

ROAD SIGNAL CONFIGURATION: AGENT-BASED SIMULATION TOOL

CONFIGURACIÓN DE SEÑALES VIALES: HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES

Ariadna C. M. Román¹✉, Maily M. Espino¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, La Habana, Cuba

✉ ariadnaclaudiam@gmail.com

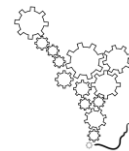
Recibido: 16 noviembre 2021 / Acepto: 15 diciembre 2021 / Publicado: 15 diciembre 2021

ABSTRACT. Poor traffic planning can bring with it countless negative effects such as collapses, traffic jams and accidents. To improve this situation, it is useful, before using configurations in traffic, to know the impact they will bring. In this way, it is possible to assess, with more confidence, whether the configuration will be functional or not. Agent-based simulation, due to its characteristics, provides advantages in terms of road network simulations. This work describes the proposal of an agent-based simulation tool that contributes to the process of configuring traffic controllers. The result is an intelligent agent-based simulation component capable of obtaining real road map data and simulating the behavior of public road users (vehicles). The proposed solution uses Cuban traffic laws as a typical case, however, the model is easily adaptable to any country.

Keywords: Intelligent Agents, Traffic Lights, Agent-Based Simulation, Traffic, Traffic Signs

ABSTRACTO. La mala planificación del tránsito puede traer consigo innumerables efectos negativos como los colapsos, embotellamientos y accidentes. Para mejorar esta situación es útil, antes de utilizar configuraciones en el tránsito, conocer el impacto que traerán consigo. De esta forma se puede valorar, con más confianza, si la configuración será funcional o no. La simulación basada en agentes, por sus características, aporta ventajas en cuanto a simulaciones de redes viales. El presente trabajo describe la propuesta de una herramienta de simulación basada en agentes que contribuye al proceso de configuración de controladores del tránsito. El resultado es un componente de simulación basada en agentes inteligentes capaz de obtener datos de mapas de carreteras reales y simular el comportamiento de los usuarios de la vía pública (vehículos). La propuesta de solución utiliza como caso típico las leyes de tránsito de Cuba, no obstante, el modelo es fácilmente adaptable a cualquier país.

Palabras clave: Agentes Inteligentes, Semáforos, Simulación Basada en Agentes, Tráfico, Señales de tránsito

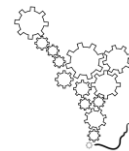


1 Introducción

En Cuba actualmente la colocación de semáforos en intersecciones de carreteras se realiza sin tener un previo conocimiento del impacto que tendrán. La instalación de estas señalizaciones supone para el país una inversión de recursos materiales y mano de obra que se desperdician si el resultado es contraproducente. Además, la mala configuración semafórica trae como consecuencia embotellamientos en las vías, accidentes y contaminación, y por supuesto pérdidas económicas. Un ejemplo de mala configuración semafórica se instanció en octubre de 2015, en la Rotonda de la Ciudad Deportiva, La Habana, Cuba (TRÁNSITO, 2015). El proyecto consistió en instalar un semáforo en cada uno de los accesos a la rotonda, regulando así la entrada a la misma. El impacto que tuvo esta reforma fue una congestión en las vías adyacentes por más de 25 minutos, automóviles atascados encima del paso a nivel ferroviario e interrupción en la entrada de un Hospital Clínico Quirúrgico. Conclusión, la Dirección Nacional de Tránsito indica retirar los semáforos en menos de 72 horas de su puesta en funcionamiento (REINALDO, 2015).

Las técnicas de simulación son utilizadas en la actualidad para imitar el desempeño de un determinado sistema y sirve para identificar y evaluar soluciones alternativas (LAW; KELTON, 1991). La Simulación Basada en Multi-Agente (MABS, *Multi-Agent Based Simulation*) se usa en un número creciente de ramas, entre las que se encuentra la Ingeniería de Tránsito. La simulación de redes viales posee una gran importancia ya que, con estas, se puede analizar el comportamiento del tráfico para configuraciones candidatas en los semáforos, obteniendo así datos estadísticos que apoyan la toma de decisiones (FRAGA, 2018).

