

Simulation of Express Service in a Public, Urban and Massive Transportation System of BRT Type (Bus Rapid Transit) in Lima, Peru

Karen Chuquihamani Altamirano, Licenciada en Ingeniería Industrial, Eduardo Carbajal López, Magister en Estadística

Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, k.chuquihamani@pucp.edu.pe,
Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, ecarbajal@pucp.pe

Abstract— The present research work develops the application of discrete event simulation in a public, urban and massive transportation system of BRT type (Bus Rapid Transit) in Metropolitan Lima, Perú. The objective of the improvement proposal is reduce waiting times at the stations and improve the quality of service, through the implementation of more buses along the trunk route. It should be noted that the long queues at the main and transfer stations in "Corredor 1" are one of the main problems affecting the service, specifically in the morning rush hours. The methodology to be followed was to carry out a diagnosis of the current situation of the process, to then identify the tool to use, in this case the simulation of discrete events, which later led to the construction of an optimization model based on simulation to reduce the times and queue lengths at rush hour. Finally, the results obtained revealed that queues and system times were reduced by 74% and 33% respectively, as well as through the use of ratios such as NPV and IRR, it was determined that the proposal was viable.

Keywords—Discrete event simulation, logistics, transportation, optimization based on simulation

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.62>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Simulación del Servicio Expreso de un Sistema Público, Urbano y Masivo de Tipo BRT (Bus Rapid Transit) en la Ciudad de Lima, Perú

Karen Chuquihamani Altamirano, Licenciada en Ingeniería Industrial, Eduardo Carbajal López, Magister en Estadística

Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, k.chuquihamani@pucp.edu.pe,
Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, ecarbajal@pucp.pe

Abstract— *The present research work develops the application of discrete event simulation in a public, urban and massive transportation system of BRT type (Bus Rapid Transit) in Metropolitan Lima, Perú. The objective of the improvement proposal is reduce waiting times at the stations and improve the quality of service, through the implementation of more buses along the trunk route. It should be noted that the long queues at the main and transfer stations in "Corredor 1" are one of the main problems affecting the service, specifically in the morning rush hours. The methodology to be followed was to carry out a diagnosis of the current situation of the process, to then identify the tool to use, in this case the simulation of discrete events, which later led to the construction of an optimization model based on simulation to reduce the times and queue lengths at rush hour. Finally, the results obtained revealed that queues and system times were reduced by 74% and 33% respectively, as well as through the use of ratios such as NPV and IRR, it was determined that the proposal was viable.*

Keywords— *Discrete event simulation, logistics, transportation, optimization based on Simulation.*

Resumen— *El presente trabajo de investigación desarrolla la aplicación de simulación de eventos discretos en un sistema de transporte público, urbano y masivo del tipo Bus Rapid Transit (BRT) en la ciudad de Lima Metropolitana. El objetivo de la propuesta de mejora es disminuir los tiempos de espera en las estaciones y mejorar la calidad de servicio, a través de la implementación de más buses a lo largo de la ruta troncal. Cabe señalar que las esperas en las estaciones principales y de transbordo en el "Corredor 1" son uno de los principales problemas que afectan al servicio, específicamente en horas punta de la mañana. La metodología a seguir fue realizar un diagnóstico de la situación actual del proceso, para luego identificar la herramienta a usar, en este caso simulación de eventos discretos, que posteriormente condujeron en la construcción de un modelo de optimización basado en simulación para reducir los tiempos y longitudes de cola en las horas pico. Finalmente, los resultados obtenidos revelaron que los tiempos de cola y de sistema fueron reducidos en 74% y 33% respectivamente, así como a través del uso de ratios como VAN y TIR, se determinó que la propuesta era viable.*

Palabras claves— *Simulación de eventos discretos, logística, transporte, simulación basada en optimización.*

I. INTRODUCCIÓN

El sistema de transporte en Lima, es uno de los tópicos de mayor interés en la agenda de diversas instituciones

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

gubernamentales y no gubernamentales, por ello a lo largo de los años se han venido diseñando planes y ejecutando proyectos que mejoren la situación actual del transporte limeño. De acuerdo a un informe del Congreso del año 2014, dentro de las principales causas que generan los problemas del transporte limeño están la poca educación de la mayoría de choferes de las unidades de transporte público y la carencia de una infraestructura de transporte adecuada (a cargo de la Municipalidad de Lima) [1]. Según cifras del INEI, al año 2017 vivían en Lima Metropolitana alrededor de 8 millones 571 mil personas [2], de las cuales el 73 % usaba frecuentemente el transporte masivo público y urbano y un 16 % el transporte privado [3].

De acuerdo a la Gerencia de Transporte Urbano de Lima, en el año 2008, de las personas que usaron el transporte público, el 44 % empleó combis para trasladarse a su lugar de trabajo y/o hogar, seguido de un 42% que usó microbuses. Ante esto, surgió la necesidad de transformar el transporte de la capital, implementando medidas como la Línea 1 del Metro de Lima y el Metropolitano, en adelante conocido como "Corredor 1", que han estado intentando arreglar el problema del transporte en Lima. No obstante, estos dos servicios todavía son insuficientes para enfrentar el caos y desorden del transporte limeño. Así, el Corredor 1 transporta aproximadamente 590 mil pasajeros al día, entre la ruta troncal y el servicio alimentador [4]; sin embargo, este servicio tras más de cinco años de funcionamiento, sigue en cifras rojas, pues comúnmente los pasajeros reportan largas colas, caos y desorden en las estaciones, antes, durante y después de abordar un bus regular, y de forma más crítica al momento de abordar un servicio expreso en horas pico de la mañana.

