

Índice general

Índice general	I
Índice de cuadros	II
Índice de figuras	III
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación y Planteamiento del Problema	4
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.2. Objetivos Específicos	6
1.4. Estructura del trabajo	6
2. Descripción del Instituto Receptor	8
2.1. Reseña histórica	9
2.2. Misión y Visión	14
2.3. Objetivo del equipo receptor: Imara	15
2.4. Documentos y Publicaciones	16
Bibliografía	17

Índice de cuadros

Índice de figuras

2.1. Logo del Inria	8
2.2. PhD. Prof. Jacques-Louis Lions	10
2.3. Mapa Organizacional del Inria	13
2.4. Equipo Imara	14

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Desde la prehistoria, la humanidad ha aprendido a crear y utilizar herramientas para su beneficio. A lo largo de la historia, se ha demostrado que no sólo utilizamos las creaciones previas, sino que con el paso del tiempo somos capaces de adaptarnos, mejorar e innovar en el sin número de ramas de la ciencia existentes hoy en día. De esta manera, no es extraño ver la creación de herramientas que mejoran nuestro nivel de vida y nos ayudan a superar los obstáculos de la vida cotidiana.

Con el paso de los años las herramientas han cobrado valor, no solo por el ahorro de tiempo que representan en nuestra vida, sino también por la comodidad que sentimos al utilizarlas, y ver lo fácil que es realizar tareas que antes eran simplemente imposibles. Los años además nos han enseñado que la educación es una de las bases para el desarrollo de la sociedad y para que, en el seno de ésta, sea factible el desarrollo de la investigación.

En 1885 Karl Friedrich Benz crea el “*Motorwagen*”, el cual es considerado el primer

vehículo de combustión interna de la historia, creando así una de las herramientas más influyentes en la actualidad. Por su lado, Henry Ford crea la compañía “Ford Motor Company” en junio de 1903, compañía que más tarde sentaría las bases de la cadena de producción que abarató el precio del automóvil. Posteriormente dicha cadena de producción fue adoptada por la industria automotriz en pleno, permitiendo la popularización del automóvil. Lo demás, es historia.

Institutos de investigación como el Inria (Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automática, del francés: Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), universidades como la Universidad Simón Bolívar y grupos de investigación dentro de ella como el Grupo de Investigación en Mecatrónica, hacen posible que la sociedad sea educada para hacer frente a las necesidades de hoy y del mañana, específicamente en el área de control y automatización.

En la actualidad, el norte en la investigación automotriz se ve muy marcado por institutos, universidades y fabricantes de éste tipo, los cuales han consolidado las ideas anteriores y trabajan en pro de automatizar la conducción y lograr el control sobre vehículos reales. La conducción autónoma, a pesar de haber sido considerado por mucho tiempo un tema utópico, es hoy uno de los frentes que ataca la ciencia, para adaptar, mejorar e innovar el automóvil, el cual ha sido una herramienta clave en el desarrollo de la sociedad.

Los primeros pasos ya han sido dados con investigaciones en el campo de los sistemas de ayuda a la conducción (ADAS, del inglés: Advance Driver Assistance Systems), donde el control crucero adaptativo, el aparcamiento automático, entre otros, son ideas que ya están implementadas por las compañías de vehículos, las cuales permiten que incluso personas con

discapacidades sean capaces de conducir [3].

Desde esta iniciativa, muchos proyectos, demostraciones e investigaciones se han llevado a cabo en lo que es llamado los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, del inglés: Intelligent Transportation Systems). Estos sistemas comprenden aplicaciones avanzadas que apuntan a mejorar la conducción, implementando para ello técnicas de control, comunicaciones y entornos virtuales, alcanzando una mayor comodidad, seguridad e inteligencia en los medios de transporte modernos. Dentro del marco de los ITS, encontramos a los Sistemas Cibernéticos de Transporte (CTS, del inglés: Cybernetic Transportation Systems), los cuales utilizan sistemas de percepción, comunicación y planificación de ruta, para mejorar el transporte en entornos urbanos.

El concepto urbano y los CTS vienen de la mano con el concepto *Cybercars* [4], el cual consiste en vehículos experimentales computarizados pensados para las ciudades. Dicho concepto ha sido desarrollado y probado en escenarios reales, alcanzando a realizar maniobras como manejo en pelotón, paradas de emergencia, intersecciones, entre otras. A pesar de todo el esfuerzo ya realizado, los vehículos completamente autónomos tienen un camino por recorrer antes de llegar a las manos del ciudadano común; razón por la cual los trabajos previos aún sugieren mejoras dentro de las etapas de comunicación y decisión.

