

Análisis del Consumo Energético de un Sistema de Transporte Público de Pasajeros con Tracción Eléctrica desde una Perspectiva Sistémica

John A. Castaño⁽¹⁾, Andrés E. Diez⁽²⁾ y Diana P. Giraldo⁽²⁾

(1) Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada, Bello-Colombia

(2) Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad Ingeniería, Bloque 11, Medellín-Colombia

(e-mail: jacastano@metrodemedellin.gov.co; andres.diez@upb.edu.co; dianap.giraldo@upb.edu.co)

Recibido May. 25, 2017; Aceptado Jul. 27, 2017; Versión final Sep. 26, 2017, Publicado Feb. 2018

Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar el consumo energético de un sistema de transporte público de pasajeros de tracción eléctrica desde una perspectiva sistémica, a partir de la simulación con Dinámica de Sistemas. Como caso de estudio se usan los datos de la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá. Este análisis considera un arquetipo clave para el planteamiento de la hipótesis dinámica: los límites del crecimiento. Los resultados obtenidos en las simulaciones mostraron cómo el uso de la capacidad de la infraestructura eléctrica, con la incorporación de nuevos proyectos de expansión, puede limitar su capacidad de operar ante contingencias. Se concluye que la planificación debe tener en cuenta que los esfuerzos realizados para expandir el sistema tienen éxito en etapas iniciales, pero cuando éstos llegan a los límites del crecimiento, comienzan a perder efectividad. Por lo tanto, el rendimiento comienza a ser decreciente, afectando la capacidad de oferta del servicio de transporte.

Palabras clave: sistemas de transporte, modelación de sistemas de transporte, planeamiento de sistemas eléctricos, dinámica de sistemas

Analysis of the Energy Consumption of a Public Passengers Transport System with Electric Traction from a Systemic Perspective

Abstract

The objective of this work is to analyze the energy consumption of a system of public passenger electric traction from a systemic perspective, based on the simulation with Dynamics of Systems. As a case study, the Mass Transit Company of the Valley of Aburrá is analyzed. The analysis considers a key archetype for the approach of the dynamic hypothesis: the limits of growth. The results obtained in the simulations showed how the use of the capacity of the electrical infrastructure, with the incorporation of new expansion projects, could limit its capacity to operate in the face of contingencies. It is concluded that the planning must take into account that the efforts done to expand the system are successful in the initial stages, but when they reach the limits of growth and begin to lose effectiveness. Therefore, the performance starts to decrease, affecting the supply capacity of the transport service.

Key words: multimodal transportation systems, transport systems modeling, electrical systems planning, systems dynamics

INTRODUCCIÓN

La planificación del crecimiento de los sistemas de transporte públicos de pasajeros está asociada a los cambios del entorno urbano y al desarrollo de las políticas territoriales, como son los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), que para el caso de los países en desarrollo exigen generalmente un incremento de la oferta de transporte público que garantice cobertura y promueva el desarrollo urbano y social. El incremento de la oferta exige un aumento de capacidad de las líneas de transporte existentes, así como la incorporación de otras tecnologías de transporte, para constituir de forma ordenada, un sistema de transporte multimodal, como una red articulada, integrada por diferentes tecnologías de transporte.

En su trabajo de investigación de sistemas de alimentación eléctrica de sistemas de transporte masivo, Chuquén et al. (2009), plantean cómo los sistemas de transporte masivo que usan energía eléctrica se han desarrollado simultáneamente con los sistemas de distribución de electricidad, pero en Colombia la red de distribución eléctrica se encuentra desarrollada para atender a sus usuarios convencionales de los centros urbanos, esto les permite plantear una interrogante en relación a los requerimientos de los sistemas de tracción para un sistema de transporte eléctrico, que serán solicitados al operador de la red del sistema de distribución de electricidad, los cuales deberán prever una mayor demanda de energía de sus sistemas. Este interrogante debe ser resuelto para garantizar una adecuada planificación de la expansión y aumento de capacidad de un sistema de transporte, especialmente los sistemas urbanos de transporte masivo como metro, tranvía, tren ligero, que requieren el suministro de energía eléctrica con altos estándares de fiabilidad (Ríos y Ramos, 2017), porque es necesario prever los requerimientos de inversión en su infraestructura eléctrica, en relación con la generación, distribución y transmisión de energía, minimizando las afectaciones que puedan limitar la capacidad de oferta del servicio de transporte.

Los trabajos que se han desarrollado para los análisis de consumos energéticos en sistemas de transporte público de pasajeros, han utilizado modelos matemáticos para simular, a un nivel de abstracción bajo, los flujos de carga que reproduzcan el comportamiento de las demandas de energía de corta duración (1 segundo), primero a nivel de tracción, y posteriormente, a nivel de alimentación, con el propósito de establecer que los equipos sensibles a las demandas pico de corta duración, especialmente los convertidores basados en electrónica de potencia, operen de manera apropiada, teniendo en cuenta sus especificaciones de diseño; así como también verificar que las fluctuaciones de tensión causadas por los arranques y paradas de trenes, no superen los límites de compatibilidad electromagnética. Referentes de estos estudios son los propuestos por Ríos y Ramos (2017), donde se plantea un modelo para analizar la demanda de energía de los sistemas de transporte eléctrico calculando la potencia instantánea de los Sistemas de Transporte Ferroviario Masivo Eléctrico como un metro, tren ligero o tranvía, tomando en cuenta parámetros de la planificación operativa, así como características de dinámicas de los vehículos, entre otros factores que permiten simular las características físicas y eléctricas de estos sistemas.

Este trabajo trata el análisis de consumo de energía eléctrica de un sistema de transporte público de pasajeros, teniendo en cuenta que el comportamiento y las relaciones causa efecto entre los factores y las variables alrededor del consumo de energía, la demanda de pasajeros y la oferta del servicio de transporte para determinar la capacidad de la infraestructura de suministro de energía en el mediano y largo plazo. Prever estas implicaciones, permite la definición de escenarios como apoyo a la toma de decisiones con respecto a la planeación e inversión de la infraestructura de alimentación eléctrica y la operación, que garanticen una prestación del servicio de transporte acorde a las necesidades de la región, así como a los intereses estratégicos de la organización y de sus socios.

Disponer de un modelo matemático que considere los factores anteriormente mencionados y que permita analizar la dinámica del sistema a un nivel de abstracción alto, el consumo de energía bajo ciertas condiciones operativas, es sin lugar a duda un mecanismo eficaz de optimización y control de los procesos, de un sistema de transporte público de pasajeros alimentado con energía eléctrica, como es el caso de la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá (ETMVA) que motiva este trabajo. También es una herramienta para negociar contratos de compra de energía de mediano o largo plazo.