A partir de este escenario, el presente trabajo de investigación realiza un diagnóstico de la situación actual de los servicios expresos más críticos del Corredor 1 y plantea una propuesta de mejora, a través de la aplicación de la herramienta de simulación de eventos discretos para reducir los tiempos de espera en las estaciones y terminales que recorren más de 5 distritos de Lima. Finalmente, también se muestra la factibilidad de la propuesta a través de un estudio técnico – económico y un análisis de sensibilidad.

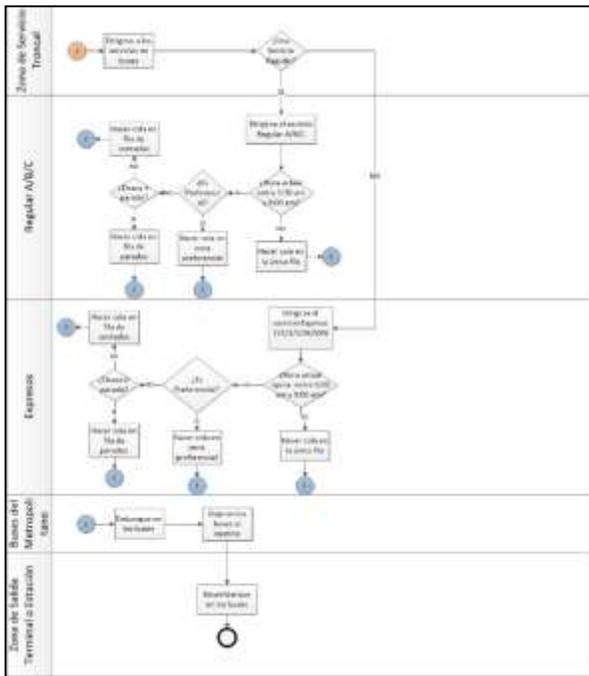


Fig. 3 Flujograma del servicio troncal parte 2

A partir del flujograma se mapearon indicadores empleando una matriz de intenciones e indicadores, para luego documentarlo con valores históricos y analizar el comportamiento indicador por indicador para identificar desviaciones considerables del valor meta que reflejen la existencia de problemas cuantificables. Como ejemplo en el Figura 4 se puede ver a ficha de indicador para el indicador: Afluencia de personas al servicio troncal.



Fig. 4 Ficha de indicador de Afluencia de personas al servicio troncal

Una vez analizados todos los problemas se procedió a sintetizarlos en una lista y priorizarlos para identificar los problemas críticos. La lista de problemas ordenados por criticidad se puede ver en la Tabla 2 y el correspondiente diagrama de Pareto en la Figura 5.

TABLA 2
CRITERIOS DE SELECCION DE PROCESO CLAVE

Nº	Indicador	Problema Identificado	frecuenciaXImpacto (S/.)	Frecuencia Acum.
6	Tiempo de espera para abordar el servicio expreso	Largas colas para abordar los buses expresos en las estaciones, en horas del turno mañana.	22,440,515	42.1%
1	Afluencia de personas al servicio troncal	El servicio solo ha llegado al 60% de las proyecciones de demanda esperada.	12,818,245	66.1%
5	Tiempo de espera para abordar el servicio regular	Largas colas para abordar uno de los buses del servicio regular en horas del turno mañana.	12,083,354	88.7%
7	Tiempo de viaje en el servicio regular	Viajes menos rápidos y seguros en el servicio regular a horas punta de la mañana.	3,888,208	96.0%
8	Tiempo de viaje en el servicio expreso	Viajes menos rápidos y cómodos en el servicio expreso a horas punta de la mañana.	2,060,750	99.9%
3	Afluencia de personas a las taquillas	Largas colas en las taquillas en horas críticas de la mañana.	22,000	99.9%
2	Afluencia de personas a los lectores electrónicos	Largas colas en las lectoras electrónicas en horas críticas de la mañana.	19,800	100.0%
4	Afluencia de personas a los módulos de autoservicio	Largas colas en los módulos de autoservicio en horas críticas de la mañana.	18,000	100.0%

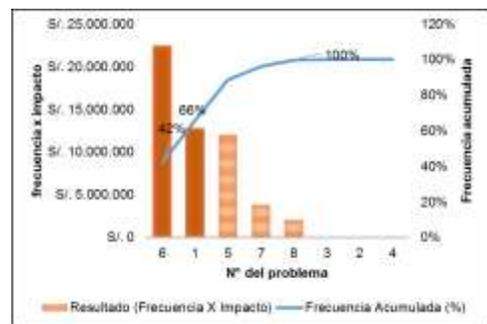


Fig. 5 Pareto de problemas identificados

Determinados los problemas principales que corresponden a: (Nº6) largas colas para abordar los buses expresos en las estaciones, en horas del turno mañana y (Nº1) El servicio se encuentra por debajo del 60% de las proyecciones de demanda esperada, el paso siguiente fue desarrollar un estudio para determinar las causas y posteriormente las causas raíces de estos problemas empleando un diagrama de Ishikawa. Se muestra uno de los empleados en la Figura 6, y luego un análisis 5W para las causas principales similarmente con un ejemplo en la Figura 7.

