

Capítulo 1

Marco Teórico y Estado del Arte

1.1. Marco Teórico

En esta sección se detallarán los conceptos esenciales para la comprensión del presente trabajo de memoria.

1.1.1. Sistemas Inteligentes de Transporte

Cascetta define en [1] los sistemas de transporte como aquella combinación de elementos que generan demanda de viaje en un cierta área geográfica, y que otorgan los servicios de transporte para suplir dicha demanda. Esta definición es amplia y otorga una visión general del concepto. En la práctica, en la presente memoria se denominará como sistema de transporte a aquel conjunto de infraestructura vial que permite el flujo de vehículos desde uno o más puntos de origen a uno o más puntos de destino.

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (en adelante *ITS*, por sus siglas en inglés – *Intelligent Transportation Systems*) surgen como una respuesta a la necesidad de optimización y modernización de sistemas de transporte existentes. La Unión Europea define a los ITS como aplicaciones avanzadas que, sin incorporar inteligencia como tal, pretenden proveer servicios innovadores relacionados con distintos modos de transporte y de administración de tráfico, que además otorgan información a los usuarios, permitiéndoles utilizar el sistema de transporte de manera más segura, coordinada e inteligente [2].

De acuerdo al Departamento de Transportes de los EEUU, los ITS se pueden dividir en dos grandes categorías [3]; Sistemas de Infraestructura Inteligente y Sistemas de Vehículos Inteligentes.

Sistemas de Infraestructura Inteligente

Tienen como enfoque el manejo de los sistemas de transporte a niveles macro, y la transmisión de información oportuna a los usuarios a través de sistemas de comunicación vehículo-infraestructura (*V2I*). Esta categoría incluye, entre otros, sistemas de advertencia y señalización dinámica en ruta (ya sea a través de pantallas o sistemas de comunicación inalámbrica), sistemas de pago electrónico y de coordinación del flujo de tráfico.

Sistemas de Vehículos Inteligentes

Engloba todo aquello relacionado con la automatización y optimización de la operación de un vehículo. Dentro de esta categoría se incluyen sistemas de advertencia y prevención de colisiones, de asistencia al conductor — por ejemplo, sistemas de navegación — y control autónomo de vehículos. Esta categoría se caracteriza por el extenso uso de comunicaciones vehículo-vehículo (*V2V*), es decir, redes de comunicaciones distribuidas *ad-hoc* (ver sección 1.1.2).

1.1.2. Tecnologías de Comunicaciones para ITS

Una de las principales características de los ITS es la capacidad del sistema de otorgar información a los usuarios para la optimización del sistema. Con este fin, se han establecido distintos tipos de categorías de tecnologías de transmisión inalámbrica para el uso en variados escenarios [4].

V2I

Vehicle-to-Infrastructure, V2I, se refiere a toda comunicación en un ITS que ocurra entre un vehículo y la infraestructura, por ejemplo, para la transmisión de información del estado de la ruta, velocidad máxima, etc.

V2V

Vehicle-to-Vehicle, V2V, es el nombre otorgado a la categoría de tecnologías que posibilitan la comunicación directa entre vehículos en un ITS. Este tipo de comunicaciones tiende a ser de índole crítico (por ejemplo, transmisión de advertencias por accidente), y deben poder funcionar en ausencia de un sistema centralizado, por lo que generalmente se utilizan redes *ad-hoc*; es

decir, redes descentralizadas en las cuales cada vehículo conforma un nodo que se comunica directamente con sus vecinos.

V2X

Finalmente, *Vehicle-to-Any*, V2X, se refiere a la combinación de las dos categorías anteriores.

IEEE 802.11p/WAVE

El estándar más común para las tres categorías de comunicaciones mencionadas anteriormente es hoy en el IEEE 802.11p, también conocido como WAVE (*Wireless Access for Vehicular Applications*).

IEEE 802.11p es una modificación al estándar 802.11 de la IEEE – el cual define el funcionamiento de redes inalámbricas de área local (popularmente conocidas como *Wi-Fi*) – para adaptarlo al funcionamiento en Sistemas Inteligentes de Transporte [5]. Su principal modificación es la habilidad de nodos en la red de comunicarse directamente sin antes tener que asociarse y autenticarse, ya que esto es costoso en términos de tiempo y las conexiones en un ITS son extremadamente efímeras.

1.1.3. Simulación de Redes de Comunicaciones

Las simulaciones de redes de comunicaciones tienen como fin modelar el comportamiento de sistemas interconectados mediante tecnologías de comunicaciones, sean estas cableadas o no. Generalmente, esto se hace a través del empleo de modelos de eventos discretos, es decir, simulaciones en las cuales el estado del modelo cambia en instantes de tiempo discreto [6].

