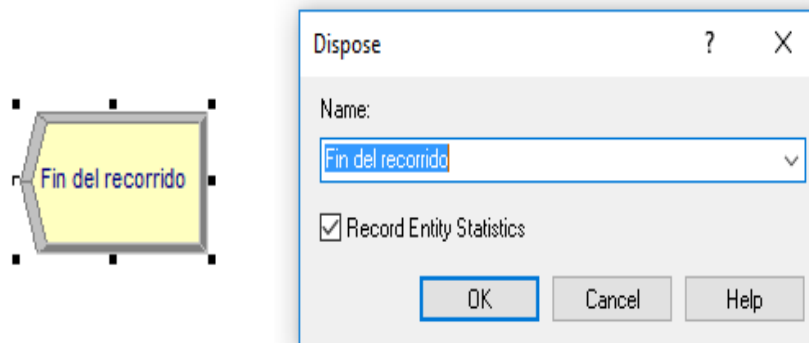




Fuente: Elaboración propia.

Se crea un nuevo módulo Station donde se ubica a la entidad en la estación correspondiente, luego el módulo Delay retiene a la entidad por un tiempo determinado y con el módulo Route se vincula a la entidad con la estación siguiente. Este proceso es repetitivo hasta la última estación de la ruta, para finalizar el modelo se crea el módulo Dispose aquí se elimina la entidad del sistema. El cuadro de diálogo se muestra en la ilustración 30.

Ilustración 30: Cuadro de diálogo módulo Dispose.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizado el modelo se debe determinar el número de réplicas.

Las réplicas son realizadas con el objetivo de producir múltiples muestras para obtener una mejor estimación del modelo.

- En primer lugar, se debe determinar un número de réplicas preliminar. Para este caso serán 240.
- Con los datos obtenidos de la desviación se define el número de réplicas para un error esperado.

$$N = \left[\frac{\sigma * Z}{(error)} \right]^2$$

Donde:

N: Número de réplicas.

z: Constante = 1.96

σ : Desviación del tiempo de viaje = 154 seg.

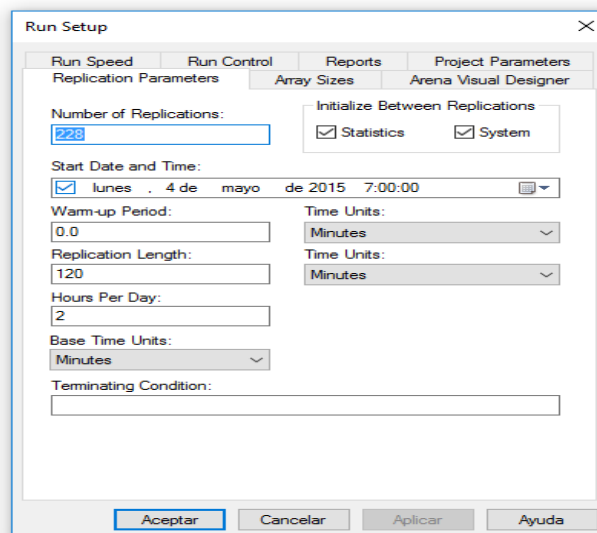
error: Error esperado = 20 seg.

Por lo tanto,

$$N = \left[\frac{154 * 1.96}{20} \right]^2 = 228$$

Determinado el número de réplicas se da inicio a las corridas del modelo. El cuadro de diálogo se puede ver en la ilustración 31.

Ilustración 31: Cuadro de diálogo para iniciar el modelo.



Fuente: Elaboración propia.

El reporte entregado al hacer correr el modelo se presenta en la ilustración 32.

Ilustración 32: Reportes del modelo.

Entity						
Time						
VA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
limache	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
sag.aldea	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
limache	19.3605	< 0,03	18.7577	19.9785	17.9026	20.8971
sag.aldea	17.3016	< 0,02	16.8407	17.7889	16.0954	18.6366
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
limache	0.00392164	< 0,00	0.00046006	0.00875119	0.00	0.01353463
sag.aldea	0.6784	< 0,08	0.00012037	1.5020	0.00	6.0023
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
limache	44.0559	< 0,04	43.2433	45.2150	42.6673	48.5080
sag.aldea	32.4384	< 0,04	31.7734	33.4852	31.1361	39.4360
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Other Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
limache	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
sag.aldea	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
limache	63.4203	< 0,05	62.4075	64.7485	61.2489	67.1212
sag.aldea	50.4184	< 0,08	49.0596	52.2545	48.0427	58.0802
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Los reportes nos entregan los siguientes resultados.

- El tiempo de viaje total promedio de los servicios que inician sus operaciones en Estación Limache es de 63 minutos.
- El tiempo de viaje total promedios de los servicios que inician sus operaciones en Estación Sargento Aldea es de 50 minutos
- El tiempo de estacionamiento promedio del servicio que inicia en Limache es de 19 minutos
- El tiempo de estacionamiento promedio del servicio que inicia en Sargento Aldea es de 17 minutos.

- El tiempo en ruta del servicio que inicia en Limache es de 44 minutos.
- El tiempo en ruta del servicio que inicia en Sargento Aldea es de 32 minutos.

4.2 Verificación del modelo

La verificación del modelo es el proceso de determinar si la lógica operacional del modelo se corresponde con la lógica del diseño, para determinar si hay errores en el programa y si este representa el sistema que se desea trabajar.

Se verifica el modelo revisando cada parte de este, que son las siguientes:

- Salen los trenes de las cocheras
- Se ingresa la distribución de los tiempos de salida
- Los trenes esperan la señal del cct antes de entrar a la estación
- Los trenes entran a la estación
- Se genera una detención de los trenes en las estaciones para la subida y bajada de pasajeros
- Se ingresa la distribución de los tiempos de detención diferente para cada estación
- Los trenes viajan a la siguiente estación
- Se ingresa la distribución de cada viaje según la distancia entre cada estación
- Los trenes llegan a la última estación del recorrido

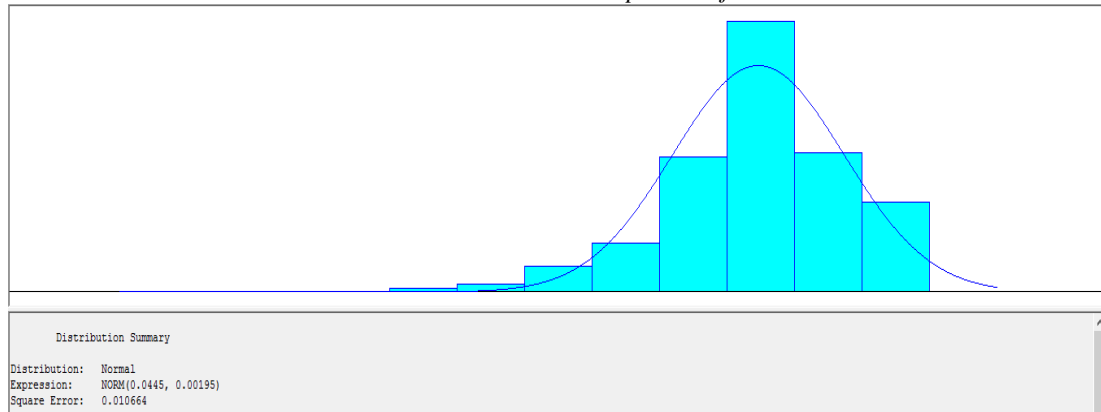
4.3 Validación del modelo

Dado que el modelo es una abstracción del sistema real se debe comprobar que existe una correspondencia entre ambos.

El proceso de validación permite determinar si el modelo es una buena representación del sistema real, esta se consigue a través de la comparación del comportamiento de un conjunto de datos. Esta validación será realizada a través de intervalos de confianza de la media.

Del sistema real se recoge una muestra de 192 datos del tiempo total de viaje para determinar la distribución, información disponible en la ilustración 33.

Ilustración 33: Distribución del tiempo de viaje del sistema real.

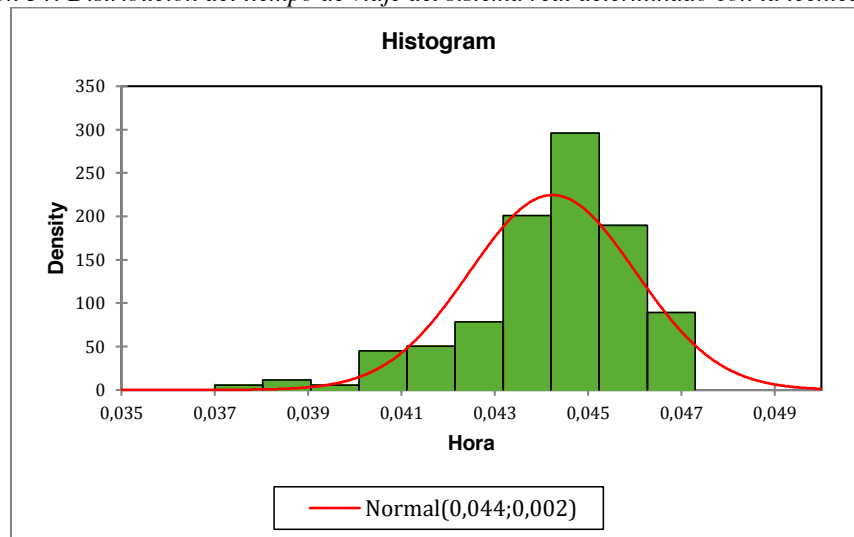


Fuente: Elaboración propia.

Donde la media de la muestra es 63 minutos con 5 segundos y desviación estándar 2 minutos 48 segundos.

Mediante la técnica del Bootstrapping disponible como suplemento de Microsoft Excel, XLSTAT, se realiza un remuestreo de 2.000 datos. La ilustración 34 muestra la nueva distribución con los nuevos parámetros estadísticos.

Ilustración 34: Distribución del tiempo de viaje del sistema real determinado con la técnica Bootstrap



Fuente: Elaboración propia.

Donde la media de la muestra es 63 minutos con 22 segundos y desviación estándar 2 minutos 53 segundos.

La regla empírica, es la regla estadística para la distribución normal y se establece con la media y la desviación estándar. Según esto, el 68% de los datos se encuentran dentro de la primera SD, el 95% dentro de las dos primeras y 99,7% dentro de las tres primeras. Para este conjunto de datos se trabajará con la regla empírica del 99.7%, bootstrap entrega los límites para las tres primeras SD estos disponibles en la tabla 10.

Tabla 10: Límites superior e inferior del sistema real.

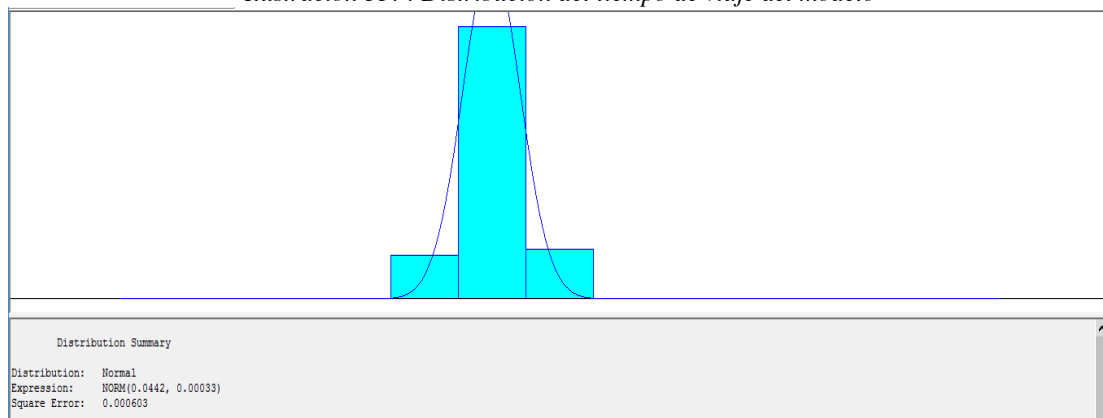
Parámetros	Estimador	Estimador (Bootstrap)	Desv. Std. (Bootstrap)	Límite superior	Límite inferior
Promedio	1:03:05	1:03:22	0:00:12	1:03:58	1:02:46
Desv. Std.	0:02:48	0:02:53	0:00:11	0:03:26	0:02:20
Mediana	1:04:04	1:04:05	0:00:08	1:04:28	1:03:32

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, del conjunto de datos del sistema real el intervalo va desde 1:02:46 hasta 1:03:58.

De igual forma se recogen 192 datos del modelo para determinar la distribución, la que se encuentra disponible en la ilustración 35.

Ilustración 35: : Distribución del tiempo de viaje del modelo

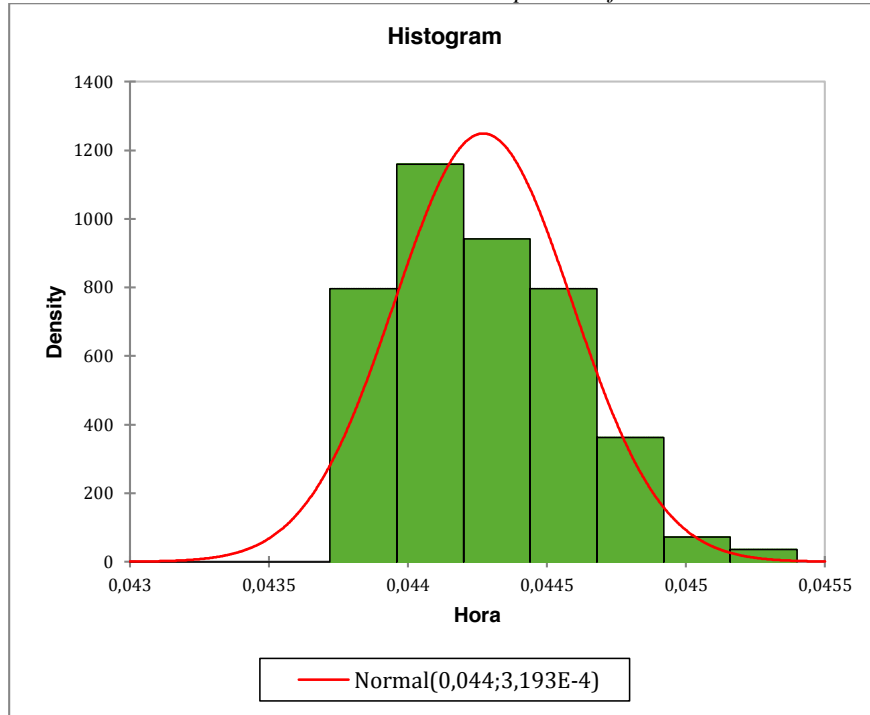


Fuente: Elaboración propia.

Donde la media de la muestra es 63 minutos con 39 segundos y desviación estándar 29 segundos.

Mediante la técnica del Bootstrapping se realiza un remuestreo de 2.000 datos. La ilustración 36 muestra la nueva distribución con los nuevos parámetros estadísticos.

Ilustración 36: Distribución del tiempo de viaje del modelo.



Fuente: Elaboración propia.

Donde la media de la muestra es de 63 minutos con 22 segundos y la desviación estándar 28 segundos.

Al igual que en la situación actual, para este conjunto de datos se trabajará con la regla empírica del 99.7%. Los límites inferiores y superiores se encuentran disponibles en la tabla 11.

Tabla 11: Límites superior e inferior del modelo.

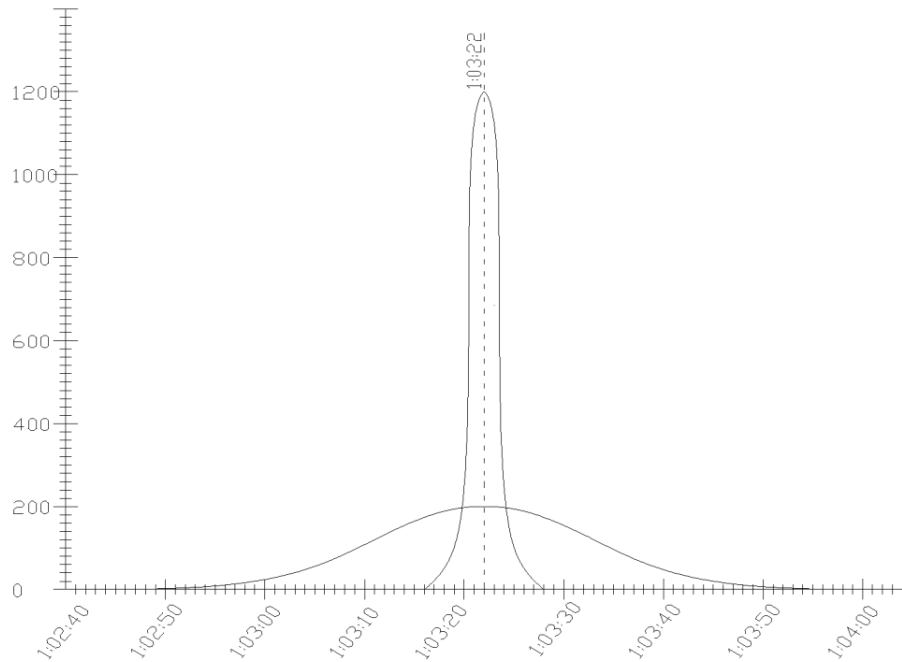
Parámetro	Estimador	Estimador (Bootstrap)	Desv. Std. (Bootstrap)	Límite superior	Límite inferior
Promedio	1:03:39	1:03:22	0:00:02	1:03:28	1:03:16
Desv. Std.	0:00:29	0:00:28	0:00:01	0:00:31	0:00:24
Mediana	1:03:40	1:03:40	0:00:02	1:03:46	1:03:36

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, del conjunto de datos del modelo el intervalo va desde 1:03:28 hasta 1:03:16.

Los intervalos del sistema real y del modelo pueden ser comparados en la ilustración 37.

Ilustración 37: Intervalos de confianza.



Fuente: Elaboración propia.

Conocidos los intervalos se puede plantear la hipótesis nula y alternativa respectivamente:

$$H_0 : \mu_{\text{real}} = \mu_{\text{simulación}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{real}} \neq \mu_{\text{simulación}}$$

Como $\mu_{\text{simulación}} = \mu_{\text{real}}$, no hay antecedentes estadísticos para rechazar la hipótesis nula.

4.4 Propuesta

La propuesta consta de tres etapas que deben ejecutarse de forma sucesiva como se indica a continuación.

4.4.1 Etapa I. Rutas expresas

Se realizará un modelo que simule rutas expresas, tal como se hace en Colombia y en Metro de Santiago.

