

ALBERTO DÍAZ ÁLVAREZ

MODELADO DE COMPOR- TAMIENTO DE CONDUCTO- RES CON TÉCNICAS DE INTELIGENCIA COMPU TACIONAL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Alberto Díaz Álvarez

Modelado de comportamiento de conductores con técnicas de Inteligencia Computacional

Tesis doctoral, 21 de agosto de 2016

Revisores: Rev1, Rev2 y Rev3

Supervisores: Dr. Francisco Serradilla García y Dr. Felipe Jiménez Alonso

Instituto Universitario de Investigación del Automóvil

Universidad Politécnica de Madrid

Campus Sur UPM, Carretera de Valencia (A-3), km7

28031 Madrid

Este documento esta realizado bajo licencia **Creative Commons “Reconocimiento-CompartirIgual 3.0 España”** .



Para Davi.

Índice general

1	<i>Introducción</i>	15
2	<i>inteligencia computacional</i>	21
3	<i>Agentes inteligentes y sistemas multiagentes</i>	29
4	<i>Simulación de tráfico</i>	31
5	<i>Modelos de comportamiento</i>	43
6	<i>Sistemas desarrollados</i>	55
7	<i>Estudio de modelos de comportamiento</i>	57
8	<i>Conclusiones</i>	59

Índice de figuras

- 1.1. Desde el comienzo de la revolución industrial, el uso masivo de combustibles fósiles y el crecimiento de la población propició un aumento desproporcionado de CO_2 a la atmósfera que continua todavía hoy. La gráfica muestra cómo ambos valores parecen estar correlacionados. Fuente: Environmental Defense Fund (edf.org). 17
- 1.2. Último censo de conductores segmentado por edades. Fuente: Dirección General de Tráfico (dgt.es). 19
- 2.1. Ilustración del Test de Turing. Propuesto modelo para probar si una máquina es capaz de exhibir comportamiento inteligente similar al del ser humano. Hay tres participantes, dos humanos (A y C) y una máquina (B), separados entre sí pero pudiendo intercambiarse mensajes de texto. C envía preguntas a A y B sin saber quién es humano y quién es máquina y éstos le responden. Si C no es capaz de identificar qué participante es la máquina, se puede concluir que la máquina es inteligente. Fuente: Hugo Féréé, via Wikimedia Commons. 21
- 2.2. El experimento mental de la habitación china (ver [[Preston and Bishop, 2002](#)]) propuesto por John Searle. Se trata de un Test de Turing donde la máquina ha aprendido a hablar chino y es reemplazada por una persona que no sabe nada del idioma pero que va equipada con manual de correspondencias del tipo “entra esta secuencia de ideogramas, sale esta secuencia de ideogramas”. Cuando una persona le manda mensajes en chino, esta otra responde, pero ¿podemos decir que dicha persona sabe chino? Evidentemente no. Entonces, cómo podemos asegurar que la máquina reemplazada ha “aprendido” chino. Autor: Jolyon Troscianko (<http://www.jolyon.co.uk/>) 21
- 2.3. Objetivos que persigue la inteligencia artificial. Las filas diferencian entre pensamiento o comportamiento mientras que las columnas separan entre inteligencia humana o inteligencia racional. Fuente: *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd Ed.), [[Russell et al., 2003](#)]. 23

