

DESIGN OF A MODEL OF OPERATION FOR RUTEO OF URBAN TRANSPORT BASED ON DISCREET SIMULATION

DISEÑO DE UN MODELO DE OPERACIÓN PARA RUTEO DE TRANSPORTE URBANO BASADO EN SIMULACIÓN DISCRETA.

Recibido: 19 de noviembre 2014- aceptado: 10 de mayo 2015

Pedro Riquelme.¹
Universidad Andrés Bello

Gustavo Gatica.²
Universidad Andrés Bello

Erick Orozco.³
Universidad Andrés Bello

Keywords:

Transport, discreet simulation, ruteo,

Abstract

The Big cities face a chaotic mobility due to the increase of the fleet, caused by lack planning to new transport systems. An ideal transport system is not characterized by full use of its capacity in a single journey; but by reducing the use of private vehicles. The participation of Intelligent Transportation Systems has increased (Transantiago in Chile, and Transmetro in Barranquilla), but its implementation does not guarantee success in its operation; the sustainability of small and medium enterprises public transport may be affected. Therefore, it is proposed a simulation model for a transport company of Barranquilla, Colombia, internal and external aspects that can affect the system are determined, to determine an optimal solution that allows mitigate the social and financial impact of the company in its environment, historical and operational data provided by a company for the category as well as a preliminary operation model are used.

Palabras clave:

Transporte, simulación discreta, ruteo

Resumen

Las grandes ciudades enfrentan una movilidad caótica producto del incremento del parque automotor, ocasionada por la falta planeación ante los nuevos sistemas de transporte. Un sistema de transporte ideal no se caracteriza por utilizar la totalidad de su capacidad en un único recorrido; sino por la disminución del uso de vehículos particulares. La participación de los Sistemas de Transporte Inteligente lo ha incrementado (Transantiago en Chile, y Transmetro en Barranquilla), aunque su implementación no garantiza el éxito en su operación; la sostenibilidad de las medianas y pequeñas empresas de transporte público pueden verse afectada. Por lo anterior, se propone de un modelo de simulación para una empresa de transporte de Barranquilla, Colombia, se determinan los aspectos internos y externos que pueden afectar al sistema, para determinar una solución subóptima, que permita mitigar el impacto social y financiero de la empresa en su entorno, se utilizan datos históricos-operacionales proporcionados por una empresa del rubro, así como un modelo de operación preliminar.

1. Ingeniero Civil Industrial, Universidad Andrés Bello, Chile
2. Doctor en Ciencias de la Ingeniería mención automática. Universidad de Andrés Bello. Chile
3. Profesor. Magíster en Estadística Aplicada. Universidad Simón Bolívar. Barranquilla.

*Este artículo es asociado al proyecto de investigación: Diseño de un modelo de operación para ruteo de transporte urbano basado en simulación discreta

INTRODUCCIÓN

Las grandes ciudades no cuentan con una planificación adecuada, para mitigar los aspectos sociales de la movilidad caótica de sus sistemas de transportes, generando que estos se conviertan en una problemática [1] [2]; por ello la importancia que tiene la industria del transporte con la prestación de servicios de calidad y eficaz, en cualquier horario que sea requerido por sus clientes y que éstos puedan utilizarlo las veces que lo estimen conveniente [2], entonces ¿es posible encontrar una frecuencia sub-óptima de servicio, que minimice los costos de operación? [3]. La simulación es una herramienta que tiene relevancia en el ámbito de la ingeniería, permite conocer y contextualizar el escenario a proyectar y llevar a un período de tiempo controlado. La incorporación de variables en el modelo permite realizar un pronóstico, que minimiza los inconvenientes para una futura implementación [4] [5] [7].

Un sistema de transporte público, equivalente a la ciudad de Barranquilla, está implementado en Cali, Colombia, Masivo Integrado de Occidente (MIO), es un sistema de transporte masivo en autobuses, que desde el año 2008 ha generado en la población objetivo un impacto físico y social favorable, dado que los tiempos de los recorridos y frecuencias de los buses, permiten al usuario tener conocimiento del vehículo que tomará en servicio [5]. Sin embargo, estos sistemas de transportes, corresponden a problemas de ruteo de vehículos con capacidades heterogéneas [6] [8] [11]. En Barranquilla el sistema de transporte masivo (Transmetro), ha representado una disminución en el número de personas transportadas al igual que la cantidad de buses en servicio [12], en el cuarto trimestre de 2014, Transmetro contó con un parque automotor en servicio mensual de 177 vehículos en promedio, aumentando 10,6% con respecto al mismo período de 2013. De igual forma, transportó 8,3 millones de pasajeros, lo que equivale al 12,6% de los usuarios en el área metropolitana. Comparado con el cuarto trimestre del año anterior, se presentó una disminución de 3,1% en el número de pasajeros transportados por el sistema.

Debido a la competencia del mercado, la reducción de las ventas y lo expuesto anteriormente, la empresa de Transporte requiere identificar los requerimientos para implementar una estrategia que impacte en la operación del servicio, proporcionando a los

usuarios eficacia y que este a su vez genere dividendos a la organización, para lograr su posicionamiento. Y una gran ayuda puede ser la implementación de herramientas logísticas para lograr en optimizar las frecuencias de viaje. Sin embargo, la construcción del modelo de simulación, considera el levantamiento de información, en particular la demanda de cada nodo existente y el número de vehículos disponibles. El análisis de la demanda implicó el diseño y ejecución de un sistema de movilidad de pasajeros que permitió conocer las tasas de llegada por cada nodo, realizada en el sistema de transporte público durante en Agosto de 2014. Los resultados permiten demostrar lo mencionado de contar con un modelo ajustado para los tiempos de viaje de los buses, más otros resultados [13] [3].

Materiales y métodos

Después de analizar las características de la problemática existente en Barranquilla, se identifica un Problema de Ruteo con Flota Homogénea (VRPH), se diseña un modelo a través del software Arena® Simulation [14] [15], que permite la comprensión del problema y contribuye a facilitar las propuestas, correcciones y/o cambios de mejora continua, con el ojeo de mejorar el tiempo de atención al cliente. [16, 17].