Para el fin del presente trabajo, por razones evidentes ligadas a la naturaleza de las comunicaciones dentro de un sistema altamente dinámico como lo son los sistemas de transporte, se consideraron únicamente sistemas de comunicación inalámbrica.

Comunicación Inalámbrica

La simulación de una red de comunicaciones inalámbrica consiste en tres etapas principales [7]:

1. El ingreso de parámetros del funcionamiento de la red (potencia de transmisión, nivel de ruido, etc).
2. Un sistema de emulación del movimiento de información en la red, a través de la simulación del funcionamiento físico de las radios.
3. Finalmente, la obtención de resultados y métricas que indiquen la eficiencia de la red en términos de pérdidas de paquetes, el *throughput* (cantidad de datos correctamente transmitidos), etc.

1.1.4. Simulación de Tráfico

Se entenderá por *Simulación de Tráfico* aquel entorno virtual que permita la emulación y estudio del comportamiento de un sistema de transporte ficticio o real, mediante el modelamiento de éste utilizando herramientas computacionales. Estas simulaciones puede ser tanto discretas como continuas.

A continuación, se describirán brevemente las tres principales categorías de modelos de tráfico utilizados actualmente en academia; microscópicos, macroscópicos y mesoscópicos [7]-[9].

Microscópicos Los modelos microscópicos de tráfico modelan de manera particular cada entidad (vehículo, peatón, etc) en la red. Cada entidad tiene su propio origen, destino, velocidad y posición (y otras propiedades adicionales), y su comportamiento se modela de manera individual con respecto al resto de la red.

Macroscópicos En contraste con los modelos microscópicos, los modelos macroscópicos simulan el movimiento de entidades dentro de una red de tráfico como flujos en vez de movimientos particulares.

Mesoscópicos Finalmente, los modelos mesoscópicos consideran aspectos de ambos modelos anteriormente mencionados, simulando particularmente el comportamiento de las entidades pero también considerando su movimiento dentro de un flujo general.

La presente memoria considera únicamente la integración de una simulación de tipo microscópica, dada su fácil adaptación al modelo utilizado por las simulaciones de comunicaciones inalámbricas – un nodo en la red de comunicaciones corresponde directamente a un vehículo en el sistema de transporte.

1.1.5. Simulación Bidireccional

En el contexto de integración de simuladores de comunicaciones y de tráfico para el estudio de Sistemas Inteligentes de Transporte, se entenderá por *Simulación Bidireccional* aquél entorno de simulación en que un simulador de redes de comunicación y otro de tráfico se ejecuten de manera paralela, cada uno obteniendo *feedback* continuo del otro.

De esta manera es posible no sólo estudiar el efecto que tiene el movimiento de los vehículos sobre la red de comunicaciones en un Sistema Inteligente de Transporte, sino también se hace posible estudiar las repercusiones de la diseminación de información en la red vehicular. Por ejemplo, permite analizar el efecto de que un grupo de conductores cambien su ruta dentro de la red de transporte en respuesta a la recepción de una notificación de un accidente más adelante en su ruta original.

1.2. Estado del Arte

1.2.1. Simuladores de Tráfico

Actualmente, existe una gran oferta de simuladores de tráfico, ya sean de fuente abierta o propietarios. Ratrouy y Rahman listan 14 de estos en su análisis comparativo del año 2009 [8], mientras que Boxill y Yu, ya en el año 2000 presentaban 8 simuladores distintos en su estudio de simuladores para el desarrollo de Sistemas Inteligentes de Transporte [9].

En esta sección se presentará brevemente el estado del arte de los más prominentes de estos simuladores, basándose en la revisión de literatura realizada por Mubasher y ul Qounain en [10].

VISSIM

VISSIM es un entorno de simulación discreto y microscópico, desarrollado propietariamente por el Grupo PVT en Alemania [11]. Es un simulador generalista, capaz de modelar sistemas de transporte multi-modales, en los que interactúan tanto vehículos “convencionales” como bicicletas, tranvías y hasta trenes pesados [12]. Modela el movimiento de cada entidad dinámica y estocásticamente, en instantes discretos de tiempo.

VISSIM es considerado actualmente el líder en términos de popularidad y número de publicaciones en estudios de sistemas de transporte.