En el mundo se han desarrollado otras herramientas que son utilizadas para resolver también el problema de la configuración de semáforos. En las últimas décadas, muchas agencias e investigadores planificadores del transporte han intentado mejorar los sistemas de señales desplegados. El simulador THE (FAROOQI; MUNIR; BAIG, 2011), implementado en Paquistán ofrece una solución al problema del tiempo excesivo de espera de los vehículos en intersecciones señalizadas; utiliza un algoritmo genético para optimizar el tiempo de luz verde de cada semáforo. A partir del trabajo propuesto en (CASTÁN; IBARRA; LARIA; GUZMÁN *et al.*, 2014) comienza a aparecer el uso de los agentes, donde se presenta el desarrollo de una metodología novedosa que permite incluir un modelo formal basado en agentes autónomos e inteligentes capaces de manipular las fases de los ciclos en una infraestructura de semáforos de



acuerdo a las limitaciones de la carretera. Otro simulador que centra su atención en fenómenos viales se presenta en (WEGENER; PIÓRKOWSKI; RAYA; HELLBRÜCK *et al.*, 2008). SUMO es un paquete de simulación de tráfico de código abierto diseñado para simular cómo se desarrolla una demanda de tráfico dada, que consiste en movimientos de vehículos a través de una red de carreteras predeterminada.

El objetivo del trabajo es presentar la propuesta de una herramienta para la configuración semafórica con un marco de trabajo de simulación basada en agentes, que puede ser aplicable fácilmente por la Dirección Nacional de Tránsito de Cuba y extensible para cualquier país.

2 Método

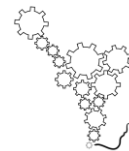
Para realizar la propuesta se hizo un análisis de los agentes inteligentes, la simulación basada en agentes y su potencialidad y se hizo además un estudio del fenómeno del tráfico en la actualidad, con especial énfasis en los factores que influyen en el comportamiento de los usuarios de la vía.

2.1 AGENTES INTELIGENTES

Según (WOOLRIDGE, 2009), no existe una definición aceptada de forma universal del término “agente”, y de hecho existe debate y controversia sobre este tema por la variedad de criterios. Una definición tomada de Wooldridge es: “Un agente es un sistema computacional situado en un entorno dado, que es capaz de actuar de forma autónoma para cumplir sus objetivos” (WOOLRIDGE, 2009).

2.1.1 Simulación Basada en Agentes

La Simulación Basada en Agentes (ABS, *Agent Based Simulation*) se refiere a una categoría de modelos computacionales que invocan acciones dinámicas, las reacciones y los protocolos de intercomunicación entre los agentes en un entorno compartido, para evaluar su diseño y rendimiento y obtener información sobre su comportamiento y propiedades emergentes. Desde el punto de vista de la simulación, la función de un componente individual puede variar desde reglas reactivas muy básicas hasta modelos de comportamiento cognitivos más sofisticados.



El objetivo de ABS es modelar sistemas complejos que adoptan un enfoque ascendente a partir de los agentes individuales (MOON, 2017). Un enfoque concreto de ABS es modelar y simular escenarios realistas con un grupo de agentes autogobernados, ya sea como entidades simples dentro de los fragmentos de códigos de cómputo o como objetos considerablemente inteligentes. Esto posiblemente se considere sinónimo de capacidades de resolución de problemas del ser humano con estados infinitos, creencias, confianzas, decisiones, acciones y respuestas. Adquirir el conocimiento adecuado del sistema para construir un modelo conceptual y lógico apropiado es una de las tareas más desafiantes de la simulación (ABAR; THEODOROPOULOS; LEMARINIER; O'HARE, 2017).

2.1.2 MASON

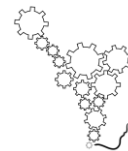
MASON (Stands for Multi-Agent Simulator Of Neighborhoods... or Networks... or something...) es una plataforma de simulación basada en agentes, de eventos rápidos y discretos, diseñado para ser la base de grandes simulaciones en el lenguaje de programación, y también para proporcionar funcionalidad más que suficiente para muchas necesidades de simulación de peso ligero. Contiene una biblioteca de modelos y un conjunto opcional de herramientas de visualización en 2D y 3D (LUKE, 2017). Como parte de la integración con GIS, MASON cuenta con una extensión opcional llamada GeoMason la cual añade soporte para datos geoespaciales y se publica bajo la Licencia Libre Académica (COLLETI, 2013).

Las principales características por las que se escogió MASON son:

- a) Posibilidad de trabajo con GIS,
- b) Licencia de Academia Libre,
- c) Soporte para usuarios con tutoriales, documentación, listas de correo y ejemplos,
- d) Rápido, portátil y computacionalmente poco costoso,
- e) Los modelos son independientes y pueden ejecutarse dentro de otras plataformas y aplicaciones (LUKE, 2017).

2.2 EL FENÓMENO DEL TRÁNSITO

A partir del siglo XX el transporte se ha convertido en una parte fundamental de la vida ciudadana. Como resultado de ello, se han incrementado de manera considerable el número de usuarios que transitan por las vías en vehículos de cualquier tipo. Con este aumento, se



incrementa también lamentablemente, el número de efectos negativos, como son los embotellamientos, colapsos, contaminación y accidentes. Una de las causas que agrava esta situación es la mala configuración de controladores del tráfico.