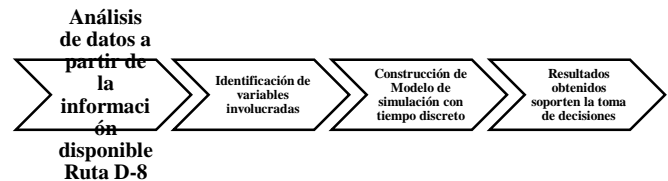


Fig. 1. Esquema general de trabajo-Fuente: Elaboración propia

La metodología establece la problemática y las posibles soluciones en las condiciones reales del objeto de estudio, siguiendo con la administración de los atributos y propiedades de los datos recopilados, existiendo una lógica en la secuencia de cómo el escenario en estudio se comporta (Ruta D-8), con las variables ingresadas al sistema de modelación, dando respuesta al problema según sus restricciones, posteriormente se interpreta los resultados, para posterior derivación en una posible

implementación. Para la elaboración de un diagnóstico, que obstaculiza el funcionamiento de las actividades que buscan de lograr la satisfacción de los clientes y márgenes de utilidad representativos. La empresa de Transportes, suministró la información relacionada con los tiempos y frecuencias habituales, el número de pasajeros y vehículos que diariamente se registran. Es necesario mantener un control en la toma de decisiones, mediante el desarrollo e implementación de un sistema de frecuencias subóptimas y hacer uso de la capacidad de la flota existente para una obtener márgenes de rentabilidad en los ingresos y una disminución en la cantidad de recursos (buses) utilizados [18].

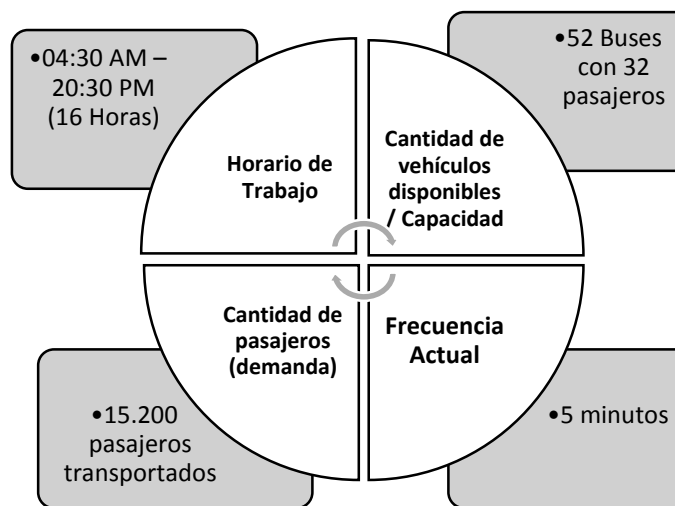


Fig. 2. Datos utilizados para el diagnóstico-Fuente: Elaboración propia

Como se presenta en la Fig. 2, con los datos empleados se realiza la simulación, que corresponden al periodo del 2013 – 2014 evidencian una disminución del 11,5% de pasajeros transportados, lo cual genera el aumento de vehículos particulares.

Tabla 1. Transporte de pasajeros IV trimestre de 2014- Fuente: DANE

Tipo de Vehículo	Total pasajeros transportados		Variación %	Promedio mensual de vehículos transportados en servicio		Variación %
	Miles	Miles		Miles	Miles	
	20	20		201	201	
	13	14		3	4	

Área	74.	65.	-	2.96	2.93	-1
Metropolitana de Barranquilla	45	99	11,4	5	6	
SITM Alimentador				50	66	31,8
SITM Padrón	8.5	8.3	-3,1	57	59	4,1
SITM Troncal	72	03		52	51	-2,5
Buses	36.	34.		1.44	1.41	-1,9
	14	73	-3,9	6	9	
Busetas	21.	15.				
	04	49	-	821	872	6,2
	3	6	26,4			
Microbuses-Colectivos	8.6	7.4	-	538	468	-10
	91	60	14,2			

Modelo de Simulación.

El modelo de simulación, se construye bajo las siguientes condiciones:

- Un periodo de 16 horas (960 minutos).
- Se disponen de un máximo de 52 buses.
- Existen 4 nodos en el recorrido más el depósito.
- Las tasas de llegada de los pasajeros se exponen en la Tabla 2.

Se define las siguientes variaciones:

- Tasa de llegadas uniforme (durante 16 horas).
- Variación de cantidad de vehículos entre 52 – 48.
- Aumento de la demanda en 50%.
- Tasas de llegadas por horarios especiales.

Tabla 2. Tasas de llegada- Fuente: Elaboración propia.

Intervalo de Nodos	Tipo de distribución
D-N1	UNIF(16.5, 18.5)
N1-N2	LOGN(2.57, 2.38)
N2-N3	ERLA(4.6, 2)
N3-N4	GAMM(6.91, 1.49)
N4-D	TRIA(40.5, 47, 62.5)

Cabe resaltar, que las distribuciones de probabilidad ajustadas los datos de llegada por para intervalo de nodos de termina por medio del uso de las pruebas de bondad de ajuste que realiza el complemento de Análisis de datos de entrada que provee la herramienta de simulación Arena®. Pero, previamente, se verifica que los datos sean independientes y que su comportamiento

sea lo más cercano a la media aritmética de los mismos. Es decir, que los datos son fiables para construir un modelo de simulación lo más asociado a la realidad. Por ejemplo, para el N2-N3, se tiene la Prueba de Bondad de ajuste Chi-Cuadrado, que según [19] y [20] hace el siguiente contraste de hipótesis:

H_0 : Los datos provienen de una distribución de Erlang

H_1 : Los datos no provienen de una distribución de Erlang

Entonces H_0 se rechaza si el estadístico de prueba es mayor al valor crítico. Así:

$$\chi^2 > \chi^2_{\alpha}, \text{ con } v = n - 2 \text{ grados de libertad}$$

Por lo anterior, $\chi^2 = 2,99$ y $\chi^2_{0,05} = 5,991$.