<i>Simulator Name</i>	<i>Number of Occurrences in Literature</i>	<i>License Type</i>
VISSIM	15	Commercial Software
PARAMICS	12	Commercial Software
CORSIM	10	FOSS
AIMSUN	9	Commercial Software
SUMO	5	FOSS

Figura 1.1: Los cinco simuladores más prominentes en la literatura (fuente: Mubasher y ul Qounain [10]).

Aimsun

Aimsun es un simulador de tráfico con una larga trayectoria, desarrollado por *TSS - Trasport Simulation Systems*, una empresa basada en Barcelona. El desarrollo del simulador comenzó en el año 1989, y actualmente se encuentra en su versión 8.2 [13].

Aimsun cuenta con la particularidad de ser un entorno integrado micro- y mesoscópico de simulación de tráfico. Esto le da adaptabilidad a los problemas; para redes que requieran detalle del movimiento de sus entidades, se utiliza el modelo macroscópico, mientras que para redes de mayor escala se puede utilizar el modelo mesoscópico.

Este simulador es muy popular en la literatura académica dada su extensibilidad y adaptabilidad a un gran número de escenarios. Sin embargo, existe una crítica común a su complicado nivel de programación de sus redes (se estima un complejidad hasta 8(!) veces mayor que para otros simuladores [14]), y a su necesidad de meticulosa calibración para obtener resultados realistas [8], [14].

CORSIM

TSIS-CORSIM, actualmente en su versión 6.3, es un simulador de tráfico de tipo microscópico desarrollado por el *Centro McTrans* del Instituto de Transportes de la Universidad de Florida [15]. Al igual que Aimsun, CORSIM es muy popular en la literatura académica, y destaca por ser más apto para

el modelamiento de redes de transporte complejas.

El simulador incluye dos modelos de simulación microscópica distintos - NETSIM para entornos urbanos, y FRESIM para tráfico en carreteras y zonas rurales. Si bien esto significa una mayor especialización y modelos más precisos para cada uno de estos casos, esto viene en desmedro de la posibilidad de simular de manera integrada un entorno que incluya ambas categorías [14].

SUMO

SUMO, *Simulation of Urban MObility* [16], es un simulador de sistemas de transporte desarrollado por el Instituto de Sistemas de Transporte Alemán [17]. Es de fuente abierta, y utiliza un modelo microscópico para la simulación de redes de transporte.

Comparado con los simuladores presentados anteriormente, SUMO es relativamente nuevo, y todavía no cuenta con el mismo nivel de soporte y renombre que CORSIM o Aimsun, especialmente en el área de investigación de sistemas de transporte. Sin embargo, su popularidad ha aumentado de manera exponencial los últimos años, y ha ganado relevancia especialmente en estudios de Sistemas Inteligentes de Transporte [18], alcanzando el primer lugar en cantidad de publicaciones relacionadas con comunicaciones vehiculares [19]. Se especula que esto se debe a su naturaleza abierta, lo cual lo hace más accesible a investigadores, y además significa que es naturalmente extensible y adaptable a nuevos desafíos.

Paramics

Paramics, desarrollado por Quadstone Paramics, un subsidiary de Pitney Bowess [20] es un simulador microscópico de redes de transporte. Es capaz de simular el espectro completo de tamaño de redes de transporte - desde intersecciones aisladas a redes de transporte a escala nacional.

El simulador cuenta también con una API de extensión para la implementación de *plugins* enfocados a la integración de aplicaciones de Sistemas Inteligentes de Transporte. Esta API permite interactuar con todos los aspectos de la simulación, desde la simple obtención de datos desde las entidades internas hasta la modificación de los modelos de movilidad internos.

Finalmente, Paramics es además el simulador de preferencia del Área de Transportes del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

1.2.2. Simuladores de Redes Inalámbricas

Kumar *et al.* realizaron en 2012 un estudio comparativo en el ámbito de Simuladores para Redes Inalámbricas [21], trabajo basado parcialmente en el estudio realizado en 2009 por Weingartner, vom Lehn y Wehrle sobre la eficiencia de estos simuladores [22]. Paralelamente, investigadores de la Universidad de Malasia y la Universidad Carlos III de Madrid, España, publicaron también en 2012 un estudio enfocado específicamente en aquellos entornos de software de fuente abierta para la simulación de redes inalámbricas de sensores [23].

A continuación se discutirán brevemente las particularidades de los siguientes cuatro entornos de simulación, destacados en los artículos previamente mencionados: GloMoSim/QualNet, OMNeT++, ns-2 y ns-3. Se escogieron específicamente estos simuladores dada su prominencia en dichos estudios y en la literatura académica en general.