Operará de la siguiente manera:

- Se elimina la salida en la sub terminal Sargento Aldea.
- La frecuencia disminuye a 4 minutos.
- Cada dos trenes simples van uno doble, con el objetivo de utilizar la flota actual de la empresa.

La determinación de las rutas estará dada por el flujo de pasajeros, tanto de ascenso y descenso, entre más alto sea el número de pasajeros mayor necesidad de que todos los servicios se detengan en la estación, sin embargo, aquellas estaciones donde el flujo de pasajeros es moderado o medio se puede eliminar la estación como parada obligatoria de ambas rutas, el flujo de pasajeros puede ser revisado en el Anexo 2. Las rutas serán identificadas por los colores naranja y azul, ya que en el reglamento de tráfico ferroviario (RTF) no representan ningún tipo de señal. La tabla 12 indica las estaciones de detención de cada ruta expresa.

Tabla 12: Rutas expresas.

ESTACIÓN	RUTA NARANJA	RUTA AZUL
LIM	X	X
PEN		X
SGA	X	
VAM	X	X
CON		X
AME	X	
BTO	X	X
SOL		X
QUI	X	X
SLT	X	
CHO		X
HOS	X	
VIN	X	X
MIR	X	X
REC		X
POR	X	
BAR	X	X
FRA		X
BEL	X	
PUE	X	X

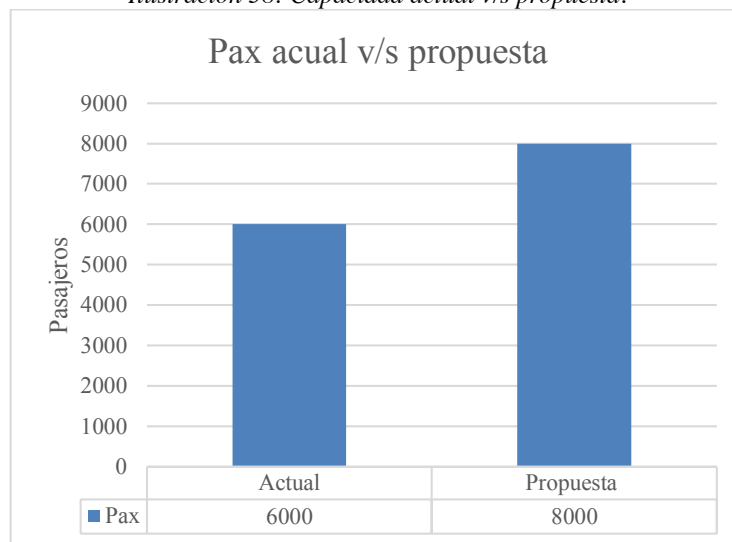
Fuente: Elaboración propia.

Estudio de la capacidad de la propuesta

Con las rutas expresas, que disminuyen el intervalo de frecuencia a 4 minutos, se espera que en una hora se realicen 15 servicios. Inicialmente cada dos trenes de simples (dos vagones) se inyecta un tren doble (cuatro vagones), por lo tanto, en una hora se movilizan 20 trenes, si cada uno tiene capacidad para 400 pasajeros se puede transportar a 8.000 usuarios.

Actualmente metro tiene una capacidad de transporte de 6.000 pasajeros. La comparación de capacidad actual y la propuesta puede ser vista en la ilustración 38.

Ilustración 38: Capacidad actual v/s propuesta.

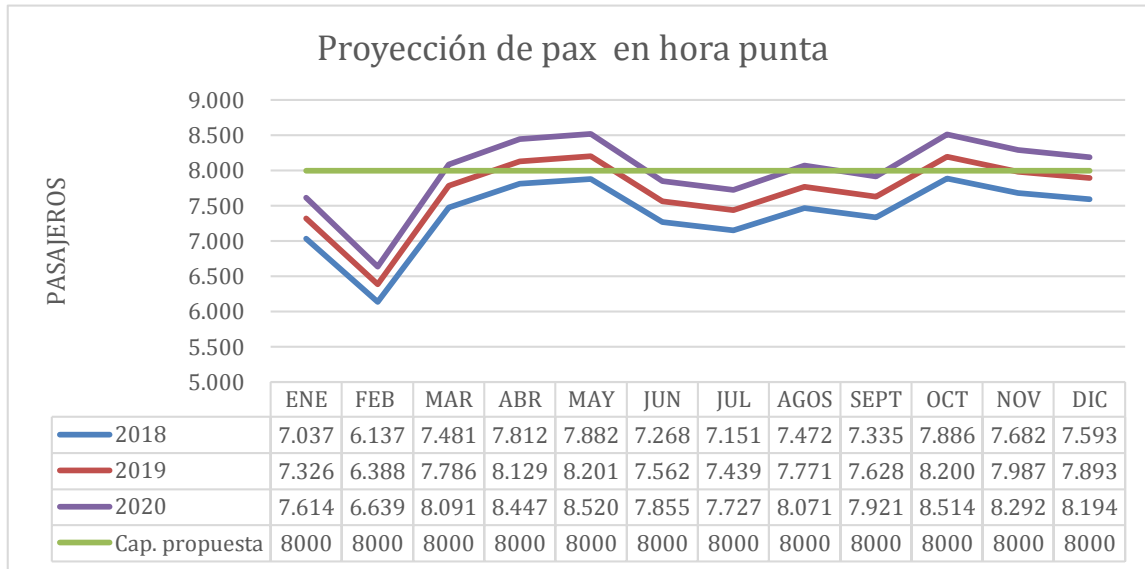


Fuente: Elaboración propia.

Demanda futura v/s capacidad de la propuesta

A partir de la proyección de demanda, vista en el capítulo 2, se puede determinar el número de usuarios a transportar en la hora de mayor tráfico, por lo tanto, se define hasta que año la etapa I satisface la demanda. La ilustración 39 compara algunos de los periodos proyectados y la capacidad de la propuesta.

Ilustración 39: Capacidad de la propuesta comparada con la proyección de demanda.



Fuente: Elaboración propia.

Dicho lo anterior, hasta febrero de 2020 la etapa I satisface la demanda.

Acciones necesarias para ejecutar la Etapa I

- Actualmente Metro Valparaíso cuenta con una flota de 35 trenes, y para llevar a cabo esta estrategia se necesita la totalidad de la flota. 20 trenes por la vía de alto tráfico y 15 que transiten por la vía contraria.

4.4.2 Etapa II. Rutas expresas con 8 servicios dobles.

Operará de la siguiente manera:

- Se elimina la salida en la sub terminal Sargento Aldea.
- La frecuencia disminuye a 4 minutos.
- 8 servicios dobles y 7 simples

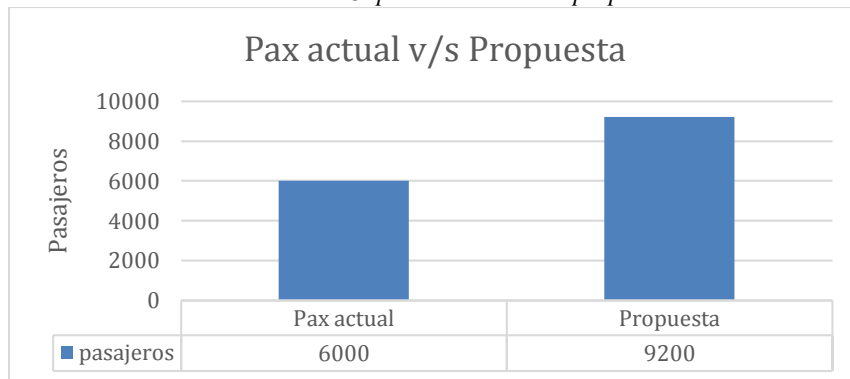
Igual que en la etapa I, la determinación de las rutas estará dada por el flujo de pasajeros, tanto de ascenso y descenso, el que puede ser revisado en el Anexo 2. Estas serán identificadas por los colores naranja y azul, ya que en el reglamento de tráfico ferroviario (RTF) no representan ningún tipo de señal, por lo tanto la tabla 12 indica las estaciones de detención de cada ruta expresa para la etapa I y II..

Estudio de la capacidad de la propuesta

En una hora se realizan 15 servicios, 8 dobles y 7 simples, por lo tanto, en una hora se movilizan 23 trenes por la vía de mayor tráfico, si cada uno tiene capacidad para 400 pasajeros se puede transportar a 9.200 usuarios.

Actualmente metro tiene una capacidad de transporte de 6.000 pasajeros. La comparación de capacidad actual y la propuesta puede ser vista en la ilustración 40.

Ilustración 40: Capacidad actual v/s propuesta.

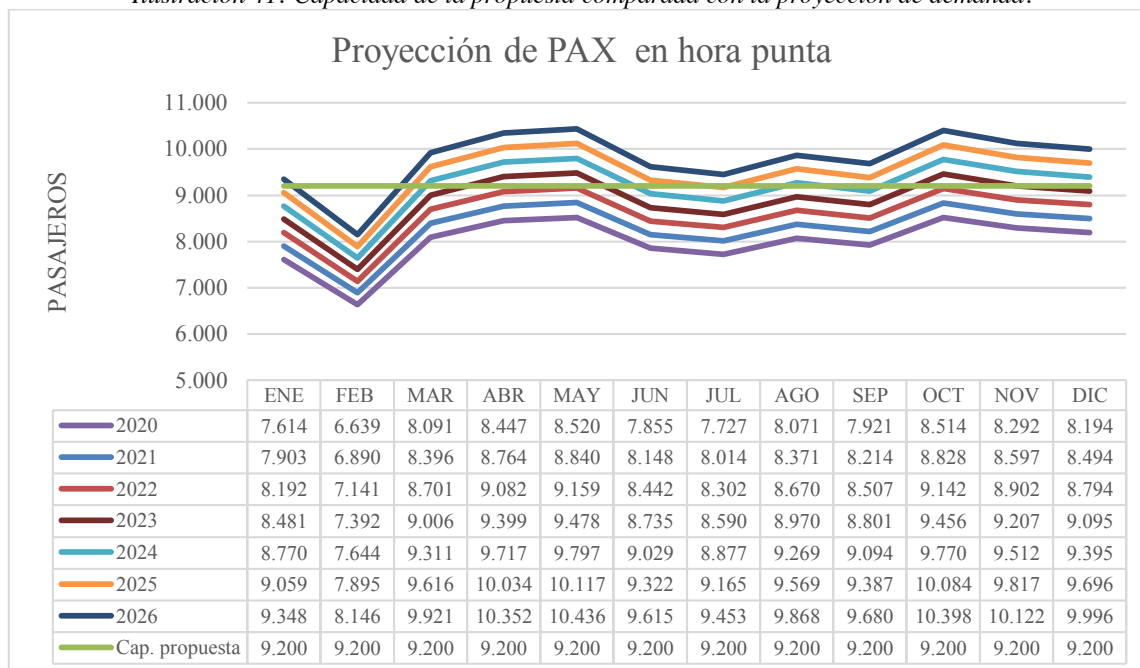


Fuente: Elaboración propia.

Demanda futura v/s capacidad de la propuesta

A partir de la proyección de demanda, vista en el capítulo 2, se puede determinar el número de usuarios a transportar en la hora de mayor tráfico, por lo tanto, se define hasta que periodo la etapa II satisface la demanda. La ilustración 41 compara algunos de los periodos proyectados y la capacidad de la propuesta.

Ilustración 41: Capacidad de la propuesta comparada con la proyección de demanda.



Fuente: Elaboración propia.

Hasta marzo del año 2023 la etapa II aun satisface la demanda.

Acciones necesarias para ejecutar la Etapa II

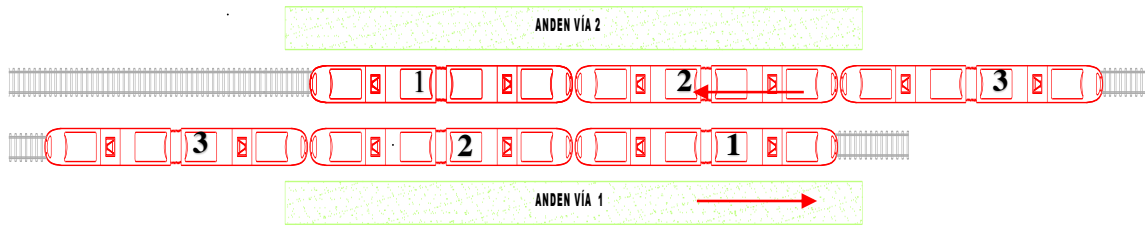
Estas acciones se mencionan, pero no se evalúan, son sugerencias que no forman parte de este trabajo, el que sólo se limita a evaluar la factibilidad del manejo de los trenes.

- Se requiere adquirir 3 trenes para marzo de 2020
- Se requiere soterrar el paso de peatones en las estaciones de Bellavista y Barón.

4.4.3 Etapa III. Rutas expresas con un tren acoplado.

La etapa III está basada en el acople de un tercer tren. Consiste en realizar 15 servicios con una frecuencia de 4 minutos entre servicios, saliendo todos los servicios desde la Estación Limache por vía 2. Cada servicio será de 3 trenes acoplados como lo muestra la ilustración 40. Estando el maquinista en el tren número 1. Los andenes tienen un largo de 100 metros con capacidad solo para 2 trenes, por lo tanto, el tercer tren deberá quedar afuera del andén, como se muestra en la ilustración 42

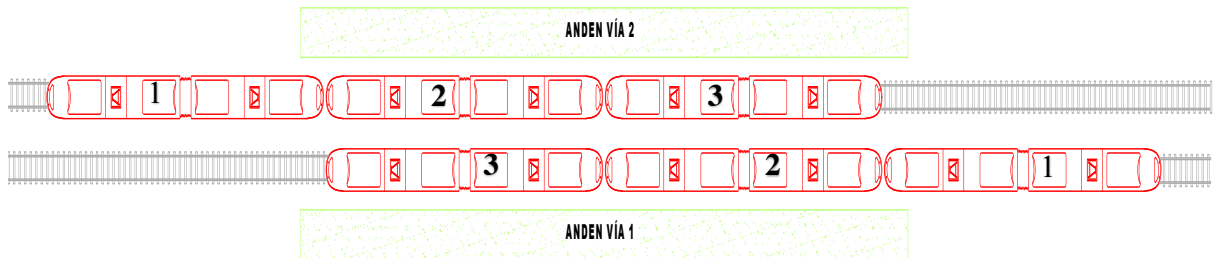
Ilustración 42: Propuesta de acoplar un tren extra



Fuente: Elaboración propia.

En la estación de salida solo se detiene el tren 2 y tren 3 para la subida de pasajeros, como muestra la ilustración 43, y en la siguiente estación según corresponda se detiene el tren 1 y el tren 2, así mismo en las estaciones que están soterrada como estación Chorrillos, Hospital, Viña del mar, Miramar solo se detienen los trenes 1 y 2 ya que el maquinista debe tener completa visibilidad del andén y no puede quedar dentro del túnel.

Ilustración 43: Estaciones de salida



Fuente: Elaboración propia.

Para dar fin al recorrido en la última estación antes de llegar a la estación terminal deben detenerse los trenes 2 y 3, indicando a los pasajeros que todos deben descender del tren número 3 e ingresar al tren número 2 ya que el tercer tren será desacoplado.

La distribución de la parada de los trenes según cada estación puede ser visto en la tabla 13, donde podemos ver qué número de tren se detiene en cierta estación según las condiciones de la vía y los andenes.

Tabla 13: Detención de trenes.

Estación	Número de tren
LIM	2,3
PEN	1,2
SGA	2,3
VAM	1,2
CON	2,3
AME	1,2
BTO	2,3
SOL	1,2
QUI	2,3
SLT	1,2
CHO	1,2
HOS	1,2
VIN	1,2
MIR	1,2
REC	2,3
POR	1,2
BAR	2,3
FRA	1,2
BEL	2,3
PUE	1,2

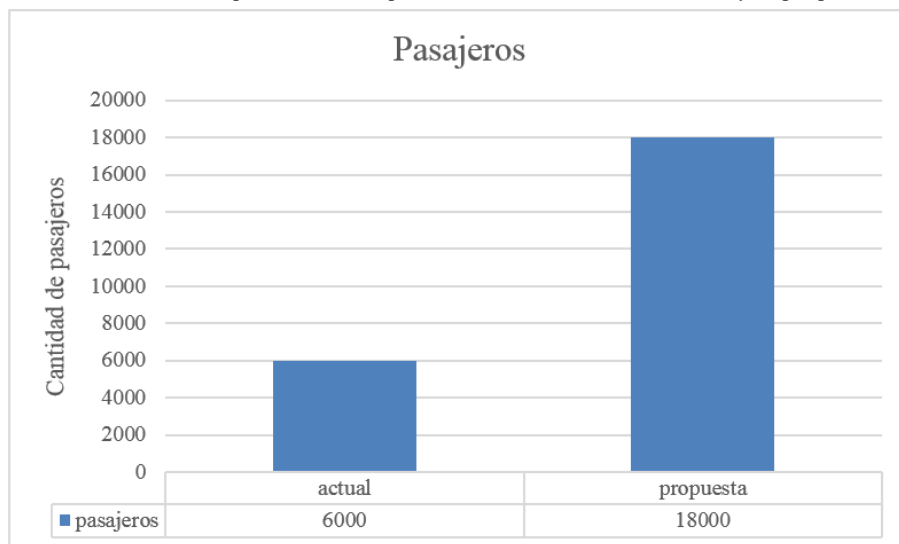
Fuente: Elaboración propia.

Estudio de la capacidad de la propuesta

Tenemos 15 servicios por hora, en cada servicio hay 3 trenes con una capacidad de 400 pasajeros cada uno y en total por servicio de 1.200 pasajeros. Por lo tanto, se obtiene una capacidad por hora punta de 18.000 pasajeros.

Actualmente Metro de Valparaíso tiene una capacidad de transportar 6000 pasajeros por hora punta, esta estrategia nos da 3 veces más la capacidad actual que tiene Metro Valparaíso. Gráficamente es posible revisarlo en la ilustración 44.

Ilustración 44: Comparación de capacidad entre la situación actual y la propuesta.



Fuente: Elaboración propia.

Por lo que esta estrategia puede ser utilizada desde abril del año 2023 en adelante según la estimación de la demanda realizada.

Acciones necesarias para ejecutar la Etapa III

Estas acciones se mencionan, pero no se evalúan, son sugerencias que no forman parte de este trabajo, el que sólo se limita a evaluar la factibilidad del manejo de los trenes.