También:

$$P\text{-valor} = P(\chi^2 > 2,99) = 0,232$$

Como $P\text{-valor} > \alpha$, no se puede rechazar la Hipótesis de que los datos provienen de una distribución de Erlang.

De igual forma, es necesario precisar que el modelo de simulación tiene la morfología a modo general de lo que hoy se conoce como el problema de agente viajero, donde existe un problema de igual punto de origen, pero con la variante de la existencia de ventanas de tiempo y demanda concentrada en nodos de recorrido.

Desarrollo del Modelo.

El modelo que se construye debe reflejar todos los detalles que interesan para el estudio y así represente al sistema real, pero también debe ser sensible a cambios que se puedan generar, es decir, observar qué pasaría en el sistema si ocurrieran algunos escenarios. Para esto se muestra la construcción del modelo:

- 1) Elaboración del diagrama Sistema de creación de entidades (Clientes): se determinan las entidades que ingresan al sistema.

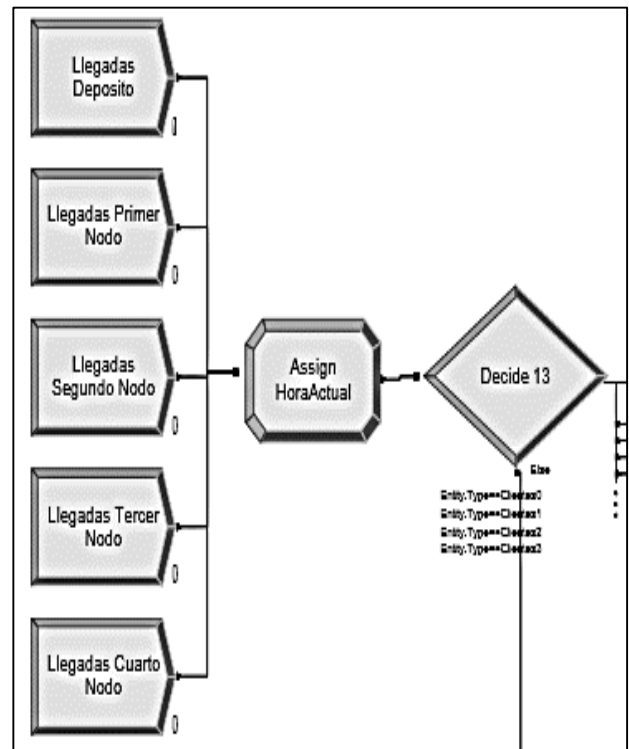


Fig. 3. Diagrama de creación de entidades

Como primera etapa del trabajo se ilustra el proceso en la Fig. 3, el comportamiento de la demanda y el flujo de entrada y salida de los pasajeros en el sistema. El modelo contiene cinco *Create* (para crear entidades se les da un nombre, tasas de llegada, número de entidades por llegada y capacidad máxima del sistema.), los cuales son creadores de entidades, en este caso los pasajeros. Los cinco módulos de entidades que corresponden a las entradas de entidades hacia los nodos que contiene el sistema, incluyendo el depósito, determinan el tiempo entre las llegadas de cada entidad para cada nodo. Posteriormente, ingresando a una tarea llamada *Assign* (definición de parámetros usados de acuerdo al modelo.) se asignan valores y condiciones a las entidades creadas, "*Assign HoraActual*" establece una variable de tiempo de trabajo del modelo, " $TNOW - (AINT(TNOW/24) * 24)$ ", la cual indica un modelo para 24 horas. De igual forma, *Decide 13* (separa en 2 flujos por entidad y/o porcentaje), es la primera condición en el modelo decide tomar uno de dos caminos, los cuales corresponden a una división de las entidades (*Cliente0, Cliente1, ..., Cliente4*), a diferentes asignaciones, posteriormente, el proceso divide las entidades por horas del día y datos expresados en segundos; el máximo de entidades creadas se denominará *Infinite* (creación de entidades de forma continua, sin detenerse), y definirá las horas donde el modelo se encuentra activo y no limitará la cantidad de pasajeros

que ingresen a cada nodo, teniendo en cuenta que el modelo al llegar a las 16 horas de actividad dejara de procesar.

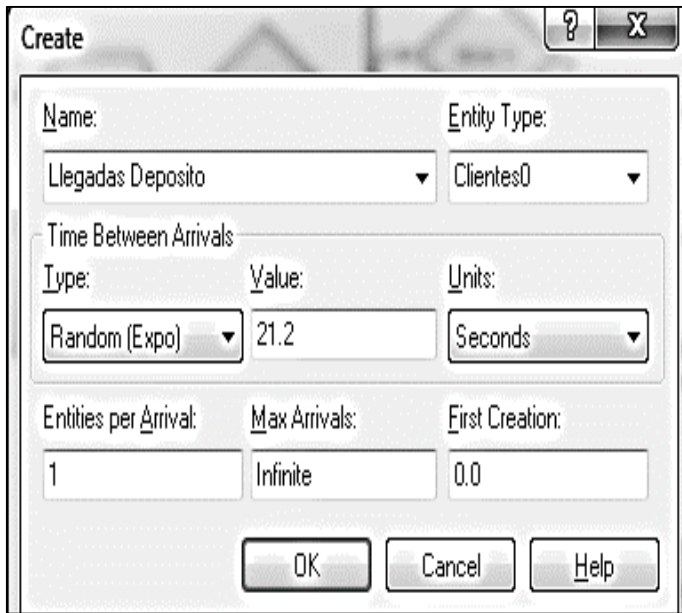


Fig. 4. Configuración Create

2) Elaboración diagrama de decisión: el modelo de flujos está relacionado con el porcentaje de preferencia de cada entidad en seleccionar un nodo, para luego abandonarlo.

