



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN FRAMEWORK INTEGRADO PARA  
SIMULACIONES DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE EN OMNET ++  
Y PARAMICS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN COMPUTACIÓN

MANUEL OSVALDO J. OLGUÍN MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:  
SANDRA CÉSPEDES U.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAVIER BUSTOS  
CRISTIÁN CORTÉS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por NIC Chile Research Labs

SANTIAGO DE CHILE  
JULIO 2017



RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN COMPUTACIÓN  
POR: MANUEL OSVALDO J. OLGUÍN MUÑOZ  
FECHA: JULIO 2017  
PROF. GUÍA: SANDRA CÉSPEDES U.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN FRAMEWORK INTEGRADO PARA  
SIMULACIONES DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE EN OMNET ++  
Y PARAMICS

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.



*Una dedicatoria corta.*



# Agradecimientos

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.





# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Estado del arte . . . . .	2
<b>2. Conceptos clave</b>	<b>5</b>
2.1. Paramics . . . . .	5
2.2. OMNeT++ . . . . .	5
2.3. TraCI . . . . .	5
2.3.1. Diseño . . . . .	5
<b>3. Comunicando Paramics con OMNeT++ mediante TraCI</b>	<b>9</b>
3.1. Diseño Arquitectural . . . . .	9



# Índice de Tablas



# Índice de Ilustraciones

2.1. Formatos de mensajes TraCI . . . . .	6
2.2. Ejemplo solicitud de variable TraCI. . . . .	7
2.3. Flujo de comunicación TraCI. . . . .	8
3.1. Arquitectura del Framework . . . . .	10



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Los sistemas de transporte conforman la columna vertebral de nuestras ciudades, contribuyendo directamente al desarrollo de la sociedad urbana. Un sistema de transporte bien diseñado y eficiente permite el desplazamiento rápido y cómodo de personas y bienes; en cambio, uno ineficiente genera grandes problemas, alargando los tiempos de viaje y aumentando la contaminación atmosférica. Los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS, por sus siglas en inglés: *Intelligent Transportation Systems*) surgen como una respuesta a la necesidad de optimización y modernización de los 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 [1]. De acuerdo al Departamento de Transportes de los EEUU<sup>1</sup>, estos sistemas se pueden dividir en dos grandes categorías: sistemas de infraestructura inteligente y sistemas de vehículos inteligentes.

Los 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. 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.

Por otro lado, la categoría de 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.

El factor común entre ambas categorías es la necesidad de extraer información en tiempo real desde el entorno, la cual debe procesarse y en muchos casos generar una respuesta a

---

<sup>1</sup>Office of the Assistant Secretary for Research and Technology (OST-R), <http://www.itsoverview.its.dot.gov/>

transmitir al usuario. Para este fin, se ha propuesto la implementación de tecnologías que posibiliten esta comunicación, principalmente utilizando redes inalámbricas, tanto de área local (los estándares incluidos en la familia WLAN, IEEE 802.11), como de área personal (WPAN, IEEE 802.15) [2, 3, 4]. Sin embargo, estas tecnologías fueron diseñadas originalmente para su uso en redes estáticas o con patrones de movimiento muy limitados, y es necesaria la evaluación de su desempeño en entornos altamente dinámicos como lo son los sistemas de transporte vehicular. Parámetros críticos para el funcionamiento óptimo de la red, como la potencia de transmisión, las condiciones del canal de transmisión y la distancia óptima entre nodos, deben establecerse teniendo en cuenta las particularidades que presentan los sistemas de transporte — por ejemplo, la alta congestión de nodos en intersecciones con semáforos.

Existe entonces hoy en día la necesidad de modelar de manera realista y precisa el comportamiento de éstas tecnologías en contextos de comunicaciones inalámbricas en redes vehiculares. Por otro lado, existe también la necesidad de modelar el impacto de la comunicación inalámbrica en un sistema de transporte, y cómo esta puede contribuir a optimizar la operación del mismo [5]. Un ejemplo de esto son los Sistemas Avanzados de Información al Viajero (*ATIS*, por sus siglas en inglés; *Advanced Traveller Information System*) los cuales proveen información en tiempo real sobre las condiciones del tránsito a conductores, permitiéndoles elegir la ruta más óptima para alcanzar su destino. Este *feedback* inmediato sin duda tiene efectos importantes en el flujo vehicular de un sistema de transportes, los cuales deben ser tomados en consideración al momento de modelar y simular el funcionamiento del mismo.