Borshchv y Filippov (2005), hacen una relación comparativa de los principales paradigmas de la modelación y la simulación: simulación Discreta o Basada en Eventos (DE), simulación Continua o Dinámica de Sistemas (DS), simulación Basada en Agentes (BA) y simulación para Sistemas Dinámicos (SD). Cada uno de estos paradigmas tiene una finalidad específica en relación con el tipo de problema a resolver, lo cual, permite clasificarlos en un nivel de abstracción bajo, medio o alto. Borshchv y Filippov (2005) definen que, el paradigma más adecuado para la construcción de un modelo de simulación estará relacionado con el grado de complejidad del sistema que se requiere modelar. Teniendo en cuenta que el sistema de transporte público de pasajeros está compuesto por un conjunto de elementos que interactúan con relación al cumplimiento de un propósito en común y que en la dinámica funcional de cada elemento se genera una consecuencia sobre

los demás en el corto, mediano y largo plazo, se puede definir que este sistema tiene una complejidad dinámica como lo establece Sterman (2000), por lo cual, se plantea aplicar un modelo con un nivel de abstracción alto. La modelación basada en agentes, a pesar de ser utilizada para otros casos de simulación del transporte público, como es el caso del modelo desarrollado por Callejas-Cuervo et al. (2014) para medir la calidad del servicio, no es útil para la modelación propuesta, debido a que se caracteriza por comprender varios agentes que son en mayor o menor grado, autónomos, heterogéneos e independientes, cada uno con sus propias metas y objetivos, sin permitir representar los bucles de realimentación a diferencia de la dinámica de sistemas (Izquierdo et al., 2008). Lo anterior, permite definir que la modelación y simulación de este caso de estudio se realice bajo el paradigma de la Dinámica de Sistemas.

Forrester (1961) definió la dinámica industrial como una forma de orientar el estudio de los sistemas industriales, que persigue mostrar cómo las políticas, decisiones, la estructura y las demoras se interrelacionan para influir en el desarrollo y estabilidad de los mismos. Así mismo, Forrester en 1972, establece que la dinámica de sistemas puede estudiar los ciclos de información característicos de actividades industriales que muestran la estructura de la organización, la amplificación y efecto de las políticas, los retardos de tiempo en la toma de decisiones, ejecución y efecto de las acciones, las cuales interactúan en los hechos de la empresa. La dinámica de sistemas ha permitido modelar diferentes estudios del comportamiento de sistemas de transporte, para analizar diversas variables de interés, como pueden ser parámetros operativos y reinversiones del sistema, simulando las variables que condicionan el comportamiento del sistema (Orozco y Arenas, 2013), como pueden ser las variables socioeconómicas de la población, el transporte de pasajeros y sus efectos en el medio ambiente por el consumo de energía, como fue propuesto por Khanna (1985), de igual manera se ha utilizada para evaluar la calidad del servicio de transporte en una sistema social complejo de acuerdo al trabajo realizado por Callejas-Cuervo et al., (2013).

De esta forma, se han ido realizando diferentes estudios que integran cada vez nuevos elementos, como la planeación gubernamental, las técnicas de gestión de demanda del transporte y la capacidad de sistema físico instalado, de acuerdo al estudio de Membrillo y García (1997), así como el de Raux (2003) en el que propone un modelo que evalúa su auto-sostenibilidad con base en políticas tarifarias y de operación logística. También se han tenido en cuenta modelos que evalúan los efectos de las decisiones de los usuarios acerca de la modalidad de transporte a utilizar (Duarte, 2011). En otros trabajos de investigación se han desarrollado modelos dinámicos que tienen como objetivo la planificación del transporte con respecto al uso del suelo, donde se pretende satisfacer el desarrollo sostenible de un sistema de transporte urbano (Guzmán, 2011), buscado maximizar el bienestar social con respecto al uso del suelo, a diferencia de esta investigación, en la cual se plantea modelar la articulación de diferentes modos de transporte, que permita evaluar su sostenibilidad, aprovechado sinergias en estructuras tecnológicas comunes, como es el caso de la red de alimentación eléctrica del sistema de transporte multimodal que opera la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá.

A nivel nacional se han adelantado otros estudios relacionados con simulaciones de transporte a partir de la dinámica de sistemas, como es el caso del modelo realizado para analizar el comportamiento del transporte público colectivo de la ciudad de Bogotá (Duarte, 2011), para analizar las variables de flujo de recursos financieros, flujo de usuarios y flujo de la flota vehicular, de igual manera, se ha utilizado la dinámica de sistemas con el objetivo analizar el comportamiento de los parámetros operativos y la reinversión en un sistema de transporte masivo, en relación con su desarrollo e incremento de su demanda (Orozco y Arenas, 2013) y en otros enfoques, para identificar los actores, restricciones, recursos, indicadores, medios tecnológicos y variables que integran la estructura de este tipo de sistemas de transporte (Moscoso et al., 2011).

CASO DE ESTUDIO SISTEMA DE TRANSPORTE DE PÚBLICO DE PASAJEROS EN MEDELLIN

En la ciudad de Medellín se ha logrado estructurar un sistema de transporte masivo único en el país, al contar con una tecnología tipo Metro que es el eje estructurante de una red de transporte multimodal integrada de forma física, operativa y tarifaria, denominada Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá (SITVA) por la autoridad regional ambiental y de transporte (Área Metropolitana del Valle de Aburrá-AMVA). Del SITVA hacen parte las tecnologías de transporte tipo: Metro, autobuses de tránsito rápido (BRT), cables aéreos, tranvía, autobuses alimentadores y bicicletas públicas. La red de transporte multimodal, que es operada por la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá (ETMVA) – Metro de Medellín Ltda, debe estar articulada con las soluciones de movilidad de corto, mediano y largo plazo que se incorporen en la región. Es por esta razón que la ETMVA incorpora dentro de su direccionamiento estratégico un plan de expansión de esta red, con nuevas líneas de transporte de tranvías, cables aéreos, sistemas de autobuses de tránsito rápido y otras tecnologías, para incrementar la oferta de transporte público sostenible e integrado en el Valle de Aburrá, privilegiando alternativas modales basadas en tecnologías de tracción eléctrica. La tabla 1 presenta las características de cada una de las líneas que componen la red de la ETMVA.

Tabla 1: Líneas integradas de la ETMVA

Línea	Tecnología	Longitud (km)	Nº Vehículos	Intervalo de operación	Oferta Pasajeros/hora Sentido	Consumo estimado de energía (kWh/km-Veh)
A	Metro	25.6	168 coches	3.5 minutos	37,000	9.18
B	Metro	5.5	18 coches	4.5 minutos	13,000	9.18
K	Metrocable	2.07	93 cabinas	14 segundos	2,700	0.38
J	Metrocable	2.7	115 cabinas	14 segundos	2,900	0.29
L	Metrocable	4.6	55 cabinas	22 segundos	2,000	0.22
H	Metrocable	1.4	42 cabinas	16 segundos	1,100	0.38
T-A	Tranvía	4.3	12	5.5 minutos	5,500	6.1
1	Autobuses (BRT)	12.5	30	3 minutos	3,600	7.86
2	Autobuses	13.5	42	3.5 minutos	2,500	7.86

Los datos estimados de consumo de energía (kWh/km-Veh) han sido calculados a partir de registros históricos en cada línea operada por la ETMVA, y validados con herramientas especializadas como el Open Track y Open Power Net. En el caso de las líneas 1 y 2 de autobuses, que operan en la actualidad con gas natural, se establece un consumo equivalente en kWh, a partir del consumo gas por vehículo (0.76 m³/km), revelando que requieren 3.5 veces más energía que los trolebuses eléctricos (160 pasajeros) que operan en Quito, e incluso, consumen más que los trenes del tranvía de Ayacucho (300 pasajeros). Eficiencia energética es una de las razones para contemplar trolebuses modernos y tranvías en las líneas futuras.