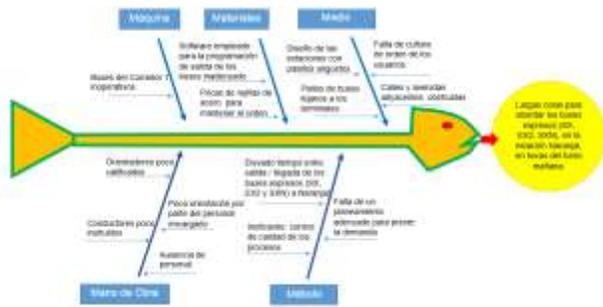


Fig. 6 Diagrama de ishikawa



Fig. 7 Análisis 5W

En función de la identificación del conjunto de causa-raíz se plantean alternativas y utilizando una matriz FACTIS, que evalúa y prioriza una lista de opciones a través de criterios de evaluación [10], se justificará la selección del uso del modelo de simulación como la alternativa más viable para la resolución del problema de colas identificado. Dentro de las formas de modelamiento empleadas para la toma de decisiones, se ha decidido usar la simulación de eventos discretos (DES), por encima de otros paradigmas como la dinámica de sistemas (SD) o la simulación basada en agentes (ABS), dado que para este escenario en particular se pone más énfasis en un tipo de problema operativo, más que estratégico debido a largas filas y tiempos de espera elevados, y en el que se requiere una perspectiva orientada en el proceso, con una metodología de arriba abajo (*top-down*), siendo el modelador el que explique todas las reglas del sistema con anticipación, en comparación, por ejemplo con ABS que es un método más dinámico, adaptativo y autónomo cuyo entorno puede cambiar. (Marshall, D. A., Burgos-Liz, L., y Ijzerman, M. J. 2015) [11].

III. MODELO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

A continuación, se resumen las principales etapas desarrolladas para la construcción del modelo del "Corredor 1". Cabe resaltar que el mismo se construyó empleando Rockwell Arena, software que usa el lenguaje de programación SIMAN y que combina la facilidad de uso que se encuentra en los simuladores de alto nivel con la flexibilidad de los lenguajes de

simulación, incluso con lenguajes como Visual Basic o C. (Kelton, Sadowski y Zupick, 2015) [12].

A. Datos de entrada

A partir de la información obtenida del proceso, se estimaron los datos de entrada necesarios. Parte de los datos de entrada corresponde a variables aleatorias, un resumen general de estas se muestra en la Tabla 3.

TABLA 3
DATOS DE ENTRADA NECESARIOS

Nº	Descripción de los datos	ID
1	Tiempo entre llegadas de los pasajeros a la cola de personas sentadas de un expreso en la estación Naranjal	D_1
2	Tiempo entre llegadas de los pasajeros a la cola de personas paradas de un expreso en la estación Naranjal	D_2
3	Tiempo de ascenso de los pasajeros de la cola de personas sentadas a un bus expreso en la estación Naranjal	D_3
4	Tiempo de ascenso de los pasajeros de la cola de personas paradas a un bus expreso en la estación Naranjal	D_4
5	Tiempo entre llegadas de los pasajeros a la cola de un expreso en una estación de transbordo	D_5
6	Tiempo de ascenso y descenso de los pasajeros de un bus expreso en la estación de transbordo	D_6
7	Nº de pasajeros que ascienden y descienden de un expreso en una estación de transbordo	D_7
8	Tiempo de descenso de los pasajeros de un bus expreso en la estación de destino.	D_8
9	Tiempo de traslado de un expreso hacia el semáforo en la Av. Chinchaysuyo	D_9
10	Tiempo de traslado del expreso desde semáforo en la Av. Chinchaysuyo al semáforo de la Av. Los Alisos	D_10
11	Tiempo de traslado de un bus expreso de un embarque a otro en la estación Naranjal	D_11
12	Tiempo entre llegada de los buses	D_12
13	Tiempo de viaje entre estaciones	D_13
14	Tiempo de la luz verde/ámbar/roja de un semáforo	D_14
15	Proporción de pasajeros que abordarán un expreso en una estación de embarque	D_15

Para cada variable aleatoria se debe determinar un tamaño de muestra adecuado, para lo cual se empleó el muestreo aleatorio simple para la estimación de la media. El valor del coeficiente de variación (C.V.) permite asegurar que el dato de entrada realmente sea una variable aleatoria. La Figura 8 muestra el ejemplo para la segunda variable

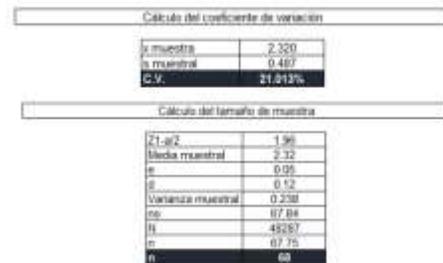


Fig. 8 Estudio muestral para D_2

Como paso final, una vez obtenida la muestra se procede a emplear el Arena Input Analyzer para determinar la mejor distribución de probabilidad que se ajuste a los datos empleando las pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov y Chi

cuadrado. En la figura 9 se muestra el ajuste de los datos a la curva de una distribución conocida.