GloMoSim

En primer lugar, GloMoSim es un simulador de fuente abierta desarrollado por investigadores de la Universidad de California, Los Ángeles [24]. El simulador utiliza las capacidades de simulación de eventos discretos y paralelos otorgadas por el lenguaje de programación Parsec, desarrollado en el Laboratorio de Computación Paralela de la UCLA [25]. QualNet es un derivado comercial de este mismo software, basado en C++ en vez de Parsec.

Las desventajas de GloMoSim y QualNet son varias. Para nombrar un par, no presentan soporte para un número considerable de implementaciones de TCP, y su interfaz gráfica es deficiente. Finalmente, además GloMoSim ya no se encuentra en desarrollo activo, por lo que es poco probable que esto se solucione en el futuro.

OMNeT++

OMNeT++, *Objective Modular Network Testbed in C++*, es un entorno modular y basado en componentes para la simulación de sistemas de eventos discretos [26]. Está escrito en C++, y si bien en estricto rigor OMNeT++ en sí sólo conforma el *framework* genérico para la definición de modelos, la distribución incluye además múltiples extensiones para el modelamiento de redes de comunicación – siendo la principal de éstas INET.

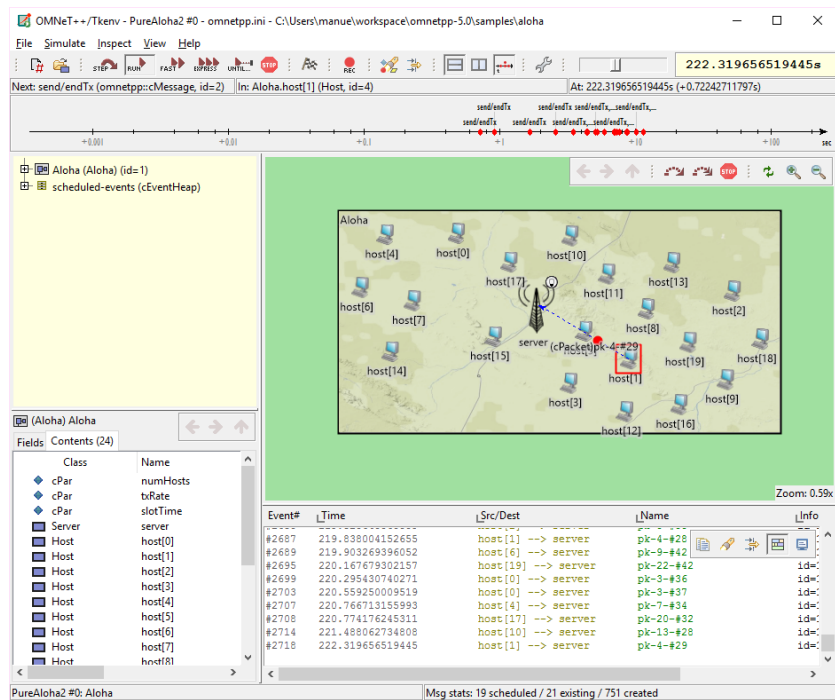


Figura 1.2: Entorno de simulación gráfica de OMNeT++.

INET incluye modelos para la simulación de múltiples *stacks* de protocolos para la comunicación tanto cableada como inalámbrica, a través de una gran cantidad de protocolos (IPV6, WSN, etc.). Finalmente, INET incluye además modelos de movilidad, para el estudio de redes con nodos en movimiento.

OMNeT++ presenta una gran ventaja en su diseño modular y extensible, y se posiciona como una excelente opción para simulaciones que requieran un alto nivel de flexibilidad.

ns-2 y ns-3

ns-2 es un simulador de eventos discretos para la simulación de redes de comunicación, cuyo desarrollo comenzó en 1989 y que a lo largo de los años ha recibido grandes contribuciones tanto de la comunidad científico como de corporaciones como DARPA, Xerox, etc. Gracias a su larga trayectoria y extenso soporte, actualmente cuenta con un gran renombre en academia.

El simulador y sus módulos en sí están escritos en C++, pero se utiliza una extensión del lenguaje Tcl para su configuración y la definición de topologías de red. Esta decisión de diseño fue producto de un deseo de evitar la recompilación del simulador al realizar cambios en algún escenario, lo cual tenía mucho sentido en un tiempo en que la compilación implicaba extensos tiempos de espera. Hoy en día sin embargo, con los avances en potencia computacional, es más una desventaja, perjudicando la escalabilidad del sistema [22] a cambio de una marginal mejora en tiempos de recompilación.

ns-3 es considerado el sucesor de ns-2, llevando el exitoso simulador al siglo XXI. A diferencia de su ancestro, ns-3 está escrito completamente en C++, y opcionalmente algunos módulos pueden definirse en Python. Además, ns-3 incluye extensas optimizaciones en términos de escalabilidad y paralelismo, a cambio de una incompatibilidad con antiguos modelos desarrollados para ns-2

1.2.3. Entornos de Simulación Bidireccional

A continuación se resumirá brevemente el estado del arte en el tema de simulación bidireccional para simulaciones de Sistemas Inteligentes de Transporte.