2.2.1 Consecuencias de la mala configuración de las señales

Las malas configuraciones del tráfico son aquellas que, lejos de organizar el transporte, lo obstaculizan. Cuando se pone en funcionamiento una mala configuración de señales en cierta intersección de carreteras, las afectaciones ocurrientes son proporcionales a la demanda de vehículos que la misma tenga. Esta situación puede ocasionar embotellamientos o colapsos del tránsito, aglomeraciones excesivas de vehículos en espera por la luz del semáforo o por otros vehículos. Una característica típica en los embotellamientos es que los vehículos avanzan con muy baja velocidad y con frecuentes paradas, esto implica que los motores funcionen mucho más y, por lo tanto, generen más gases contaminantes que acaban en la atmósfera, contaminan el medio ambiente y fortalecen el cada vez más preocupante, calentamiento global.

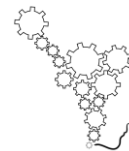
Por otra parte, están los accidentes. Según la Organización Panamericana de la Salud, OPS el 11% de los accidentes de tránsito del mundo ocurren en la región de las Américas, dejando casi 155 mil muertes al año (ORGANIZATION, 2018). De todos los accidentes que ocurren anualmente, una gran parte están relacionados con la desobediencia de los conductores respecto a los semáforos. Esta desobediencia, aunque no justificada, se debe a la prolongada espera de los vehículos cuando el semáforo está en rojo, o por ser muy corto el tiempo de la luz verde.

2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO VIAL

El comportamiento de los vehículos en la vía está condicionado por varios factores que se pueden clasificar en tres tipos: del vehículo, humanos y externos. Teniendo en cuenta todos estos factores se garantiza que la simulación brindará resultados fiables y semejantes a los de la vía real.

2.3.1 Factor Humano: Adelantar carril

Los adelantamientos de carril ocurren cuando un vehículo decide posicionarse delante de los vehículos que lo anteceden por la misma senda donde transita. Esta maniobra debe realizarse



cumpliendo con lo establecido en las leyes del tránsito vigentes. Suele suceder cuando el conductor desea llegar rápido a su destino y los vehículos anteriores van a un menor ritmo o bien porque los vehículos anteriores van muy despacio y estorban su paso (LEÓN, 2016).

2.3.2 Factor externo: Condiciones ambientales

Con la lluvia las condiciones de visibilidad disminuyen, los parabrisas se empañan internamente y dificulta la detección de vehículos y personas en la vía. La visibilidad de los conductores también puede verse afectada por la humedad y la neblina. Así mismo, los neumáticos pierden adherencia y la rueda tiende a patinar sobre el agua con poco contacto al pavimento. Ante altos grados de temperatura, que se reflejan aún más cálidos en el interior de los vehículos, los conductores manifiestan conductas de desesperación por arribar a su destino, desobedeciendo sobre la marcha las señales de tráfico que se les interpongan, y como es de suponer también aumentan su velocidad, siendo así más propensos a provocar o sufrir accidentes.

2.3.3 Factor Vehículo: Características y estado técnico

Las características de cada vehículo tienen mucho que decir sobre las probabilidades que tenga el mismo de colisionar. Un estudio realizado en la Universidad de Monash (NEWSTEAD, 2007) establece una variación de la peligrosidad de los vehículos según su color y el momento del día. Además del color, el peso del vehículo, su tipo de carrocería y el uso que se le da también son factores determinantes en su comportamiento en la vía, y es diferente el impacto que tienen en un accidente. Otra cuestión a tener en cuenta es el estado técnico que presenten los mismos. Aspectos mecánicos como el fallo en los frenos, en la dirección, en la suspensión, falta de mantenimiento, exceso de carga, modificaciones inadecuadas o sobredimensionamiento del vehículo pueden ser motivo de desperfectos sobre la marcha.