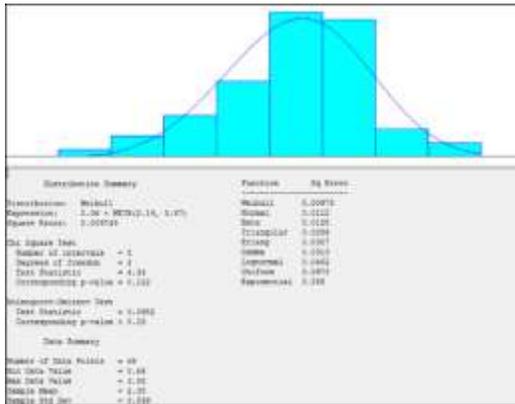


Fig. 9 Fit All Summary, Fit All y Data Summary of D_2

El procedimiento descrito se aplica a todas las variables aleatorias de entrada.

Para el caso de las proporciones el procedimiento es similar salvo que una vez obtenida la muestra final, la proporción solo se estima por promedio simple. Las proporciones son fácilmente identificables pues corresponden con procesos de decisión dentro del flujograma o clasificación por tipo y tienen un valor entre 0 a 1.

Finalmente, el último conjunto de datos de entrada son los datos determinísticos que corresponden con datos de baja variabilidad que son prácticamente estáticos dentro del intervalo de simulación del modelo, como por ejemplo la distancia entre estaciones, número de buses, entre otros.

B. Desarrollo del modelo

En primera fase se identifican los elementos que componen el modelo, que corresponden a los recursos, en la Tabla 4; las entidades, en la Tabla 5 y los atributos en la Tabla 6 a continuación.

TABLA 4 RECURSOS DEL MODELO

Recursos	Cantidad	Nombre en el modelo
Embarque en la estación Naranjal para el ingreso de las personas que irán sentadas.	1	embarque_TipoDeExpreso_1_nar
Embarque en la estación Naranjal para el ingreso de las personas que irán paradas.	1	embarque_TipoDeExpreso_2_nar
Embarque en la estación de transbordo	1	embarque_EstacionTransbordo_TipoDeExpreso
Embarque en la estación de destino final	1	embarque_EstacionFinal_TipoDeExpreso

TABLA 5 ENTIDADES DEL MODELO

Entidades	Descripción
Usuarios en la estación Naranjal que desean ir parados dentro del bus expreso	Son los pasajeros que llegan a la estación Naranjal, y hacen cola en la fila destinada para aquellos que van a ir parados dentro del bus. Esta cola es la preferida porque avanza más rápido que otra cola destinada a las personas que irán sentadas en el bus.

Usuarios en la estación Naranjal que desean ir sentados dentro del bus expreso.	Son los pasajeros que llegan a la estación Naranjal, y hacen cola en la fila destinada a las personas que irán sentadas en el bus expreso.
Buses expresos del Corredor 1	Son los buses del Corredor que hacen las rutas EX2, SXN y SX en sentido norte - sur.
Buses expresos con los usuarios sentados en la estación Naranjal	Es el bus en cuyo interior se encuentran sentados los pasajeros y están listos para dirigirse a la zona de las personas que hacen su cola para ir paradas en el bus.
Buses con los pasajeros sentados y parados en su interior que salen de la estación Naranjal	Son los buses que están listos para partir de la estación Naranjal.
Usuarios de los expresos en las estaciones de transbordo	Son los pasajeros que llegan a la estación de transbordo para abordar un bus expreso.
Buses expresos con usuarios de la estación de transbordo	Son los buses expresos que contienen los pasajeros que subieron y bajaron en la estación de transbordo.
Buses expresos vacíos	Son los buses que terminan en la estación final después de que todos los pasajeros hayan bajado.

TABLA 6 ATRIBUTOS DEL MODELO

Atributo	Nombre	Descripción
Tipo de usuario en la estación Naranjal	usuarios_sentados_TipoDeExpreso_Est_Naranjal	Este atributo se utiliza para identificar a las entidades que arriban a la cola de pasajeros que irán parados dentro de un bus expreso en la estación Naranjal.
	usuarios_parados_TipoDeExpreso_Est_Naranjal	Este atributo se utiliza para identificar a las entidades que arriban a la cola de pasajeros que irán sentados dentro de un bus expreso en la estación Naranjal.
Tipo de expreso	tipo_expreso_TipoDeExpreso	Este atributo se utiliza para identificar qué tipo de expreso son los buses del Corredor 1: EX2, SXN o SX
Tipo de usuario en la estación de transbordo	usuarios_TipoDeExpreso_EstacionTransbordo	Este atributo se utiliza para identificar a las entidades que arriban a la cola de un expreso en la estación de transbordo.
Valor de utilización inicial	utilizacion_bus_inicial_EstacionTransbordo	Se utiliza para identificar la cantidad de personas que quedan en un bus expreso una vez que bajen los usuarios cuyo destino es la estación de transbordo.
Valor de utilización final	utilizacion_bus_final_EstacionTransbordo	Se usa para identificar la cantidad de personas en el bus una vez que ingresan usuarios en la estación de transbordo.