El presente proyecto consiste en mejorar y desarrollar estrategias de control, específicamente en el área de planificación de trayectorias, para vehículos eléctricos autónomos en entornos urbanos. El proyecto fue realizado en las instalaciones del Inria, en la sede París-Rocquencourt, en el marco del equipo Imara (Informática, Matemática y Automática para la Ruta Automatizada, del francés: Informatique, Mathématiques et Automatique pour la

Route Automatisée).

1.2. Justificación y Planteamiento del Problema

En la actualidad, el campo de los CTS es de gran importancia dentro de los ITS. Dicho campo se centra en el problema de congestionamiento de las ciudades modernas, y trata de resolverlo recurriendo a vehículos autónomos (Los anteriormente mencionados *Cybercars*). Este tipo de vehículos se encuentra a la vanguardia gracias a su versatilidad, adaptabilidad y características ecológicas, siendo ya implementados en varias presentaciones y parques temáticos [1, 2].

Investigaciones recientes apuntan a temas como intersecciones, cruces de caminos, redomas y riesgos de colisión, los cuales son considerados como algunos de los más interesantes en el campo de los CTS. En competencias recientes como el *DARPA Urban Challenge*¹, o el *GCDC*², es clara la atención que se le da a dichos temas, prometiendo en un futuro cercano la existencia de vehículos autónomos en las ciudades y carreteras. Por otro lado, en [5] se evidencian grandes aportes en materia de conducción urbana, siendo el control (lateral y longitudinal) el principal tema, que lidian con cruces, redomas, cambios de carril, entre otros.

Tomando en cuenta estos precedentes, el presente trabajo se basa en la mejora y el desarrollo de nuevas técnicas y algoritmos de control, específicamente en la planificación de trayectorias para vehículos autónomos en entornos urbanos. Partiendo de trabajos previos en el grupo Imara, en [1, 6] se presenta resuelto el problema de conducción autónoma para CTS a través de estaciones, sin embargo, éstos presentan un perfil estático en cuanto a la planifica-

¹<http://archive.darpa.mil/grandchallenge/>

²http://www.gcdc.net/mainmenu/Home/the_Challenge

ción de la ruta, es decir, ésta no cambia en todo el trayecto.

El problema principal se visualiza en la imposibilidad de cambiar la ruta en tiempo real al momento de eventos imprevistos (la parada de emergencia sí está considerada), como obstáculos móviles, estacionarios o incluso un comando del operador, por ejemplo, peatones, otros vehículos, trabajos en la vía, etc. Para ello, una nueva arquitectura de control es presentada, la cual permite realizar ajustes en la trayectoria, respondiendo dinámicamente a situaciones imprevistas.

Parte del problema recae en el tratamiento del mapa por parte de la arquitectura anterior. Ésta, sólo podía funcionar por una ruta pregrabada a mano, con gran cantidad de puntos tanto en tramos rectos como curvos, lo cual hacía imposible su modificación, y además añadía ruido al momento que el controlador interpretaba la trayectoria a seguir, sin mencionar que impedía modificaciones para insertar la curvatura como variable del control lateral.

El presente trabajo también parte de aportes para entornos urbanos en [5], el cual presenta puntos importantes para el manejo en redomas e intersecciones con curvas paramétricas. Dichas curvas son analizadas para la obtención de trayectorias cómodas y seguras para los pasajeros. Además la curvatura es introducida como parámetro de control lateral, sumada al error lateral y el error angular.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Mejorar y desarrollar nuevas estrategias de control, específicamente en el área de planificación de trayectorias, para vehículos eléctricos autónomos (Cybercars) en entornos urbanos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudio del estado del arte de los vehículos autónomos y, concretamente, vehículos eléctricos Cybercars.
- Búsqueda de diferentes maneras de generar curvas paramétricas. Simulaciones y comparaciones.
- Implementación en las plataformas reales.
- Verificaciones en diferentes escenarios.