Simulaciones unidireccionales

De acuerdo a Sommer *et al.* [27], la mayor parte de las simulaciones de comunicaciones inalámbricas en ITS se hacen a través de la importación de trazas de movimiento reales desde simuladores de transporte, de manera unidireccional. Dichas trazas se pueden generar de dos maneras: *offline*, es decir, aisladamente en el simulador de transporte, para luego ser exportadas en un formato que el simulador de red sea capaz de interpretar, y *decoupled online*, de manera que el simulador de transporte genere las trazas en tiempo real y el simulador de red simplemente las “consume”. Sin embargo, si bien este método permite analizar el efecto del modelo de movimiento de un sistema de transporte en las comunicaciones inalámbricas, es incapaz de reflejar el impacto de la propagación de información del estado del tráfico en el modelo mismo. Es decir, esta metodología no es útil para la simulación de, por ejemplo, sistemas de advertencia de accidentes o de asistencia al conductor, puesto que las trazas de movimiento están predefinidas o se generan sin considerar los resultados de esta comunicación. Este tipo de simulación, si bien es útil para ciertos análisis específicos, no constituye una simulación bidireccional y no abarca la totalidad del problema.

Los trabajos realizados por investigadores de la Universidad Jiao Tong de Shanghai en [28], [29] son ejemplos de esta modalidad. Para estas investigaciones, los autores obtuvieron trazas reales de movimiento de SUVnet, una red vehicular compuesta por aproximadamente 4000 taxis en la ciudad de Shanghai. Estas trazas luego fueron simplemente utilizadas en simulaciones de red de comunicaciones para la validación de los modelos desarrollados.

Otro ejemplo de esto es la investigación presentada por Goebel *et al.* en [30]. En este trabajo, los investigadores utilizaron SUMO para la generación de trazas vehiculares realistas, las cuales luego fueron importadas en OMNeT++ para el estudio del impacto de la movilidad vehicular en comunicaciones celulares.

Entornos integrados

La necesidad de un entorno integrado para la simulación de Sistemas Inteligentes de Transportes es un tema que ha estado presente en la comunidad académica hace casi más de una década ya. En particular, Sommer *et al.* argumentaron fuertemente a favor de la idea en [27] y [31]; el siguiente análisis se basa principalmente en ambos documentos, con algunas fuentes

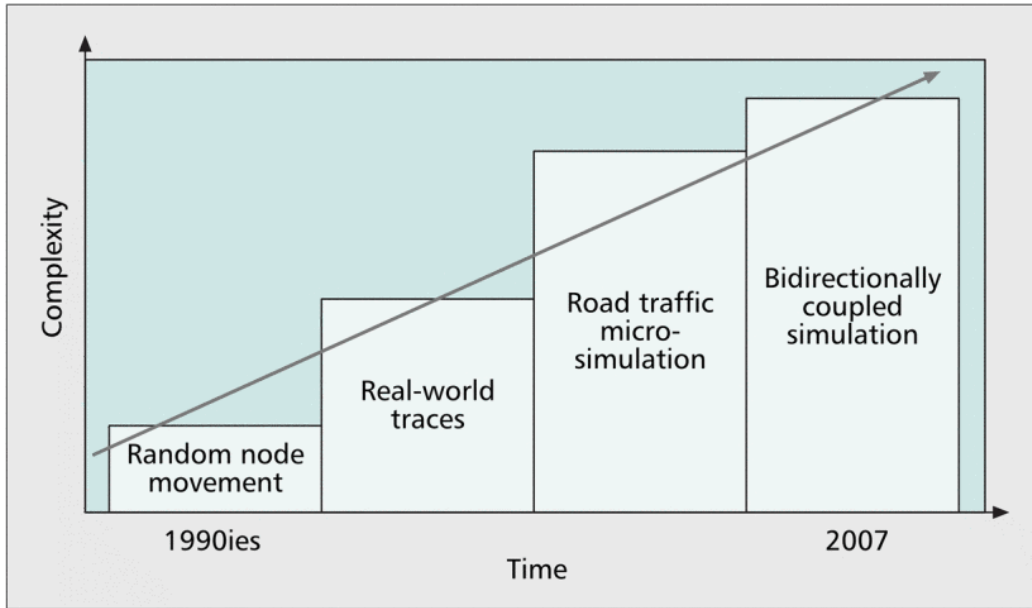


Figura 1.3: Evolución de simulaciones integradas para ITS (fuente: Sommer y Dressler [31]).

adicionales que se mencionarán oportunamente.