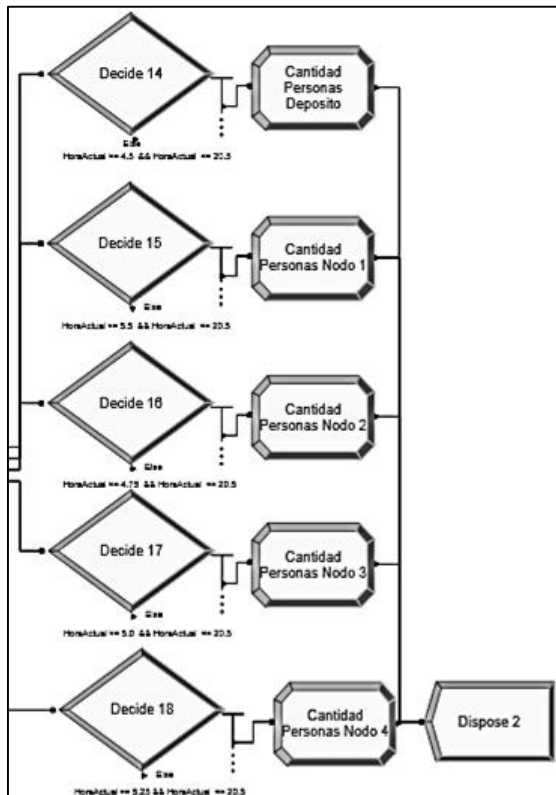


Fig. 5. Diagrama de preferencia de nodos

Los *Decide* cumplen la función de establecer una preferencia de nodos de cada entidad “*Clientes*” cuando el pasajero accede al servicio, como es un sistema de transporte, el proceso se da a su ingreso y posterior salida del sistema en algún nodo o parada específica, ya estudiados en la demanda, se determinan los intervalos de horarios que el sistema está activo para su funcionamiento bajo la siguiente expresión: “*Hora Actual* >= 4.5 && *Hora Actual* <= 20.5”, la cual se refleja que es de 04:30 AM- 20:30 PM. Para cada nodo se genera la variable *Cant*. Ingresando la cantidad de pasajeros que acceden en aquel nodo, finalmente las entidades y variables de cantidad dejan el sistema, ingresando el módulo *Dispose* (término del flujo de las entidades temporales), que se utilizó para retirar las unidades registrarlas.

3) Elaboración Subsistema creación de entidad (buses): El comportamiento del sistema dependerá del rendimiento de cada subsistema, de sus relaciones entre entidades y variables que permiten una sincronización entre ellos.



Fig. 6. Creación de entidad -Bus- (Fuente: Elaboración propia)

El sistema operativo del tráfico de los vehículos que harán parte del sistema, será una especie de *Sistema Dispatch (Modular Mining Systems)* que posee el modelo. El proceso inicia con un *Create* donde se podrá configurar la partida de cada bus, editando la frecuencia y el intervalo de tiempo de salida de las entidades (buses). Luego un *Station* (modulo para trasladar entidades) que cumplirá la función de representar el Depósito de la empresa, el módulo “*Station*” recibe los vehículos del último nodo y despacha hacia el primero, verificando que la capacidad de la entidad que sale e ingresa sea igual a cero, porque se entiende que los buses llegan vacíos, y en esas mismas condiciones inician su recorrido, conjuntamente se asigna un valor a la siguiente asignación donde se genera el Atributo “*Cantidad*”, que para esta estación será de *Cantidad* = 0, ya que es donde la entidad “*Bus*” inicia el recorrido.

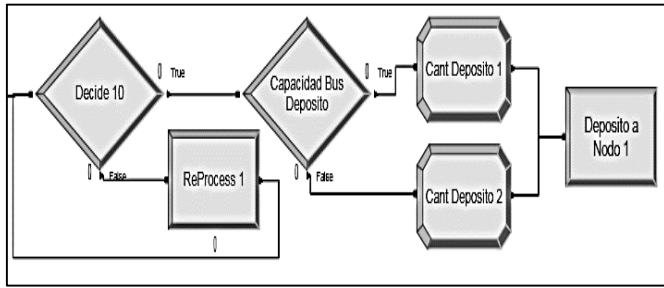


Fig. 7. Flujo de entidad Bus, hacia Nodo 1

Aquí, se configura el sistema para que el software pueda entender la lógica del proceso, porque se necesita que los clientes ingresen y salgan del sistema, pero no las entidades creadas de buses, el modelo necesita que los vehículos al momento de terminar su trayecto entre los cuatro nodos vuelvan al sistema y se genere un *Process* (acción a ejecutar de un recurso y parámetros) el cual realiza que la entidad (Bus) vuelva al subsistema, con una propiedad de lógica de acción *Delay* (acción de utilizar algún recurso, entidad, variable por un momento y después la libera) ya que utiliza el recurso durante un tiempo, posteriormente se verifican las cantidades del número de pasajeros al salir y entrar al sistema y enviarlo al *Route* (transfiere entidades a otro bloque del sistema) que contiene la configuración del tipo de distribución de los pasajeros que llegan al primer nodo, para transferirlos al segundo nodo.

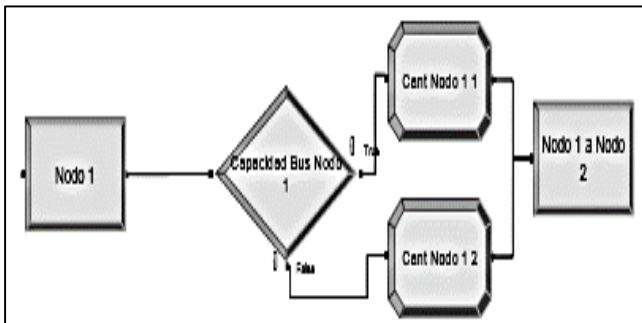


Fig. 8. Flujo Nodo 1 – Nodo 2

Para continuar con el ciclo del recorrido luego de un *Route* se conecta con un *Station* para hacer traspaso de los recursos que se están utilizando, cuando el flujo ingresa al nodo 1, al que el sistema indica la prioridad absoluta para seguir la secuencia del recorrido, el sistema verifica la cantidad de personas que descienden del vehículos junto con los pasajeros que siguen su recorrido, ocurre una diferencias de entidades que salieron del sistema y otras que aún permanecen en ella, editado como *By Chance* (decisión mediante porcentajes) que dependerá de una

probabilidad de preferencia de los pasajeros que tiene hacia cada nodo (parada).