La figura 1 representa el comportamiento histórico del consumo de energía de la ETMVA, relacionada con el incremento de demanda de pasajeros y la incorporación de los modos que se han integrado al sistema. Tanto la demanda de energía como la de pasajeros (pax) transportados están tomados sobre la base diaria de un Día Típico Laboral (DTL).

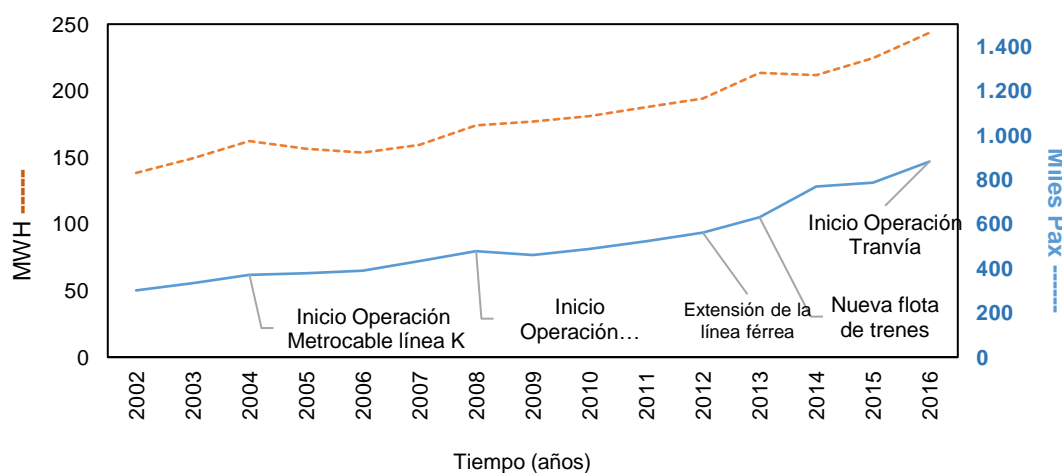


Fig. 1: Consumo de energía –vs– Demanda Día Típico Laboral (DTL) de la ETMVA

MODELACIÓN CON DINAMICA DE SISTEMAS

Este estudio se ha desarrollado teniendo en cuenta las siguientes fases propuestas por Sterman (2000), para el proceso de modelación y simulación: 1. Definición de la hipótesis dinámica del modelo; 2. Formulación para la simulación del modelo; 3. Validación; 4. Políticas y escenarios de evaluación.

Hipótesis dinámica

El arquetipo de límites del crecimiento (Braun, 2002), permite revelar el comportamiento de este sistema para el planteamiento de la hipótesis dinámica, definiendo que un proceso de refuerzo de la aceleración del crecimiento (o expansión), se encontrará con un proceso de equilibrio de acuerdo a los límites de la capacidad del sistema (Braun, 2002), por lo tanto, la hipótesis plantea que continuos esfuerzos producirán rendimientos decrecientes cuando se acerca a los límites de la capacidad del sistema. Para este modelo, el esfuerzo está asociado al crecimiento de la red de transporte en relación con los planes de expansión de la red del sistema, lo cual le permitirá tener una mayor cobertura y generación de demanda del sistema y el límite está vinculado

por la capacidad de sus recursos energéticos que le permitan soportar este crecimiento, manteniendo los estándares de calidad en relación con la oferta del servicio de transporte. El problema que permite modelar este arquetipo está asociado con la planificación en relación con los límites. Si la planificación desconoce esta condición, se está planeando el éxito en el corto plazo, con las consecuencias para el fracaso en el largo plazo. Este modelo permite anticipar problemas futuros para gestionarlos antes de que se conviertan en una amenaza (Braun, 2002).

Para analizar el comportamiento del sistema, asociado a esta hipótesis dinámica, se definen las variables asociadas a la prestación del servicio de transporte con relación a la capacidad de su infraestructura eléctrica, clasificándolas en endógenas y exógenas al sistema, tal y como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Definición de variables endógenas y exógenas en el sistema.

<i>Variable</i>	<i>Tipo de variable</i>	<i>Medida</i>
<i>Variables operativas</i>		
Planificación de la oferta	Endógena	Nº de servicios de despachos programados
Sincronización de consumo de energía entre líneas de transporte integradas	Endógena	Agregación de carga de energía* Tecnología de transporte incorporada. Factor de simultaneidad
Demanda de pasajeros	Exógena	Nº de pasajeros que usan el sistema de transporte
Agregación de demanda de pasajeros	Endógena	Agregación de pasajeros* Tecnología de transporte incorporada
Capacidad de carga de pasajeros por líneas de transporte	Endógena	Nº de pasajeros máximo que pueden transportarse* línea
Capacidad de oferta de vehículos (despachos e intervalos)	Endógena	Nº de servicios máximo en función del intervalo mínimo que permite la línea la tecnología de transporte
Afectaciones del servicio (retardos)	Endógena	Desviaciones del cumplimiento de los servicios planificados
Calidad de tráfico	Endógena	Índice porcentual del cumplimiento de la oferta planificada en función de las afectaciones del servicio (atrasos y servicios cancelados)
<i>Variables de la infraestructura eléctrica en generación, transmisión, distribución y consumo</i>		
Fallas de la red	Endógena	Nº de fallas que se presentan en la infraestructura
Disponibilidad de la red	Endógena	Tiempo funcional de uso para operación de la infraestructura
Confiabilidad de la red	Endógena	Capacidad de respuesta funcional para uso operacional de la infraestructura sin la generación de fallos
Capacidad de carga de la red	Endógena	Medida con el factor de demanda en un periodo de integración de 10 min
Rutinas de mantenimiento preventivo y correctivo	Endógena	Nº de rutinas de mantenimiento que se generan para mantener las condiciones de disponibilidad y confiabilidad de la infraestructura
Disponibilidad de personal de mantenimiento	Endógena	Nº de personas para atender las rutinas de mantenimiento
Compatibilidad entre las tecnologías de las líneas de transporte	Exógena	Posibilidad de interconexión de tecnologías desde la infraestructura eléctrica
<i>Variables estratégicas</i>		
Plan de expansión y aumento de capacidad del sistema de transporte	Exógena	Proyectos de expansión con la incorporación de tecnologías de transporte y aumento de oferta de servicios con la adquisición de vehículos
Externalidades de mejoramiento del servicio y de expansión del sistema	Exógena	Cantidad de reducción de emisión CO2 como aporte a la calidad del aire con la utilización de transporte limpio Reducción de emisiones de sustancias que afectan la calidad del aire PM 10, PM 2,5, NOX, etc
Uso eficiente del consumo de energía	Endógena	Ahorros energéticos a partir de la gestión operacional en la prestación del servicio
Tarifa de energía	Exógena	Tarifa de energía del mercado
Implementación de tecnologías de usos eficientes de energía	Endógena	Medidas generadas de I+D+i para la generación de ahorros y minimización de inversiones

El Diagrama causal, que relaciona estas variables, permite identificar cuatro ciclos reforzadores y 8 compensadores, como se presenta en la figura 2. Los ciclos R1 y R2, representan como la agregación de nueva demanda, generada a partir de los planes de expansión, produce un incremento de la oferta del servicio, que exige un mayor nivel en la calidad del cumplimiento del mismo, representado en puntualidad, rapidez y confort de lo ofertado. La satisfacción con respecto a la calidad del servicio generará una posible necesidad de ampliar la cobertura para los usuarios potenciales que provengan de otros medios de transporte.