En primer lugar, los autores destacan la existencia de un sistema de simulación bidireccional desarrollado por la Universidad Nacional de Chiao Tung, Taiwan [32], [33], el cual permite la simulación íntegra de un sistema de transportes dotado de capacidades de comunicación inalámbrica.

NCTUns, actualmente en su versión 6.0 (publicada en junio del 2010 [33]), es un simulador para el estudio de Sistemas Inteligentes de Transporte. Su principal particularidad es que presenta un entorno totalmente integrado para la ejecución de dichas simulaciones; es decir, es tanto un simulador de redes de comunicaciones como de tráfico. Incluye capacidades para simular comportamiento tanto autónomo como predefinido (*rutas*) de vehículos, e implementa un *stack* de protocolo completo en cada vehículo.

No obstante, Sommer *et al.* critican la incompatibilidad de dicho sistema (en su versión 4.0) con los modelos de protocolos de comunicación y transporte ya desarrollados para los simuladores más prominentes, limitando su utilidad práctica en la investigación. Además, si bien NCTUns es capaz de simular un número capacidad de capas físicas, todavía se encuentra muy limitado en ese aspecto en comparación con otros simuladores de redes.

Los investigadores mencionan también la existencia de TraNS [34], un *framework* para la integración de ns-2 con SUMO. Este sistema implementa un *loop* de control y *feedback* activo entre ambos simuladores, estableciendo así una simulación bidireccional que permite la emulación de un ITS.

TraNS integra dos simuladores de renombre en la academia, y ha sido muy bien recibido. Sin embargo, los autores destacan que carece de ciertas funcionalidades – principalmente, la capacidad de sincronizar y controlar el tiempo de simulación entre ambos simuladores.

Se debe destacar también los trabajos realizados por investigadores en la Universidad Estatal de Nueva York en Buffalo [35] y de la Universidad de Düsseldorf [36]. Ambos constituyen ejemplos de simulaciones bidireccionales – no obstante se ven limitados por su especificidad, y dificultad de adaptación a escenarios más diversos. El trabajo de Shalaby en su tesis de magíster [7] también sufre este mismo problema, además de temas relacionados a la eficiencia del *framework* desarrollado por la autora, principalmente ligados a la elección de mecanismo de comunicación entre los simuladores (archivos en disco).

Finalmente, Sommer, German y Dressler presentan su solución en [37]: VEINS, un *framework* de integración entre OMNeT++ y SUMO. Ambos simuladores se escogieron específicamente por su adopción en el mundo académico, y por sus naturalezas abiertas y fáciles de adaptar y modificar.

A través de VEINS, ambos simuladores se ejecutan en paralelo, comunicándose en tiempo real mediante un *socket* utilizando el protocolo TCP; SUMO proporciona las trazas de movimiento de los elementos en la simulación a la vez que OMNeT++ simula el comportamiento de la red de comunicaciones. Además, mediante este esquema, OMNeT++ también puede modificar directamente el comportamiento del modelo de transporte, por ejemplo alterando la velocidad de un vehículo en respuesta a un mensaje específico obtenido a través de la red de comunicaciones. De esta manera, el *framework* en cuestión permite modelar sistemas complejos y dinámicos, que reflejan de buena manera la realidad.

Sin embargo, VEINS sufre por su elección de simulador de transporte; SUMO todavía se encuentra en una temprana etapa de desarrollo, lo cual implica que frecuentemente sufre de problemas de estabilidad y de falta de características y documentación. Por ejemplo, hasta diciembre del 2015 (ver-

sión 0.25.0), SUMO no contaba con un editor gráfico de redes de transporte¹, lo cual dificultaba mucho el diseño de redes originales. Además, la curva de aprendizaje de SUMO es bastante pronunciada, y todas sus configuraciones son a través de archivos; es por esto que en muchos departamentos de ingeniería de transporte se opta por otros simuladores más avanzados y estables.