- 2.4. Una sección del neocórtex humano, región asociada a las capacidades cognitivas y que supone alrededor de un 76% del volumen total del cerebro humano. Está distribuido en 6 capas y miles de columnas que las atraviesan, cada una con alrededor de 10,000 neuronas y un diámetro de 0,5mm. Fuente: *Blue Brain Project EPFL*, <http://bluebrain.epfl.ch/>. 25
- 4.1. Taxonomía clásica de los simuladores en función de la granularidad (complejidad) de la simulación. 32
 - 4.2. Aproximaciones alternativas de modelos en función de la complejidad. Ejemplo de mesosimulación como ventana de microsimulación dentro de un flujo en un macrosimulador (e.g. [Munoz et al., 2001]) y ejemplo de submicrosimulación donde se modelan componentes internos del vehículo. 33
 - 4.3. Ejemplo de un simulador de tráfico basado en autómatas celulares. En éste, el espacio se divide en celdas que pueden, o bien estar vacías, o bien ocupadas por un vehículo. La ilustración representa la evolución de los tiempos para cada vehículo (representado por un punto) según se desplaza a través del espacio discretizado en celdas de 7,5m. Concretamente muestra la evolución a lo largo del tiempo del movimiento de un modelo de *car-following* de tres vehículos. Fuente: [Brilon and Wu, 1999]. 34
 - 4.4. Ejemplo de un modelo lineal en un espacio continuo. La posición del vehículo es un valor $x \in \mathbb{R}$. Este ejemplo representa un modelo de *car-following* donde el comportamiento de la aceleración del vehículo es determinado por la distancia al coche siguiente. Fuente: [Tordoux et al., 2011]. 35
 - 4.5. Representación de la evolución de un atasco en una autopista de 100 celdas de longitud usando el modelo Nagel-Scherckenberg. Con una densidad de ocupación $\rho = 0,35$ y una probabilidad de frenada de $p = 0,35$ se puede observar en la figura cómo se desplazan las olas del atasco a lo largo de los 100 ciclos de la simulación. Fuente: Wikimedia 36
 - 4.6. Captura de pantalla del simulador MovSim. Este simulador implementa un modelo multiagente donde los vehículos incorporan sistemas de comunicación vehicular. El estudio se centra en el uso de la comunicación entre vehículos para el acoplamiento dinámico de vehículos en sus respectivos carriles. Fuente: [Gu et al., 2015]. 38
 - 4.7. Ejemplo de pantalla del simulador Simulation of Urban Mobility (SUMO). Además de entorno de simulación propiamente dicho, SUMO provee de una interfaz gráfica que permite una visualización general, de zonas y de elementos en concreto a la vez que permite la variación de configuración de la simulación durante el desarrollo de la misma. 42

- 5.1. Los tres niveles jerárquicos que describen la tarea de conducción según [Michon, 1985]: *estrategia* (i.e. las decisiones generales), la *maniobra* (i.e. decisiones durante la conducción de más corto plazo) y *control* (i.e. comportamientos automáticos). (TODO!Hacer mejor esta figura)

Índice de cuadros

- 1.1. Línea temporal de los principales hitos en la AI. Actualmente la AI está ofreciendo resultados muy prometedores áreas como la conducción autónoma, el procesamiento del lenguaje natural o el análisis de sentimiento entre muchos otros. 15

Capítulo 1

Introducción

Es un hecho que la **inteligencia artificial** (AI, **artificial intelligence**) en general (y la **inteligencia computacional** (CI, **computational intelligence**) en particular) como área de conocimiento ha experimentado un creciente interés en los últimos años. Esto no siempre ha sido así, ya que después de un nacimiento muy esperanzador, con mucho optimismo, le siguieron unas épocas de apenas avance (ver cuadro 1.1). Sin embargo, en la actualidad es muy difícil encontrar un campo que no se beneficie directamente de sus técnicas.

Una de sus razones es su carácter multidisciplinar ya que, si bien se la define como área perteneciente al campo de la informática, es transversal a muy diferentes campos, como pueden ser por ejemplo la biología, neurología o la psicología, entre otros.

Dentro del área de la **inteligencia artificial** es común diferenciar dos tipos de aproximaciones a la hora de hablar de cómo representar el conocimiento: la **inteligencia artificial clásica**, que postula que el conocimiento como tal se puede reducir a un conjunto de símbolos con operadores para su manipulación, y la **inteligencia computacional**, que defiende que al conocimiento se llega a través del aprendizaje, y que basa sus esfuerzos en la simulación de elementos de bajo nivel que subyacen a los comportamientos inteligentes esperando que el conocimiento “emerja” de éstos.

El límite entre ambos conjuntos no está perfectamente definido, máxime si tenemos en cuenta las diferentes terminologías existentes, las sinergias entre distintas técnicas dentro del área y los diferentes puntos de vista sobre éstas por parte de los autores. Sin embargo, una de las principales diferencias de ambos paradigmas es el punto de vista a la hora de solucionar problemas, siendo la aproximación **top-down** la usada en problemas de AI clásica y la **bottom-up** la típica usada en la CI. Revisaremos las diferencias entre conceptos de diferentes autores en el capítulo 2¹.

Uno de los campos de aplicación es el de los **sistemas inteligentes de transporte** (ITSs, **intelligent transport systems**). Éstos se definen como un conjunto de aplicaciones orientadas a gestionar el transpor-

Cuadro 1.1: Línea temporal de los principales hitos en la AI. Actualmente la AI está ofreciendo resultados muy prometedores áreas como la conducción autónoma, el procesamiento del lenguaje natural o el análisis de sentimiento entre muchos otros.