Finalmente se detallaron los principales supuestos que constituyen aspectos que se diferenciaron entre la realidad y el modelo. Algunos de los más importantes son los siguientes:

- Se asume que solo hay una cola para las personas que desean ir sentadas y otra cola para las que desean ir paradas dentro del bus expreso del Corredor 1.
- Se considera que solo hay una puerta de embarque para cada servicio en la estación Naranjal - en lugar de 4 puertas de embarque - por lo que solo se forma una fila para abordar un expreso.
- La capacidad de asientos en los buses, es de 40 asientos; de los cuales 6 son reservados y están destinados a personas mayores de edad, discapacitados, embarazadas y/o con niños. Dado que estos usuarios hacen una cola aparte de las dos mencionadas, para el modelo no se considerará esta cola preferencial y se asume que estas personas están incluidas dentro de la "fila de personas que irán sentadas en el bus".
- Se establece que todas las personas que ingresan a las filas respectivas en una estación para abordar un bus expreso logran tomar el bus. No se considera el caso de personas que abandonan las colas, ni que se quedan esperando en la cola para abordar un bus menos lleno. Asimismo, no se considera el caso de personas que se filtran en las colas y logran ingresar por delante de otros.

- La cantidad de asientos en los buses es de 40 y se asume que éstos son ocupados en un 100% por los usuarios que esperan ingresar al bus haciendo su cola en la fila de sentados en la estación Naranjal.
- Desde la estación de partida, es decir la estación Naranjal, el porcentaje de ocupación o utilización del bus, incluyendo a las personas que van paradas dentro del bus, es de 100%.
- El tiempo que demoran los usuarios en acomodarse y el tiempo que toma cerrar automáticamente las puertas del bus del Corredor 1 están contempladas en los tiempos de ascenso del bus expreso.
- Dado que en ciertas estaciones, las zonas de embarques se encuentran compartidas por expresos o servicios regulares, si un embarque está compartido solo con un servicio regular, se ha asumido que todas las entidades que arriben a la cola corresponderán al servicio expreso, por ser mayoritaria la preferencia de los expresos en comparación de los servicios regulares en horas punta. Si un embarque no está compartido con un servicio regular, sino con un servicio expreso (como es el caso del EX2 y SX para las estaciones Canaval y Moreyra y Angamos), se ha asumido que los tiempos de llegada a las colas, corresponderán a ambos expresos, pero la preferencia por ingresar a los buses será distinta, pues son proporciones.
- Las entidades, entiéndase usuarios y buses, llegan a las colas en las respectivas estaciones, siendo la lista de procesamiento de dicha cola FIFO.
- En las estaciones de transbordo que se encuentran antes de las de estación Central se asume que la cantidad de entidades que ingresan al bus y salen es la misma.
- El horario de atención de los buses será de lunes a viernes, iniciando la salida de buses expresos en la estación Naranjal a la hora de inicio programada y terminando cuando la última entidad sale del sistema para cada expreso.
- Se están considerando los semáforos de la estación Naranjal y las estaciones de transbordo, el resto de estaciones que tengan semáforos no serán tomadas en cuenta, es decir el tiempo de viaje de una estación, en donde no se detiene el bus, a otra incluye el tiempo que un bus espera en una avenida para que cambie la luz del semáforo.

C. Descripción del modelo

Sobre la base de lo anterior, se procede a emplear Rockwell Arena para construir el modelo de simulación. El modelo se descompone en componentes que incluyen a los servicios prestados en el corredor principal superponiéndose la ejecución sobre la infraestructura de recorrido vial.

La construcción de la lógica incluye todo el proceso de atención de pasajeros de acuerdo al alcance citado en el flujograma previo. Referencialmente se muestra un fragmento de la lógica de un modelo para que pueda entenderse el enfoque

y perspectiva del modelador. Véase la Figura 10 que contiene una parte de la lógica del modelo para una de las estaciones terminales del Corredor 1 que es el Terminal Naranjal, y para la ruta Expreso 2.

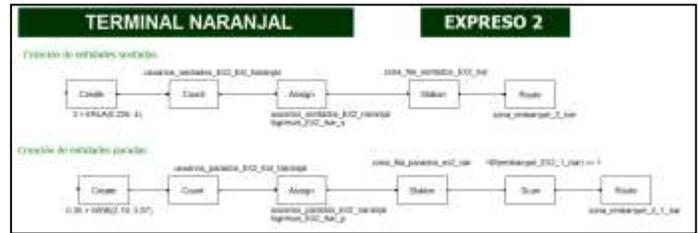


Fig. 10 Creación de entidades – Estación Naranjal

Para realizar la simulación de los usuarios que arriban a la cola de espera para personas que desean ir sentadas dentro del bus en la estación Naranjal (en adelante denominadas “entidades sentadas”), se emplea el bloque *Create*, el cual tiene el tiempo entre llegadas de los pasajeros a esta cola, y en el *operand maximun batches* se indica que la simulación termina cuando salga la última entidad del sistema. Seguidamente, se coloca el bloque *Count* para contar la cantidad de usuarios que hacen la cola de personas sentadas. Luego, mediante el bloque *Assign*, se le asigna a la entidad generada el atributo que la denotará como un pasajero que espera ir a su destino sentado en el bus, por lo que estará en la zona “Fila Sentados” definida con un bloque *Station*. Las entidades son trasladadas a la zona de embarque de personas sentadas usando un bloque *Route*.