## 1.2. Estado del arte

La idea de integrar un simulador de redes inalámbricas con uno de transporte no es nueva. Sommer et al. argumentaron a favor de la idea el 2008 [5], e introdujeron su propia solución el 2011 [6]. A continuación se resumirá brevemente el estado del arte detallado en dichos documentos, junto con una evaluación de la implementación de los autores. Finalmente, se definirá la solución propuesta para este trabajo de memoria.

De acuerdo a Sommer et al., gran parte de la simulación de comunicaciones inalámbricas en ITS se hace a través de la importación de trazas de movimiento reales desde simuladores de transporte. 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.

Por otro lado, los autores destacan la existencia de un sistema de simulación bidireccional desarrollado por la Universidad Nacional de Chiao Tung, Taiwan [7], el cual permite



la simulación íntegra de un sistema de transportes dotado de capacidades de comunicación inalámbrica. No obstante, critican la incompatibilidad de dicho sistema con los modelos de protocolos de comunicación y transporte ya desarrollados para los simuladores más prominentes, limitando severamente su utilidad práctica en la investigación.

Finalmente, presentan su solución: VEINS, un *framework* de integración entre OMNeT++ [8], un simulador de redes inalámbricas, y SUMO [9], un simulador de redes de transporte. 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.

No obstante, 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 (versión 0.25.0), SUMO no contaba con un editor gráfico de redes de transporte<sup>2</sup>, 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. En el caso específico del Área de Transportes del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, el simulador de preferencia es Quadstone Paramics [10, 11], un simulador de tráfico de fuente cerrada.

Paramics es un simulador popular a nivel académico y de agencias de estados, y cuenta con una gran cantidad de modelos de redes de transporte reales gracias a contribuciones de estos. El software en sí está compuesto por un *suite* de componentes (Modelador, Procesador, Estimador, Analisador, Programador, Diseñador, etc.) que juntos conforman una plataforma completa y dinámica, capaz de simular una gran variedad de sistemas de transporte. Además, cuenta con una API completa y muy bien documentada para agregar funcionalidades al software mediante plugins desarrollados en C. Esta API permite la comunicación de Paramics con software externo, transmitiendo por ejemplo información del modelo y sus cambios en el tiempo. Una comparación de las características de SUMO, Paramics y un número de simuladores más se detalla en [11].

Por estas razones; facilidad de uso, popularidad en el mundo académico y, en específico, su extenso uso por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, el presente trabajo se enfocará en combinar Paramics con un simulador de redes inalámbricas. OMNeT++ surge como la opción natural para este fin, dado su excelente rendimiento en *frameworks* como VEINS, su modularidad y extensibilidad dada su naturaleza abierta y libre,

---

<sup>2</sup><http://sumo.dlr.de/wiki/FAQ>

su excelente documentación y su popularidad en la academia.

Cabe notar que una combinación de este tipo tampoco es algo completamente nuevo. Shalaby elaboró para su tesis de magíster en 2010 [12] un framework que permite la comunicación entre Paramics y OMNeT++. Sin embargo, su solución sólo contempla un caso muy acotado de interacción entre los simuladores, y sufre además por limitaciones en su implementación; por ejemplo, la comunicación entre los componentes se efectúa mediante archivos en disco, lo cual es sumamente ineficiente comparado con otras soluciones posibles (e.g. *sockets*).

# Capítulo 2

## Conceptos clave

### 2.1. Paramics

### 2.2. OMNeT++

### 2.3. TraCI

TraCI (**Traffic Control Interface**) es una arquitectura para la interacción con simuladores de redes de transporte, cuyo principal propósito es facilitar el diseño y la implementación de simulaciones de Sistemas de Transporte Inteligente [13]. Proporciona una interfaz unificada que permite no sólo la obtención de datos desde la simulación de transporte, sino que también permite el control directo sobre la ejecución de ésta y provee métodos para la modificación del comportamiento de sus componentes. Así, TraCI permite a un agente externo (como, por ejemplo, un simulador de redes) comunicarse de manera bidireccional con la simulación de la red de transporte, posibilitando un desarrollo dinámico de dicha simulación en reacción a estímulos externos.