- Se requiere adquirir 22 trenes.
- Se requiere soterrar el paso peatonal de Francia.
- En el cruce Portales se requiere crear un paso bajo nivel para vehículos y peatones.
- Agrandar los andenes en 50 metros para que las operaciones sean operacionalmente poco complejas.

4.5 Modelo de simulación de las rutas.

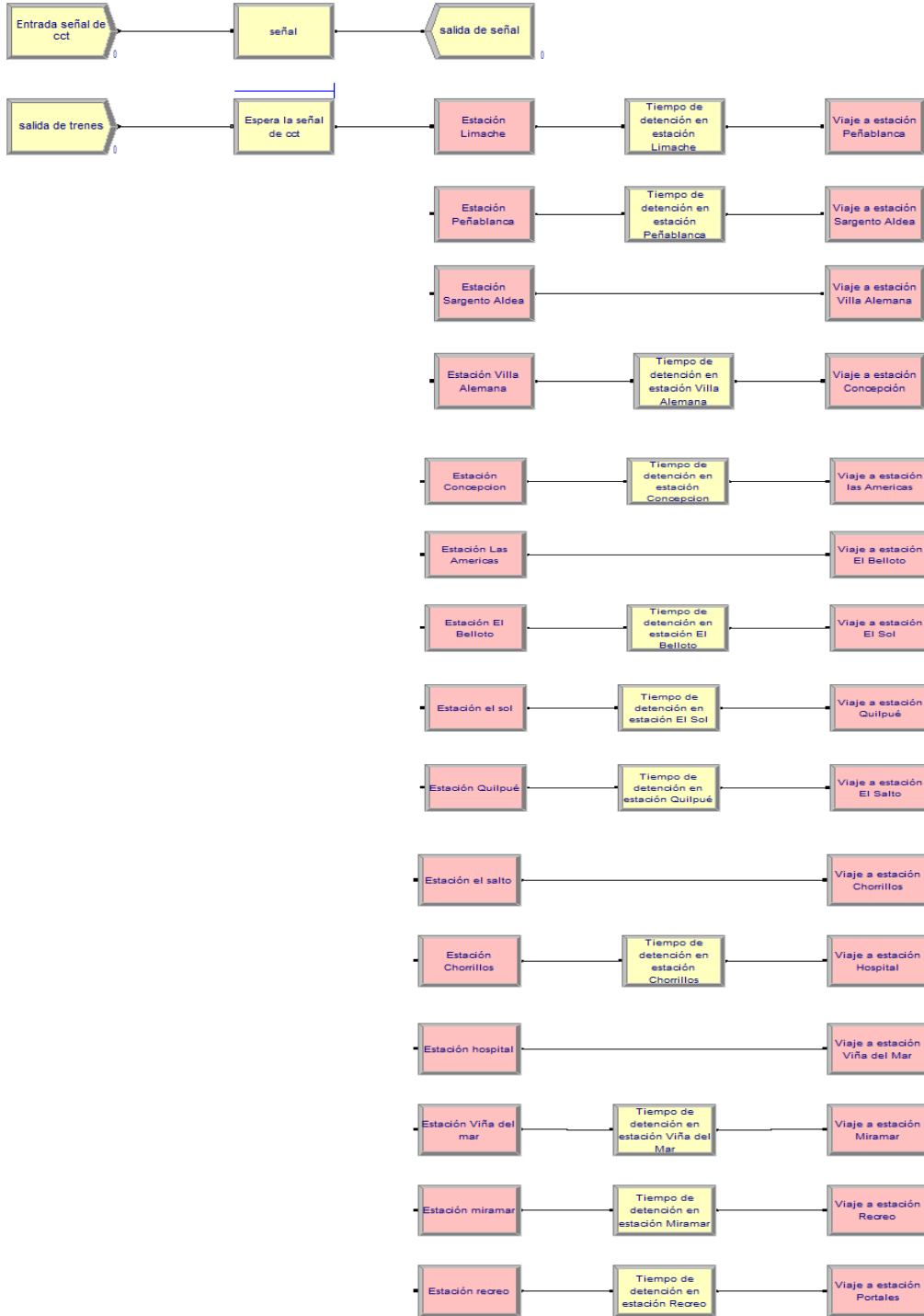
Para la etapa I y II se utiliza el mismo modelo de simulación

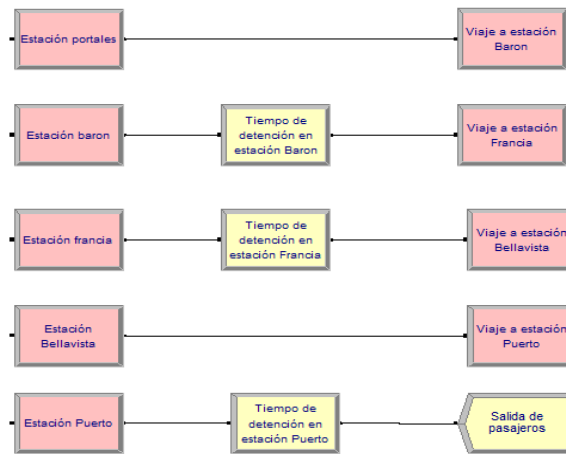
En el caso de la ruta azul no hay tiempo de espera en las estaciones en donde el tren no se detiene, los módulos Delay en estas desaparecen.

La ilustración 45 es el modelo de simulación de la ruta expresa azul.

Ilustración 45: Modelo ruta expresa azul.

Ruta Expresa Azul





Fuente: Elaboración propia.

Los reportes entregados para la ruta expresa azul pueden ser revisados en la ilustración 46.

Ilustración 46: Reportes ruta expresa azul.

Entity						
Time						
VA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
ruta expresa azul	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
ruta expresa azul	13.9245	< 0,01	13.6424	14.2004	13.0052	15.5517
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
ruta expresa azul	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
ruta expresa azul	43.2918	< 0,03	42.7792	43.8807	41.1434	48.5090
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Other Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
ruta expresa azul	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
ruta expresa azul	57.2164	< 0,03	56.6697	57.6449	54.8405	62.3969
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00

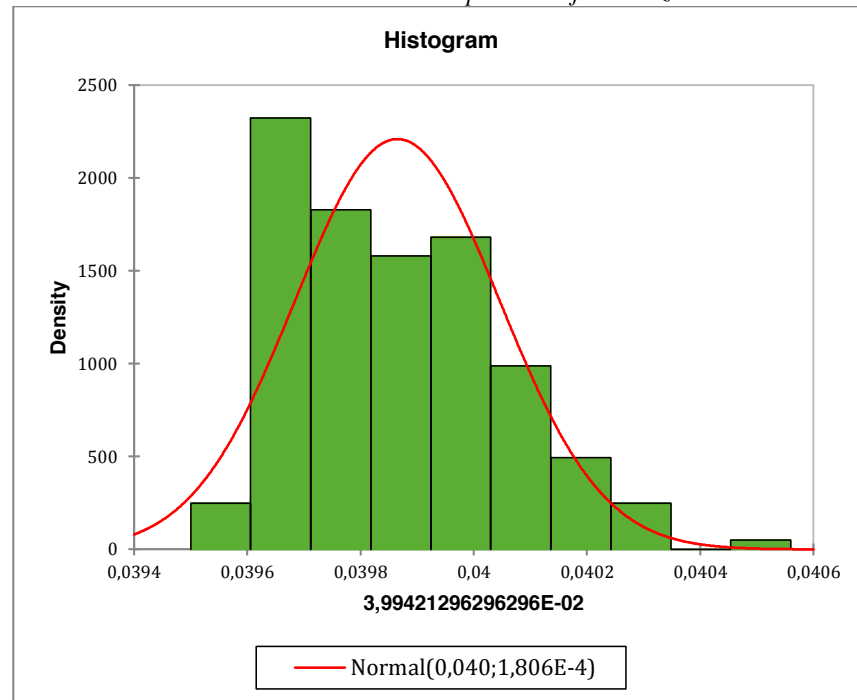
Fuente: elaboración propia.

Los reportes presentan los siguientes resultados.

- El tiempo de viaje total promedio de los servicios es de 57 minutos.
- El tiempo de estacionamiento promedio del servicio es de 14 minutos.
- El tiempo en ruta del servicio es de 43 minutos.

Para la ruta expresa azul se realiza el análisis mediante la técnica de Bootstrap utilizando el suplemento de Excel Xlstat. La distribución de los datos es posible revisarla en la ilustración 47.

Ilustración 47: Distribución tiempos de viaje ruta azul.



Fuente: Elaboración propia.

Los límites superior e inferior pueden ser revisados en la tabla 14.

Tabla 14: Límites superior e inferior ruta expresa azul.

Parámetro	Estimador	Estimador (Bootstrap)	Desv. Std. (Bootstrap)	Límite superior	Límite inferior
Promedio	0:57:36	0:57:36	0:00:01	0:57:39	0:57:33
Desv. Std.	0:00:16	0:00:16	0:00:01	0:00:18	0:00:13
Mediana	0:57:23	0:57:22	0:00:02	0:57:28	0:57:18

Fuente: Elaboración propia.

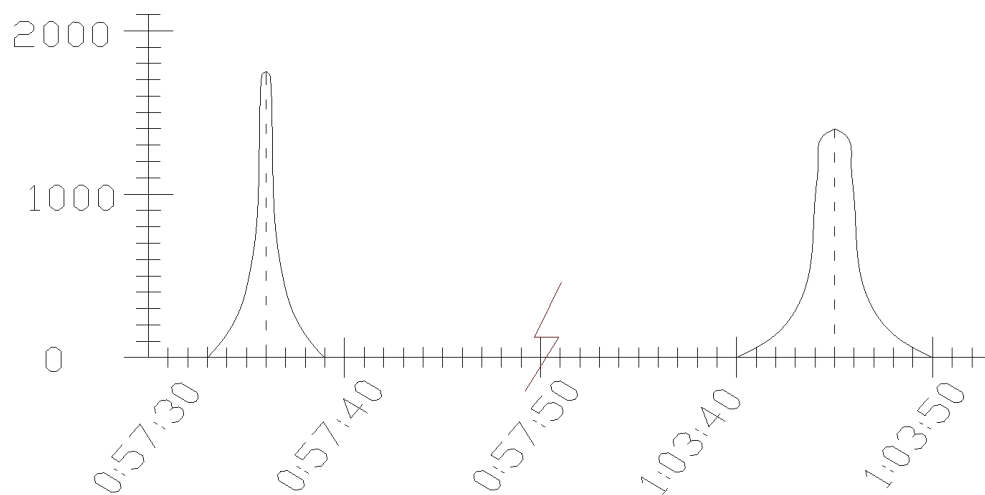
La hipótesis nula y alternativa son respectivamente:

$$H_0: \mu_{\text{ simulación}} = \mu_{\text{ real}}$$

$$H_1: \mu_{\text{ simulación}} \neq \mu_{\text{ real}}$$

La comparación de los intervalos de las rutas expresas y la situación actual puede ser revisada en la ilustración 48.

Ilustración 48: Intervalos de confianza ruta azul.



Fuente: Elaboración propia.

Como $\mu_{\text{ real}} \neq \mu_{\text{ simulación}}$, hay antecedentes estadísticos para rechazar la hipótesis nula.

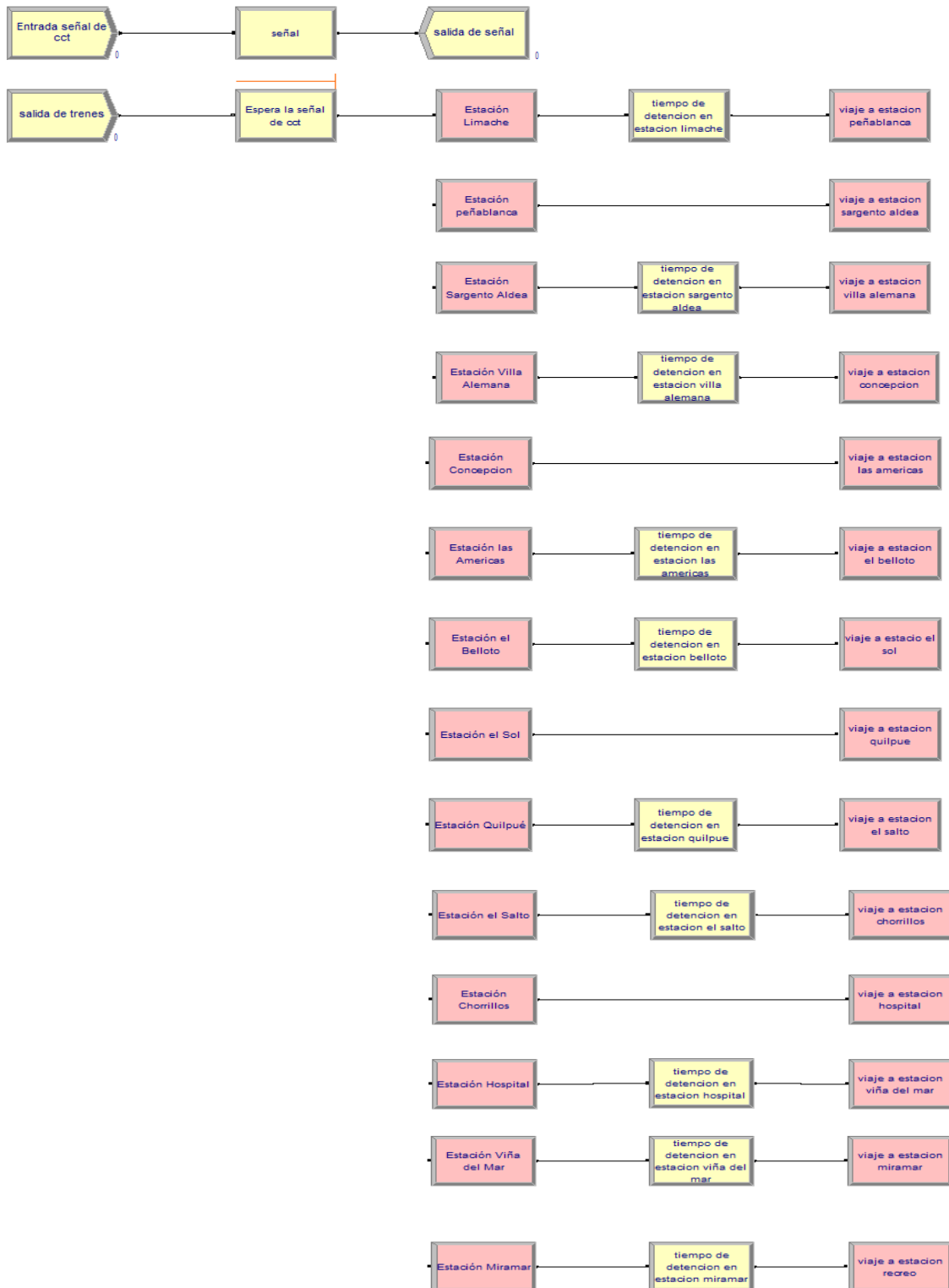
Que $\mu_{\text{ real}} \neq \mu_{\text{ simulación}}$ implica que la estrategia propuesta genera cambios significativos en las operaciones.

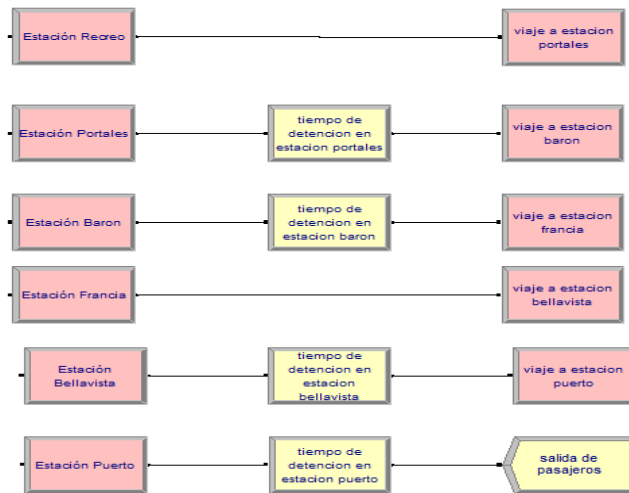
Al igual que en la ruta expresa azul, para la ruta naranja, el módulo Delay desaparece en las estaciones donde no hay tiempo de detención por ascenso o descenso de pasajeros.

La ilustración 49 es el modelo de simulación para la ruta expresa naranja.

Ilustración 49: Modelo ruta expresa naranja.

Ruta Expresa Naranja





Fuente: Elaboración propia.

Los reportes entregados para la ruta expresa naranja pueden ser revisados en la ilustración 50.

Ilustración 50: Reportes ruta expresa azul.

Entity						
Time						
VA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
trenes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
trenes	13.8748	< 0,02	13.5274	14.2042	12.3991	16.0679
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
trenes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
trenes	43.2830	< 0,03	42.8483	43.9308	41.2846	48.1789
Other Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
trenes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
señalpartes	0.00	< 0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
trenes	57.1579	< 0,03	56.6229	57.8249	54.2567	62.4248

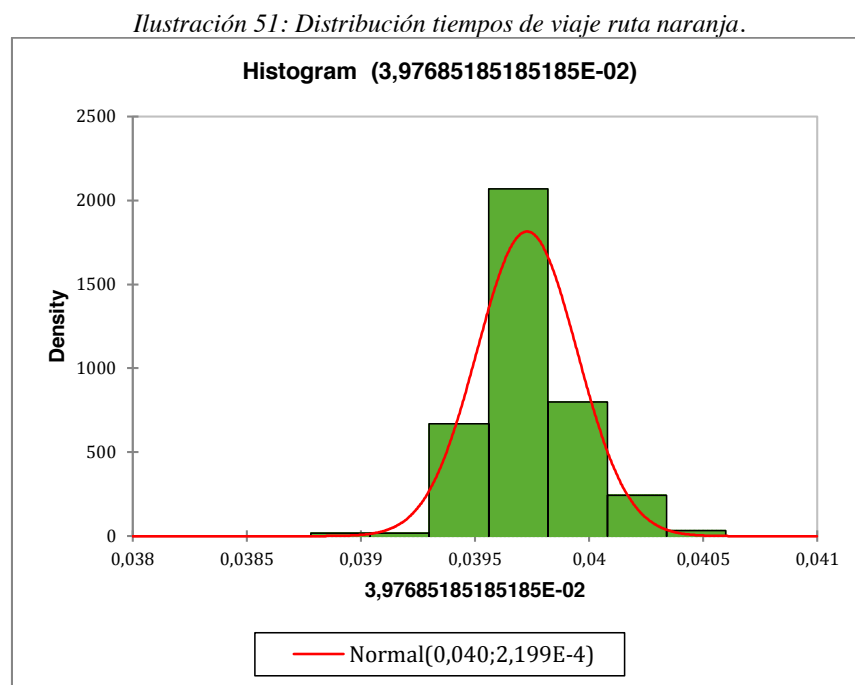
Fuente: Elaboración propia.