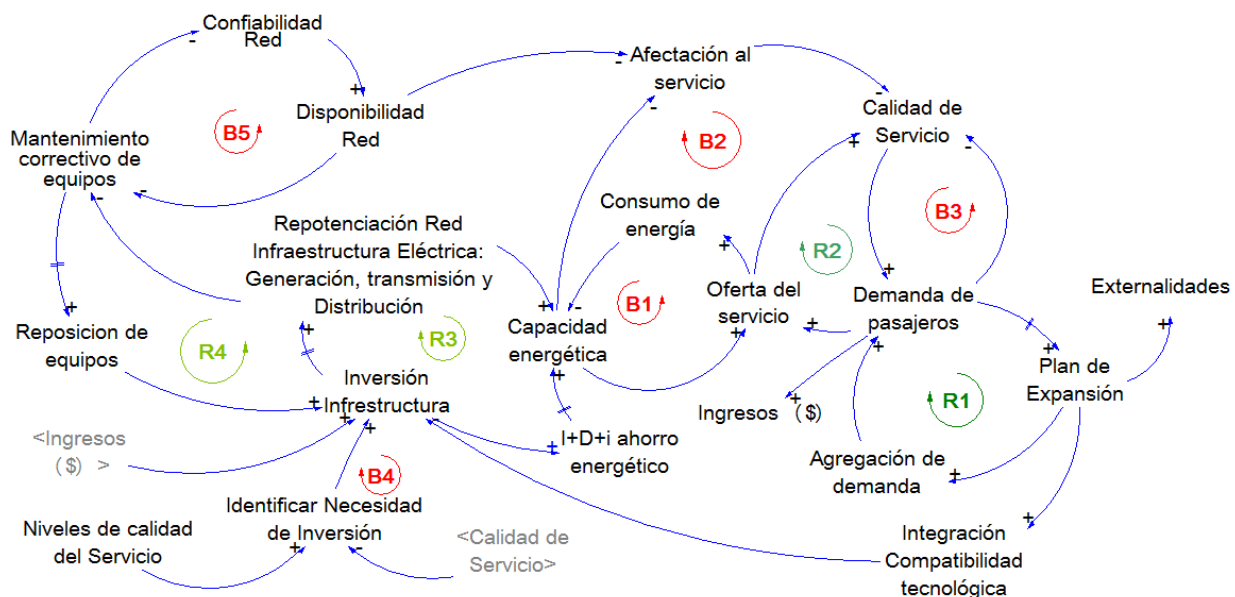


Fig. 2: Diagrama causal

El ciclo compensador B1 representa la restricción de capacidad del recurso energético, asociado a las características de la red de la infraestructura eléctrica, lo que conlleva al arquetipo de “Limite de crecimiento”. Así mismo se puede observar en la figura 2, como el ciclo reforzador R1 hace parte de la generación de pasajeros en relación con la agregación de demanda que proviene de las políticas del plan de expansión. Esto tiene una repercusión en la disminución de la calidad del servicio, cuando las condiciones de la oferta del servicio se mantienen con los mismos recursos técnicos y operacionales, como representa el ciclo compensador B3 y B2. El ciclo compensador B4 conlleva a identificar la necesidad de inversión para incrementar los niveles de capacidad de los recursos energéticos, para garantizar una oferta que satisfaga las demandas de pasajeros.

El ciclo reforzador R4, representa la condición de mantenibilidad de la red de la infraestructura eléctrica, la cual, al ser más exigida sin contar con una repotenciación que soporte las nuevas exigencias de demanda energética, conllevará a un incremento en los mantenimientos para mantener la confiabilidad y disponibilidad de la red de suministro de energía, para no afectar la prestación del servicio de transporte, como lo indica el ciclo compensador B3 y B4. Esta condición conlleva en el tiempo a realizar una inversión en la reposición de los equipos que hayan acelerado su desgaste de vida útil. El ciclo reforzador R3, permite identificar como las inversiones en I+D+i, puede conllevar a la implementación de medidas tecnológicas y operativas, para incrementar la eficiencia energética, liberando capacidad para las nuevas demandas, sin que tengan que hacerse grandes inversiones en la repotenciación de la red de infraestructura eléctrica. Para el caso de estudio, el sistema se ha subdividido en dos (2) subsistemas:

Subsistema Prestación del Servicio: representa la dinámica del comportamiento de la oferta del servicio, que busca satisfacer la demanda de usuarios que utilizan el sistema de transporte masivo, esta dinámica se encuentra relacionada con las capacidades de flota (vehículos) por cada una de las líneas que componen el sistema y los intervalos entre despachos que se planifiquen desde la gestión operativa. Esta dinámica es relevante en las condiciones de la calidad del servicio que se preste, pues debe responder a una nueva demanda agregada por la inclusión de nuevos corredores de transporte, así como a la demanda cautiva que crece acorde al crecimiento vegetativo de la población. La calidad de la prestación del servicio puede conllevar a la atracción de nuevos usuarios, especialmente a los del sector poblacional que utiliza el vehículo particular entre carros y motos, que representa el 25,7% de la movilidad del Valle de Aburrá, de acuerdo con la encuesta de movilidad del 2012 realizada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Así mismo, la calidad del servicio también puede conllevar a la fuga de la demanda cautiva, o a la no incorporación de nueva demanda, cuando ésta no cumple con las necesidades y requerimientos de los usuarios, con relación al confort, la puntualidad y la rapidez.

Subsistema Infraestructura Eléctrica: contiene la dinámica del comportamiento de la red infraestructura eléctrica con relación a la variación de carga, por el incremento de usuarios y la integración de nuevas líneas de transporte, que se interconectan con la red de suministro de energía. Esta dinámica, está relacionada con las capacidades de cada uno de los grandes componentes de la cadena de suministro de energía: generación, transmisión y distribución, y los efectos que sobre los mismos representan las demandas máximas. Esta dinámica permite estimar las pérdidas por confiabilidad y calidad en el suministro de energía, así como la aceleración de la pérdida de vida útil de los equipos que componen la infraestructura, lo que representará restricciones en la capacidad oferta del servicio, o costos de reposición.