3 Resultados

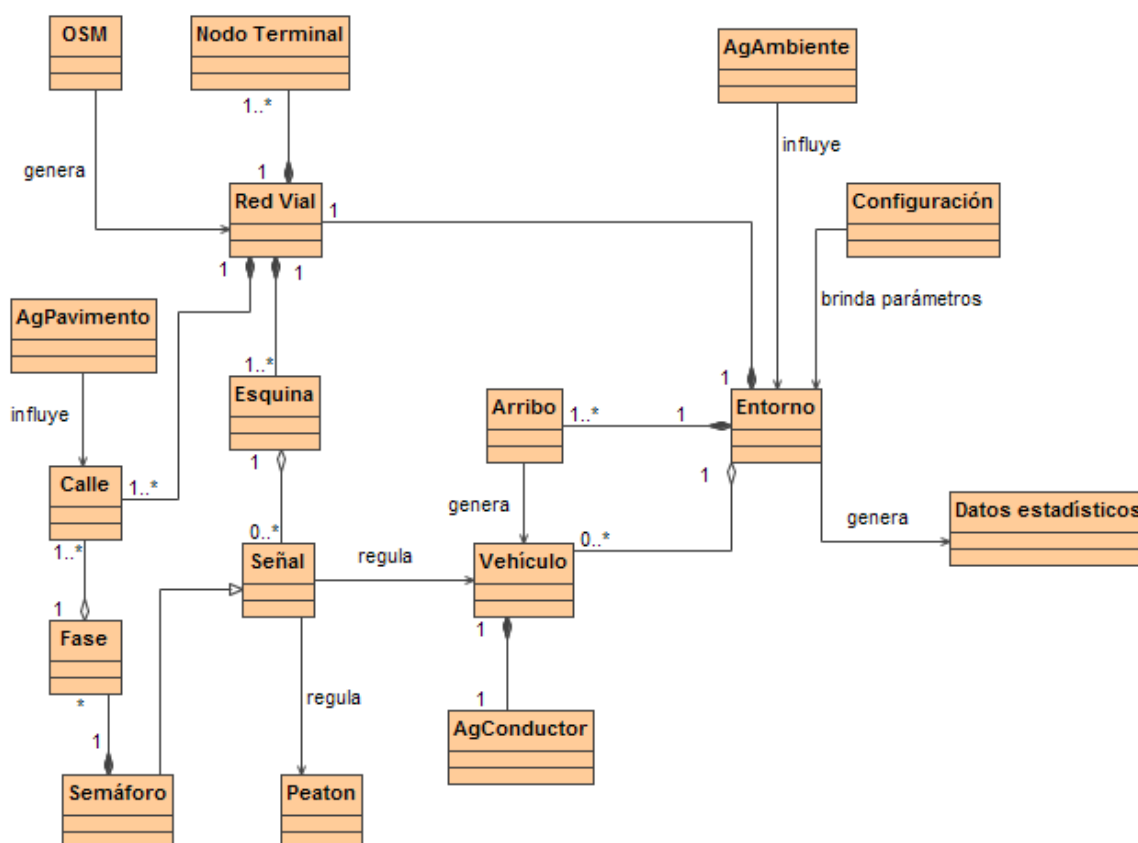
3.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

La Figura 1 muestra el Modelo de Dominio de la simulación que contiene las entidades relacionadas. La simulación se desarrolla en un “Entorno” que es contenedor de una “Red Vial” y un conjunto de vehículos. Las calles, esquinas, fases de los semáforos, nodos terminales,



accidentes e infracciones no constituyen agentes, son clases contenidas en la solución con un comportamiento predeterminado con las que los agentes interactúan durante su marcha.

FIGURA 1 – MODELO DEL DOMINO



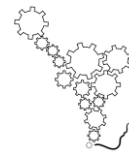
FUENTE: El autor (2019)

3.1.1 COMPORTAMIENTO DE LOS AGENTES

Agente Semáforo: Su comportamiento es simple, comprueba si ya terminó el tiempo establecido de una luz y cambia para la siguiente. Por cada fase del semáforo y dependiendo de la luz que esté activa habrá un grupo de calles permitidas y otras no.

Agente Arribo: Chequea si ya transcurrió el tiempo entre arribos (TEA) establecido para crear otro agente de tipo vehículo. Si ya transcurrió ese tiempo crea un nuevo vehículo, en caso contrario no realiza ninguna acción y continúa esperando.

Agente Vehículo: Los vehículos circulan por la red vial siguiendo una ruta trazada en el momento de su creación. Su comportamiento en la vía se basa en probabilidades de choque y eventos aleatorios. De esta manera están modelados los accidentes, los adelantamientos de carril y las infracciones. Las probabilidades de choque son ingresadas a la simulación por el



usuario que inicia la herramienta y los eventos aleatorios son creados por el entorno de simulación. La ocurrencia de esos sucesos depende de si el evento aleatorio es menor que la probabilidad de choque de ocurrencia establecida. Durante su tiempo en la simulación chequean en cada esquina la existencia de semáforos y toman las decisiones pertinentes sobre obedecer o no.

Agente Pavimento: El agente pavimento utiliza las probabilidades de que las calles se encuentren en mal estado atendiendo al municipio y al tipo de calle (principal, secundaria, autopista, etc.). Además de estos valores utiliza un valor aleatorio generado por la clase controladora del entorno. Para cada calle del entorno es generado un valor entre 0 y 1, y es asignada a esa calle un número entre 1 y 3 según el valor de probabilidad obtenido.