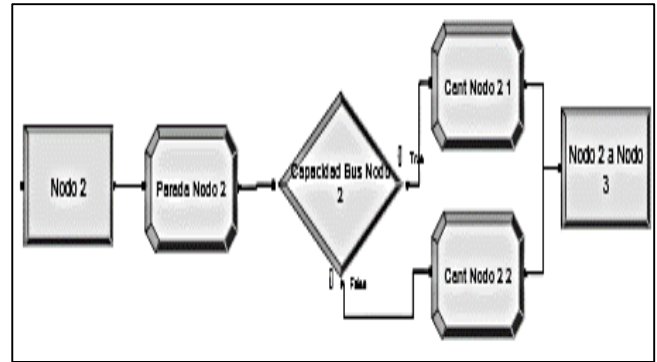


Fig. 9. Flujo Nodo 2 – Nodo 3

Y, desde el nodo 2 hasta el 4 el proceso será de la siguiente manera, las entidades al llegar del nodo 1 se asignaran las nuevas variables de capacidad que contiene el vehículo, es decir las personas que descendieron del bus en el trayecto entre el nodo 1 y 2, ya que es la única forma de controlar una demanda que no es con paradas definidas, sino una conversión a nodos. El modelo sigue el concepto de preferencia por porcentajes de nodos de bajada al igual que el anterior, por lo que el sistema vuelve a verificar la información.

Resultados

Los resultados de la simulación evidencian la ejecución del modelo en cinco instancias. La frecuencia simulada corresponde a 5, 7, 9 y 11 minutos respectivamente y la cantidad de vehículos varía de 52-48 buses, se indican las cantidades de pasajeros que ingresaron al sistema por cada uno de los cinco nodos existentes en un intervalo de 16 horas, que es un valor fijado por las características de operación de la compañía.

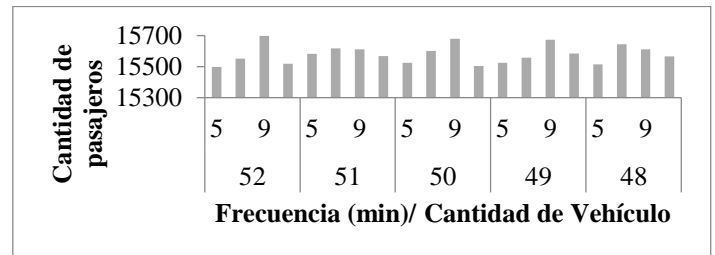


Fig. 10. Histograma frecuencia/Vehículo. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Fig. 10, se puede observar que la cantidad de pasajeros transportados en el transcurso del día, seleccionando una frecuencia de 7 minutos con 51 o 48 vehículos, representa una mejor frecuencia pero los tiempos de espera son altos, sin embargo es una frecuencia que minimiza el uso de la flota que se convierte en un espacio necesario para que los vehículos posean su ventana de mantenimiento preventivo y/o correctivo. Y, a continuación la tabla consolidada para la frecuencia en mención (ver Tabla 3)

Tabla 3. Resultados frecuencia 7 minutos. Fuente: Elaboración propia.

Intervalo de Nodos	Cantidad de Vehículo	
	51	48
	Frecuencia	
	7	7
N4-D	2646	2679
D-N1	3365	3339
N1-N2	1717	1718
N2-N3	5822	5818
N3-N4	2067	2090
TOTAL	15617	15644

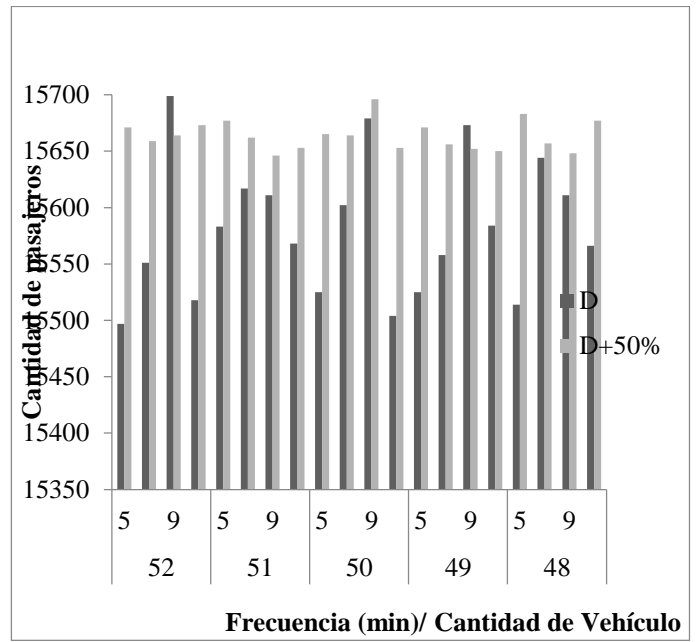


Fig. 11. Gráfica con demanda aumentada en 50%. Fuente: Elaboración propia

Con el aumento de 50% en la demanda, las frecuencias menores tienden a captar más clientes, es lógico, porque existirá un mayor porcentaje de clientes en espera en cada nodo. Pero es reiterativo el comportamiento, que la frecuencia de 7 minutos minimiza el uso de la flota.