Formulación para la simulación del modelo

Elaboración del diagrama de flujos y niveles (Diagrama de Forrester): Este diagrama representa un conjunto de ecuaciones de estado que describen el comportamiento de un sistema dinámico. Dadas unas condiciones iniciales especificadas y unos parámetros de comportamiento supuestos, el modelo sigue los cambios en las variables claves a través del tiempo, y permite ver las implicaciones dinámicas de estos supuestos (Ruth y Hannon, 1997). Matemáticamente, la estructura base de un modelo formal de simulación dinámica, representado en espacio de estados, consiste en un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, no lineales:

$$\frac{d}{dt}x(t) = f(x, p) \quad (1)$$

Donde x es un vector de variables de estado, llamados niveles (stocks) en DS, p un conjunto de parámetros y f es una función vectorial no lineal (Richardson, 1991). La simulación numérica de estos sistemas se logra mediante la partición del tiempo de simulación en intervalos de tiempo discreto de longitud fija Δt . El modelo del sistema está representado por los diagramas de flujos y niveles del subsistema de prestación del servicio y el subsistema de infraestructura eléctrica como puede observarse en la figura 3.

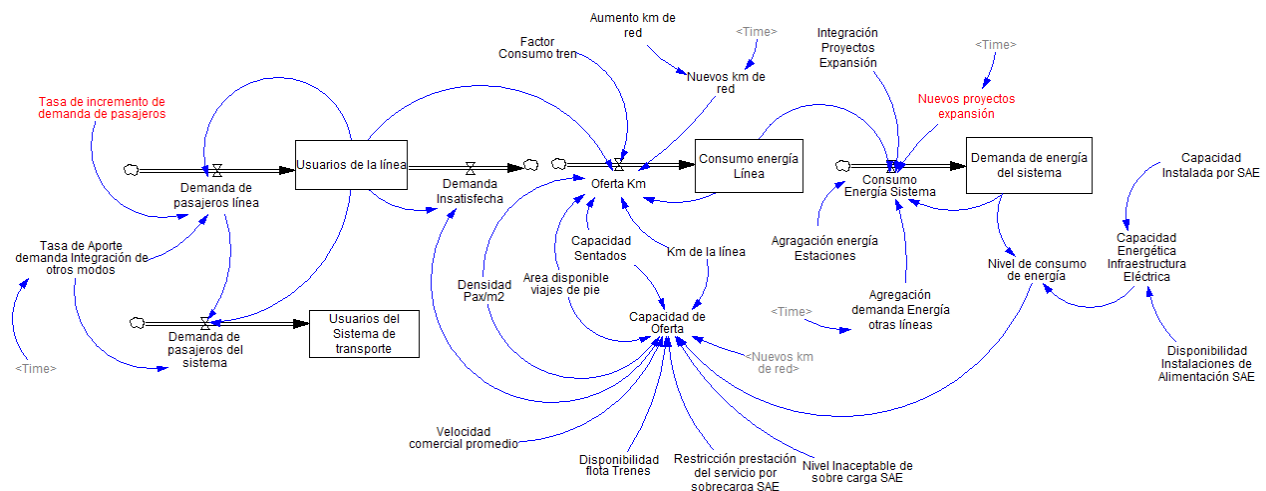


Fig. 3: Diagrama de flujos y niveles del Subsistema Prestación del servicio y subsistema de Infraestructura Eléctrica

Las siguientes formulaciones relacionan las variables del modelo:

$$Co = d \left(\left(\frac{Vc * Df}{2 * Ll} \right) * (Cs + A * d) * Rs \right) / dt \quad (2)$$

Donde Co corresponde a la capacidad de oferta, Vc es la velocidad comercial promedio, Df es la disponibilidad de flota en número de vehículos, Ll es la longitud de la línea, Cs es la capacidad de pasajeros sentados por vehículo, A es el área disponible pasajeros de pie vehículo, d es la densidad de pasajeros por metro cuadrado al que se desea transportarlos y Rs es la restricción de flota por sobrecarga de la red de infraestructura eléctrica.

$$Ce = d(Ci * Di) / dt \quad (3)$$

Donde Ce corresponde a la capacidad energética de la infraestructura eléctrica, Ci es la capacidad instalada por cada subestación de alimentación (SAE), Di es la disponibilidad de las instalaciones de SAE para los análisis de operación en N-1 por contingencia.

$$De = d \left(\left(\frac{Us}{(Cs + A * d)} \right) * Nv * Ll * Fc + Ag + Prj + Ee \right) / dt \quad (4)$$

Donde De corresponde a la demanda de energía del sistema, Us es la demanda de pasajeros, Cs es la capacidad de pasajeros sentados en vehículo, A es el área disponible de pasajeros de pie en vehículo, d es la densidad de pasajeros por metro cuadrado al que se desea transportarlos, Nv es la composición de vehículos (2: conformación doble, 1: conformación simple), Ll es la longitud de la línea, Fc es el factor de consumo de energía de la tecnología de transporte en $kWh/km-veh$, Ag es la demanda energética agregada de otras líneas comerciales que se integran a la red del sistema, Prj es la demanda energética agregada por los proyectos de expansión planificados y Ee es la demanda energética agregada resultado del consumo en las estaciones del sistema de transporte.

$$Nc = d((De/Ce) * 100) / dt \quad (5)$$

Donde Nc corresponde al porcentaje de uso de la capacidad instalada de la infraestructura eléctrica, De es la demanda de energía del sistema y Ce es la capacidad energética instalada.

$$Dp = d(Ul * (tip + tai) * 100) / dt \quad (6)$$

Donde Dp corresponde a la demanda de pasajeros, Ul son los usuarios de la línea de transporte de mayor integración del sistema multimodal, Tip es la tasa de incremento de demanda de pasajeros en el tiempo (años) y Tai es la tasa de aporte demanda Integración de otros modos de transporte que hacen parte del sistema.

$$Di = d(Abs(Co - Dp)) / dt \quad (7)$$

Donde Di corresponde a la demanda de pasajeros insatisfecha del sistema al estar por encima de la capacidad de oferta, Co es la capacidad de oferta y Dp es la demanda de pasajeros.

La tabla 3 contiene los parámetros que fueron configurados para el caso de estudio en el diagrama de flujos y niveles del subsistema Prestación del Servicio y subsistema de Infraestructura Eléctrica.

Tabla 3: parámetros de configuración del modelo para el caso de estudio

Variable	Unidad	Valor
Velocidad comercial promedio	km/h	38
Tasa de incremento de demanda de pasajeros	pax/h Sentido año	0.045
Restricción prestación del servicio por sobrecarga SAE	%	0.8
Nivel Inaceptable de sobre carga SAE	"%"	150
Densidad Pax/m2	pax/m2	6
Capacidad pasajeros sentados	Und	148
Área de pasajeros de pie	m ²	123
Composición de vehículos	Und	2
Disponibilidad flota Trenes	N° Trenes	28
Disponibilidad Instalaciones de Alimentación SAE	Unidad	3
Factor Consumo tren	kWh/km-Tren	9.18
Km de la línea	Km	25
Capacidad Instalada por SAE	MW	31.5
Usuarios del Sistema de transporte	pax/h-sentido	35,000 – Para el año 2015

Validación del modelo

Para analizar la consistencia del modelo de simulación, se realiza una comparación de los resultados de las simulaciones con los datos de consumo histórico de energía, medidos en las tres Subestaciones de Alimentación eléctrica (S/E) de la red de media tensión que alimenta el sistema de la ETMVA: Zamora (ZAM), San Diego (SD), Envigado (ENV). El período de interés corresponde al de mayor demanda de pasajeros entre las 5:00 a.m. y 8:00 a.m. obteniéndose una buena correspondencia entre las tendencias simuladas y reales.