1.4. Estructura del trabajo

Luego de presentar el problema y los objetivos específicos, el presente trabajo tiene 6 capítulos aparte de éste, los cuales serán organizados de la siguiente manera:

En el **capítulo 2** se muestra una descripción detallada del instituto receptor (Inria), su historia, su presente, sus objetivos, además de una descripción del grupo Imara; grupo dentro del cual el pasante realizó el presente trabajo de investigación.

Una revisión del estado del arte se evidencia en el **capítulo 3**, el cual describe ciertas aplicaciones en robótica móvil. Los grandes grupos a nivel mundial trabajando en la conducción autónoma de vehículos. Los ITS en conjunto con los CTS y los Cybercars, específicamente en entornos urbanos. Diferentes técnicas de generación de trayectorias, ecuaciones paramétricas, entre otras.

El **capítulo 4** describe la arquitectura de control presentada. A pesar que todos sus módulos son explicados, se profundizará en las etapas de decisión y control. Se explica las técnicas utilizadas para la generación de la trayectoria, así como el control lateral y longitudinal utilizado.

Las plataformas experimentales son presentadas en el **capítulo 5**. En las simulaciones se habla de ProSivic, simulador que utiliza una plataforma 3D para emular vehículos como los Cybercars, implementando diferentes sensores como IMU (Unidad Medidora de Inercia, del inglés: Inertial Measurement Unit), láseres, odometría, entre otros. Por su parte las plataformas reales citan a los Cybercars y sus características de implementación.

En el **capítulo 6** se muestran los resultados experimentales, entre ellos se contemplan las simulaciones realizadas con escenarios de tipo intersección, redomas, cambios de carril. Además se muestra una pequeña referencia a las pruebas reales.

Finalmente, el **capítulo 7** cierra con las conclusiones. Aquí se describen los puntos más resaltantes del presente trabajo, así como las posibles investigaciones futuras, derivadas de esta investigación.

Capítulo 2

Descripción del Instituto Receptor

El Inria¹ (Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automática, del francés: Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), es un instituto de investigación francés fundado en 1967. Éste posee 8 sedes alrededor de Francia, es el único centro público francés completamente dedicado a la Informática y la Automática (Figura 2.1).



Figura 2.1: Logo del Inria

El Inria es hoy en día uno de los centros de investigación de tecnología de punta, liderando y formando parte de un sin número de proyectos en el ámbito europeo, así como en el internacional. Dentro de él se encuentran un gran número de grupos de investigación, siendo uno de ellos el equipo Imara² (Informática, Matemáticas y Automática para la Ruta Automatizada, del francés: Informatique, Mathématiques et Automatique pour la Route Automatisée), el

¹Página Web. <http://www.inria.fr/>

²Página Web. <https://team.inria.fr/imara/>

cual será el equipo receptor del presente trabajo.

2.1. Reseña histórica

EL Inria

Con más de cuarenta años desde su fundación, ha abordado las ciencias de la computación desde su infancia, hasta el dominio digital del presente. Su historia puede ser resumida en cuatro períodos importantes a saber a continuación:

1967-1973: En búsqueda del rumbo.

La creación del Inria (1967), fue un símbolo de la política proactiva francesa presente en el gobierno del presidente De Gaulle. En estos tiempos, el estado francés buscaba desarrollar tecnologías de punta y su posterior producción. Lo anterior promueve al estado francés a desarrollar un instituto, con capacidad competitiva en el ámbito informático y de control, el cual tendría además, la capacidad de educar al país en informática y automática.

En sus inicios, su nombre era Iria (Instituto de investigación en Informática y automática, del francés: Institut de Recherche en Informatique et en Automatique), siendo incluso hoy en día una institución que sirve de puente entre el sector público y la industria. Pensado para ser la mano derecha del CII (Compañía Internacional para la Informática, del francés: Compagnie Internationale pour l'informatique), el Iria se crea bajo el mando de Michel Laudet.

Su carácter internacional salió a relucir de inmediato, gracias a la organización de diferentes conferencias internacionales, a las cuales eran invitados los grandes pensadores del mundo de la informática y las matemáticas aplicadas. Siendo una de sus prioridades la educación dentro de los campos previamente mencionados, se establecen varias escuelas de verano y

centros de cursos.

1974-1979: El largo camino a la madurez.

El período de 1974-1979 vio tanto la maduración del centro, como su modificación en algunos proyectos internos. Para este punto es importante mencionar a Jacques-Louis Lions, quien para 1973 era jefe de Laboria (Laboratorio de Investigación en Informática y Control, del inglés: The computer science and control research laboratory).