Hoy en día, dicha arquitectura se encuentra integrada en SUMO, y se utiliza en conjunto con simuladores de redes de comunicación inalámbrica como OMNeT++ y NS2 para la simulación y estudio de Sistemas de Transporte Inteligente.

#### 2.3.1. Diseño

##### Mensajes

TraCI se basa en una arquitectura cliente-servidor, en la cual el simulador de redes de transporte asume el rol de un servidor pasivo que espera comandos desde un cliente activo.

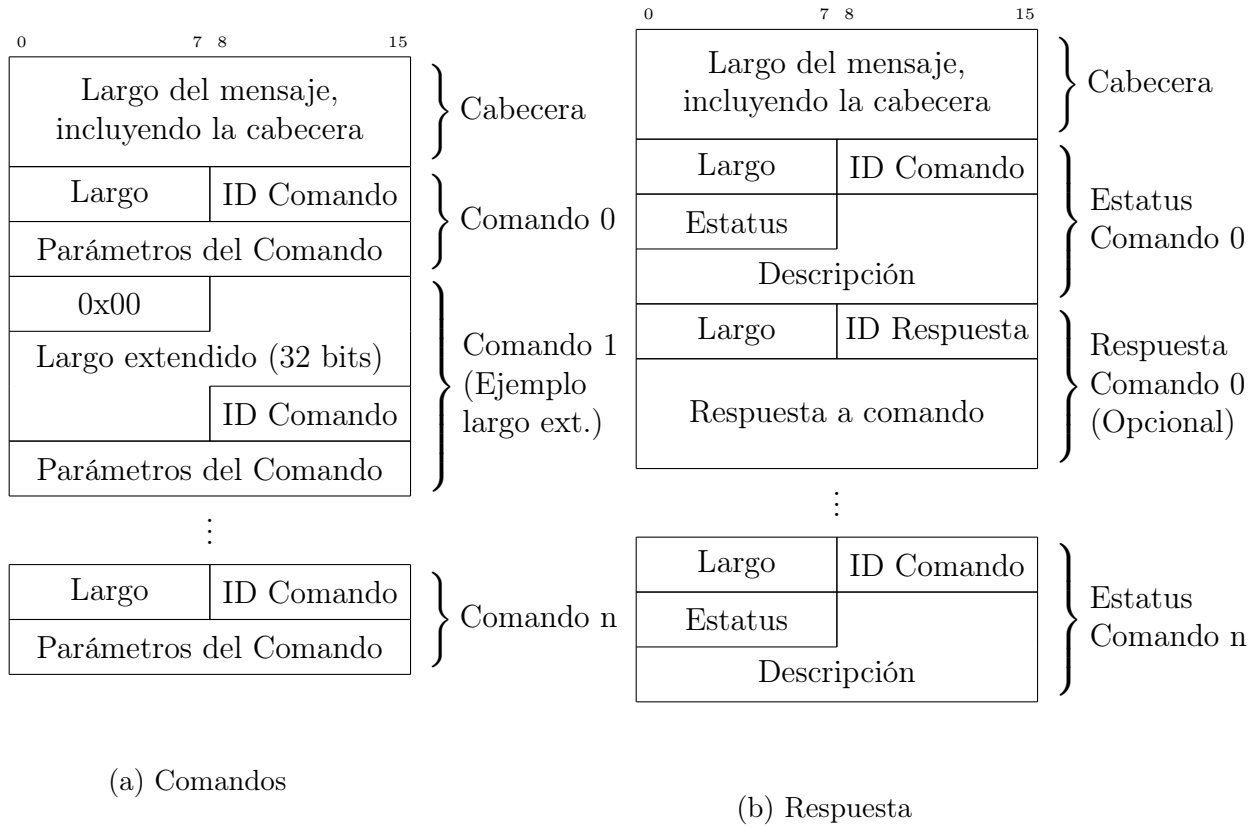


Figura 2.1: Formatos de mensajes TraCI

Define además un protocolo de comunicaciones de capa de aplicación para la transmisión de comandos e información entre servidor y cliente mediante un *socket* TCP.

La figura 2.1a ilustra la estructura básica de un mensaje TraCI enviado desde un cliente al servidor. Consiste en una cadena de comandos TraCI consecutivos que deben ser ejecutados por este último; cada comando tiene un largo y un identificador, y puede incluir información adicional – por ejemplo, en el caso de que se trate de un comando que asigne algún valor a una variable de la simulación. En caso de que el valor del largo exceda 255, se agrega un campo de 32 bits para almacenar dicho valor y el campo original se fija en 0x00.