¹<http://sumo.dlr.de/wiki/FAQ>

Bibliografía

- [1] E. Cascetta, *Transportation systems engineering: theory and methods*. Springer Science & Business Media, 2013, vol. 49.
- [2] *Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport*, 2010 O.J. L 207/1, European Parliament, 2010.
- [3] (Abr. de 2017). U.S. Department of Transportation, Office of the Assistant Secretary for Research and Technology (OST-R), dirección: <http://www.itsoverview.its.dot.gov/>.
- [4] K. Dar, M. Bakhouya, J. Gaber, M. Wack y P. Lorenz, «Wireless communication technologies for ITS applications [Topics in Automotive Networking]», *IEEE Communica-*
tions Magazine, vol. 48, n.º 5, págs. 156-162, 2010.
- [5] D. Jiang y L. Delgrossi, «IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments», en *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*, mayo de 2008, págs. 2036-2040. DOI: [10 . 1109/VETECS.2008.458](https://doi.org/10.1109/VETECS.2008.458).
- [6] T. J. Schriber, D. T. Brunner y J. S. Smith, «How Discrete-event Simulation Software Works and Why It Matters», en *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, ép. WSC '12, Berlin, Germany: Winter Simulation Conference, 2012, 3:1-3:15. dirección: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2429759.2429763>.
- [7] Y. Shalaby, «An Integrated Framework for Coupling Traffic and Wireless Network Simulations», Tesis de mtría., De-

- partment of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 2010.
- [8] N. T. Ratrouy y S. M. Rahman, «A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software», *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 34, n.º 1B, págs. 121-133, 2009.
 - [9] S. A. Boxill y L. Yu, «An evaluation of traffic simulation models for supporting ITS», *Houston, TX: Development Centre for Transportation Training and Research, Texas Southern University*, 2000.
 - [10] M. M. Mubasher y J. S. W. ul Qounain, «Systematic literature review of vehicular traffic flow simulators», en *2015 International Conference on Open Source Software Computing (OSSCOM)*, sep. de 2015, págs. 1-6. DOI: [10 . 1109 / OSSCOM.2015.7372687](https://doi.org/10.1109/OSSCOM.2015.7372687).
 - [11] (Mayo de 2017). PVT VISSIM, dirección: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>.
 - [12] M. Fellendorf y P. Vortisch, «Microscopic traffic flow simulator VISSIM», en *Fundamentals of traffic simulation*, Springer, 2010, págs. 63-93.
 - [13] (Mayo de 2017). Aimsun traffic modelling software, dirección: <https://www.aimsun.com/aimsun/>.
 - [14] S. L. Jones, A. J. Sullivan, N. Cheekoti, M. D. Anderson y D. Malave, «Traffic simulation software comparison study», *UTCA Report*, vol. 2217, 2004.
 - [15] (Mayo de 2017). TSIS-CORSIM™, dirección: <https://mctrans.ce.ufl.edu/mct/index.php/tsis-corsim/>.
 - [16] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann y D. Krajzewicz, «SUMO - Simulation of Urban Mobility: An Overview», en *SIMUL 2011*, S. Ū. of Oslo Aida Omerovic, R. I. .-. R. T. P. D. A. Simoni y R. I. .-. R. T. P. G. Bobashev, eds., ThinkMind, oct. de 2011. dirección: <http://elib.dlr.de/71460/>.
 - [17] (Mayo de 2017). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dirección: http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-1221/1665_read-3070/.

- [18] D. Krajzewicz, «Summary on Publications citing SUMO, 2002-2012», en *1st SUMO User Conference-SUMO 2013*, DLR, vol. 21, 2013, págs. 11-24.
- [19] S. Joerer, C. Sommer y F. Dressler, «Toward reproducibility and comparability of IVC simulation studies: a literature survey», *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, n.º 10, págs. 82-88, oct. de 2012, ISSN: 0163-6804. DOI: [10 . 1109 / MCOM.2012.6316780](https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6316780).
- [20] (Mar. de 2017). Quadstone Paramics website, dirección: <http://www.paramics-online.com>.
- [21] A. Kumar, S. K. Kaushik, R. Sharma y P. Raj, «Simulators for Wireless Networks: A Comparative Study», en *2012 International Conference on Computing Sciences*, sep. de 2012, págs. 338-342. DOI: [10 . 1109 / ICCS.2012.65](https://doi.org/10.1109/ICCS.2012.65).
- [22] E. Weingartner, H. vom Lehn y K. Wehrle, «A Performance Comparison of Recent Network Simulators», en *2009 IEEE International Conference on Communications*, jun. de 2009, págs. 1-5. DOI: [10 . 1109 / ICC.2009.5198657](https://doi.org/10.1109/ICC.2009.5198657).
- [23] A. R. Khan, S. M. Bilal y M. Othman, «A performance comparison of open source network simulators for wireless networks», en *2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, nov. de 2012, págs. 34-38. DOI: [10 . 1109 / ICCSCE.2012.6487111](https://doi.org/10.1109/ICCSCE.2012.6487111).
- [24] X. Zeng, R. Bagrodia y M. Gerla, «GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks», en *Parallel and Distributed Simulation, 1998. PADS 98. Proceedings. Twelfth Workshop on*, mayo de 1998, págs. 154-161. DOI: [10 . 1109 / PADS.1998.685281](https://doi.org/10.1109/PADS.1998.685281).
- [25] R. Bagrodia, R. Meyer, M. Takai, Y.-A. Chen, X. Zeng, J. Martin y H. Y. Song, «Parsec: a parallel simulation environment for complex systems», *Computer*, vol. 31, n.º 10, págs. 77-85, oct. de 1998, ISSN: 0018-9162. DOI: [10 . 1109 / 2.722293](https://doi.org/10.1109/2.722293).
- [26] A. Varga y R. Hornig, «An overview of the OMNeT++ simulation environment», en *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics y Tele-