Por otro lado, se tienen a otras entidades que arriban al terminal Naranjal, para ocupar un espacio dentro del bus, por lo que después de colocar un bloque *Count* para contar la cantidad de pasajeros que irán parados, se coloca un bloque *Assign* donde se asigna el atributo que los identificará como pasajeros que irán parados. Estas entidades son trasladadas a través de un bloque *Route* a la zona de embarque de personas paradas.

Asimismo, los buses EX2 son entidades que se generan cada cierto tiempo, por lo que deberán ser generadas usando un bloque *Create*, una vez que los pasajeros sentados ingresan al bus, el recurso de embarque se libera y el bus se traslada a la zona de embarque para pasajeros que irán parados, empleando el bloque *Route*.

Una vez que se ha realizado el abordaje por parte de los pasajeros que van parados, el bus se encuentra con el semáforo de la Avenida Los Alisos (a la salida de la estación Naranjal), por lo cual dependiendo de la luz del semáforo, el bus deberá detenerse o simplemente seguir su camino hacia la estación Tomas Valle. Para modelar ello, se ha colocado un bloque *Scan*, con una condición que indica que cuando el semáforo esté en luz verde, los buses con pasajeros, podrán ir directamente a la estación Tomas Valle con el bloque *Route*, ver figura 11. La lógica de las luces del semáforo se aprecia en la figura 12.

un proceso iterativo para determinar el mejor escenario que responde a un objetivo planteado

Se comenzará detallando los *Controls* y *Responses* empleados en cada modelo, así como las restricciones - denominadas *Constraints* - de tal forma que se pueda alcanzar el objetivo del sistema. Seguidamente, se mostrará el diseño y resultados de la optimización para el Expreso 2 (EX2).

A. Definición de controles

Para diseñar la optimización de los modelos, se debe comenzar definiendo los *Controls* para cada uno de los sistemas expresos que están sujetos a estudio. De acuerdo a Rossetti (2015) [14], los controles no son más que las variables de decisión en un problema de optimización y son cambiados durante las corridas del OptQuest hasta que la herramienta encuentre los valores óptimos. La variable “tiempo entre llegadas” es el principal control que se empleará para la optimización de los tres modelos, la Tabla 9 muestra el rango de valores que éste puede tomar para el servicio EX2.

TABLA 9
CONTROLES

Nombre	Elemento	Valor mínimo (Segundos)	Valor Máximo (Segundos)
tiempo entre llegadas EX2	Variable	60 (1 min)	240 (4 min)

El control definido será del tipo discreto con saltos de 1 en 1, pues en el modelo planteado la unidad de tiempo sobre la que se está trabajando es el segundo y por la naturaleza del indicador solo se puede medir hasta el nivel de detalle de 1 segundo. Se puede ver la caracterización del control en la Figura 13.

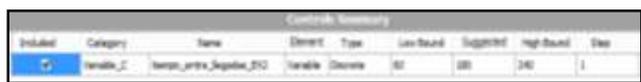


Fig. 13 Controles utilizados en OptQuest

B. Definición de responses

Se definen como *responses* a los indicadores de tiempo en cola, el valor de la utilidad esperada por el flujo de pasajeros y a la cantidad de salidas de buses del EX2. Esta selección se muestra en la Figura 14.



Fig. 14 Responses utilizados en OptQuest

C. Definición de Constraints

Después de haber definido las variables de decisión y las de salida en la optimización, se deben establecer las relaciones entre ellas.

Estas restricciones se emplearán para determinar el valor óptimo del *Control* y han sido planteadas para reducir los tiempos de espera de los servicios expresos entre 5 a 10 minutos, respecto a sus tiempos actuales en sus estaciones principales. La Figura 15, muestra el resumen de las restricciones empleadas en la optimización para el servicio EX2.

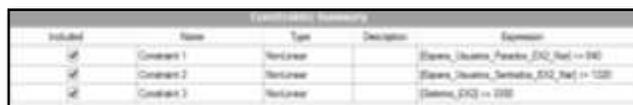


Fig. 15 Constraints utilizados en OptQuest

D. Definición de Objective

La labor del *OptQuest* se centrará en encontrar el valor óptimo para alcanzar la meta propuesta y a la vez reducir el tiempo de espera. La Figura 16 muestra la función objetivo en el *OptQuest*.

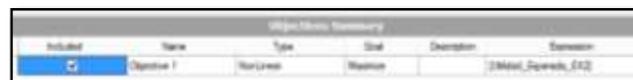


Fig. 16 Objective en OptQuest

E. Resultados

Después de haber dado inicio al proceso de optimización en el *OptQuest* para el servicio EX2, se obtienen los resultados óptimos para la variable tiempo entre llegadas, que busca maximizar la utilidad de dicho servicio.