Agente Ambiente: Las condiciones ambientales tenidas en cuenta para la simulación son la temperatura, la humedad, el momento del día simulado y la lluvia. En caso de que el usuario ejecute la simulación en línea el agente ambiente obtendrá el pronóstico del tiempo actual utilizando la API de OpenWeatherMap (OPENWEATHERMAP, 2020). La actualización de las variables observadas es mostrada por el entorno y los vehículos reciben la notificación correspondiente para que moderen su velocidad teniendo en cuenta el estado ambiental en todo momento.

3.1.2 PARÁMETROS INICIALES DE LA SIMULACIÓN

Antes de iniciar cada simulación el analista o ingeniero de tránsito que llevará a cabo la misma debe dejar claro los parámetros bajo los cuales funcionarán los agentes y entidades antes descritas. La Figura 2 es la primera vista de la herramienta donde se especifican los datos con los que trabajarán los agentes durante la simulación.

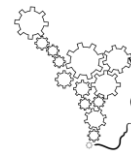


FIGURA 2 – PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN INICIAL



← Volver

Mapa --Selecione-- Municipio --Selecione--

--Semáforos--

Tiempo de luz verde	10
Tiempo de luz amarilla	3
Tiempo de luz roja	7
Probabilidad de pasar en rojo	0.005
Probabilidad de pasar en amarillo	0.01
Probabilidad de doblar sin permiso	0.001
Probabilidad de no respetar señales	0.002

--Vehículos--

Probabilidad de repararse	0.0005
Tiempo entre arribos	10
Cantidad de vehículos a simular	50
Probabilidad de romperse	0.00001

--Ambiente--

☒ Offline ☐ Online

Temperatura inicial	30
Humedad inicial	80
Nivel de lluvia	0.00

☒ Día ☐ Amanecer o atardecer ☐ Noche

--Accidentes--

Probabilidad de Colisión	0.0001
Probabilidad de Colisión Para Infractores	0.0002
Probabilidad de Adelantar carril	0.02
Impacto promedio	2
Probabilidad aparecer obstáculos	0.02

▶ Cargar MASON

FUENTE: El autor (2020)

En los casos en que las simulaciones lancen resultados no satisfactorios una solución podría ser iniciarla con parámetros diferentes, tantas veces como lo desee el analista hasta que esté satisfecho con alguna configuración.

Entre los parámetros a configurar existen dos tipos. Las probabilidades se corresponden con eventos no controlables de la simulación pues son decisiones tomadas por los vehículos como agentes autónomos. El resto de los parámetros son controlables tanto en la simulación como en la puesta en marcha de un proyecto de semaforización real.

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de la simulación en ejecución para la intersección de Calle 23 y Avenida de los Presidentes, en Plaza de la Revolución, Habana, Cuba. Acompañando al entorno de simulación se encuentra una consola con los atributos para cada una de las calles, y se da la posibilidad además de consultarlos, de modificarlos.

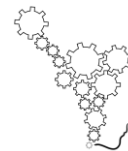
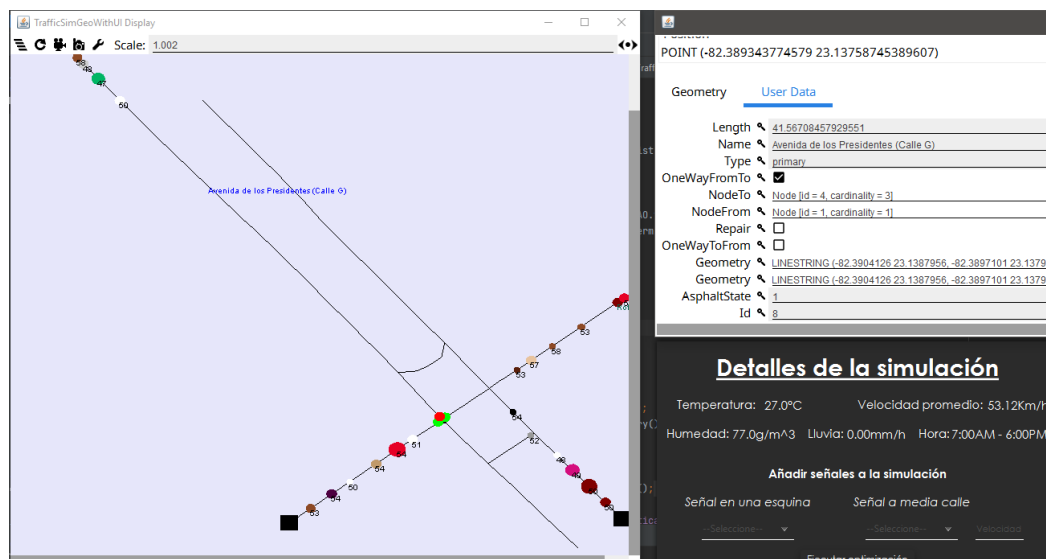