- communications Engineering), 2008, pág. 60.
- [27] C. Sommer, Z. Yao, R. German y F. Dressler, «On the Need for Bidirectional Coupling of Road Traffic Microsimulation and Network Simulation», en *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE Workshop on Mobility Models*, ép. MobilityModels '08, Hong Kong, Hong Kong, China: ACM, 2008, págs. 41-48, ISBN: 978-1-60558-111-8. DOI: 10 . 1145 / 1374688 . 1374697. dirección: <http://doi.acm.org/10.1145/1374688.1374697>.
- [28] D. Li, H. Huang, X. Li, M. Li y F. Tang, «A Distance-Based Directional Broadcast Protocol for Urban Vehicular Ad Hoc Network», en *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, sep. de 2007, págs. 1520-1523. DOI: 10 . 1109 / WICOM . 2007.383.
- [29] H. Y. Huang, P. E. Luo, M. Li, D. Li, X. Li, W. Shu y M. Y. Wu, «Performance Evaluation of SUVnet With Real-Time Traffic Data», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, n.º 6, págs. 3381-3396, nov. de 2007, ISSN: 0018-9545. DOI: 10 . 1109 / TVT . 2007 . 907273.
- [30] N. Goebel, R. Bialon, M. Mauve y K. Graffi, «Coupled simulation of mobile cellular networks, road traffic and V2X applications using traces», en *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, mayo de 2016, págs. 1-7. DOI: 10 . 1109 / ICC.2016.7511126.
- [31] C. Sommer y F. Dressler, «Progressing toward realistic mobility models in VANET simulations», *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, n.º 11, págs. 132-137, nov. de 2008, ISSN: 0163-6804. DOI: 10 . 1109 / MCOM . 2008 . 4689256.
- [32] S. Y. Wang, C. L. Chou, Y. H. Chiu, Y. S. Tzeng, M. S. Hsu, Y. W. Cheng, W. L. Liu y T. W. Ho, «NCTUns 4.0: An Integrated Simulation Platform for Vehicular Traffic, Communication, and Network Researches», en *2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, sep. de 2007, págs. 2081-2085. DOI: 10 . 1109 / VETECF . 2007.437.
- [33] S. Y. Wang y C. C. Lin, «NCTUns 6.0: A Simulator for Advanced Wireless Vehicular

- Network Research», en *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, mayo de 2010, págs. 1-2. DOI: 10.1109/VETECS.2010.5494212.
- [34] M. Piorkowski, M. Raya, A. L. Lugo, P. Papadimitratos, M. Grossglauser y J.-P. Hubaux, «TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETs», *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, vol. 12, n.º 1, págs. 31-33, 2008.
- [35] Y. Zhao, A. Wagh, Y. Hou, K. Hulme, C. Qiao y A. W. Sadek, «Integrated traffic-driving-networking simulator for the design of connected vehicle applications: eco-signal case study», *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, n.º 1, págs. 75-87, 2016.
- [36] C. Lochert, A. Barthels, A. Cervantes, M. Mauve y M. Caliskan, «Multiple simulator interlinking environment for IVC», en *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, ACM, 2005, págs. 87-88.
- [37] C. Sommer, R. German y F. Dressler, «Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis», *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, n.º 1, págs. 3-15, ene. de 2011, ISSN: 1536-1233. DOI: 10.1109/TMC.2010.133.