Por otro lado, la figura 2.1b ilustra un ejemplo de respuesta del servidor, el cual debe responder a cada uno de éstos mensajes con una notificación del estado de la solicitud (“OK”, “ERROR” o “NO IMPLEMENTADO”) y, en caso de que corresponda, con información adicional de acuerdo a parámetros específicos definidos para cada comando. Finalmente, la figura 2.2 ilustra el flujo de mensajes para la solicitud de una variable de la simulación.

## Comandos

El protocolo define tres categorías de comandos disponibles:

- **Control de Simulación:** Esta categoría abarca en total tres comandos distintos, relacionados directamente con el control de la ejecución de la simulación:

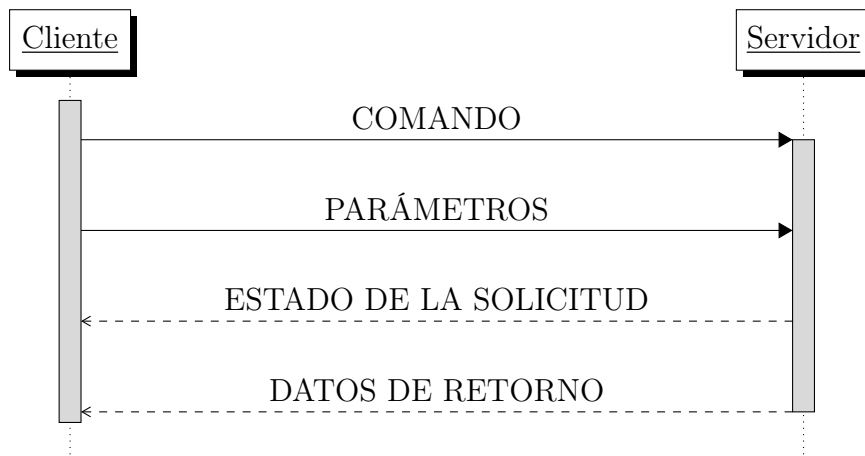


Figura 2.2: Ejemplo solicitud de variable TraCI.

0x00 GET VERSION Por diseño, es el primer mensaje en ser enviado por el cliente al iniciar una sesión TraCI – esto para asegurar versiones compatibles del protocolo con el servidor. Este último debe retornar un byte indicando la versión implementada de la API de TraCI y un *string* opcional de descripción del software.

0x02 SIMULATION STEP Corresponde al comando de control de simulación fundamental del protocolo, a través del cual el cliente controla la ejecución de cada paso de la simulación en el servidor.

Este comando tiene dos modos de operación; *single step* y *target time step*. En el modo *single step*, el servidor ejecuta exactamente un único instante de tiempo en la simulación, mientras que en el *target time step* el cliente le indica un instante de tiempo “objetivo”  $T$ , y el servidor ejecuta cuantos pasos sean necesarios tal que la simulación alcance el menor instante de tiempo  $t$  tal que  $t \geq T$ . En ambos modos, luego de avanzar la simulación, el servidor debe retornar las “suscripciones” que el cliente haya solicitado con anterioridad. Estas consisten en conjuntos de datos que el cliente puede requerir luego de cada ejecución de la simulación (por ejemplo, las posiciones de todos los vehículos de la simulación).

0x7f CLOSE Este mensaje es enviado por el cliente cuando desee cerrar la conexión y finalizar la simulación. El servidor entonces anuncia la recepción del comando y procede a cerrar el socket.

- **Obtención de Valores:** Esta categoría abarca una gran cantidad de comandos asociados a variables internas de la simulación vehicular o de sus componentes (vehículos, cruces, etc.). Cada comando representa a un conjunto de variables específicas; por ejemplo, 0xa2 GET TRAFFIC LIGHTS VARIABLE agrupa y obtiene los valores asociados a las variables propias de los semáforos en la red simulada, mientras que 0xa4 GET VEHICLE VARIABLE está relacionado exclusivamente con los valores de los vehículos presentes en la red.
- **Modificación de Estados:** Finalmente, aquí se agrupan aquellos comandos que modifican valores y parámetros de la simulación y al igual que en la categoría anterior, cada comando de esta categoría está asociado a un conjunto de variables. Estos comandos tienden a ser más complejos que aquellos de categorías anteriores, ya que por razones obvias incluyen más información que debe ser interpretada por el servidor.