Gracias a Laboria, laboratorio que formaba parte del Iria, se realizaron presentaciones en Francia, Europa y Estados Unidos, lo cual colocó al Iria a la vanguardia de las investigaciones en el campo computacional.

En 1979, la descentralización francesa amenaza con desaparecer el Iria, esto debido a que se pensaba absorber al Iria con algún instituto como el IRISA (Instituto de Ciencias de la Computación y Sistemas Aleatorios, del francés: Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires). Sin embargo, al asumir Jacques-Louis Lions el cargo de CEO, el instituto fue conservado en Rocquencourt (París) y, el 27 de diciembre de 1979, al nombre le fue agregada una “N”, conocido de ese momento en adelante como el Inria.



Figura 2.2: PhD. Prof. Jacques-Louis Lions

1980-2000: La rápida expansión del Inria.

El cambio más grande en la historia del Inria se hace realidad al llegar Jacques-Louis Lions a la presidencia en 1980 (Ver Figura 2.2). El instituto aún carecía de los recursos necesarios, sin embargo, un modelo de desarrollo de tecnologías de alta calidad, para el desarrollo de la industria, fue aplicado exitosamente.

Gracias a la creación de una red europea de investigadores, el Inria jugó un papel importante en el desarrollo del internet en Europa. Ya para este momento, luego de innumerables ensayos y errores, el Inria poseía un claro rumbo, y una muy alta reputación internacional.

En este período, fueron construidos varios centros alrededor de Francia, gracias a la descentralización. Entre ellos tenemos:

- Irista y la unidad de investigación en Rennes en 1975.
- La unidad de investigación Sophia-Antipolis en 1983.
- La unidad de investigación en Lorraine / Loria en 1986.
- La unidad de investigación Rhone-Alpes en 1992.
- La unidad de investigación Futurs desde el 2003, con miras a tres unidades nuevas en Bordeaux, Lille y Saclay.

Dentro del marco del instituto, la tecnología innovadora era y es una constante, incurriendo constantemente en actividades que incluyen la creación de patentes, asociaciones con entes del sector industrial, el funcionamiento de consorcios y el soporte para la innovación en

los negocios. Sin duda, el número de colaboración internacional creció rápidamente.

Inria llega al siglo 21

Para el 2007, Inria llega a su 40vo aniversario, con una expansión notable. Entre 1999 y 2009, su fuerza de trabajo se vio duplicada. Tres nuevos centros de investigación fueron añadidos a los cinco ya existentes, estos fueron los centros de Saclay, Bordeaux y Lille. Fuertemente arraigado en el ámbito de la industria local y la educación, el Inria busca actualmente un mayor desenvolvimiento en cuanto al ámbito de investigación europeo.

Actualmente el Inria se encuentra organizado como se presenta en la Figura 2.3. Todos sus integrantes, teniendo en cuenta que el futuro de nuestras sociedades yace en el mundo digital, el Inria ataca problemas cruciales en el desenvolvimiento de las sociedades de hoy en día. Siendo una de las 10 primeras instituciones contribuyentes al Marco de Programas Europeos para la Investigación y el Desarrollo (FPRD, del inglés: European Framework Programmes for Research and Developement).

Finalmente es importante resaltar la mirada al futuro del Inria con su plan estratégico 2008-2012, el cual se basa en superar los retos del siglo 21. Inria está en constante evolución y fortalecimiento gracias a asociaciones con diferentes disciplinas científicas y el mundo económico, especialmente en Francia, Europa, Estados Unidos y regiones emergentes como China, India, Suramérica y África.



Figura 2.3: Mapa Organizacional del Inria

Equipo Imara



Figura 2.4: Equipo Imara

El equipo Imara (Figura 2.4), creado en el 2008, está orientado a la investigación en ITS, (Sistemas de Transporte Inteligentes, del inglés: Intelligent Transportation Systems). Su estructura organizacional se ve conformada por un equipo de carácter horizontal, liderado actualmente por el PhD. Prof. Fawzi Nashashibi y respondiendo a la rama de investigación de la PhD. Prof. Isabelle Ryl (Ver centro de la Figura 2.3), siendo su

objetivo inicial la agrupación de conocimientos del Inria y el mundo, donde dichos conocimientos son aplicables a la Automática en vehículos autónomos y al concepto LaRA³ (La ruta automática, del francés: La Route Automatisée).