Se siguió el esquema propuesta por Barlas (1996) y Forrester y Senge (1980). En la figura 4 se observa el comportamiento histórico de la demanda de energía tanto el simulado como el real, así como el incremento de la demanda de pasajeros hora sentido (pax/h) del sistema de transporte público de la ETMVA.

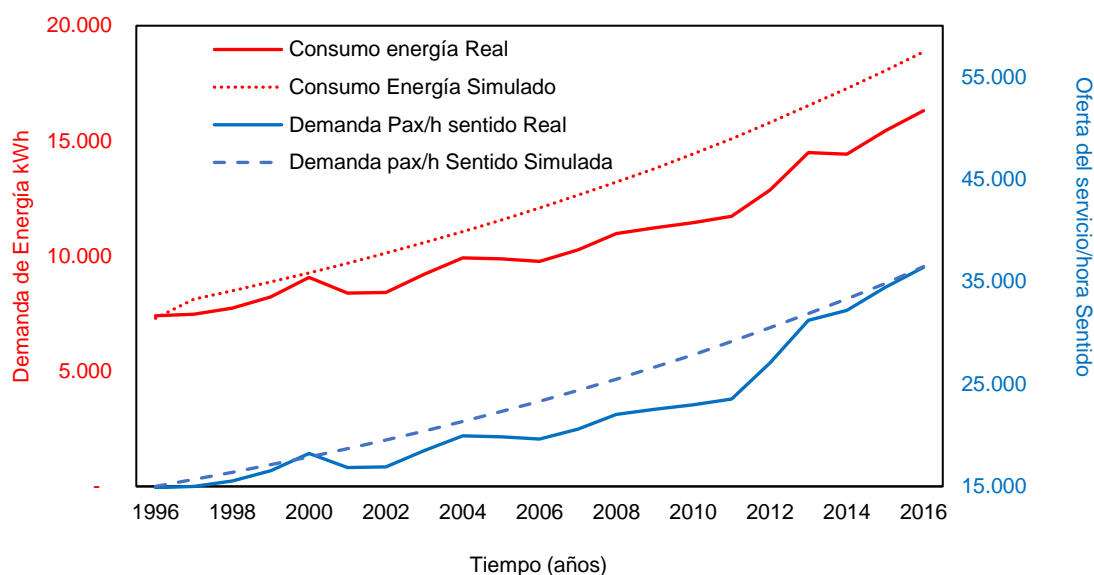


Fig. 4: Demanda de energía de las Subestaciones Alimentadoras (SA) en hora de mayor demanda para un Día Típico Laboral (DTL)

Políticas y escenarios de evaluación

Con la validez del modelo se plantean las políticas en relación a las modificaciones del sistema, incorporando el aumento de oferta del sistema en relación a la cantidad de flota que requiere el servicio, para analizar su efecto en la infraestructura eléctrica. Con el modelo se pueden realizar los análisis de sensibilidad requeridos para la toma de decisiones en la planeación de la infraestructura eléctrica de un sistema de transporte de pasajeros multimodal. La definición de los límites operativos para las subestaciones de tracción se basa en el estándar de diseño aplicable según EN 50328 de 2003, que para el caso del sistema Metro es la clase de servicio VI, la cual está definida para aplicaciones de líneas férreas principales, tránsito rápido masivo y sistemas de ferrocarril ligero. La clase de servicio VI exige soportar carga de 300% (respecto a capacidad nominal) durante un minuto, 150% durante dos horas y carga nominal de manera continua.

La definición de las políticas también debe considerar las condiciones de confiabilidad y disponibilidad de la red de la infraestructura eléctrica, para los casos de contingencias en los que se deba operar sin una de las Subestaciones de Alimentación eléctrica (SE), sin que se degrade la operación y la oferta del servicio de transporte, lo que se conoce como capacidad del sistema para operar con N-1. El límite de sobrecarga a nivel de Alimentación lo determina el transformador de potencia, que en este caso es en aceite, y deben cumplir los requerimientos IEC 60076-7:2005. Según esta norma, el transformador de alimentación está diseñado para soportar una sobrecarga del 50% de manera permanente.

Los escenarios para analizar el comportamiento del sistema en relación a la política de garantizar el cumplimiento de la norma IEC 60076-7:2005, teniendo en cuenta operaciones con N-1, se definen de la siguiente manera:

Escenario 1: Operación de una línea de transporte en sus condiciones actuales de disponibilidad de flota, para prestar un servicio de transporte ante una demanda creciente para una densidad de 6pax/m2.

Escenario 2: Incremento de vehículos (trenes) para una de las líneas de metro, para prestar un servicio de transporte ante una demanda creciente y una ampliación de distancia en cobertura de esta línea de transporte.

Escenario 3: Incorporación de nuevas líneas de transporte de pasajeros con tecnologías de tracción eléctrica, a la red de suministro de energía que alimenta el sistema de transporte público.

Para cada escenario, el consumo de energía está relacionado con la oferta que el sistema de transporte público esté en capacidad de brindar. Esta relación se puede observar en el modelo como la oferta en despachos a un intervalo requerido, el cual, es transformado en equivalente a kilómetros por vehículo, para

posteriormente estimar su consumo de energía eléctrica, que para el caso de estudio estará determinado para la tecnología Metro de 9,18 kWh/km-vehículo de acuerdo datos obtenidos de mediciones de consumo de energía eléctrica y a los registros kilómetros recorridos en la oferta del servicio de trenes de la línea de metro.

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La simulación se efectuó en el programa VENSIM-PLE, un paquete comercial de modelización que permite simular y analizar modelos de Dinámica de Sistemas. Esta simulación se define para un horizonte de tiempo hasta el año 2050, aplicada al caso de estudio para la ETMVA, así mismo la simulación sólo evalúa el comportamiento del sistema en el período de mayor demanda de pasajeros (Pax/hora), también denominada la hora pico. Los resultados del caso de estudio están referidos a los escenarios implementados con respecto a las características técnicas y operativas de la línea A de la ETMVA, definidas en la tabla 1, así como a sus requerimientos de demanda, por ser la línea de transporte público que compone el eje estructurante del sistema de transporte e integrador de las demás líneas de transporte, siendo mayor su demanda de pasajeros y su consumo de energía eléctrica. Cada uno de estos escenarios se analiza teniendo en cuenta la condición de confiabilidad de la red para operar con N-1 subestaciones de energía eléctrica, como estado de contingencia sin que se degrade la oferta del servicio.

Escenario 1: representa la condición actual del sistema y su capacidad de oferta del servicio (pax/hora sentido). Como puede observarse en la figura 5, esta capacidad es limitada en el tiempo por la cantidad de vehículos para la operación, lo que con lleva a no lograr satisfacer el incremento de la demanda de pasajeros a partir del año 2016, generándose una posible pérdida de atracción de demanda de otras alternativas de transporte público o privado. Este escenario permite evidenciar que la demanda energética, para las tres subestaciones de alimentación de la red de media tensión del sistema de la ETMVA, no alcanza a llegar al 30% de la capacidad nominal, medido con el factor de demanda energética, como se ilustra en la figura 6.