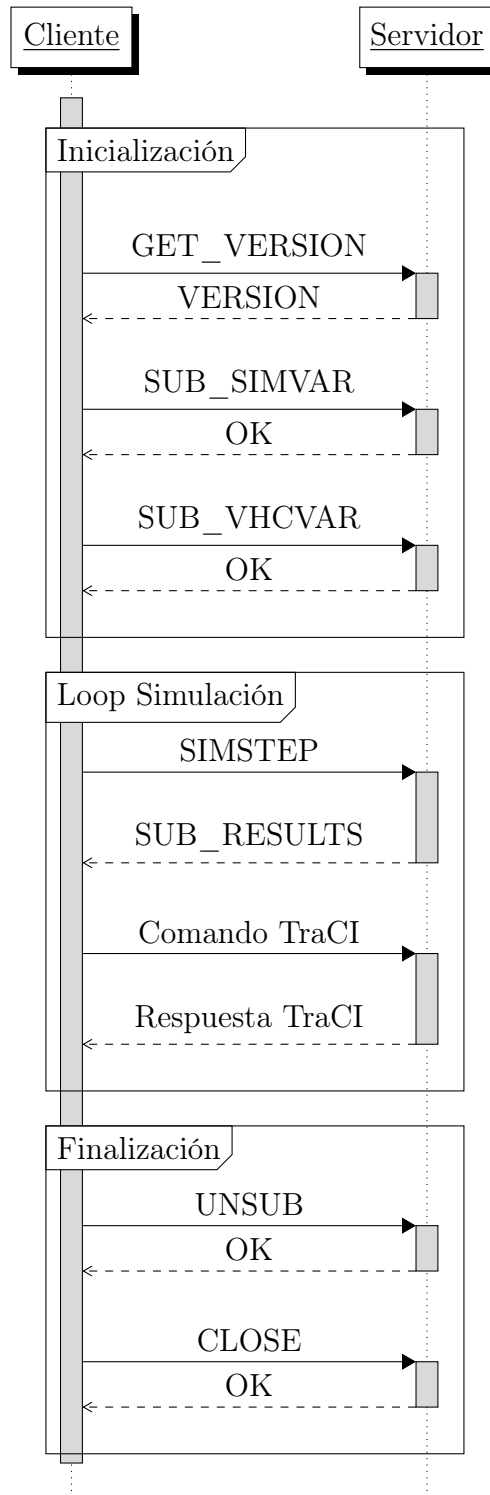


Figura 2.3: Flujo de comunicación TraCI.