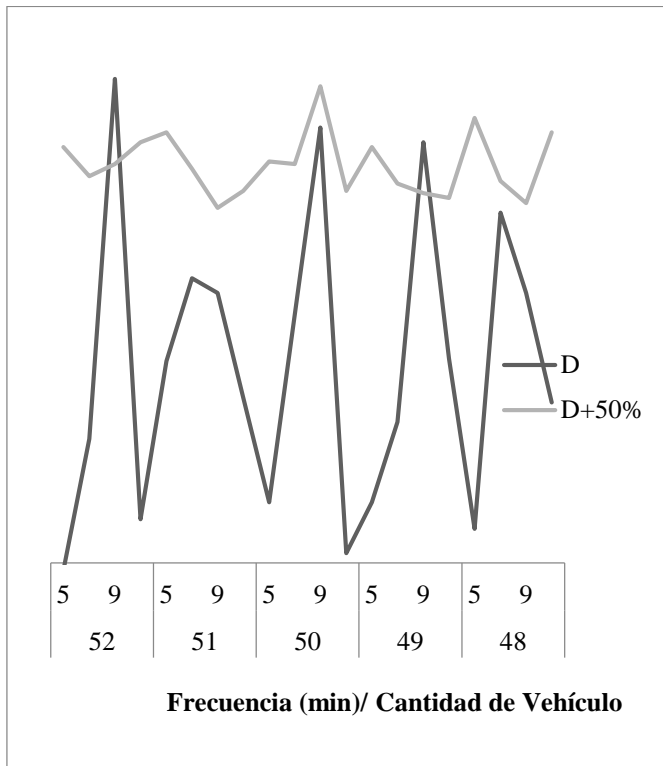


Fig. 12. Línea de tendencia para la frecuencia. Fuente: Elaboración propia.

Ahora, de acuerdo a la línea de tendencia (ver Fig. 11 y Fig. 12) se puede confirmar que la cantidad de vehículos no es relevante en el modelo de simulación, ya que la variación es mínima, por lo que los resultados se reflejan en las diferentes frecuencias

Por otro lado, los resultados obtenidos anteriormente fueron extraídos mediante un supuesto general, en el cual no se tomó en cuenta los horarios de la demanda alta y baja como ocurre en la realidad. Posteriormente, se analiza la demanda por segmentos de hora baja y alta [14], ajustándolo a un modelo con ventanas de tiempo como lo expresa [15].

Tabla 4. Tipo de distribución en cada horario. Fuente: Elaboración propia

	04:30-05:30	05:30-10:30	10:30-12:30	12:30-17:30	17:30-20:30
D-N1	3,7667	EXPO(160)	BETA(0.296, 0.306)	BETA(0.29, 0.386)	BETA(0.156, 0.272)
N1-N2	3,3333	BETA(0.295, 0.251)	BETA(0.352, 0.375)	BETA(0.294, 0.314)	UNIF(175, 302)

N2-N3	3,0667	EXPO(69.8)	BETA(0.304, 0.31)	BETA(0.401, 0.466)	BETA(0.538, 0.391)
N3-N4	2,45	BETA(0.0573, 0.0443)	BETA(0.236, 0.241)	BETA(0.342, 0.371)	BETA(0.0748, 0.0856)
N4-D	2,6667	BETA(0.278, 0.318)	BETA(0.30282, 0.282)	BETA(0.338, 0.312)	NORM(178, 34.6)

Horarios: Demanda Alta: 05:30 – 10:30 / 12:30 – 17:30.

Demanda Baja 04:30 – 05:30 / 10:30 – 12:30 / 17:30 – 20:30.

Tabla 5. Correlación entre horarios. Fuente: Elaboración propia

	04:30 - 05:30	05:30 - 10:30	10:30 - 12:30	12:30 - 17:30	17:30 - 20:30
04:30 - 05:30	1				
05:30 - 10:30	0,50362745	1			
10:30 - 12:30	0,94674469	0,45471627	1		
12:30 - 17:30	0,66420982	0,90071664	0,36816027	1	
17:30 - 20:30	0,92271664	0,47435556	0,95094694	0,59317817	1

Dado las variables, la correlación permite hacer estimaciones del valor de una de ellas conociendo el valor de la otra variable, entregando el grado de porcentaje siendo estadísticamente iguales son rangos de horarios especiales creados. La Tabla 5, genera la idea que la matriz de correlaciones está lejos de una matriz identidad, es decir, que las variables correlacionadas sean independientes, por ende, las variables están íntimamente correlacionadas. A continuación se ilustra la cantidad de pasajeros transportados en las siguientes horas del día versus la propuesta de frecuencia óptima decidida.

Tabla 6. Resultados frecuencias/horarios. Fuente: Elaboración propia

Vehículo/ Minutos	04:30- 05:30	05:30- 10:30	10:30- 12:30	12:30- 17:30	17:30- 20:30
51/5	954	4974	1918	4942	2955
51/7	979	4955	1981	4953	2951
51/9	976	4955	1993	4941	2976
51/11	985	4947	1999	4996	2877

Con los diferentes tipos de distribución, 15.887 pasajeros accedieron al sistema durante el día, pero de acuerdo al resultado de la encuesta aplicada, los pasajeros solo están disponibles para esperar máximo 9 minutos, incluyendo si existieran tarifas especiales (vehículos con aire acondicionado, escolares) entonces las frecuencias superiores a 10 minutos quedan descartadas, convirtiéndose en una restricción del sistema.

Tabla 7. Resultados frecuencias/ horarios con restricción. Fuente: Elaboración propia

Vehículo/ Minutos	04:30- 05:30	05:30- 10:30	10:30- 12:30	12:30- 17:30	17:30- 20:30
51/5	954	4974	1918	4942	2955
51/7	979	4955	1981	4953	2951
51/9	976	4955	1993	4941	2976

Luego, es normal analizar los tiempos entre los nodos. Pero, para extraer inferencias, es necesario verificar el supuesto de la normalidad de los datos, donde la prueba de Shapiro-Wilk genera un $w = 0.9484$, con un $P\text{-valor} = 0.001933$, donde se deduce que los datos analizados no son normales, por ende se deben basar los análisis en pruebas no paramétricas, como sigue a continuación:

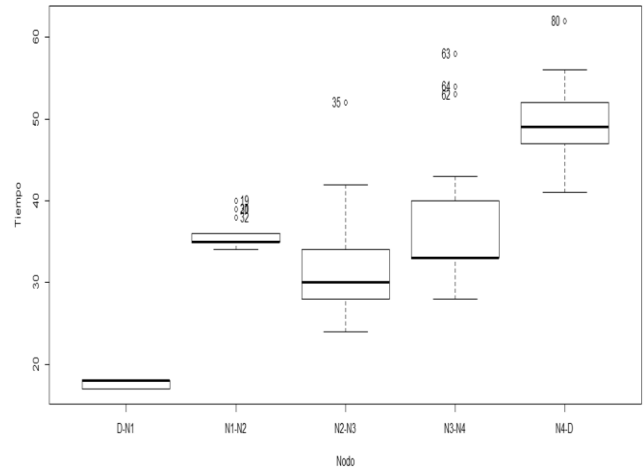


Fig. 13. Gráfico de caja y bigote para los tiempos por nodos-Fuente Elaboración Propia