FIGURA 3 – HERRAMIENTA EN EJECUCIÓN



FUENTE: El autor (2020)

3.2 VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Para validar los resultados de la herramienta desarrollada se presentan las conclusiones de un Diseño de Experimentos realizado con el escenario de la Ciudad Deportiva y, además se establece una comparación entre los resultados obtenidos para diferentes configuraciones, que evidencian la influencia de los factores simulados en el comportamiento de los vehículos.

3.2.1 Diseño de Experimentos

Un diseño de experimentos (DoE, Design of experiments) es definido como: “una secuencia de pasos tomados de antemano para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo que conduzcan a deducciones válidas con respecto al problema planteado” (ANDERSON; WHITCOMB, 2000).

El DoE desarrollado está orientado al caso: “Ciudad Deportiva semaforizada”. Para ello se siguen las directrices del DoE. Los factores controlables, acompañado de los niveles, está descrito en la Tabla 1. También fueron identificados otros factores que no pueden ser controlados, pero no por esto menos importantes, ya que tienen una influencia considerable en el rendimiento. Estos son, cantidad de accidentes, número de infracciones, número de infractores y cantidad de vehículos que llegan a su fin.

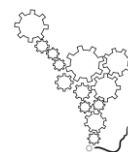


TABLA 1 – FACTORES CONTROLABLES

Id	Factor	Nivel		Unidad
		Bajo (-1)	Alto (1)	
A	Presencia de semáforos en la rotonda	No	si	-
B	Velocidad promedio de los vehículos	40	60	Km/h
C	Cantidad de vehículos que arriban	1	3	u/s

FUENTE: El autor (2019)

Luego de pasar por todas las fases que componen un diseño de experimentos se llega a la siguiente configuración recomendada mostrada en la Tabla 2, lo que muestra que para colocar estos semáforos no se realizó un estudio completo (FRAGA, 2018).

TABLA 2 – CONFIGURACIÓN RECOMENDADA

Id	Factores	Niveles	Valor	Unidad
A	Presencia de semáforos en la rotonda	Bajo (-1)	no	-
B	Velocidad promedio de los vehículos	Alto (1)	60	Km/h
C	Cantidad de vehículos que arriban	Bajo (-1)	1	u/s

FUENTE: El autor (2019)

3.2.2 Comparación de resultados

En la configuración de la herramienta existen varios parámetros que son decisivos en el comportamiento de los vehículos durante la simulación. Como parte de la validación del software se analizan los resultados estadísticos brindados por la herramienta luego de tres ejecuciones con juegos de datos distintos, la Tabla 3 contiene los parámetros específicos bajo los cuales se ejecutó cada simulación y la Tabla 4 muestra los parámetros comunes para todas.

TABLA 3 – JUEGOS DE DATOS PARA LAS SIMULACIONES

Parámetros	Sim. A	Sim. B	Sim. C
Tiempo de las luces	10/3/7	20/6/14	5/1/4
Tiempo entre arribos	10	1	15
Lluvia	0	5	3
Horario de la simulación	Amanecer	De día	Madrugada
Temperatura	27	30	22
Humedad	65	80	65

FUENTE: El autor (2020)