## Capítulo 3

# Comunicando Paramics con OMNeT++ mediante TraCI

### 3.1. Diseño Arquitectural

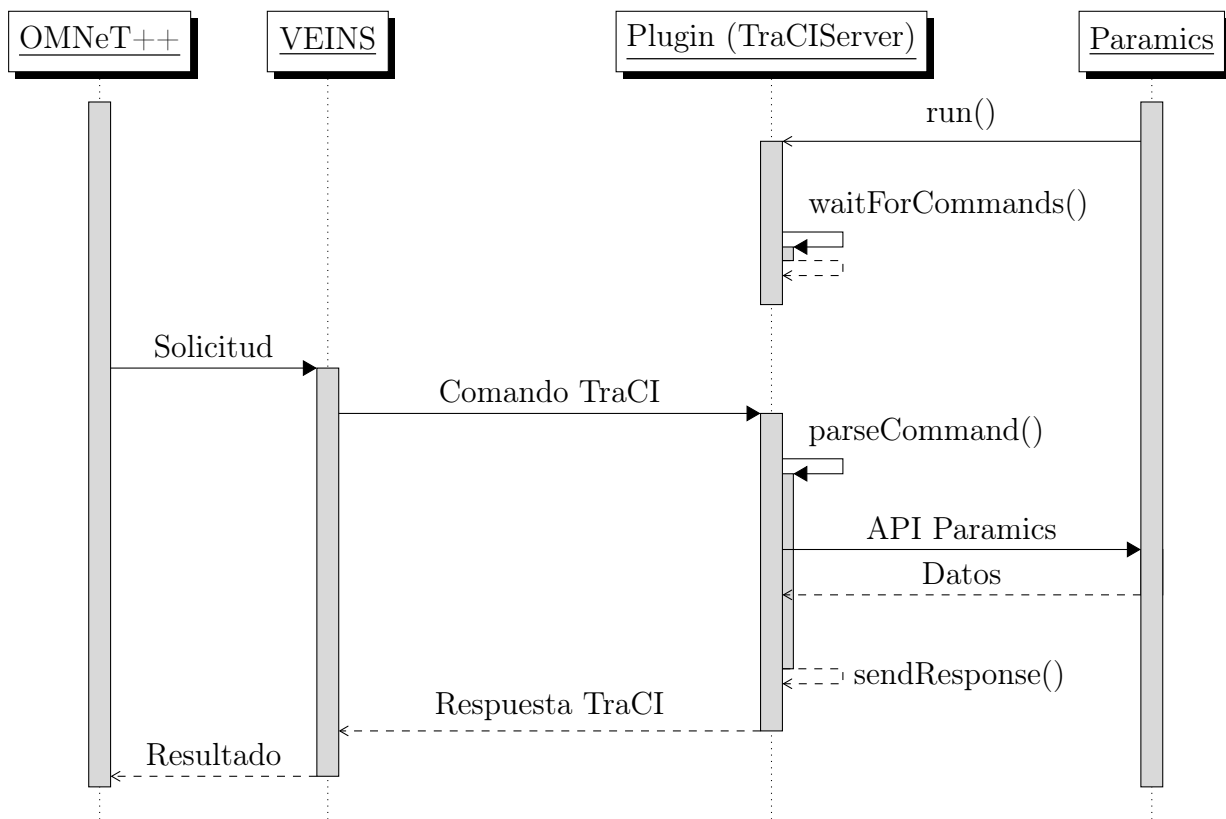


Figura 3.1: Arquitectura del Framework



# Bibliografía

- [1] European Parliament, *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.
- [2] D. J. Dailey, K. McFarland, and J. L. Garrison, “Experimental study of 802.11 based networking for vehicular management and safety,” in *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 1209–1213, June 2010.
- [3] W. Xiong, X. Hu, and T. Jiang, “Measurement and characterization of link quality for IEEE 802.15.4-compliant wireless sensor networks in vehicular communications,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, pp. 1702–1713, Oct 2016.
- [4] D. Jiang and L. Delgrossi, “IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments,” in *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 2036–2040, May 2008.
- [5] C. Sommer, Z. Yao, R. German, and F. Dressler, “On the need for bidirectional coupling of road traffic microsimulation and network simulation,” in *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE Workshop on Mobility Models*, MobilityModels ’08, (New York, NY, USA), pp. 41–48, ACM, 2008.
- [6] C. Sommer, R. German, and F. Dressler, “Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved IVC analysis,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, pp. 3–15, Jan 2011.
- [7] S. Y. Wang, C. L. Chou, Y. H. Chiu, Y. S. Tzeng, M. S. Hsu, Y. W. Cheng, W. L. Liu, and T. W. Ho, “NCTUns 4.0: An integrated simulation platform for vehicular traffic, communication, and network researches,” in *2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, pp. 2081–2085, Sept 2007.
- [8] A. Varga and R. Hornig, “An overview of the OMNeT++ simulation environment,” in *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, p. 60, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.
- [9] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann, and D. Krajzewicz, “SUMO - Simulation of Urban MObility: An overview,” in *SIMUL 2011* (S. . U. of Oslo Aida Omerovic, R. I. R. T. P. D. A. Simoni, and R. I. R. T. P. G. Bobashev, eds.), Think-Mind, October 2011.
- [10] “Quadstone Paramics website.” <http://www.paramics-online.com>. Visitado 03/2017.
- [11] G. Kotusevski and K. Hawick, “A review of traffic simulation software,” 2009.
- [12] Y. Shalaby, “An integrated framework for coupling traffic and wireless network simulations,” Master’s thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 2010.

- [13] A. Wegener, M. Piórkowski, M. Raya, H. Hellbrück, S. Fischer, and J.-P. Hubaux, “Traci: An interface for coupling road traffic and network simulators,” in *Proceedings of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium*, CNS '08, (New York, NY, USA), pp. 155–163, ACM, 2008.