Los reportes nos entregan los siguientes resultados.

- El tiempo de viaje total promedio de los servicios es de 57 minutos.
- El tiempo de estacionamiento promedio del servicio es de 14 minutos.
- El tiempo en ruta del servicio es de 43 minutos.

Para la ruta expresa naranja se realiza un estudio mediante la técnica de Bootstrap utilizando el suplemento de Excel XLSTAT.

La ilustración 51 es la distribución de los tiempos de viaje obtenidos al simular la ruta naranja.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos al aplicar Bootstrap pueden ser revisados en la tabla 15.

Tabla 15: Límites ruta expresa naranja.

Parámetro	Estimador	Estimador (Bootstrap)	Desv. Std. (Bootstrap)	Límite superior	Límite inferior
Promedio	0:57:36	0:57:36	0:00:01	0:57:39	0:57:33
Desv. Std.	0:00:19	0:00:19	0:00:01	0:00:22	0:00:16
Mediana	0:57:11	0:57:11	0:00:01	0:57:15	0:57:08

Fuente: Elaboración propia.

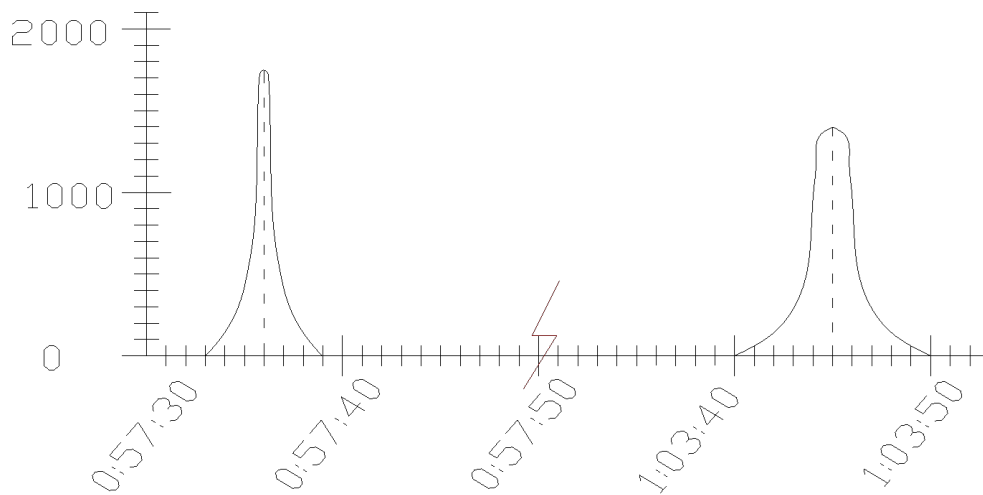
La hipótesis nula y alternativa son respectivamente:

$$H_0: \mu_{\text{ simulación}} = \mu_{\text{ real}}$$

$$H_1: \mu_{\text{ simulación}} \neq \mu_{\text{ real}}$$

La comparación de los límites superior e inferior de la ruta expresa naranja y la situación actual puede ser revisada en la ilustración 52.

Ilustración 52: Límites superior e inferior de la ruta naranja v/s situación actual



Fuente: Elaboración propia.

Como $\mu_{\text{ simulación}} \neq \mu_{\text{ real}}$, hay antecedentes estadísticos para rechazar la hipótesis nula.

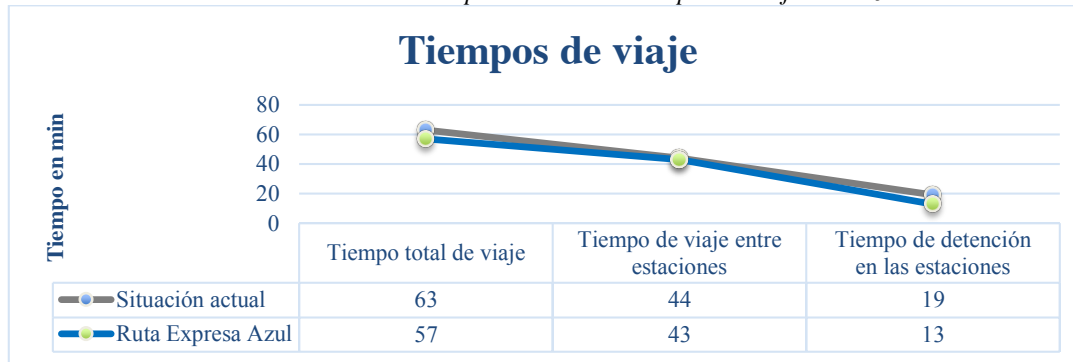
Que $\mu_{\text{ real}} \neq \mu_{\text{ simulación}}$ implica que la estrategia propuesta genera cambios significativos en las operaciones.

4.6 Comparación de resultados.

4.6.1 Tiempos de viaje.

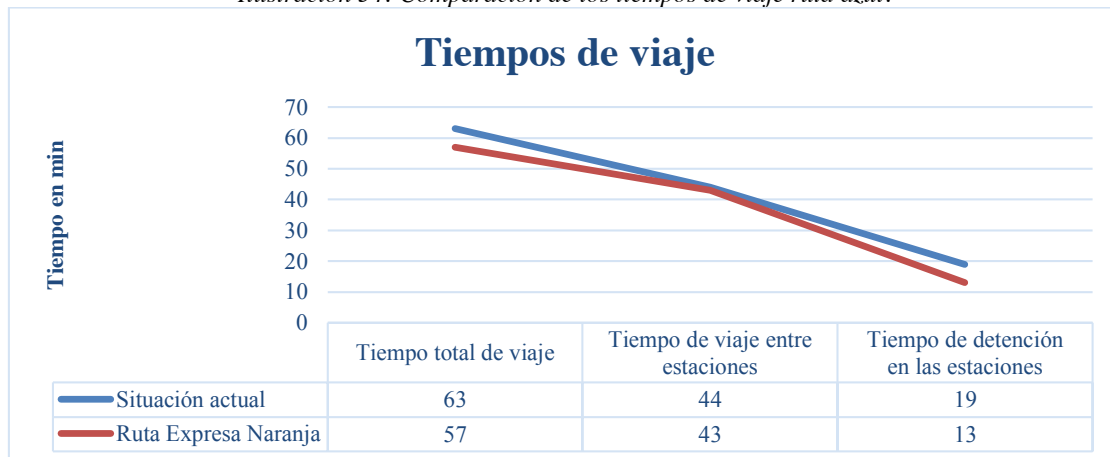
Las ilustraciones 53 y 54 son una comparación de los tiempos de viaje de la situación actual y las rutas expresas. Se ilustran de forma separada puesto que los tiempos de la ruta azul y naranja son coincidentes.

Ilustración 53: Comparación de los tiempos de viaje ruta azul.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 54: Comparación de los tiempos de viaje ruta azul.



Fuente: Elaboración propia.

Con la aplicación de las rutas expresas se disminuye el tiempo de viaje en 6 minutos. Esto pone a disposición de la empresa un tren con 12 minutos de anticipación.

4.6.2 Oferta de transporte

La comparación entre la oferta actual de la empresa y la que ofrece la propuesta en sus tres etapas es posible revisarlas en la tabla 16.

Tabla 16: Comparación de la oferta de transporte solo en la ruta de alta demanda.

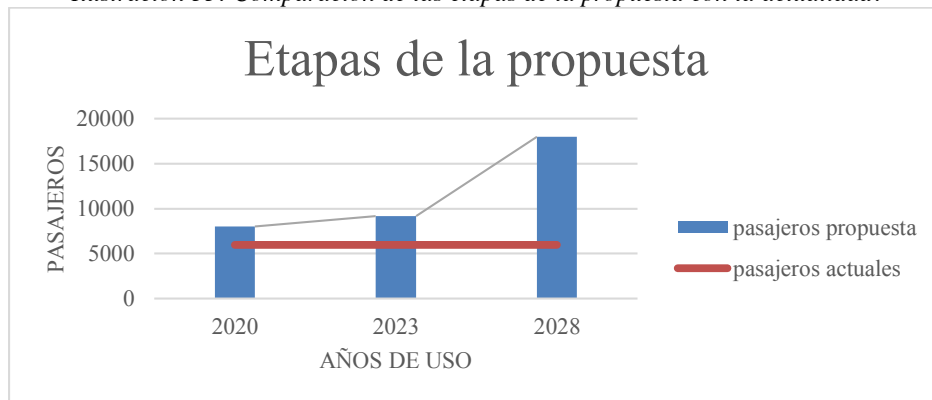
	Cantidad de Servicios	Cantidad de trenes en HP	Capacidad promedio de pax por tren	Capacidad total pax HP
Situación actual	10	15	400	6.000
Etapa I	15	20	400	8.000
Etapa II	15	23	400	9.200
Etapa III	15	45	400	18.000

Fuente: Elaboración propia.

Actualmente Metro Valparaíso cuenta con una capacidad para transportar a 6000 pasajeros en hora punta. La etapa I entrega una capacidad de 8000 pasajeros en hora punta, un aumento en la oferta de transporte de un 33%, esto por el aumento de capacidad y disminución de la frecuencia. La etapa II entrega una capacidad de 9.200 pasajeros un aumento de un 53% en la oferta de transporte. La etapa III entrega una capacidad de 18.000 pasajeros en hora punta lo que representa un aumento de un 200% más en la oferta de transporte entregada por la empresa.

- Para el año 2020 la etapa I servirá sólo hasta febrero.
- Para el año 2023 a etapa II servirá hasta el mes de marzo.
- En la condición más desfavorable, hoy en promedio se transportan 7.063 pasajeros en hora punta, para diciembre de 2026 se deberá transportar 10.252 pasajeros. Por lo tanto, hasta 2028 con la etapa III aún satisface la demanda ya que permite transportar 18.000 en hora punta. La comparación de la oferta de transporte disponible en la ilustración 55.

Ilustración 55: Comparación de las etapas de la propuesta con la actualidad.



Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIÓN

El siguiente estudio de identificación de los procesos de circulación con los que cuenta Metro Valparaíso, permitió la creación de un modelo de simulación que representa la realidad actual de la empresa, al validar este modelo se logró generar nuevas estrategias de circulación.

La propuesta desarrollada en este estudio cuenta con tres etapas:

En la etapa I se estudió las rutas expresas (naranja y azul) donde los trenes se detienen de forma alternada en las estaciones de gran flujo de pasajeros, que de ser implementadas generan una serie de mejorías, una de estas es el tiempo total de viaje desde la primera estación hasta la última, de 63 minutos en promedio a 57 minutos en promedio por ruta. También se logra una mejor oferta de transporte, ya que se disminuye el intervalo de frecuencia, aumentando a 15 los servicios ofrecidos en hora punta, un 50% más. Con 5 trenes más y un aumento de capacidad de 6.000 a 8.000 pasajero por hora punta, se transporta un 33% de pasajeros adicionales de lo que actualmente la empresa puede transportar utilizando la misma dotación de trenes.

En la etapa II, se logra transportar una cantidad de 9.200 pasajeros por hora punta, un 53% más que la actualidad, que de acuerdo con la estimación de la demanda da total utilidad a Metro Valparaíso hasta marzo del año 2023. Para llevar a cabo esta propuesta se necesita la adquisición de nuevo material rodante por un total de 3 trenes

En la etapa III, se logra transportar una cantidad de 18.000 pasajeros por hora punta, un 300% más que la actualidad, lo cual permitirá satisfacer la demanda de pasajeros hasta diciembre del año 2026 sin problemas. A diferencia de las rutas expresas los servicios se detendrán en todas las estaciones. Por la vía de alto tráfico se utilizará un total de 45 trenes lo que llevaría a la empresa a adquirir nuevo material rodante por un total de 22 trenes.

Para que la etapa III pueda tener un uso más expedito se necesita hacer un estudio financiero para ampliar los andenes en al menos 50 metros.

El modelo de simulación que se realizó en el software Arena versión 15, puede ser utilizado para proponer diversas estrategias de circulación ya que teniendo en cuenta que al estar validado estadísticamente este tiene una alta apariencia de credibilidad y validez, por lo tanto, provee de una confianza para ser utilizado y explotado con las diversas etapas de la propuesta.

Realizada y validada la simulación la recomendación es a ejecutar las rutas expresas, conforme a lo dispuesto en la etapa I. aumentando de esta forma en un 30% la capacidad de transporte, además la empresa debe invertir en nuevo material rodante que permite implementar la etapa II y III.

BIBLIOGRAFÍA

Caroca, D. (2011). *Optimización de la frecuencia de trenes en la línea 1 de Metro S.A. con el objeto de satisfacer la demanda en horas puntas*. Tesis , Universidad de Valparaíso.

Gérondeau. (1965).

Gracia, C. (2016). *Operación de ferrocarriles metropolitanos automáticos GoA4*. Tesis, Universidad Pontificia de Corillas, Madrid.

López, A. (1967). *Los ferrocarriles metropolitanos*.

López, A. (2016). *Optimización de diseño de estaciones de Metro*. Tesis, Santiago.

metro.cl. (2017). Obtenido de metrodemedellin.gob.co.

MV. (2010). *Memoria anual*.

MV. (2012). *Memoria anual*.

MV. (2014). *Memoria anual* .

MV. (2016). *Memoria anual*.

MV. (2017). *Informe de gestión* .

Virgili, G. (1970). *El metro como sistema de transporte*.

ANEXO 1

La tabla 17 y 18 es un detalle del número de pax efectivamente transportados para los meses de Abril, Mayo y Junio en hora punta mañana (HPM) y hora punta tarde (HPT) para cada día laboral, sin considerar interferidos, pues en estos días el número de pasajeros desciende sin superar la capacidad.

Tabla 17: Número de pax diario, para los meses de estudio (HPM).

Abril 07:00 a 08:00		Mayo 07:00 a 08:00		Junio 07:00 a 08:00	
Día	Pax	Día	Pax	Día	Pax
Mi 1	7.390				
Ju 2	6.875				
Feriado					
Lu 6	7.466	Lu 4	7.046	Lu 1	6.617
Ma 7	7.445	Ma 5	6.987	Ma 2	6.585
Mi 8	7.333	Mi 6	6.839	Mi 3	5.940
Ju 9	7.141	Ju 7	6.708	Ju 4	5.968
Vi 10	6.546	Vi 8	6.360	Vi 5	5.996
Lu 13	7.490	Lu 11	6.922	Lu 8	6.499
Ma 14	7.396	Ma 12	6.922	Ma 9	6.334
Mi 15	7.122	Mi 13	6.791	Mi 10	6.074
Ju 16	6.551	Ju 14	6.190	Ju 11	6.108
Vi 17	6.648	Vi 15	6.227	Vi 12	5.684
Lu 20	7.245	Lu 18	6.641	Lu 15	6.020
Ma 21	7.261	Ma 19	6.758	Ma 16	5.635
Mi 22	7.245	Mi 20	6.511	Mi 17	5.643
Ju 23	6.851	Feriado		Ju 11	5.899
Vi 24	6.593	Inteferiado		Vi 19	5.726
Lu 27	7.205	Lu 25	6.947	Lu 22	5.582
Ma 28	6.923	Ma 26	6.682	Ma 23	5.552
Mi 29	6.961	Mi 27	6.612	Mi 24	5.346
Ju 30	6.628	Ju 28	6.429	Ju 25	4.887
		Vi 29	6.025	Vi 26	5.092
				Feriado	
				Ma 30	5.309
Promedio	7063	Promedio	6644	Promedio	5.833

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Número de pax diario, para los meses de estudio (HPT).

Abril 18:00 a 19:00		Mayo 18:00 a 19:00		Junio 18:00 a 19:00	
Día	Pax	Día	Pax	Día	Pax
Mi 1	6416				
Ju 2	5309				
Feriado					
Lu 6	6616	Lu 5	6708	Lu 1	6746
Ma 7	6538	Ma 6	6603	Ma 2	6725
Mi 8	6506	Mi 7	6396	Mi 3	6220
Ju 9	6167	Ju 8	6392	Ju 4	5857,5
Vi 10	5315	Vi 9	5554	Vi 5	5495
Lu 13	6605	Lu 12	6636	Lu 8	6689
Ma 14	6320	Ma 13	6508	Ma 9	6354
Mi 15	6240	Mi 14	6479	Mi 10	6450
Ju 16	6251	Ju 15	6392	Ju 11	7048
Vi 17	5068	Vi 16	5646	Vi 12	5492
Lu 20	6427	Lu 19	6694	Lu 15	6796
Ma 21	6361	Ma 20	6066	Ma 16	6258
Mi 22	6538	Feriado		Mi 17	6127
Ju 23	6406	Ju 22	6385	Ju 11	6363
Vi 24	5275	Vi 23	5458	Vi 19	5716
Lu 27	6484	Lu 26	6624	Lu 22	6309
Ma 28	6255	Ma 27	6662	Ma 23	5998
Mi 29	6193	Mi 28	6390	Mi 24	6473
Ju 30	6099	Ju 29	5935	Ju 25	5566
		Vi 30	5822	Vi 26	5414
				Feriado	
				Ma 30	5720
Promedio	6161	Promedio	6282	Promedio	6182

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2

La tabla 19, 20 y 21 proporcionan el número de pax que asciende y desciende por cada estación, para los meses de Abril, Mayo y Junio considerando la franja horaria de interés, hora punta mañana de 07:00 a 08:00 Hrs. y hora punta tarde de 18:00 a 19:00 Hrs.

Tabla 19: Número de pax, mes de Abril, según ascenso y descenso franja horaria de alto tráfico.