2.2. Misión y Visión

La principal misión del Inria se enfoca en la excelencia científica y la transferencia de tecnología⁴ (del francés: Les missions d'Inria concernent l'excellence scientifique et le transfert technologique). Sin embargo, las palabras de Michael Cosnard, presidente y CEO (Jefe Ejecutivo, del inglés: Chief Executive Officer) del Inria pueden dar un mejor entendimiento a la frase anteriormente expuesta:

Conceiving the infrastructures of the future sustainable digital society is one of our priorities. Energy consumption related to these technologies, their environmental impact and the potential for ensuring a sustainable development of our societies are key issues

³imara.inria.fr/lara

⁴<http://www.facebook.com/Inria.fr/info>

that mobilize our research teams. With our experience of partnership with numerous public and private leaders of research and innovation, we are convinced that the joint efforts within the GreenTouch Initiative will provide genuine solutions to these challenges.

*Michel Cosnard, Chairman and CEO, Inria*⁵

En español:

Concebir las infraestructuras del futuro de la sociedad digital sostenible es una de nuestras prioridades. El consumo de energía relacionado con estas tecnologías, su impacto ambiental y la posibilidad de garantizar un desarrollo sostenible de nuestras sociedades son cuestiones clave que movilizan nuestros equipos de investigación. Con nuestra experiencia de colaboración con numerosos líderes públicos y privados de investigación e innovación, estamos convencidos de que los esfuerzos conjuntos de la Iniciativa GreenTouch proporcionará soluciones reales a estos desafíos.

Michael Cosnard, Presidente y CEO, Inria.

2.3. Objetivo del equipo receptor: Imara

Mejorar el transporte terrestre en términos de seguridad, eficiencia y confort; basado en investigaciones orientadas a tecnologías de ayuda al conductor, hasta alcanzar el completo manejo automatizado⁶. Esto se logra gracias a la coordinación y transferencia de todas las investigaciones hechas en el Inria, las cuales pueden ser aplicadas al concepto LaRA.

⁵<http://www.greentouch.org/index.php?page=inria>

⁶<https://team.inria.fr/imara/>

2.4. Documentos y Publicaciones

En el marco del presente trabajo se realizaron cuatro documentos internos del instituto Inria, una presentación de carácter explicativo del proyecto, un paper entregado al IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2013⁷, y un segundo paper entregado a la revista RIAI⁸ (Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial).

Se da evidencia de dichos documentos en el apéndice xxxxxxxx??? Pongo aquí los abstracts???. Después vere como poner esto.

Esto no debería ir en otro lado???, es decir, lo quiero poner, pero no sé si se ve bien aquí. Le haré referencia a que fueron añadidos a los apéndices.

⁷Página Web. <http://iv2013.org/>

⁸Página Web. <http://riai.isa.upv.es/>

Bibliografía

- [1] L. Bouraoui, C. Boussard, F. Charlot, C. Holguin, F. Nashashibi, N. Parent, Michel, and P. Resende, “An on-demand personal automated transport system: The CityMobil demonstration in La Rochelle,” in *IV’2011 : IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Baden-Baden, Allemagne, Jun. 2011, Poster. [Online]. Available: <http://hal.inria.fr/inria-00625980>
- [2] V. Dupourque, “Automatic people transportation: Operational achievements,” Robosoft, Tech. Rep., 2008.
- [3] D. Ferguson, T. Howard, and M. Likhachev, “Motion planning in urban environments: Part i,” in *Proceedings of the IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, September 2008.
- [4] A. Furda and L. Vlacic, “An object-oriented design of a world model for autonomous city vehicles,” in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp. (IV)*, 2010, pp. 1054–1059.
- [5] J. Pérez Rastelli, “Agentes de control de vehículos autónomos en entornos urbanos y autovías,” Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Mar. 2012. [Online]. Available: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00732953>
- [6] P. Resende, F. Nashashibi, F. Charlot, C. Holguin, L. Bouraoui, and M. Parent, “A Cooperative Personal Automated Transport System - A CityMobil Demonstration

in Rocquencourt,” in *ICARCV 2012 : 12th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Nanyang Technological University of Singapore, Chinese University of Hong Kong and IEEE Guangzhou Control Chapter. Guangzhou, Chine: IEEE, Dec. 2012. [Online]. Available: <http://hal.inria.fr/hal-00732860>