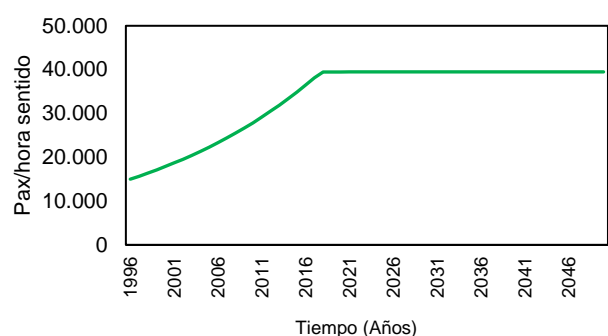


Fig. 5: Oferta del servicio de pasajeros: flota de 28 trenes

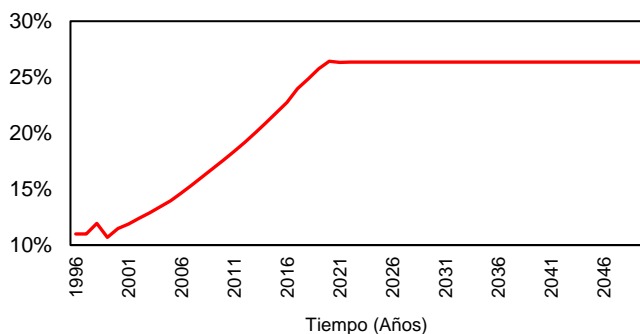


Fig. 6: Capacidad energética en uso SE

Escenario 2: en las figuras 7 y 8, puede apreciarse que el incremento de la flota de trenes en un 46%, aumenta en un 14% el uso de la capacidad nominal de las tres subestaciones de alimentación de energía eléctrica. Esta ampliación de flota permite aumentar la oferta del servicio requerida por el incremento de demanda de pasajeros.

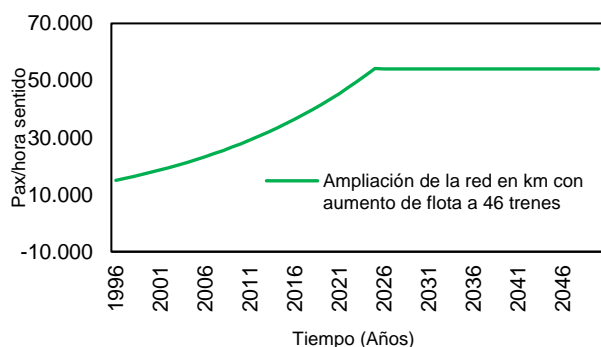


Fig. 7: Oferta del servicio de pasajeros: Ampliación de la línea en km con ampliación de flota a 46 trenes

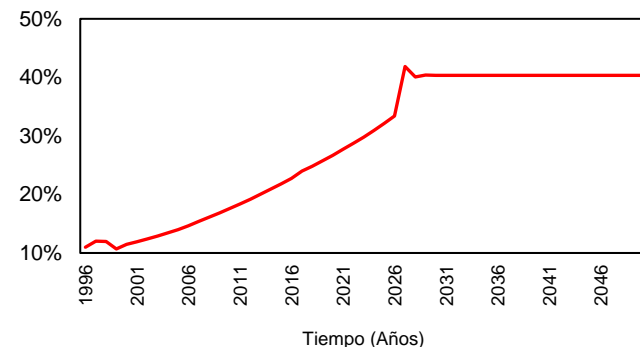


Fig. 8: Capacidad energética en uso SE

Escenario 3: Este escenario incorpora nuevas líneas de transporte, listadas en la tabla 4, las cuales están asociadas a diferentes tecnologías, cuyos factores de consumo de energía por kilómetro recorrido por cada vehículo (kwh/km – Vehículo), permite estimar la demanda de energía en relación con la capacidad de oferta

en la prestación del servicio para cada una de ellas. El resultado de este escenario, que puede apreciarse en la figura 9, permite evidenciar que, para una operación con 46 trenes en la línea principal de metro, con la incorporación de estas nuevas líneas se ha llegado al límite de la capacidad nominal de las subestaciones de alimentación de energía.

Tabla 4: Nuevas líneas de transporte a considerar en los planes de expansión de la ETMVA.

Cantidad de líneas	Tecnología	Factor de consumo energía (kWh/km-Vehículo)
8	Tranvía	4,5
2	Cable aéreo	0,38
12	Trolebús (18 metros)	2,23
1	Tren electrificado	8,95

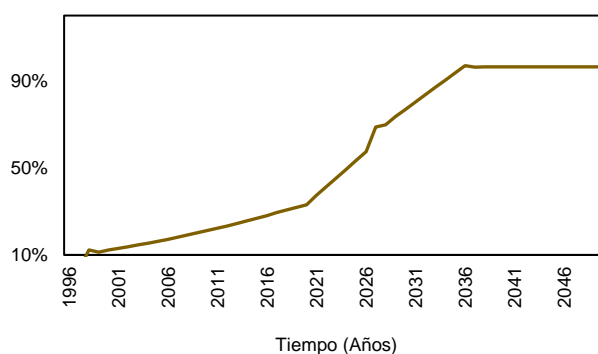


Fig. 9: Capacidad energética en uso: Ampliación de la línea en km con ampliación de flota a 46 trenes y proyectos de expansión

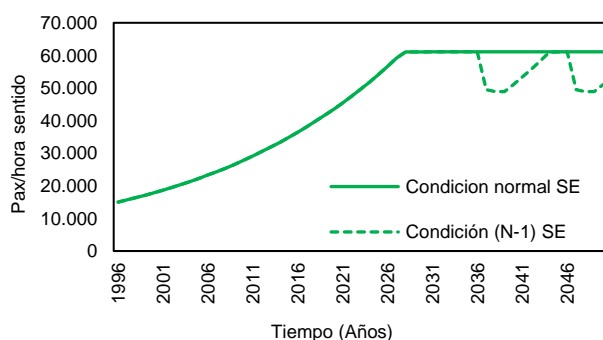


Fig. 10: Oferta del servicio de pasajeros: Proyectos de expansión y aumento de flota a 52 trenes

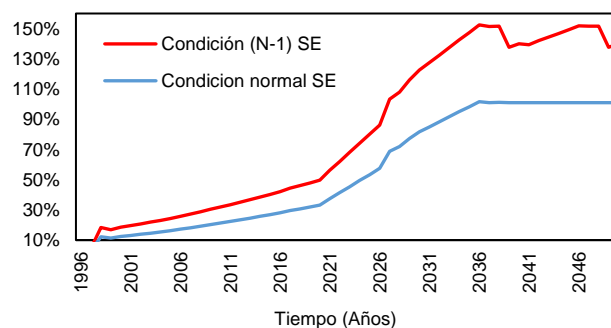


Fig. 11: Capacidad energética en uso SE

A pesar de que la operación en N-1 con 46 trenes no supera el 150%, acorde con la especificación de los transformadores de alimentación (con diseño según IEC 60076-7 de 2005), el incremento de la operación con una mayor cantidad de flota de trenes (52), supera el 150% de la capacidad nominal de las subestaciones que asumen la demanda, como se observa en la figura 11. Así mismo en la figura 10, puede apreciarse como esta condición restringe la oferta del servicio para evitar fallos por sobrecargas en los equipos de la red de suministro de energía que afecten la disponibilidad y confiabilidad de la red. Para las subestaciones de tracción, se verifica puntualmente cumplimiento de las especificaciones de diseño según EN 50328 de 2003, usando simulaciones detalladas con Open Track y Open Power Net.