Abril HPM 07:00 a 08:00

Abril HPT 18:00 a 19:00

	Ascenso	Descenso		Ascenso	Descenso
LIM	1728	21	PUE	1496	5
PEN	271	24	BEL	769	5
SGA	588	100	FRA	554	7
VAM	520	107	BAR	539	20
CON	360	26	POR	319	42
AME	776	20	REC	101	44
BTO	819	70	MIR	439	344
SOL	404	39	VIN	789	422
QUI	867	281	HOS	225	165
SLT	28	184	CHO	214	447
CHO	241	453	SLT	142	22
HOS	208	440	QUI	248	957
VIN	71	955	SOL	44	197
MIR	109	511	BTO	53	451
REC	41	70	AME	32	445
POR	20	449	CON	17	178
BAR	9	577	VAM	95	715
FRA	2	799	SGA	38	193
BEL	0	680	PEN	25	170
PUE	2	1258	LIM	20	1332

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20: Número de pax, mes de Mayo, según ascenso y descenso franja horaria de alto tráfico

Mayo HPM 07:00 a 08:00			Mayo HPT 18:00 a 19:00		
	Ascenso	Descenso		Ascenso	Descenso
LI	1628	20	PUE	1508	3
PEN	245	25	BEL	786	7
SGA	572	97	FRA	556	7
VAM	476	110	BAR	544	19
CON	346	24	POR	316	39
AME	731	18	REC	115	47
BTO	779	75	MIR	439	360
SOL	389	39	VIN	817	450
QUI	797	278	HOS	224	178
SLT	24	185	CHO	213	460
CHO	223	403	SLT	142	21
HOS	192	456	QUI	267	988
VIN	66	895	SOL	48	194
MIR	103	476	BTO	55	453
REC	39	71	AME	33	456
POR	20	385	CON	18	176
BAR	7	554	VAM	100	714
FRA	2	718	SGA	40	200
BEL	1	649	PEN	24	173
PUE	2	1164	LIM	20	1320

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21: Número de pax, mes de Junio, según ascenso y descenso franja horaria de alto tráfico

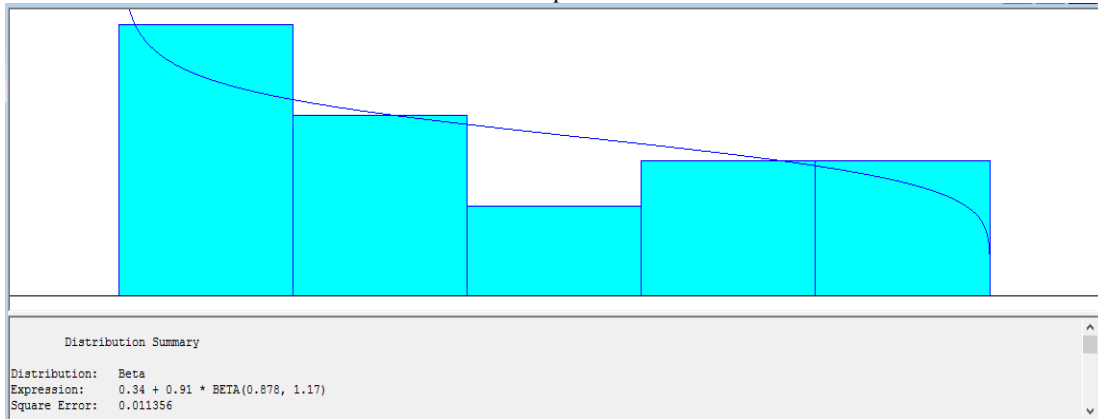
Junio HPM 07:00 a 08:00			Junio HPT 18:00 a 19:00		
	Ascenso	Descenso		Ascenso	Descenso
LIM	1482	21	PUE	1495	2
PEN	208	26	BEL	775	5
SGA	517	93	FRA	521	6
VAM	415	108	BAR	541	17
CON	294	23	POR	285	39
AME	636	16	REC	111	50
BTO	675	76	MIR	453	361
SOL	332	39	VIN	808	463
QUI	701	257	HOS	229	179
SLT	23	179	CHO	208	434
CHO	190	353	SLT	146	21
HOS	162	436	QUI	272	978
VIN	55	850	SOL	50	189
MIR	86	444	BTO	52	449
REC	29	67	AME	32	471
POR	17	297	CON	17	171
BAR	8	408	VAM	99	714
FRA	1	532	SGA	45	201
BEL	1	586	PEN	23	171
PUE	2	1023	LIM	18	1261

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3

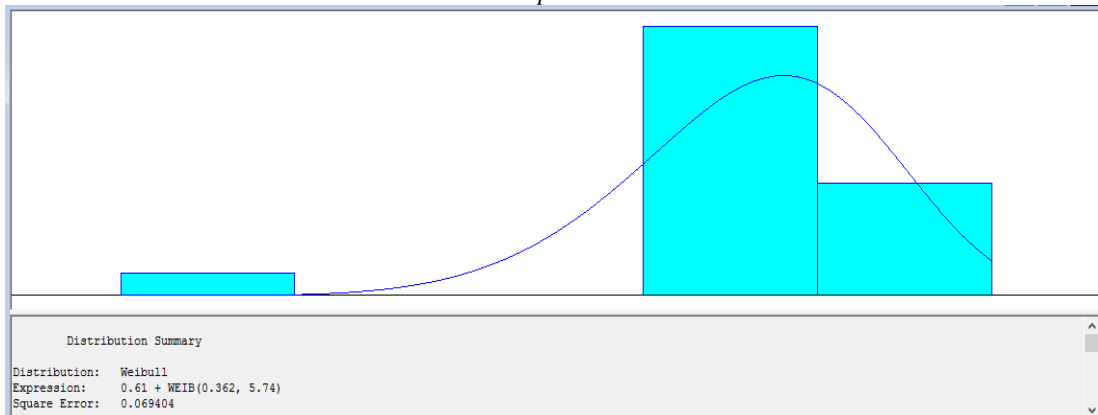
Desde la ilustración 56 a la 74 se encuentran las gráficas de las distribuciones de probabilidad de los tiempos de detención, entregados por la herramienta Input Analyzer de Arena, los que posteriormente son ingresados en el módulo Delay.

Ilustración 56: Distribución tiempo de detención Estación Puerto.



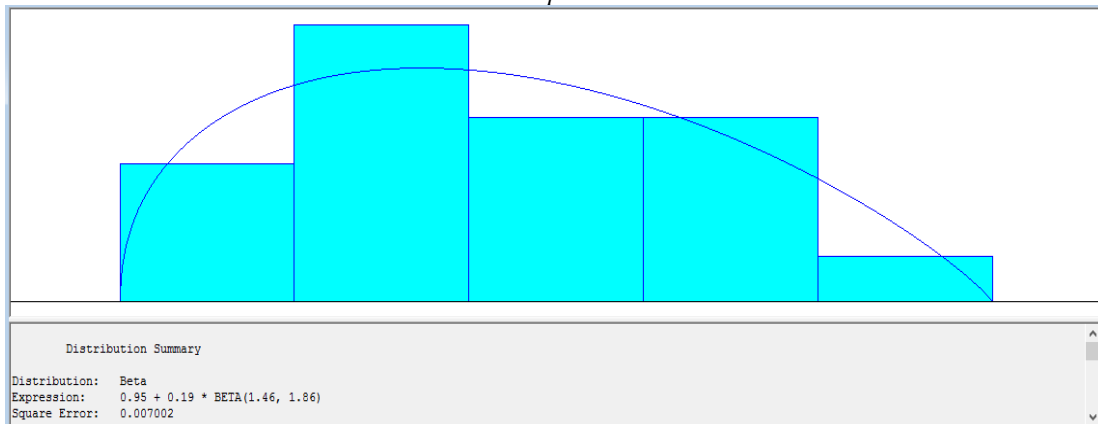
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 57: Distribución tiempo de detención Estación Bellavista.



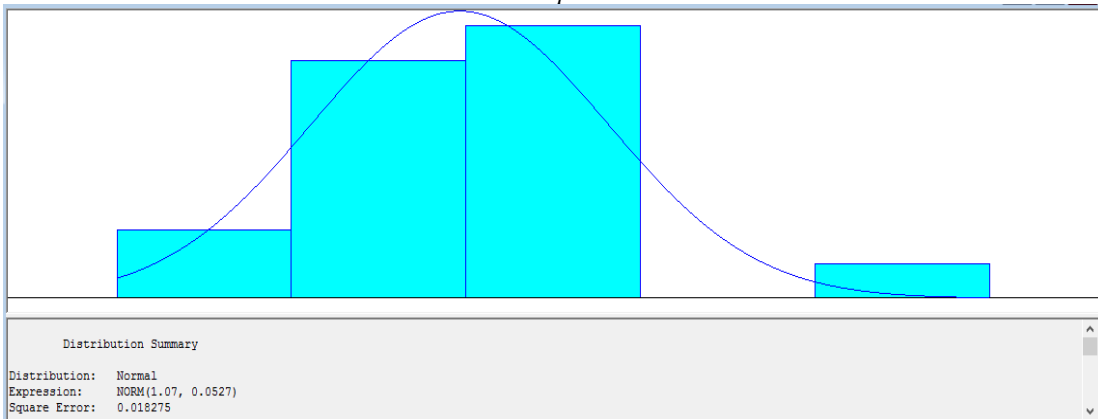
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 58: Distribución tiempo de detención Estación Francia.



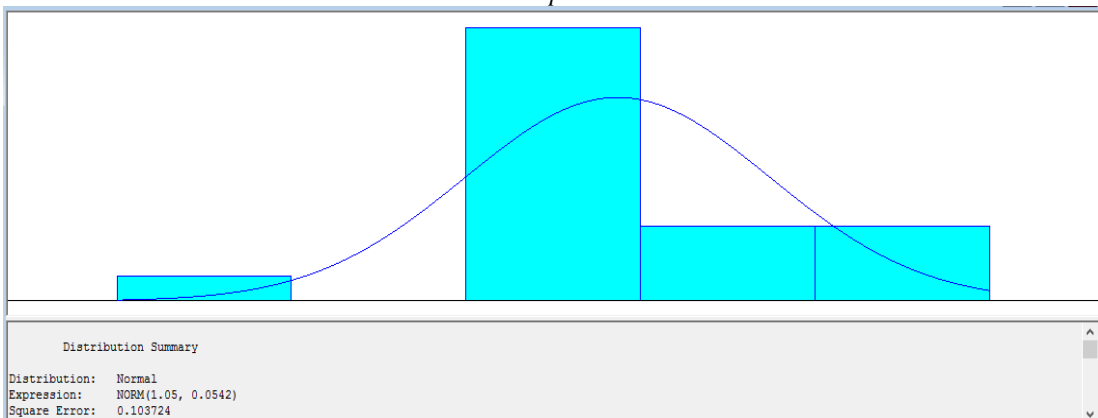
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 59: Distribución tiempo de detención Estación Barón.



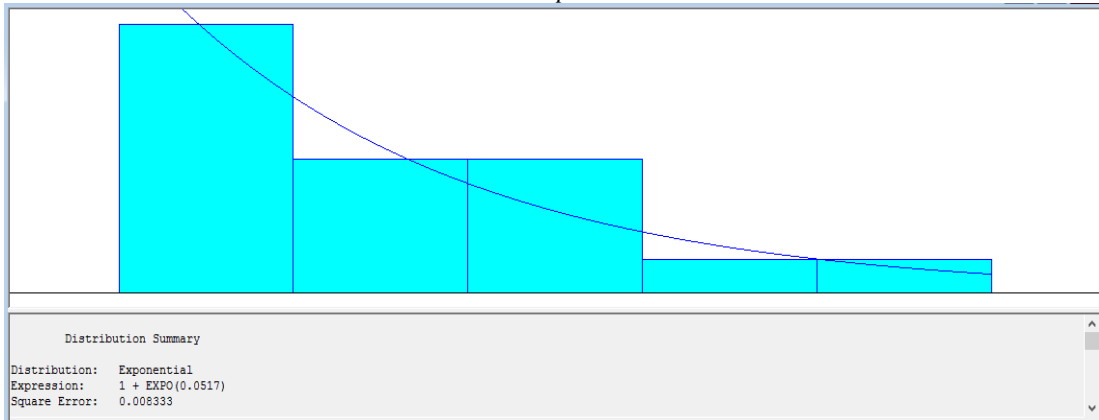
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 60: Distribución tiempo de detención Estación Portales



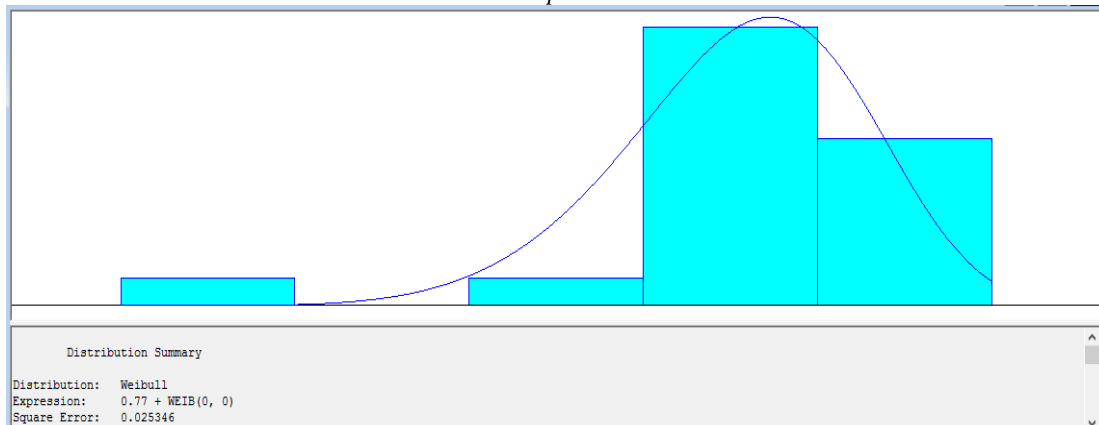
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 61: Distribución tiempo de detención Estación Recreo



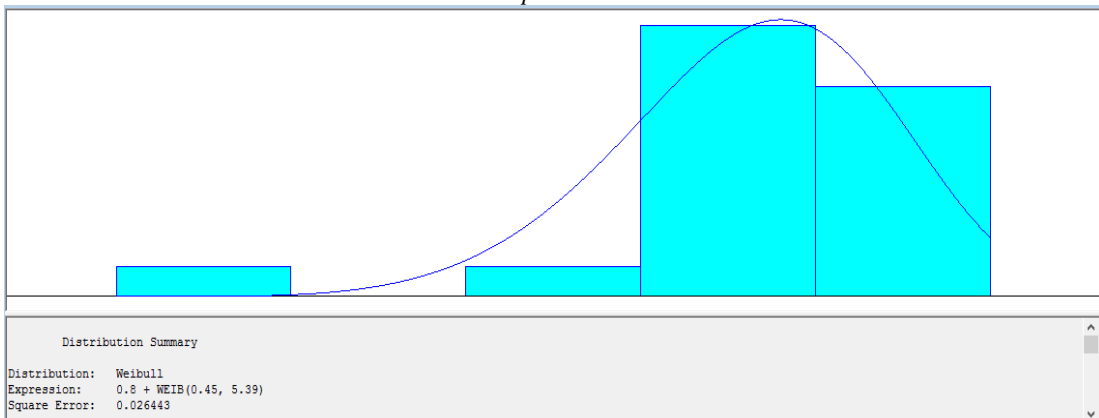
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 62: Distribución tiempo de detención Estación Miramar



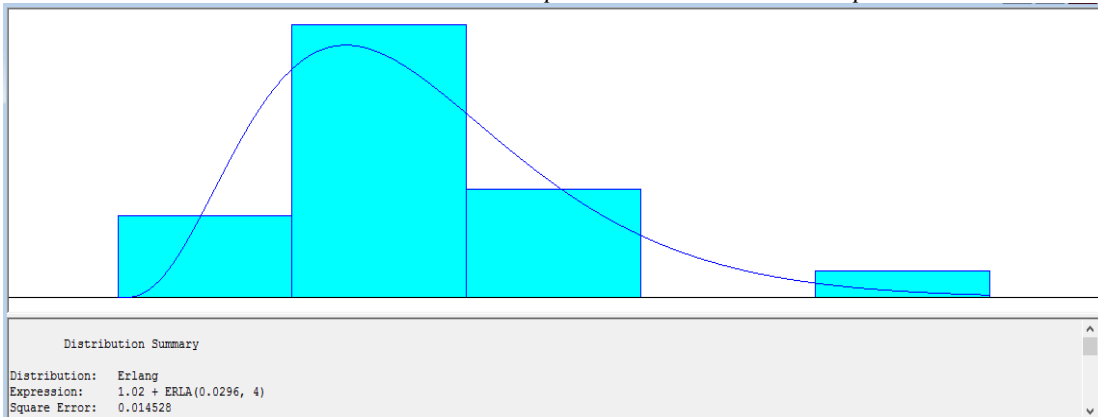
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 63: Distribución tiempo de detención Estación Viña del Mar.



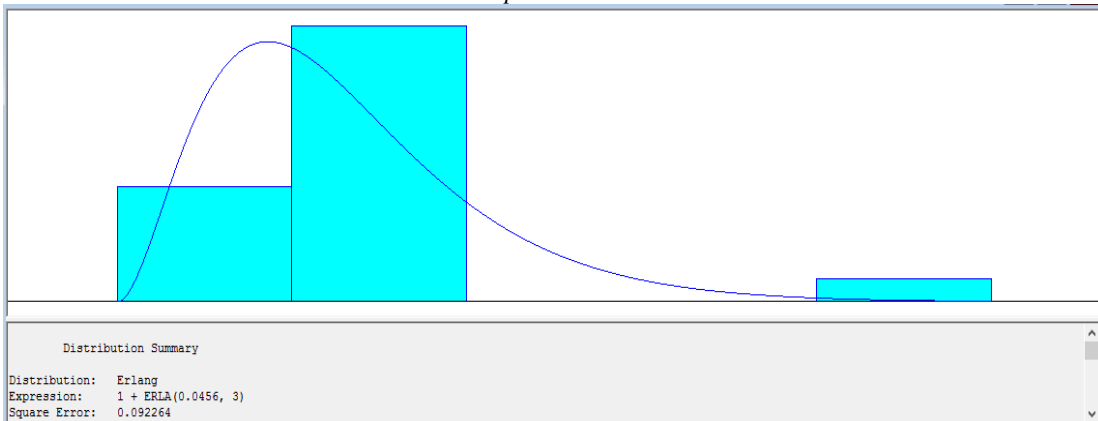
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 64: Distribución tiempo de detención Estación Hospital.