Un primer paso para mirar si existe diferencia significativa entre el tiempo por cada nodo en el análisis de gráficos de caja y bigote. Este gráfico es de suma importancia, porque se compone de medidas que no son sensibles a datos extremos que son el principal rasgo de los datos presentes. A partir, de la Fig. 13, es válido afirmar que existe un tiempo promedio bastante homogéneo entre N1-N2, N2-N3 y N3-N4 pero si se observan diferencias del nodo D-N1 y del N4-D con los demás nodos. Pero, es posible que las diferencias visuales no siempre son estadísticas.

En concordancia con lo anterior, se aplica una prueba no paramétrica de Wilcoxon donde se establece el siguiente contraste de hipótesis:

$$H_0 : \text{Las medianas de los grupos son iguales}$$

$$H_1 : \text{Al menos un par de grupos tienen medianas diferentes}$$

Entonces, a partir del contraste anterior, se tiene que $v = 3655$, con $P\text{-valor} = 1.15 \times 10^{-15}$, es decir, un rechazo significativo de la hipótesis nula. Con esto, se puede afirmar que existe diferencia significativa entre al menos dos de las medianas de los grupos de nodos conectados (ver Fig. 14).

```

Wilcoxon signed rank test with continuity correction

data: Tiempo
V = 3655, p-value = 1.147e-15
alternative hypothesis: true location is not equal to 0
    
```

Fig. 14. Prueba de Wilcoxon para tiempos.-Fuente: Elaboración Propia

De igual forma, con un procedimiento genérico a los tiempos, se puede afirmar que los flujos de pasajeros en cada sector (Definiendo cada sector como el espacio que existe entre dos puntos cuales quiera en el grafo) no son estadísticamente iguales debido a que se rechaza la hipótesis de la igualdad de las medianas. Esto, se puede observar en la Fig. 16 y Fig. 17.

```

Wilcoxon signed rank test with continuity correction
data: Pasajeros
V = 3240, p-value = 7.988e-15
alternative hypothesis: true location is not equal to 0
    
```

Fig. 15. Prueba de Wilcoxon para pasajeros. Fuente: Elaboración propia

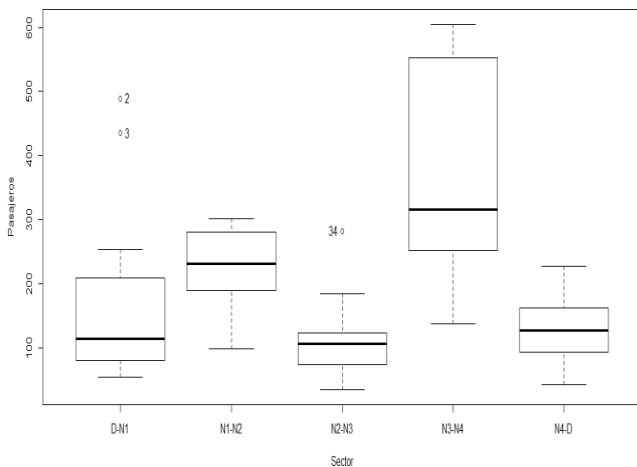


Fig. 16. Gráfico de caja para pasajeros por sector. Fuente: Elaboración propia

Conclusiones y Discusiones

El análisis de la demanda implicó el diseño y ejecución de un sistema de movilidad de pasajeros que permitió, dentro de las cuatro frecuencias simuladas anteriormente, demuestran en primera instancia y con un escenario óptimo, que la mejor frecuencia para que el sistema alcance su máxima capacidad de pasajeros, con 51 buses disponibles, es de 7 minutos con 48 vehículos en promedio en servicio, ya que el sistema lo permite de acuerdo a los buses que posee la organización y las tasas de llegada de los pasajeros en cada nodo, además quedan a disposición cuatro buses restantes para que la organización proyecte sus respectivos procesos de mantenimientos sin afectar el funcionamiento de la línea en sus operaciones.

En el segundo experimento, está relacionado con la variable de cantidad de vehículos a utilizar, y que ésta no influye en el modelo, ya que al simular con los horarios especiales de alta-baja demanda, permitió visualizar el escenario de manera más clara, existe un promedio de 48 vehículos circulando en el recorrido seleccionado, es decir, al no disminuir esa cantidad de vehículos no habrá variación en el número de pasajeros transportados ya que el problema radica en los intervalos de tiempos en los cuales operaciones despacha los buses, no en la cantidad de vehículos. Los resultados de este tipo de horarios especiales reflejan un aumento en la cantidad de pasajeros considerable, comparado con el primer experimento y la situación actual de la empresa, como consecuencia del manejo adecuado de la demanda, analizando y trabajando de acuerdo a su comportamiento.

¿Es posible la implementación de un modelo de optimización de ruteo en un sistema de transporte público, sin estaciones de parada y sin alterar sus rutas?

Los resultados del modelo hacen referencia a la presentación de los datos, es decir, la facilidad de obtener datos de cualquiera de los parámetros del modelo que se requieran según lo realizado, esta propuesta permite el manejo de diferentes frecuencias de cualquier ruta que se contemple apta para ingresar al sistema, conjuntamente con una capacidad de análisis, entendiéndose el problemas con sus limitaciones externas e internas, las cuales no son posibles simular en el modelo, ya que es un comportamiento humano y al trabajar con escenarios de ese tipo, conduce naturalmente a error. La implementación de estas recomendaciones permitirá a la organización mayores beneficios relacionados con la cantidad de personas que ingresen a los buses al igual, que entrega frecuencias acordes al comportamiento de la demanda. También la oportunidad de negocio de implementar nuevas rutas al sistema debido a la poca cantidad de buses alimentadores al sistema, conociendo el la ineficiencia del transporte Transmetro en la ciudad, de las principales causas reflejadas en la encuesta como, buses llenos, pocas frecuencias, y lo lento que son los vehículos.