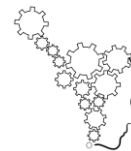


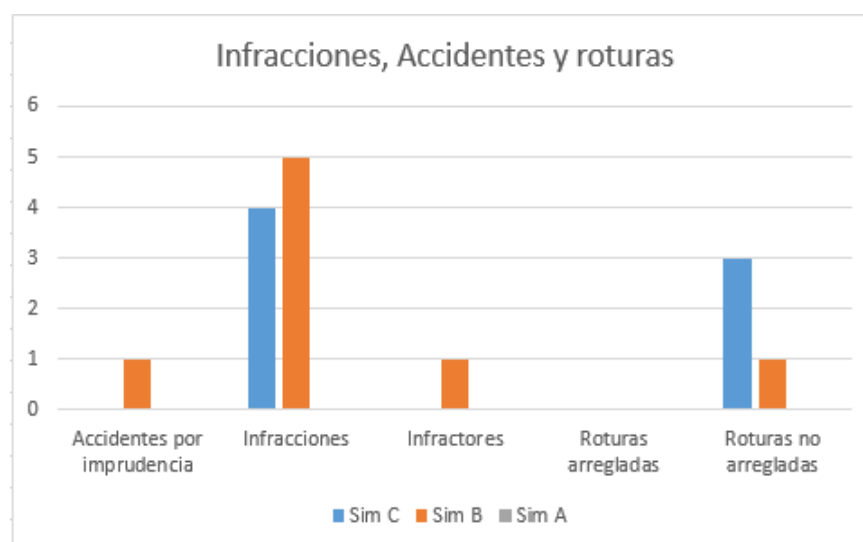
TABLA 4 – PARÁMETROS COMUNES PARA LAS SIMULACIONES

Parámetros	Valor
Mapa	Avenida 124 y Avenida 51
Municipio simulado	Marianao
Probabilidad de pasar en rojo/amarillo	0.0001/0.001
Probabilidad de colisión	0.0001
Probabilidad de adelantar carril	0.02
Probabilidad de romperse/repararse	0.00001/0.0005
Semáforo instalado	Avenida 124 y Avenida 51

FUENTE: El autor (2020)

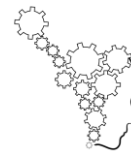
La Figura 4 ilustra la relación entre las cantidades de accidentes, infracciones y roturas ocurridas. En la Simulación B, al existir mayor demanda de vehículos en la vía y ser mayor el tiempo de luz roja del semáforo, la cantidad de infracciones es mayor y con ello aumenta también la cantidad de accidentes. La simulación A transcurre sin inconvenientes debido a que los vehículos esperan un tiempo aceptable por las luces del semáforo, no hay tantos vehículos en la simulación y se realiza en un horario donde los conductores prestan total atención a la vía. Por último, la simulación C también se desarrolla con cierta normalidad, salvo por el hecho de que en horarios de la noche los conductores suelen desobedecer las señales por la falta de personal policial en las calles.

FIGURA 4 – INFRACCIONES, ACCIDENTES Y ROTURAS



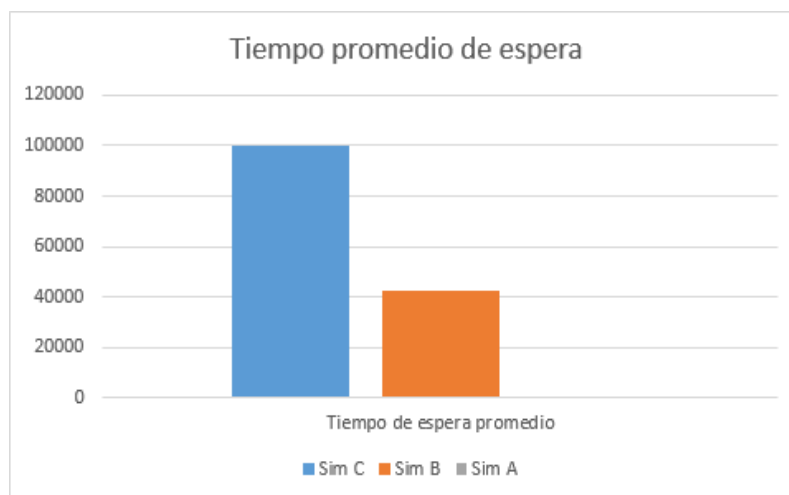
FUENTE: El autor (2020)

El tiempo promedio de espera de los vehículos ante las luces del semáforo es una de las variables más importantes a analizar para decir si las señales colocadas en la simulación han



tenido o no un buen impacto. La Figura 5 muestra como en la simulación A los vehículos tuvieron tiempo de espera 0, pues era baja la cantidad de vehículos en la vía. Por otra parte, las simulaciones B y C presentan tiempos de espera más alto, que responden a un mayor número de vehículos en el entorno de simulación y a mayores tiempos de luz roja en el semáforo.

FIGURA 5 – TIEMPO DE ESPERA PROMEDIO

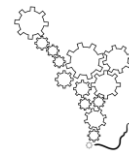


FUENTE: El autor (2020)

4 DISCUSIÓN

La herramienta ofrece resultados de calidad para los analistas de tránsito que interactúen con la misma, pero puede seguir siendo extendida a nuevas funcionalidades que garanticen su cercanía a la realidad vial.

En futuras versiones se recomienda incluir nuevas señales verticales y horizontales que controlen el tráfico, así como la presencia de peatones transitando por la vía. Además, se recomienda desarrollar un sistema de análisis que sugiera configuraciones de buen rendimiento vial basándose en los datos obtenidos en cada simulación. También es necesario incluir en la herramienta la presencia de obstáculos en las calles y la posibilidad de utilizarse bajo las leyes de cualquier país a través de la propia interfaz de la herramienta y no modificando el código fuente. Por último, las condiciones anímicas bajo las que se encuentren los conductores también serían determinantes en casos de accidentes.