DISCUSION FINAL

La planificación de los proyectos de nuevos corredores de transporte debe tener en cuenta que los esfuerzos de expansión tienen éxito en etapas iniciales, pero a medida que estos esfuerzos llegan a los límites del crecimiento, estos comienzan a perder efectividad y el rendimiento comienza a ser decreciente, afectando la capacidad de oferta del servicio de transporte. Mientras no se realicen intervenciones en la capacidad energética de la red y la incorporación de tecnologías eficientes para el consumo de energía, se tendrá

limitada la incorporación de nuevos proyectos, generando una afectación en las necesidades de movilidad. Las estrategias para implementar proyectos de expansión con recursos limitados, pero que requieren viabilidad financiera, pueden incorporar retardos o la no inversión en capacidad de la red de suministro de energía, y consecuentemente, generar límites en la capacidad de oferta, afectando la demanda esperada. Sin embargo, las estrategias de planeación de estos nuevos corredores pueden estar apoyadas por las eficiencias energéticas que se generen desde la Investigación y Desarrollo (I+D), para la incorporación de tecnologías y procesos eficientes que permiten ahorros en consumos de energía.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio presentado, a los resultados obtenidos y a la discusión sobre diversos aspectos del trabajo, se presentan las siguientes conclusiones:

- i) La capacidad energética de un sistema de transporte público al estar dimensionados para crecimientos futuros de las líneas existentes, pueden tener limitaciones para operaciones en N-1 al tratar de utilizarse para nuevos proyectos de expansión.
- ii) El consumo energético de un sistema de transporte está directamente relacionado con la oferta del servicio que este sistema puede brindar con relación a la cantidad de vehículos en operación. La eficiencia energética que permiten las tecnologías en relación Kwh/km-Vehículo puede permitir un mejor aprovechamiento de la capacidad de la infraestructura eléctrica instalada, y de los recursos energéticos como combustibles fósiles.
- iii) Desde la metodología de la dinámica de sistemas es posible analizar de forma sistémica los escenarios que permitan definir políticas para la toma de decisiones, en los procesos de planeación, teniendo en cuenta las capacidades y las complejidades que se deriva de las condiciones de la red de suministro de energía, con relación a la prestación del servicio de transporte, así como de su expansión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Ruta N por su apoyo mediante el proyecto titulado Redes Multimodales código 111C-2015 y con ello al equipo de trabajo de la Universidad Pontificia Bolivariana, entre ellos al Magister Diego Alejandro Munera Hoyos y a los ingenieros Melissa Rodríguez Mejía y Daniel Alberto Arroyave Molina, por todo el apoyo en el desarrollo del presente trabajo y por brindar la información requerida para el mismo.

REFERENCIAS

- Barlas, Y. Formal Aspects of Model Validity and Validation in System Dynamics. *System Dynamics Review*. 12(3), 183-210 (1996)
- Borshchv, A., Filippov, A. From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: reasons, techniques, tools (2005)
- Braun, W. The Systems Archetypes. Copyright © 2002 by William Braun (2002.02.27) [en línea]. Recuperado de: <https://goo.gl/v8DBwA>. Fecha último acceso: 09 de noviembre (2017)
- Callejas-Cuervo, M., Valero-Bustos, H. y Alarcón-Aldana, A. Agentes de Software como Herramienta para Medir la Calidad de Servicio Prestado en un Sistema de Transporte Público Colectivo Urbano, doi: 10.4067/S0718-07642014000500020, *Inf. Tecnol.*, 25(5), 147-154 (2014)
- Callejas-Cuervo, M., Valero, H. A. y Alarcón-Aldana, A. C. Simulation Based on System Dynamics for Evaluating the Quality of Transport Service in a Complex Social System. *Rev. Dyna*, (en línea), 80(180), 33-40 (2013)
- Chuquén, R.M., Mesías M.A., López, G.A., Restrepo, E.Q. Sistemas de Alimentación Eléctrica de Sistemas de Transporte Masivo Tipo Metro. *Revista Javeriana*, 13(2), 424-437 (2009)
- Forrester, J. W. *Industrial Dynamics*. The MIT PRESS, Institute of Technology, Cambridge Massachusetts (1961)
- Forrester, J.W. y Senge, P.M. Tests for Building Confidence in System Dynamics Models. In *System Dynamics*. Ed. A. A. Legasto, J. W. Forrester y J. M. Lyneis. Amsterdam: North-Holland (1980)
- Guzmán, L. Optimización Dinámica de Estrategias de Movilidad Sostenible en Áreas Metropolitanas. Universidad Politécnica de Madrid, España (2011)

- Izquierdo, L., Galán, M., Santos, I., Olmo, R. Modelado de Sistemas Complejos Mediante Simulación Basada en Agentes y Mediante Dinámica de Sistemas. *Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, 16, 85-112 (2008)
- Khanna, N. *System Dynamics in Urban Transportation Planning and Policy Analysis*. Proceedings, Keystone, CO USA, 453–462 (1985)
- Membrillo, J. y García, C. Vehicular Congestion in Mexico City: A Systems Perspective and Future Scenarios. *International Systems Dynamics Conference*, 2, 797–802 (1997)
- Moscoso, J., Perdomo, L., Perdomo, M. y Mayorga, O. Modelado de Sistemas de Transporte Masivo Empleando Dinámica de Sistemas: caso Transmilenio S.A. 9° Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, Comunidad Colombiana de Dinámica de Sistemas, Bogotá – Colombia. <https://goo.gl/dRpFtF>. [ISSN 2027-7709] 14 al 16 de septiembre del (2011)
- Orozco, J. y Arenas, F. Aproximación al Desarrollo de un Sistema de Transporte Masivo a Través de la Dinámica de Sistemas. *Revista S&T*, 11(24), 91–106 (2013)
- Raux, C. A Systems Dynamics Model for the Urban Travel System. AET. European Transport Conference 2003 – ETC 2003, 8 - 10 october 2003, Strasbourg, London, United Kingdom. AET, 32 p. (2003)
- Richardson, G. P. *System Dynamics: Simulation for Policy Analysis from a Feedback Perspective, Qualitative Simulation Modeling and Analysis*, Springer-Verlag New York, Inc., 144-169 (1991)
- Ríos, M.A. y Ramos, G. Power System Modelling for Urban Massive Transportation Systems. In *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*. InTech. (2012)
- Ruth, M. y Hannon, B. *Modeling Dynamic Economic Systems*, Springer Science + Business Media, LLC, Springer-Verlag New York (1997)
- Sterman, J. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Higher Education, USA, 982 p. (2000)