	Conferencia de Dartmouth. Nace el campo de la AI. Se destinan muchos recursos debido al potencial del nuevo campo..
1956 . . .	
	No llegan los resultados esperados. Se suspenden financiaciones y se deja de investigar en muchas áreas (AI Winter).
1974 . . .	
	Aparecen los sistemas expertos. Muy prometedores. Acaparan la práctica totalidad de la investigación en AI..
1980 . . .	
	De nuevo los resultados no son lo esperado y vuelve a disminuir el trabajo en AI..
1987 . . .	
	La mejora de las prestaciones, la ubicuidad de los ordenadores y nuevos conceptos (e.g. agentes) hacen que la investigación en el área vuelva a crecer. Se replantea el concepto de AI..
1990 . . .	
	Se retoman investigaciones relacionadas con el aprendizaje profundo. Aumenta la investigación en el área de las redes neuronales y redes bayesianas..
2000 . . .	
	Conferencia de Dartmouth. Se analizan los avances y se debate sobre la AI a 50 años vista. Crece la expectación y el interés en el campo.
2006 . . .	
	Crece el interés en el aprendizaje automático debido a los resultados obtenidos y el aumento de las fuentes de datos.
2007 . . .	

¹ Una aproximación *top-down* a los problemas funciona definiendo primero el algoritmo que resuelve el problema para posteriormente ejecutarlo y llegar así a la solución exacta. Por otro lado, una aproximación *bottom-up* el algoritmo de resolución no se programa, sino que se aprende, llegando él sólo a soluciones no necesariamente exactas pero sí lo suficientemente buenas para ser aceptadas.

² En esta directiva, los ITS se definen como *aplicaciones avanzadas que, sin incluir la inteligencia como tal, proporcionan servicios innovadores en relación con los diferentes modos de transporte y la gestión del tráfico y permiten a los distintos usuarios estar mejor informados y hacer un uso más seguro, más coordinado y «más inteligente» de las redes de transporte.*

te en todos sus aspectos y granularidades (e.g. conducción eficiente, diseño de automóviles, gestión del tráfico o señalización en redes de carreteras) para hacerlos más eficientes y seguros. El interés es tal que en el año 2010 se publicó la directiva 2010/40/UE (ver [par, 2010]) donde se estableció el marco de implantación de los ITS en la Unión Europea².

En el caso concreto del comportamiento al volante, es interesante la evaluación de los conductores para conocer su manera de actuar en determinados escenarios, y poder extraer información de éstos que nos permitan, por ejemplo, detectar qué factores pueden afectar más o menos a determinados indicadores (e.g. el consumo estimado para una ruta en concreto). Sin embargo, la evaluación en distintos escenarios puede no ser interesante debido a limitaciones existentes, como pueden ser, por ejemplo, el tiempo, el dinero o la peligrosidad del escenario.

Los simuladores de tráfico son una solución para muchas de estas limitaciones, pero suelen basar su funcionamiento en conductores y vehículos (normalmente concebidos como una única entidad) basándose en modelos de conductor que responden a funciones más o menos complejas, además con pocas o ningunas opciones de personalización. Esto provoca que dichos modelos se adapten poco al modelo de un conductor en concreto.

Esta tesis pretende explorar el tema de la generación de modelos de conductor para simuladores que respondan al comportamiento de conductores reales usando, para ello, técnicas pertenecientes al campo de la CI.

Concretamente pretende desarrollar un método para el análisis de la eficiencia de los conductores realizando, para ello, un modelo del perfil de conducción a partir de técnicas de la CI y aplicándolo a un entorno multiagente de simulación. Así, una vez configurado el entorno multiagente, se podrán estudiar aspectos generales como la evolución del tráfico con determinados perfiles o particulares como el estilo de conducción o el impacto de los sistemas de asistencia.

Motivación

Los conceptos introducidos al comienzo del capítulo obedecen a una *necesidad* (aquí como eufemismo de problema) de la sociedad en la que vivimos, y que afecta tanto a nuestra generación como afectará a las venideras: la eficiencia en la conducción. Dado que es imprescindible saber que existe un problema para arreglarlo, nada mejor que puntualizar algunos hechos de sobra conocidos:

- En el año 2014, el número de vehículos a nivel mundial asciende a más de 1,200 millones, con una tendencia creciente [OICA, 2015]. Reducir en un pequeño porcentaje el consumo durante la conduc-

ción evita la emisión de toneladas de gases considerados nocivos para el medio ambiente y el ser humano³.