5 CONCLUSIÓN

Se propone una herramienta de simulación que apoya el proceso de configuración de controladores del tránsito en redes viales. La simulación basada en agentes permite tener una aproximación de como funcionarán los procesos antes de su puesta en práctica. Constituye una solución escalable y reutilizable que puede ser fácilmente adaptada y extendida a nuevas funcionalidades.

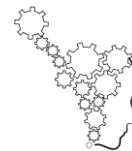
Mediante el diseño de experimentos se demostró que un análisis profundo previo a la instalación de señales viales puede ahorrar recursos materiales y mano de obras que se pierden si la configuración es contraproducente. Además, se evidenció que con la presencia en la herramienta de factores que influyen en el comportamiento de los conductores en la vía se obtienen resultados cercanos a la realidad vial.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

- Mailyn Moreno y Ariadna Moreno fueron responsables de la concepción y diseño de la investigación. Todos los autores leen y aprueban la versión final del manuscrito.
- Ariadna Moreno hizo la recopilación de datos, análisis, interpretación y análisis estadístico, realizó la búsqueda bibliográfica, revisó el borrador y elaboró la versión final. Fue responsable de la extracción y tratamiento de datos, así como de la escritura del manuscrito.
- Mailyn Moreno conceptualizó, diseñó el estudio y revisó el manuscrito hizo una revisión crítica del manuscrito en cuanto al contenido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAR, S.; THEODOROPOULOS, G. K.; LEMARINIER, P.; O'HARE, G. M. P. **Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software**. Computers Science Review, 24, p. 13-33, 2017.
- ANDERSON, M. J.; WHITCOMB, P. J. Design of experiments. **Wiley Online Library**, 2000.
- CASTÁN, J. A.; IBARRA, S.; LARIA, J.; GUZMÁN, J. et al. **Control de tráfico basado en agentes inteligentes**. Polibits, 50, 2014.
- COLLETI, M. The **GeoMason Cookbook**. San Francisco: Department of Computer Science George Mason University, 2013.
- FAROOQI, A. H.; MUNIR, A.; BAIG, A. R. **The: traffic light simulator and optimization using genetic algorithm**. In: International Conference on Computer Engineering and Applications, 2011, Press, Singapore. 2. IPCSIT, DOI: <http://doi.org/10.1.1.1056.9362>.
- FRAGA, D. B. **Herramienta de Simulación Basada en Agentes para la evaluación de configuraciones semafóricas en redes viales**. 2018. (Pregrado) - DIAISI, Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, CUJAE, La Habana.



- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. McGraw-Hill New York, 1991.
- LEÓN, A. M. d. **Código de Seguridad Vial**. La Habana: Editorial Capitán San Luis, 2016.
- LUKE, S. **Multiagent Simulation And the MASON Library**. Department of Computer Science George Mason University, 2017.
- MOON, Y. B. **Simulation modelling for sustainability: a review of the literature**. Int J Sustain Eng., 2017.
- NEWSTEAD, S. **An investigation into the relationship between vehicle colour and crash risk**. Monash University. Accident Research Center, 2007.
- OPENWEATHERMAP. **OpenWeatherMap**. Disponível em: <http://owm.org/>. Acesso em: 10/11/2020.
- ORGANIZATION, W. H. **Global Status Report on Road Safety**. WHO. Ginebra, Suíça. 2018.
- REINALDO, O. F. **Rotondas, semáforos y comunicación por descongestionar**. **Cubadebate**, Disponível em: <http://www.cubadebate.cu/opinion/2015/12/23/rotondas-semaforos-y-comunicacion-por-descongestionar>. Acesso em: 04/30/2019.
- TRÁNSITO, D. N. d. **A partir del viernes 9 funcionarán semáforos en la Rotonda de la Ciudad Deportiva**. **Cubadebate**, Disponível em: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2015/10/08/a-partir-del-viernes-9-funcionaran-semaforos-en-la-rotonda-de-la-ciudad-deportiva/>. Acesso em: 04/30/2019.
- WEGENER, A.; PIÓRKOWSKI, M.; RAYA, M.; HELLBRÜCK, H. et al. **TraCI: an interface for coupling road traffic and network simulators**. In: 11th communications and networking simulation symposium, 2008, Ottawa, Canada. 08. DOI: <http://doi.org/10.1145/1400713.1400740>.
- WOOLRIDGE, M. **An Introduction to MultiAgent Systems**. 2nd ed. Department of Computer Science, University of Liverpool: John Wiley & Sons, 2009.