Para desarrollar eficientemente las actividades, se propone a la empresa de transporte que debe operar con las frecuencias anteriormente presentadas, aquellas analizadas con el tipo de demanda para cada horario del

día, proceso que tiene que ser implementado en el área de operaciones de la organización para lograr conocimiento mediante la aplicación de esta propuesta, considerando una cantidad de mayor o igual a 48 vehículos disponibles para lograr los beneficios esperados.



Fig. 17. Propuesta de frecuencias. Fuente: Elaboración propia

¿Por qué obviar resultados de la simulación?

En primer lugar se ha definido y analizado el problema, sometido a diferentes pruebas, conjuntamente, con sus respectivos resultados. Dentro de las características externas del problema, el factor social que a su vez es de mayor impacto, teniendo en cuenta la cultura de la ciudad y los aspectos climáticos, Barranquilla está ubicada en la costa caribe de Colombia con temperaturas promedio de 30°C y humedad del 80%, en las cuales un pasajero no contempla un tiempo de espera superior a 9 minutos, incluso si fuera sinónimo de una tarifa especial o vehículos equipados con aire acondicionado¹. Entre las 10:30 – 19:30 horas del día, quedando detallado en la encuesta realizada, es decir, una nueva restricción del modelo será que las frecuencias aceptadas no pueden superar los 9 minutos, evidente desventaja al considerar que el grupo de actores que intervienen en el proceso tienen interés muy particulares, por su parte los pasajeros buscan rutas más rápidas, con mejores servicios y las organizaciones un mayor lucro. Entonces los parámetros que se obvian en el modelo comprenden a los factores sociales, el comportamiento de los clientes, mediante las restricciones existentes, a la decisión de los pasajeros en seleccionar otras empresas transportistas ya que se trabajó con una demanda conocida a la empresa y no al sistema general de transportes.

¹ Resultados encuesta realizada a 100 personas, estudiantes, docentes y usuarios del transporte público Octubre 2015, Barranquilla.

Agradecimientos

A la Alianza Pacifico con el convenio de cooperación académica y al Departamento administrativo nacional de estadística (DANE) por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Bibliografía

- [1] D. G. Orea y M. T. G. Villarino, «Salud, ambiente y territorio: una visión integrada en un mundo globalizado,» *Estoa. Revista de la Facultad de arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, pp. (2), 7-19, 2013.
- [2] E. C. Delmelle y I. Casas, «Evaluating the spatial equity of bus rapid transit-based accessibility patterns in a developing country: The case of Cali, Colombia,» *Transport Policy*, pp. 36-46, 2011.
- [3] C. Novoa y . R. Storer, «An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands,» *European Journal of Operational Research*, pp. 509-515, 2009.
- [4] P. Tolh y D. Vigo, «Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications,» Philadelphia, Society for industrial and applied mathematics, 2014, pp. (18) 264-265.
- [5] A. Greasley, «Using business-process simulation within a business-process reengineering approach,» *Business Process Management Journal*, vol. XI, nº 4, pp. 408-420, 2003.
- [6] D. B. R. C. V. & C. W. Applegate, *The traveling salesman problem: a computational study.*, New Jersey: Princeton University Press, 2011.
- [7] L. Guimarães y B. Almada-Lobo, «Planeamento de longo prazo da cadeia de abastecimento na

- industria de bebidas,» de *Annals XVI CLAIO - XLIV SBPO - Workshop LIA-SGT*, Rio de Janeiro, 2012.
- [8] M. A. Salcedo y S. S. Caicedo, «Señales visuales urbanas en algunos cruces viales de Cali, Colombia,» *Universidad de San Buenaventura Cali*, p. 5 (2), 2015.
- [9] G. Gatica, *Nuevas variantes y enfoques metaheurísticos para enrutamiento.*, Santiago, Chile., 2014.
- [10] J. M. Gheiman, «La transposition d'un modèle de transport public en site propre et son impact urbain. Le cas de la ville de Cali en Colombie et le BRT MIO,» *Université de Strasbourg*, 2012.
- [11] J. F. K. G. & Y. G. Bard, «A branch-and-cut procedure for the vehicle routing problem with time windows,» *Transportation Science*, 2002, pp. 36(2), 250-269..
- [12] DANE, «Departamento Administrativo Nacional de Estadística,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.dane.gov.co/index.php/esp/sala-de-prensa/comunicados-y-boletines/113-boletines/servicios/4568-transporte-urbano-automotor-de-pasajeros>.
- [13] J. B. Acevedo, *El Transporte como Soporte al Desarrollo de Bogotá*, Bogota: Ediciones Uniandes, 2009.
- [14] R. Automation, *Arena simulation software*, Rockwell Automation, 2012.
- [15] B. Y. Z. & Y. J. Yu, «Genetic algorithm for bus frequency optimization.,» *Journal of Transportation Engineering*, pp. 576-583, 2009.
- [16] E. Orozco, «Simulación en tiempo discreto de un proceso de abastecimiento de combustible como una herramienta de toma de decisiones: Caso estación de servicios en Barranquilla,» *Dictamen Libre*, , p. 10(10/11)., 2012.
- [17] Gutiérrez, «Reseña del software disponible en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicios,» *Revista Universidad EAFIT*, pp. 60-80, 2012.
- [18] P. Toth y D. Vigo, «Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem.,» *Discrete Applied Mathematics*, pp. 487-512, 2002.
- [19] H. Llinás, *Estadística Inferencial*, Barranquilla: Ediciones Uninorte, 2010.
- [20] D. Anderson, D. Sweeney, T. Williams, J. Camm y K. Martin, *Métodos cuantitativos para los negocios*, Undécima Edición ed., J. Reyes, Ed., México, México: Cengage Learning, 2011.