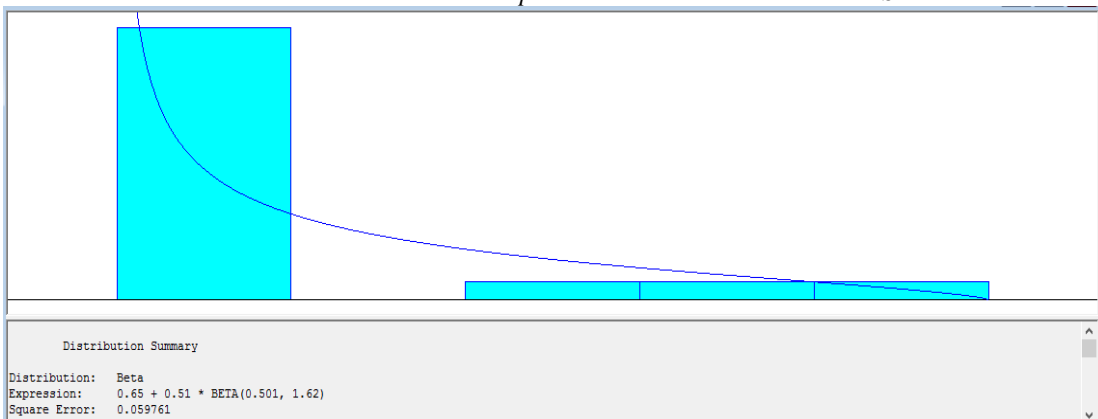
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 65: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Chorrillos



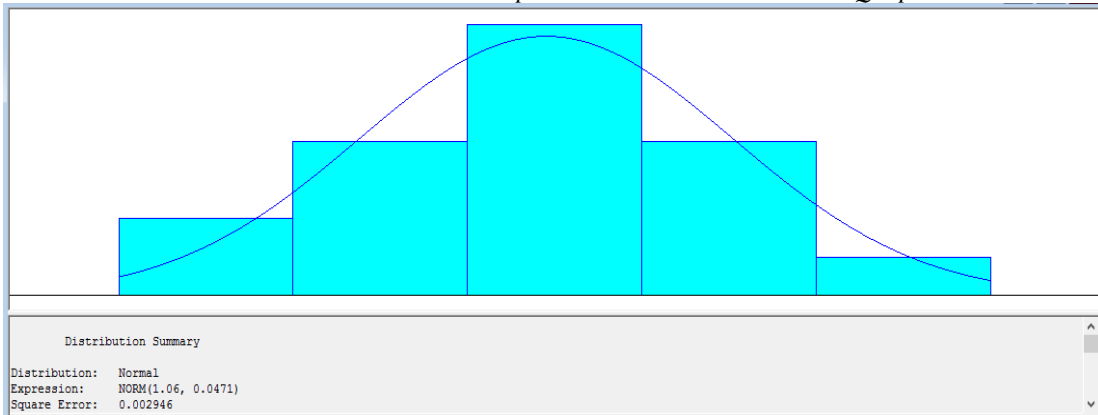
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 66: Distribución tiempo de estacionamiento Estación el Salto



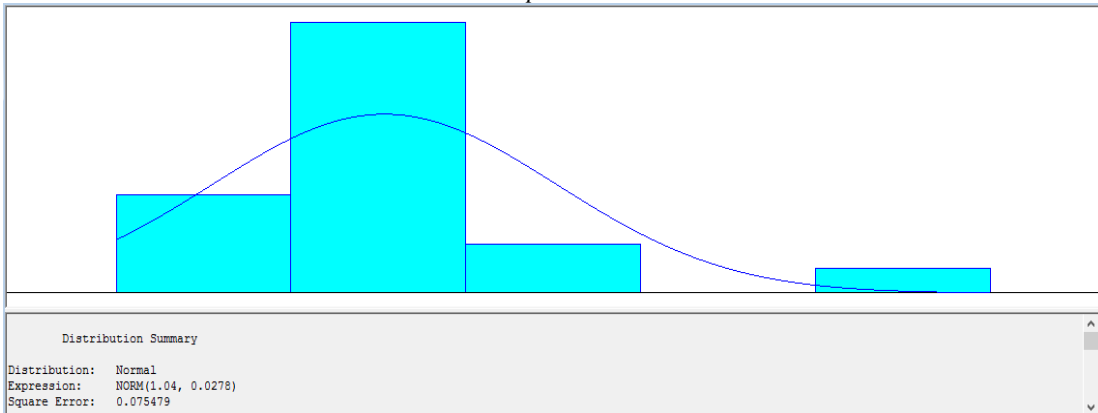
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 67: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Quilpué



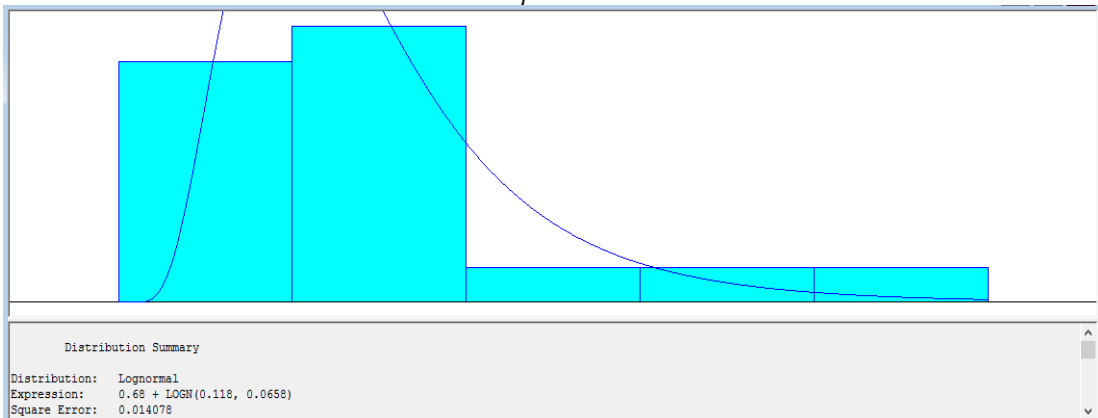
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 68: Distribución tiempo de estacionamiento Estación El Sol



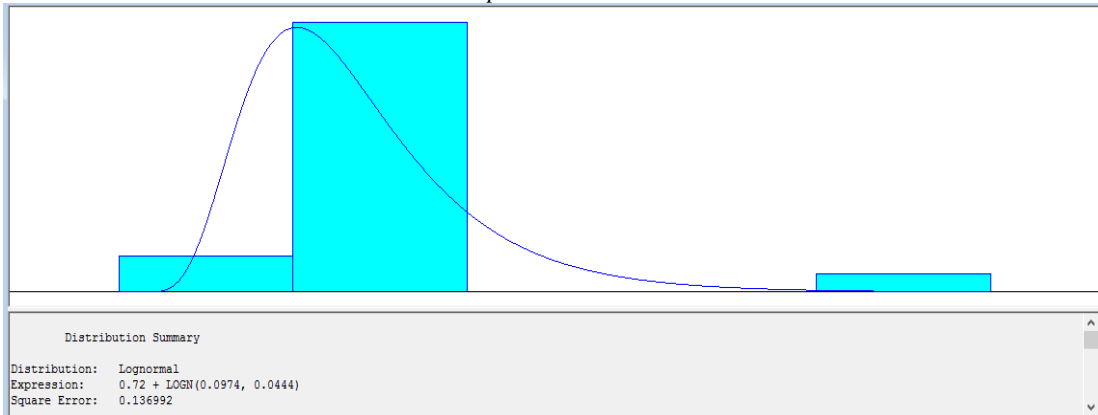
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 69: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Belloto



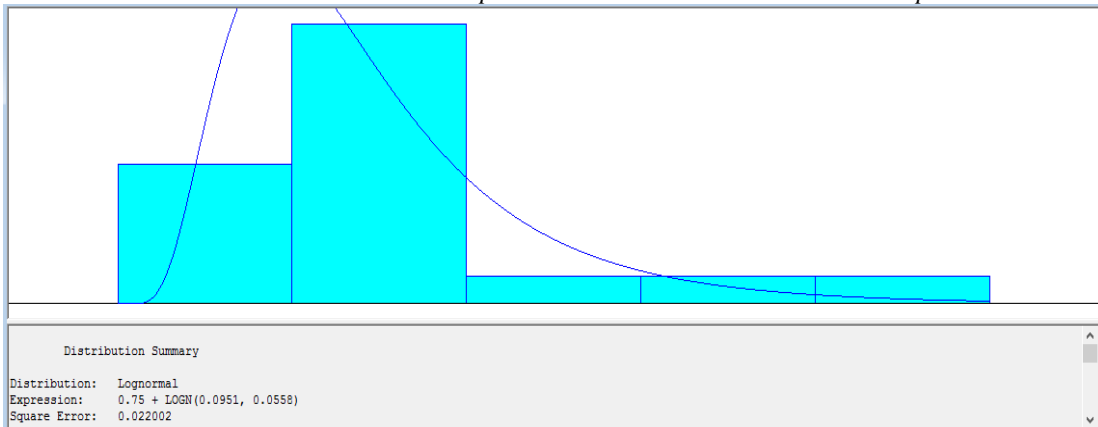
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 70: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Las Américas



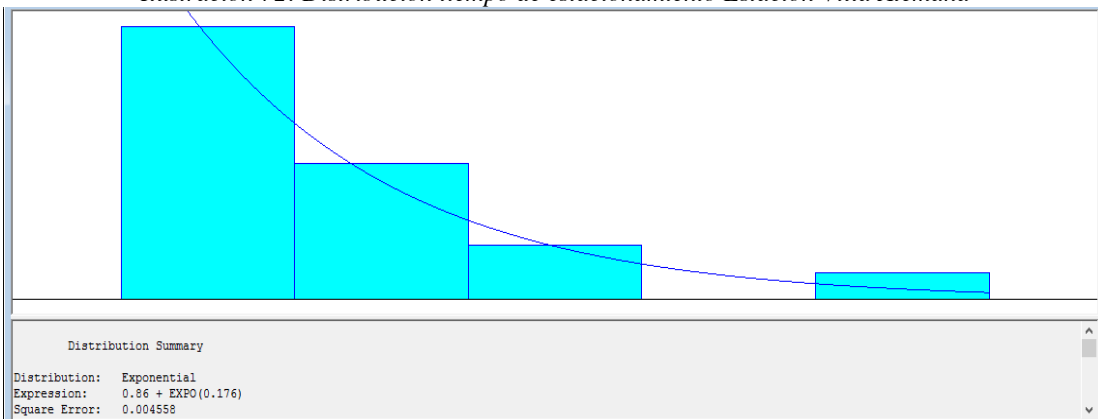
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 71: Distribución tiempo de estacionamiento Estación La Concepción



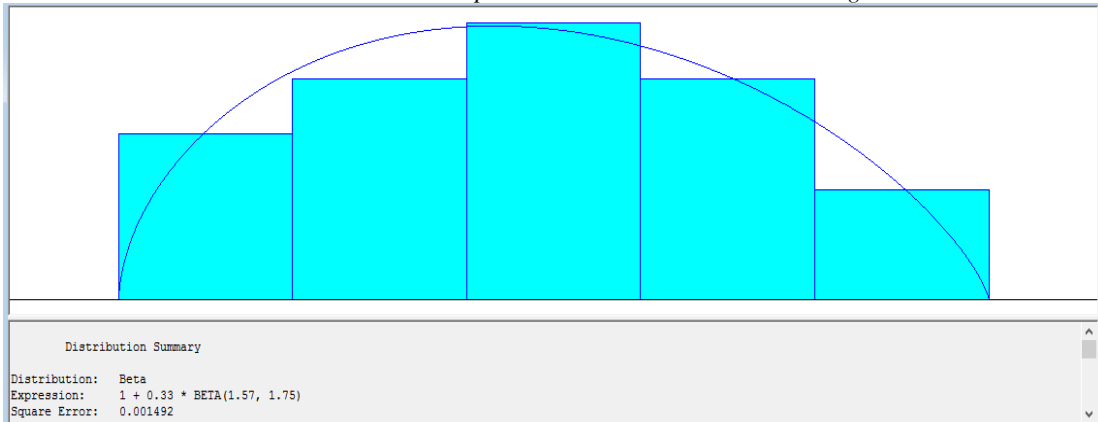
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 72: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Villa Alemana



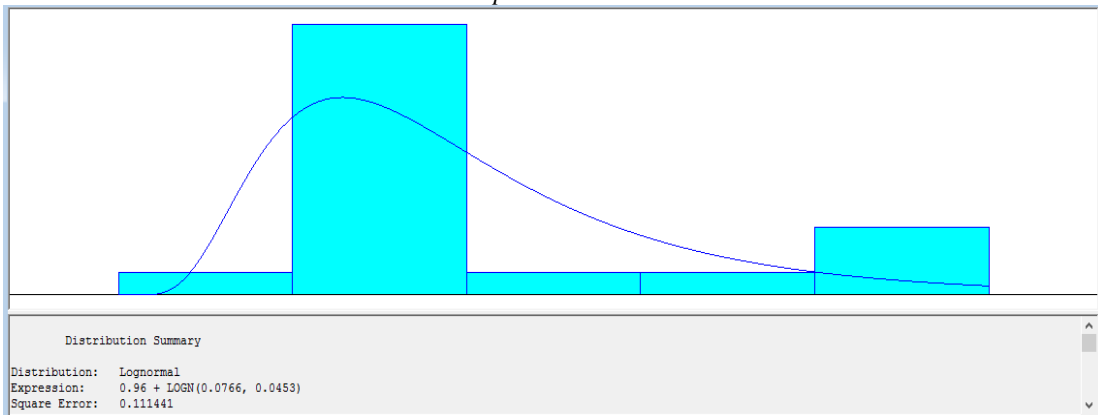
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 73: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Sargento Aldea.



Fuente: Elaboración propia.

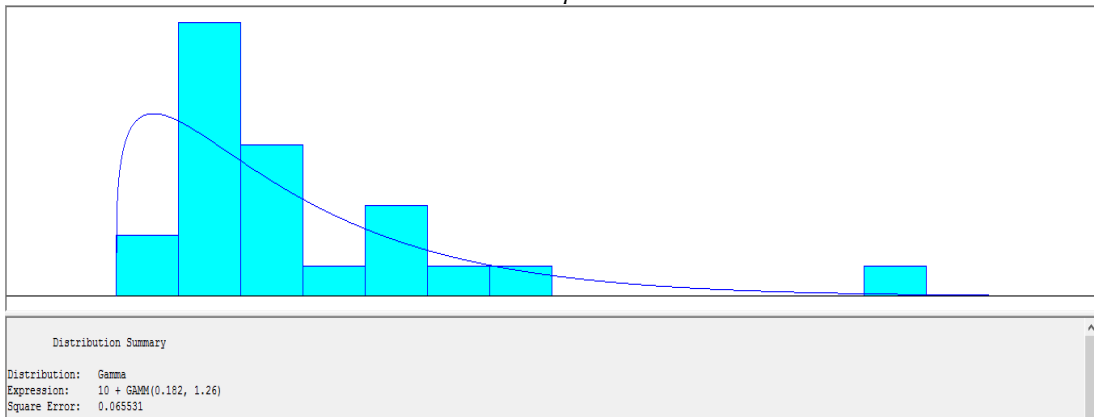
Ilustración 74: Distribución tiempo de estacionamiento Estación Peñablanca.



Fuente: Elaboración propia.

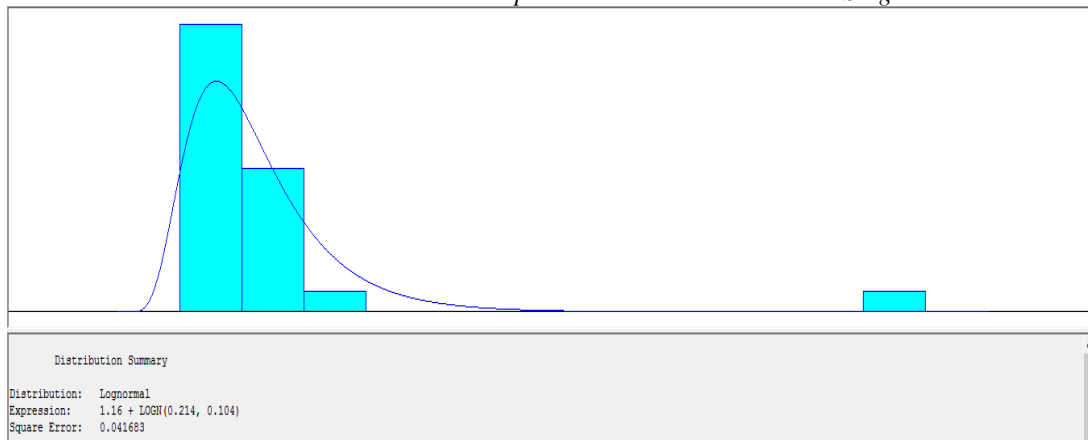
Desde la ilustración 75 a la 93 se encuentran las gráficas de las distribuciones de probabilidad de los tiempos de viaje entre estaciones, entregados por la herramienta Input Analyzer de Arena, los que posteriormente son ingresados en el módulo Route.

Ilustración 75: Distribución del tiempo en ruta desde Limache a Peñablanca.



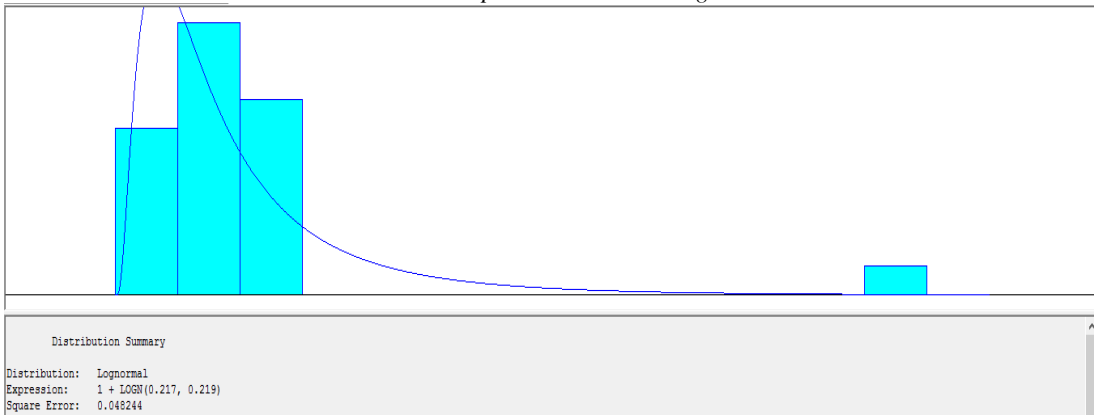
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 76: Distribución del tiempo en ruta desde Peñablanca a Sargento Aldea



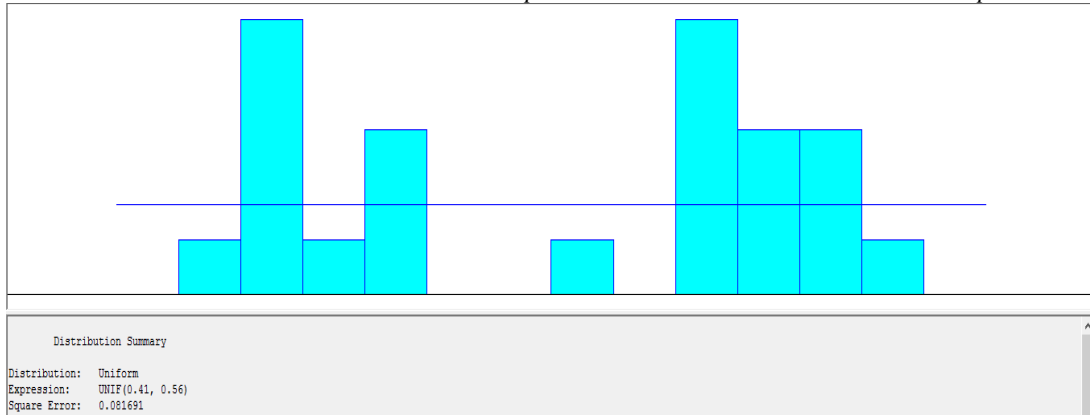
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 77: Distribución del tiempo en ruta desde Sargento Aldea a Villa Alemana.