En la figura 17, se aprecia que la mejor simulación se obtiene en la 20.a iteración, cuando la variable “tiempo_entre_llegadas_EX2” alcanza el valor de 185 segundos, lo que a su vez genera una utilidad aproximada de S/. 246,691.



Fig. 17 Resultados en OptQuest

Como se ha indicado, el diseño de la optimización abarca a otros dos servicios expresos (SX y SXN) los cuales han sido desarrollados de forma análoga. En el caso del primero, la mejor solución óptima se obtiene en la 9.^a iteración y para el segundo, en la 42.^a. Partiendo de lo anterior, la Tabla 10 presenta los resultados para los tiempos entre llegadas de cada uno de los modelos.

TABLA 10
OPTIMOS DE SX Y SXN

Variable\ Servicio	SXN	EX2	SX
Tiempo entre llegadas (segundos)	239 (3.98 min)	185 (3.08 min)	209 (3.48 min)

V. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

En el presente acápite, se realizará la evaluación técnica y económica de las propuestas de mejora definidas en el capítulo anterior para los servicios expresos del sistema de transporte de tipo BRT en la ciudad de Lima. Se comenzará por la evaluación técnica, donde se analizará y contrastará el impacto de la propuesta sobre los *Performance Indicators* (PI) trabajados para cada uno de los sistemas descritos, tales como tiempo de cola y de sistema. Luego, para realizar la evaluación económica de la propuesta de mejora, se definirán los costos de mano de obra directa, material directo y costos indirectos incurridos en la operación y a partir de ahí se presentará el flujo de caja económico y determinará la viabilidad de la propuesta.

A. Evaluación técnica

Los servicios que se han presentado cuentan con más de 5 años operando; sin embargo, todavía no cumplen con las expectativas de los usuarios, causando que éstos tengan que realizar largas colas en horas punta de la mañana para alcanzar un espacio en un bus en la estación Naranjal. Ante ello, se evaluará el grado de impacto que tiene la propuesta de mejora sobre los indicadores que están directamente relacionados con la percepción del usuario sobre los servicios. La Tabla 11, muestra el antes y después de los PI de tiempos de sistema:

TABLA 11
OPTIMOS DE EX2, SX Y SXN

Indicador	Antes de la optimización (min)	Después de la optimización (min)	Δ Variación
Tiempo de Sistema EX2	77.8	54.1	-30.5%
Tiempo de Sistema SXN	49.5	32.6	-34.2%
Tiempo de Sistema SX	67.8	44.5	-34.4%
Promedio			-33.0%

Como se puede apreciar, los tiempos de sistema para cada servicio han sido reducidos en promedio en 33%, lo cual representa una disminución significativa para los miles de usuarios que emplean estas rutas troncales.

En adición, en la Tabla 12 se aprecia la comparación de la optimización respecto a la situación actual para los indicadores de tiempos de cola.

TABLA 12
OPTIMOS DE EX2, SX Y SXN

Ruta	Indicador	Antes de la optimización (min)	Después de la optimización (min)	Δ Variación
EX2	Tiempo de espera de usuarios de la fila de parados en la estación Naranjal	24.0	4.3	-82.2%
	Tiempo de espera de usuarios de la fila de sentados en la estación Naranjal	32.1	14.1	-56.1%
SXN	Tiempo de espera de usuarios de la fila de parados en la estación Naranjal	18.8	2.3	-87.9%
	Tiempo de espera de usuarios de la fila de sentados en la estación Naranjal	30.6	7.9	-74.1%
SX	Tiempo de espera de usuarios de la fila de parados en la estación Naranjal	30.6	7.3	-76.0%
	Tiempo de espera de usuarios de la fila de sentados en la estación Naranjal	30.8	10.1	-67.2%
Promedio				-73.9%

De igual forma, se ha visto que con la propuesta de mejora los tiempos de espera de los usuarios, tanto en la fila de parados como de sentados, han sido significativamente reducidos, aproximadamente 74% respecto a los tiempos de espera originales. Por lo indicado, se concluye que la propuesta de mejora planteada, repercute de forma positiva sobre la calidad

del servicio de los usuarios que usan este transporte del tipo BRT.

B. Evaluación económica

Se realizó el cálculo de presupuesto de ingresos y egresos relevantes de la mejora, y en base a una estimación de costo de oportunidad se estimó un costo promedio ponderado de capital (CPPK) de acuerdo a una tasa social de descuento de 8% correspondiente a tasa para proyectos de inversión pública [15], en base a estos se analizaron los indicadores económicos usuales que se resumen en la Tabla 13.

TABLA 13
INDICADORES ECONÓMICOS

VAN	S/ 2.931,331
TIR	10.08%
B/C	1.049

Los valores presentados demuestran que no solo se alcanza una mejora técnica, sino que desde el punto de vista de inversión en un proyecto público es rentable la mejora.