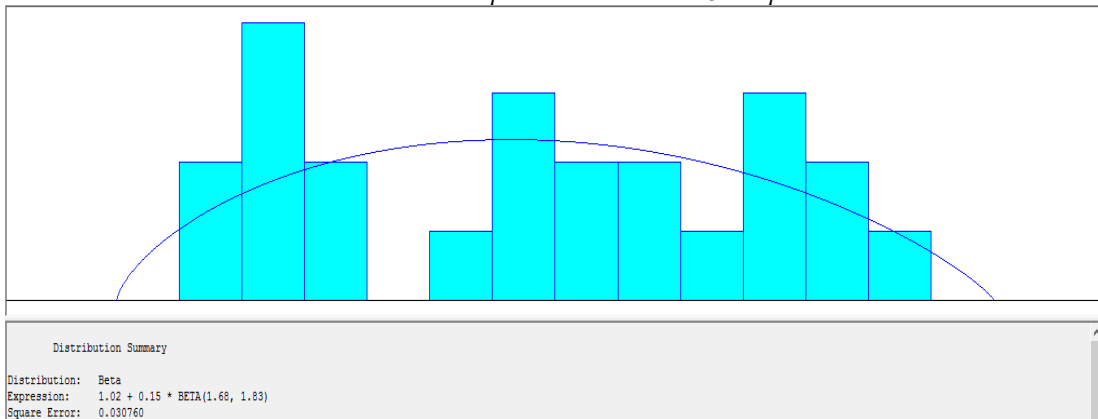
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 78: Distribución del tiempo en ruta desde Villa Alemana a La Concepción.



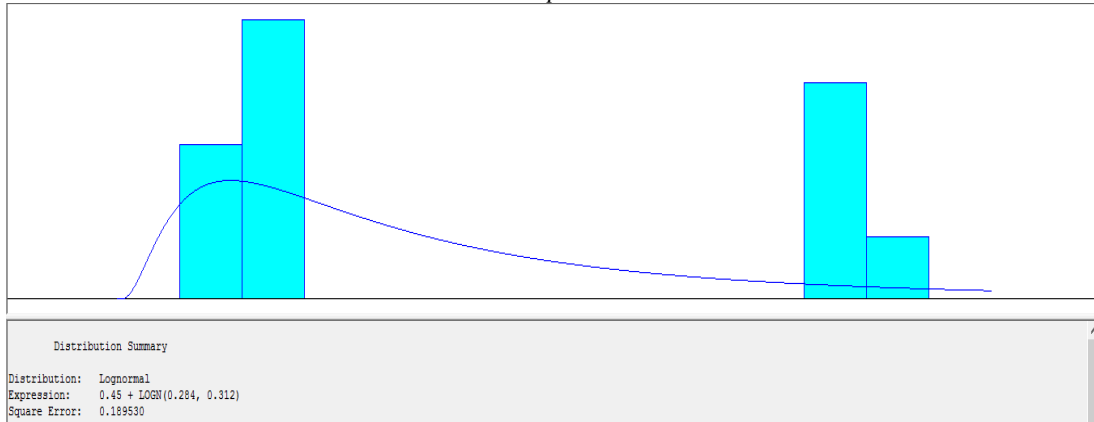
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 79: Distribución del tiempo en ruta desde La Concepción a Las Américas.



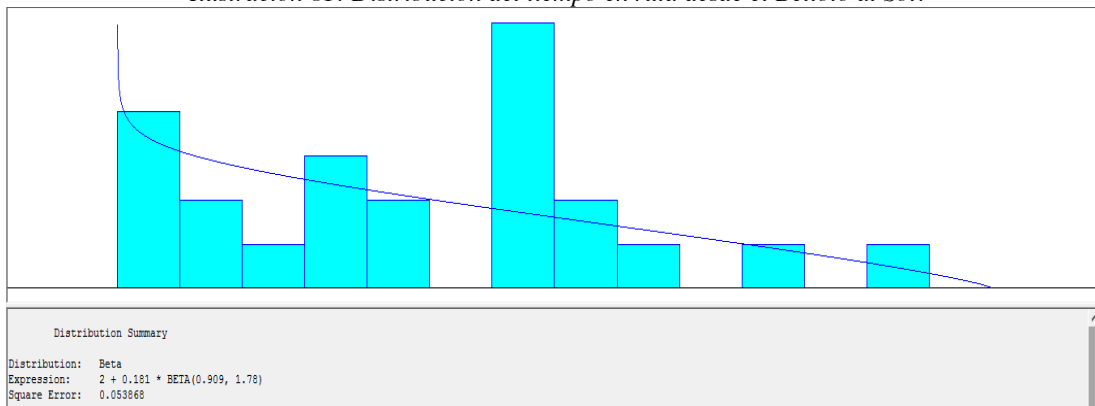
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 80: Distribución del tiempo en ruta desde Las Américas al Belloto.



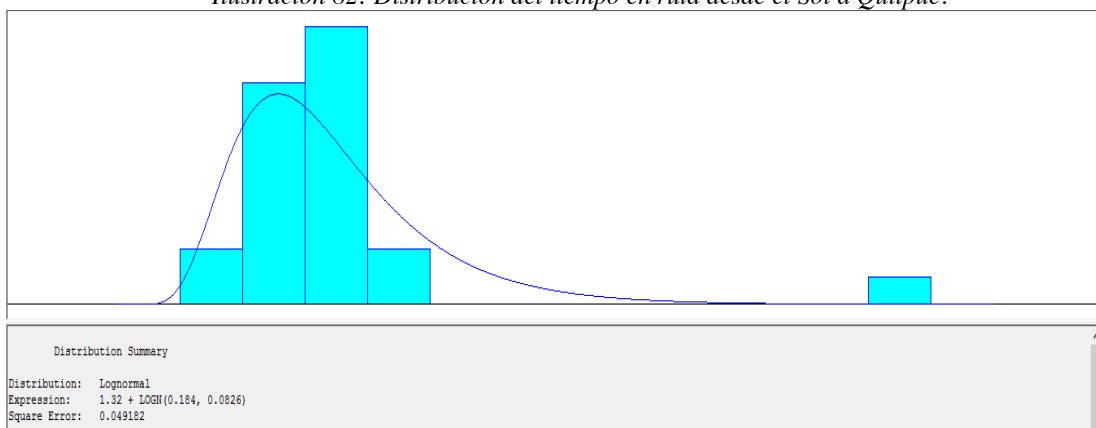
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 81: Distribución del tiempo en ruta desde el Belloto al Sol.



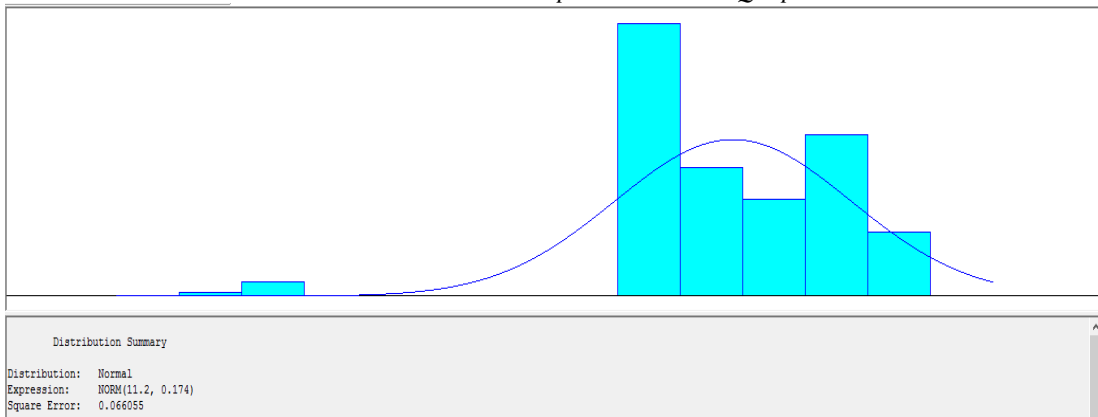
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 82: Distribución del tiempo en ruta desde el Sol a Quilpué.



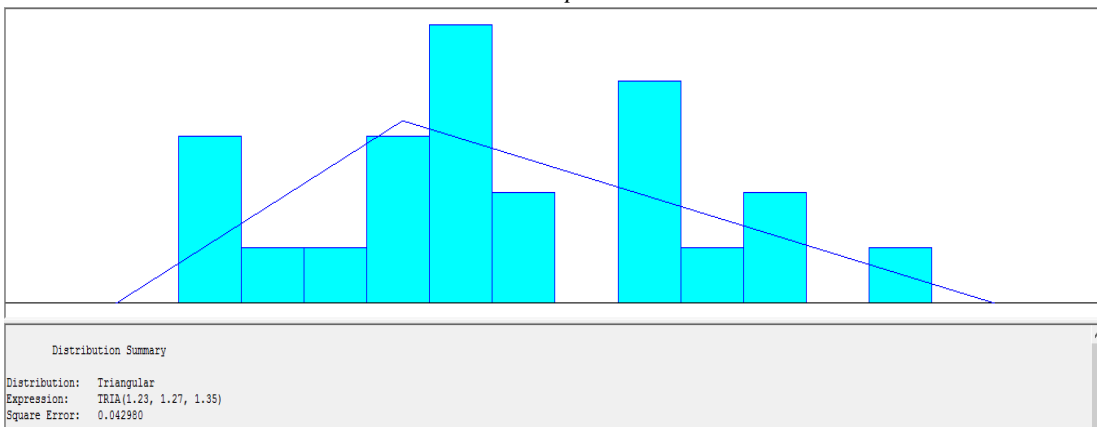
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 83: Distribución del tiempo en ruta desde Quilpué a El Salto.



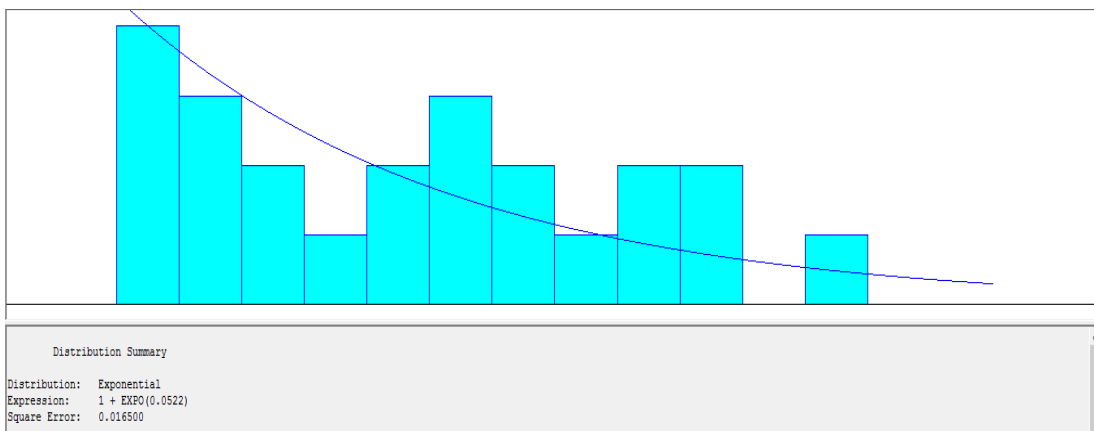
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 84: Distribución de tiempo en ruta desde el Salto a Chorrillos.



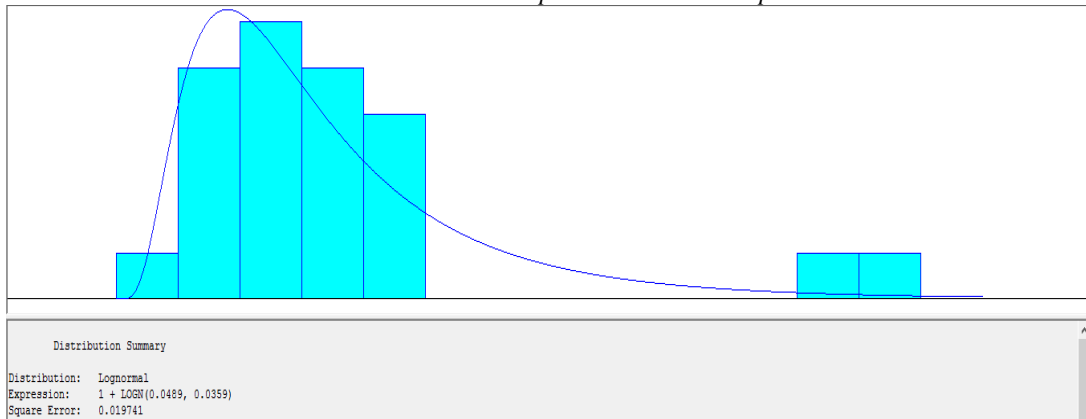
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 85: Distribución de tiempo en ruta desde Chorrillos a Hospital.



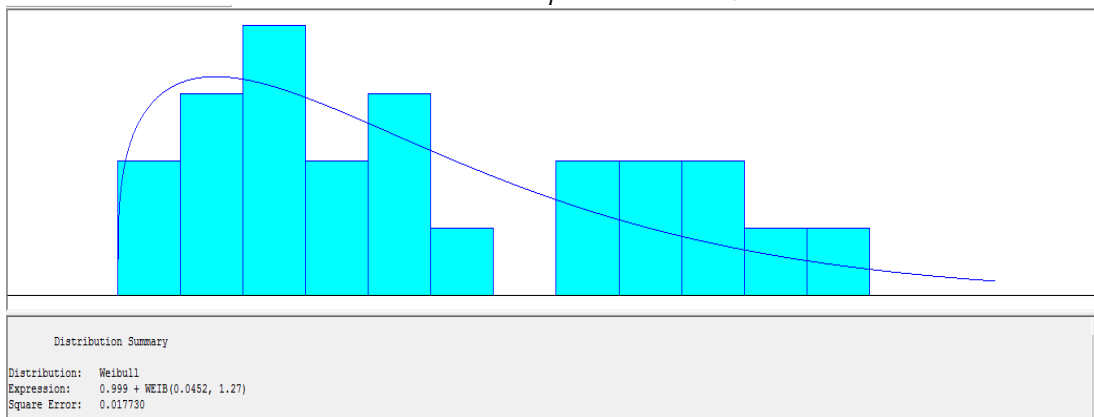
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 86: Distribución de tiempo en ruta desde Hospital a Viña del Mar.



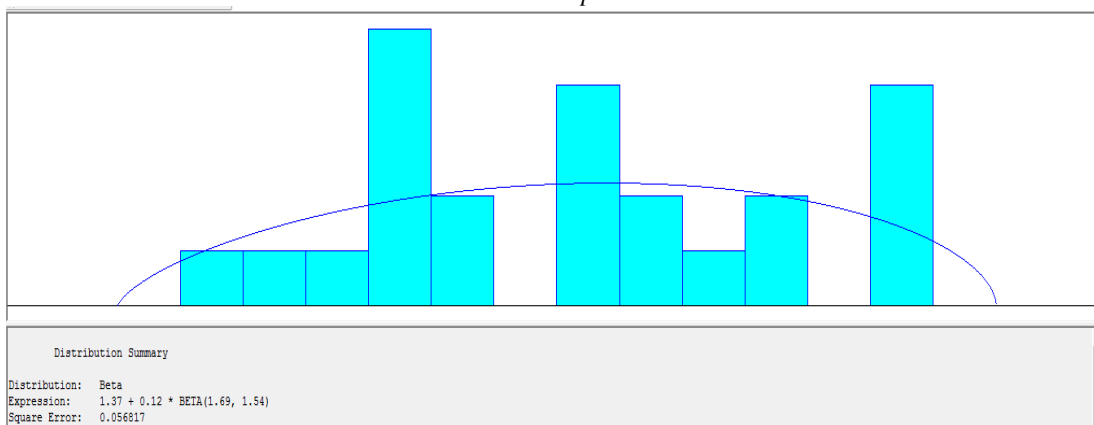
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 87: Distribución del tiempo en ruta desde Viña del Mar a Miramar.



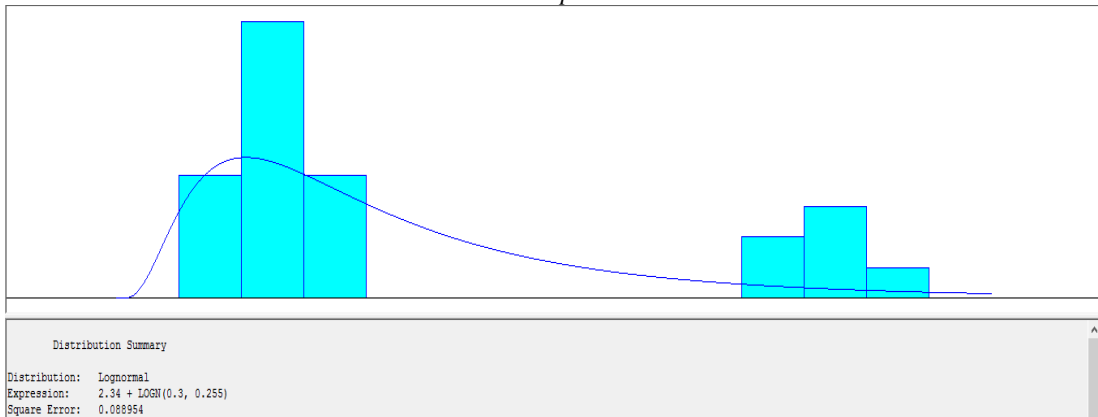
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 88: Distribución del tiempo en ruta desde Miramar a Recreo.



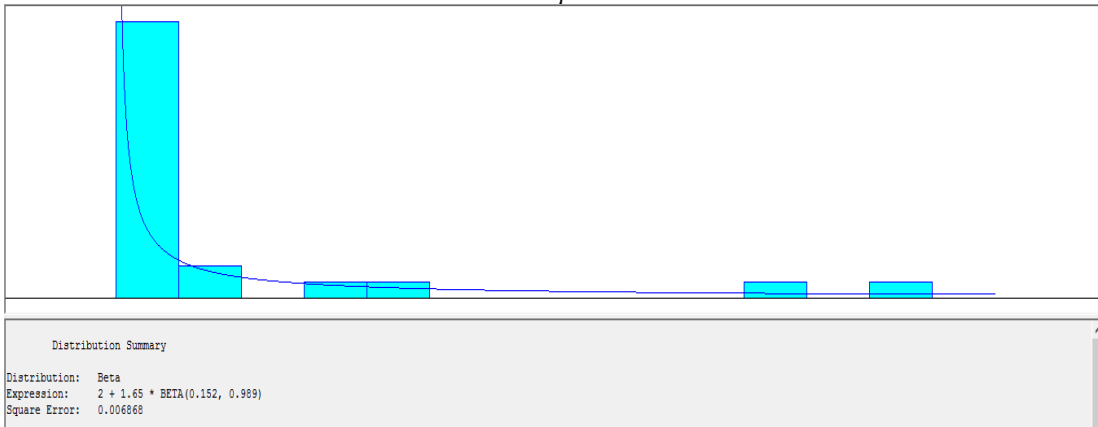
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 89: Distribución del tiempo en ruta desde Recreo a Portales.



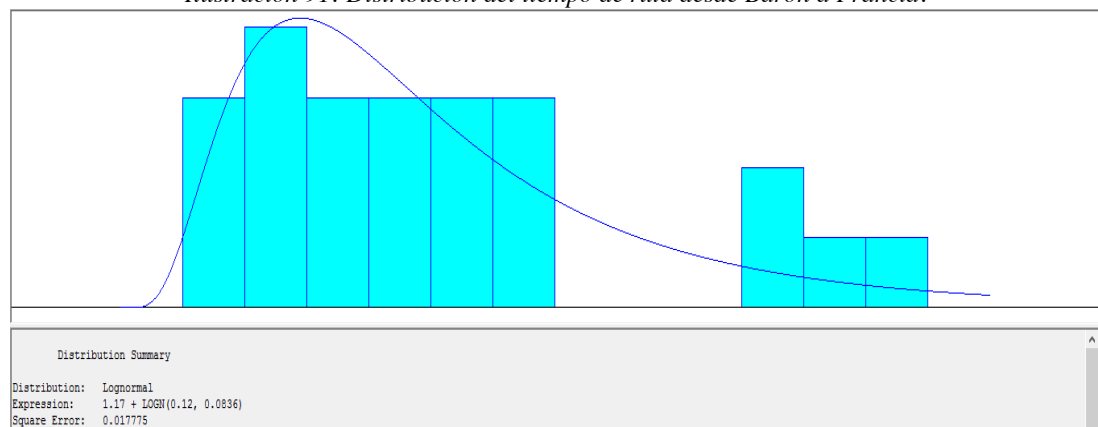
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 90: Distribución del tiempos de ruta desde Portales a Barón.



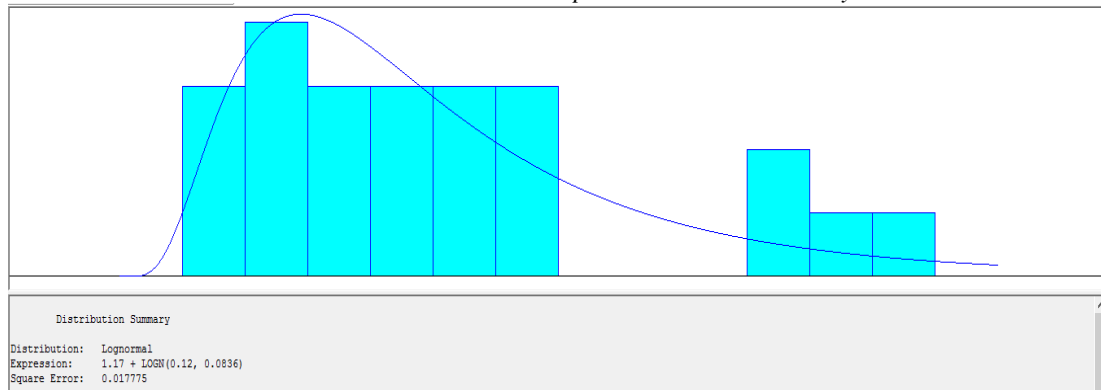
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 91: Distribución del tiempo de ruta desde Barón a Francia.



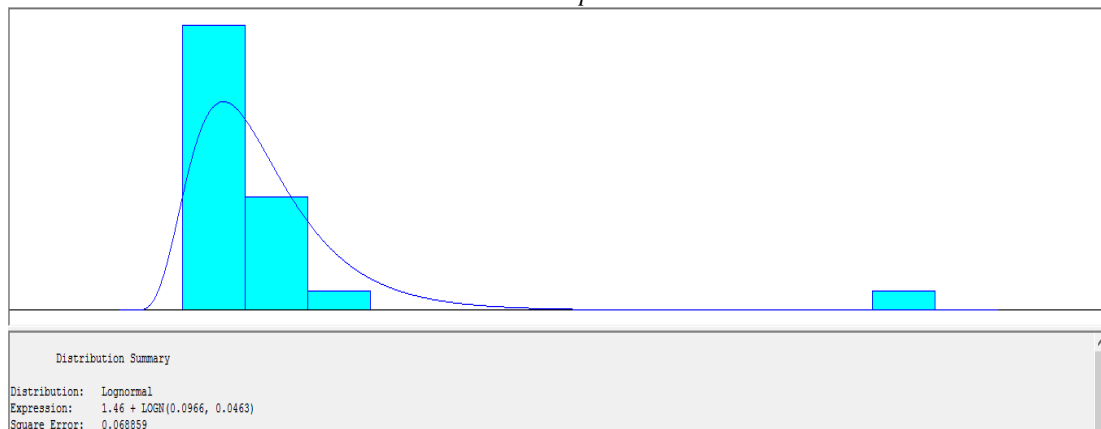
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 92: Distribución del tiempo de ruta desde Francia y Bellavista.



Fuente: Elaboración Propia.

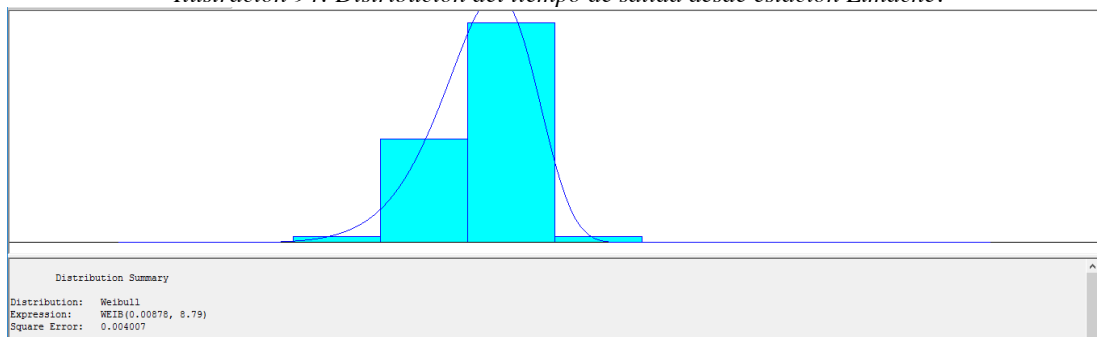
Ilustración 93: Distribución del tiempo de ruta desde Bellavista a Puerto.



Fuente: Elaboración propia.

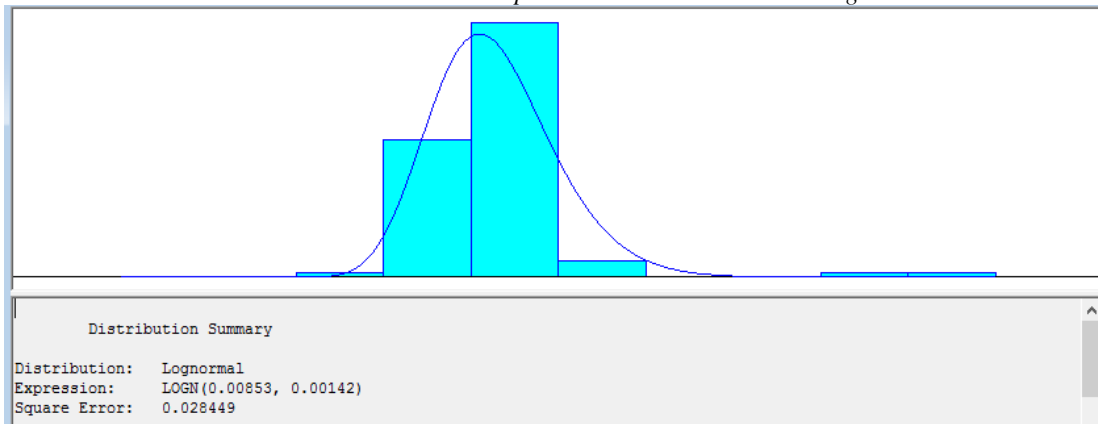
La ilustración 94 y 95 se encuentran las gráficas de las distribuciones de probabilidad de los tiempos de salida, entregados por la herramienta Input Analyzer de Arena, los que posteriormente son ingresados en el módulo Create.

Ilustración 94: Distribución del tiempo de salida desde estación Limache.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 95: Distribución del tiempo de salida desde Estación Sargento Aldea.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 4

Ilustración 96: Extracto memoria anual 2010 (MV, Memoria anual, 2010)

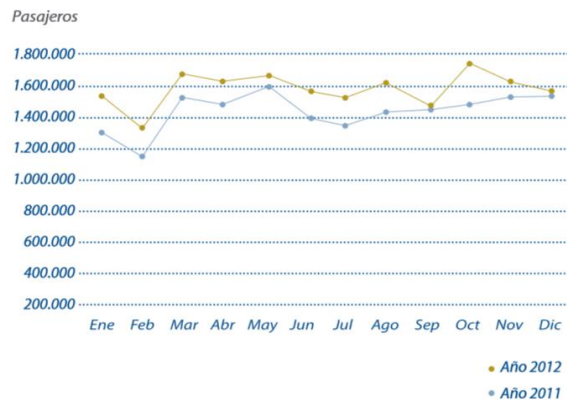
Pasajeros Transportados		
Mes	Año 2009	Año 2010
Enero	1.123.831	1.093.549
Febrero	967.170	949.374
Marzo	1.209.242	448.039
Abril	1.211.625	1.193.785
Mayo	1.167.256	1.220.094
Junio	1.096.211	1.230.347
Julio	1.119.311	1.193.721
Agosto	1.177.533	1.307.887
Septiembre	1.137.687	1.317.637
Octubre	1.191.052	1.363.954
Noviembre	1.164.150	1.360.637
Diciembre	1.146.122	1.354.629
TOTAL	13.711.190	14.033.653



Fuente: Metro Valparaíso.

Ilustración 97: Extracto memoria anual 2012 (MV, Memoria anual, 2012)

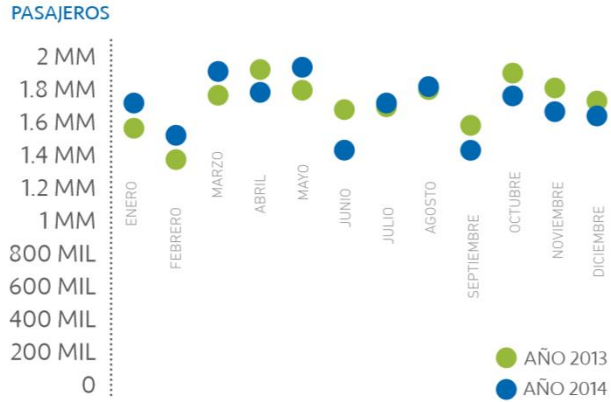
Pasajeros Transportados		
Mes	Año 2011	Año 2012
Enero	1.306.035	1.515.747
Febrero	1.141.253	1.320.107
Marzo	1.533.695	1.670.361
Abril	1.495.286	1.617.754
Mayo	1.590.870	1.667.571
Junio	1.397.380	1.563.839
Julio	1.334.085	1.502.899
Agosto	1.426.897	1.629.914
Septiembre	1.447.228	1.485.026
Octubre	1.481.505	1.726.559
Noviembre	1.526.864	1.632.221
Diciembre	1.539.161	1.572.738
TOTAL	17.220.259	18.904.736



Fuente: Metro Valparaíso.

Ilustración 98: Extracto memoria anual 2014 MV (MV, Memoria anual , 2014)

PASAJEROS TRANSPORTADOS		
Mes	Año 2013	Año 2014
Enero	1.540.833	1.659.317
Febrero	1.341.685	1.426.011
Marzo	1.706.278	1.867.991
Abril	1.887.655	1.825.039
Mayo	1.738.866	1.825.917
Junio	1.662.755	1.419.274
Julio	1.678.139	1.678.800
Agosto	1.755.150	1.754.122
Septiembre	1.611.764	1.706.384
Octubre	1.865.456	1.907.306
Noviembre	1.729.883	1.778.827
Diciembre	1.693.385	1.717.673
TOTAL	20.211.849	20.566.661



Fuente: Metro Valparaíso.

Ilustración 99: Extracto memoria anual 2016 MV (MV, Memoria anual, 2016)

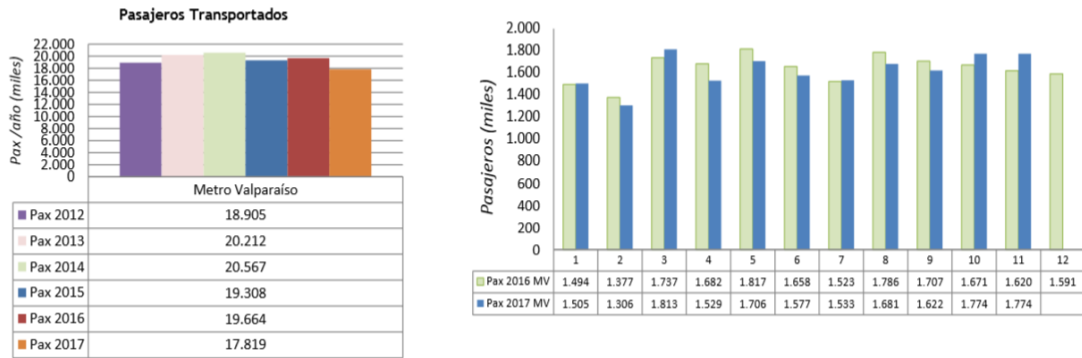
PASAJEROS TRANSPORTADOS		
Mes	Año 2015	Año 2016
Enero	1.623.752	1.494.420
Febrero	1.419.442	1.377.129
Marzo	1.907.320	1.737.172
Abril	1.884.523	1.682.025
Mayo	1.765.493	1.817.110
Junio	1.757.781	1.658.238
Julio	1.578.515	1.522.635
Agosto	1.202.962	1.786.040
Septiembre	1.461.665	1.706.948
Octubre	1.596.752	1.671.473
Noviembre	1.573.605	1.619.697
Diciembre	1.535.848	1.590.793
TOTAL	19.307.658	19.663.680



Fuente: Metro Valparaíso.

Ilustración 100: Extracto informes de Gestión 2017 (MV, Informe de gestión , 2017).

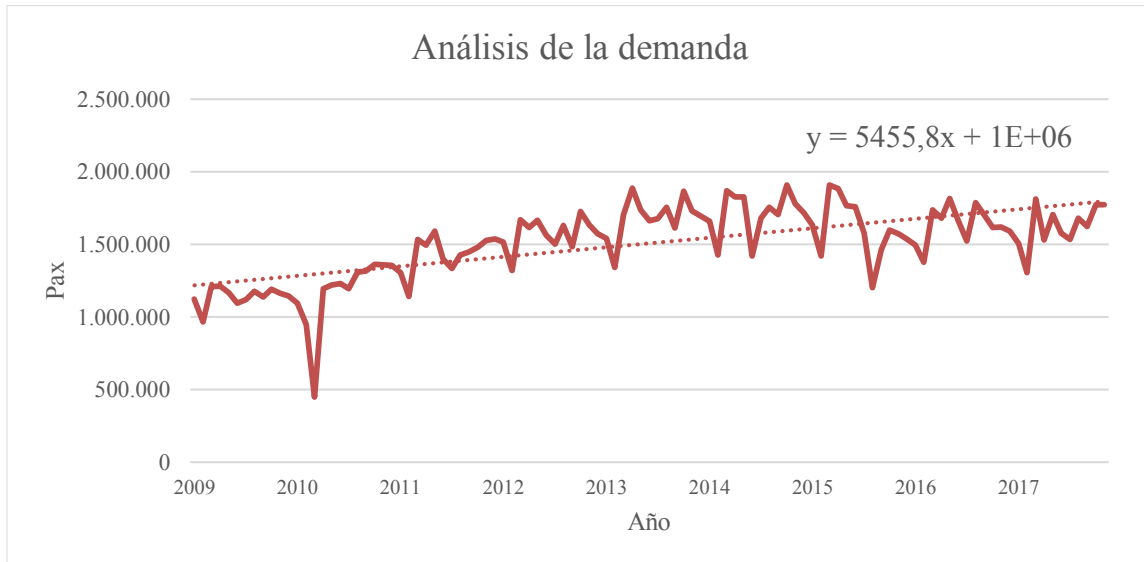
Indicadores Operacionales a Noviembre 2017



Fuente: Metro Valparaíso.

Los antecedentes recopilados de las memorias anuales e informes de gestión de Metro Valparaíso permiten mediante el método de “mínimos cuadrados” estimar la demanda hasta el año 2026. La ilustración 101 es el gráfico con la ecuación de la recta que permite realizar un análisis de la demanda.

Ilustración 101: Análisis de la demanda.



Fuente: Elaboración propia.