VI. CONCLUSIONES

Con más de 6 años operando, el servicio del Corredor 1 todavía no cumple con las expectativas de los usuarios, quienes cada día se ven afectados por la ausencia de buses, su poca frecuencia, desinformación en las estaciones, entre otros; lo que provoca que los usuarios tengan que realizar largas colas en horas punta, malestar, caos, discusiones e inclusive se peleen para lograr un espacio en el bus. No obstante, este sistema de transporte urbano es uno de los más utilizados en Lima Metropolitana, por la rapidez en el tiempo de viaje. La mayoría de los usuarios valora el servicio por su rapidez, pero no por el orden, comodidad, seguridad o el costo del boleto que ofrecen. Así pues, el 53.8% de los entrevistados en el año 2015, calificó desde una escala de regular a muy malo el servicio del Metropolitano, porcentaje que se ha incrementado si se compara con el año 2014, donde alcanzaba un 42.1%. Por lo que, se detecta claramente una oportunidad de mejora.

La herramienta de optimización del Software Arena, de nombre *OptQuest*, permitió hallar nuevos valores de tiempos entre salidas para los buses que comprendían las rutas de expresos estudiadas. Por ejemplo, el EX2 disminuyó su tiempo entre llegadas en un 22.92 %, con lo cual logró reducir los tiempos de cola en la estación Naranjal un 69.15 % (tanto de la fila de personas que irán sentadas, como las de paradas). En general, se logró reducir los tiempos de espera para los tres servicios en la estación Naranjal, en un 73.9 %. Asimismo, los tiempos de sistema, como era de esperarse, también se vieron reducidos en un 33.0%.

En adición, también se calculó la Tasa Interna de Retorno (TIR) económica cuyo valor (10.08%) era mayor a la Tasa Social de Descuento (8%). De igual forma, se calculó el ratio de

beneficio- costo, que compara el VAN de ingresos con el VAN de egresos, obteniéndose 1.049 por lo que al ser mayor a 1 se concluye que el proyecto se aprueba

REFERENCIAS

- [1] Congreso de la República Del Perú (2014). Informe de investigación N° 90/2014-2015 Transporte Público de Pasajeros en Lima. Consulta: 25 de Mayo de 2017. [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/295F26B15EDAC0C2052580820061AF36/\\$FILE/246_INFINVES90_2014_2015_transporte_publico.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/295F26B15EDAC0C2052580820061AF36/$FILE/246_INFINVES90_2014_2015_transporte_publico.pdf)
- [2] Instituto Nacional de Estadística e Informática – INEI (2018). Directorio Nacional de Centros Poblados Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Viviendo y III de Comunidades Indígenas. Consulta: 30 de Noviembre de 2018. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/tomo1.pdf
- [3] Lima Como Vamos. (2017). Encuesta Lima Como Vamos 2017. Lima. Consulta: 25 noviembre de 2018 http://www.limacomovamos.org/cm/wp-content/uploads/2018/03/EncuestaLimaC%C3%B3moVamos_2017.pdf
- [4] El Comercio (2015). Metropolitano, servicio que sigue en cifras rojas tras 5 años. Consulta: 17 de Mayo de 2017. <https://elcomercio.pe/lima/metropolitano-servicio-sigue-cifras-rojas-5-anos-233501>
- [5] Instituto Protransporte de Lima. (2015). Plan Operativo Insitucional (POI). Consulta: 15 de Agosto de 2017. <http://www.protransporte.gob.pe/attachments/article/11/resolucion-234-APROBACION-POI-2015.pdf>
- [6] Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw Hill.
- [7] El Comercio (2015). Metropolitano, servicio que sigue en cifras rojas tras 5 años. Recuperado el 15 de Septiembre de 2017, de <https://elcomercio.pe/lima/metropolitano-servicio-sigue-cifras-rojas-5-anos-233501>
- [8] El Comercio (2014). Metropolitano: pasaje en buses aumentará a S/. 2,50 desde el 20. Consulta: 15 de Septiembre de 2017. <https://elcomercio.pe/lima/metropolitano-pasaje-buses-aumentara-s-2-50-20-313043>
- [9] Radio Programas del Perú (2017). Usuarios reportaron largas colas en la estación Naranjal del Metropolitano. Consulta: 30 de Octubre 2017. <https://rpp.pe/lima/actualidad/usuarios-reportaron-largas-colas-se-registraron-en-la-estacion-naranjal-del-metropolitano-noticia-1077482>
- [10] Tague, N. (2005). The Quality ToolBox. Wisconsin: American Society for Quality.
- [11] Marshall, D. A., Burgos-Liz, L., y Ijzerman, M. J. (2015). Selecting a Dynamic Simulation Modeling Method for Health Care Delivery Research—Part 2: Report of the ISPOR Dynamic Simulation Modeling Emerging Good Practices Task Force. Value in Health.
- [12] Kelton, W. D., Sadowski, R. P., y Zupick N. B. (2014). Simulation with Arena. New York: McGraw-Hill Education.
- [13] Altiook, T., & Melamed, B. (2010). Simulation Modeling and Analysis with ARENA. Amsterdam : Elsevier.
- [14] Rossetti (2015). Simulation Modeling and Arena. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [15] Ministerio de Economía y Finanzas. (2017). Anexo 03 - Parámetros de Evaluación Social. Recuperado el Octubre de 2017, de https://www.mef.gob.pe/contenidos/archivos-descarga/anexo3_directiva002_2017EF6301.pdf