- Debemos abandonar los combustibles fósiles antes de que éstos nos abandonen a nosotros. Si bien es cierto que existen diferentes puntos de vista acerca de cuándo se agotarán las reservas de petróleo, también lo es que los combustibles fósiles son recursos **finitos**. Lo más probable es que no se llegue a agotar debido a la ley de la oferta y la demanda, pero hay que recordar que el petróleo se usa como base para la producción de otros muchos tipos de productos, como por ejemplo la vaselina, el asfalto o los plásticos.
- Independientemente del momento en el que se agoten los recursos, hay que hacer notar que la emisión de gases está correlacionada con el aumento de la temperatura del planeta, hecho que se ilustra en la figura 1.1. De seguir con el ritmo de consumo actual, se teme llegar a un punto de no retorno con consecuencias catastróficas para la vida en el planeta.
- Algo más cercano en el tiempo. La conducción eficiente afecta directamente a factores correlacionados con el número de accidentes de tráfico. Un factor de sobra conocido es el de la velocidad, factor relacionado no sólo con el número sino con la gravedad de los accidentes [Imprialou et al., 2016]. Otros indicadores son las aceleraciones, deceleraciones y maniobras de cambio de dirección, cuya frecuencia es inversamente proporcional a la eficiencia en la conducción y directamente proporcional a la agresividad, falta de seguridad y accidentes ([Dingus et al., 2006] y [Lerner et al., 2010]).

Estos hechos son solo algunos que ponen de manifiesto la necesidad de centrarse en el problema de cómo hacer de la conducción una actividad más eficiente y segura.

La **conducción eficiente** o *eco-driving* es definida como la aplicación de una serie de reglas de conducción con el objetivo de reducir el consumo de combustible, independientemente del tipo (e.g. electricidad, gasolina, gas natural, ...).

Ser capaces de identificar o al menos estimar qué conductores son considerados como no eficientes es importante debido a que, de esta manera, se pueden identificar los hábitos recurrentes en este tipo de perfil y adecuar la formación para eliminar dichos hábitos. Más aún teniendo en cuenta la relación existente entre la peligrosidad y algunas conductas agresivas. Un ejemplo donde la identificación de perfiles no eficientes pueden tener impacto claro económico y social es el de las empresas cuya actividad se basa en el transporte de mercancías o de personas.

Sin embargo, identificar la conducta de un conductor no es fácil, dado que su comportamiento se ve condicionado por numerosos factores como el estado de la ruta, el del tráfico o el estado físico o anímico. Además, la ambigüedad de las situaciones dificulta todavía

³ Uno puede argumentar que el parque automovilístico se recicla con nuevos vehículos eléctricos categorizados “de consumo 0”. La triste realidad es que estos vehículos consumen la electricidad generada actualmente de una mayoría de centrales de combustibles fósiles y nucleares. Además, mientras que en países desarrollados el crecimiento ha sido en torno al 4-7 %, en países subdesarrollados, donde no existe aun infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos, dicho crecimiento ha superado el 120 %.

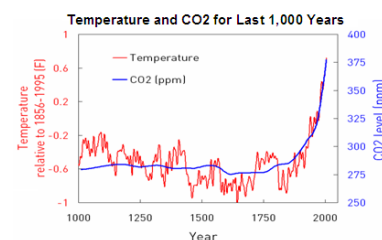


Figura 1.1: Desde el comienzo de la revolución industrial, el uso masivo de combustibles fósiles y el crecimiento de la población propició un aumento desproporcionado de CO_2 a la atmósfera que continúa todavía hoy. La gráfica muestra cómo ambos valores parecen estar correlacionados. Fuente: Environmental Defense Fund (edf.org).

más la identificación. Por ejemplo, un conductor puede ser clasificado en un momento como agresivo o no eficiente en una situación únicamente porque su comportamiento ha sido condicionado por las malas reacciones por parte de los demás conductores.

El análisis de todos los posibles casos es una tarea prácticamente imposible. Por ello, las simulaciones pueden dar una estimación de los posibles resultados de un estudio en el mundo real. Las simulaciones con **Sistemas Multi-Agentes (MASs, Multi-Agent Systems)** representan a los conductores como agentes permitiendo la evaluación del comportamiento tanto individual como general del sistema en base a sus individuos a través de iteraciones discretas de tiempo.

Si dichos agentes son obtenidos mediante la modelización de conductores a partir de sus datos reales, su comportamiento en la simulación podría ser considerado como fuente de datos para condiciones de tráfico y/o rutas no contempladas en el mundo real. De esta forma, se dispondría de un marco de trabajo para la comparación de diferentes conductores sin necesidad de exponerlos a todos y cada uno de los posibles eventos posibles. También sería factible evaluar sistemas de asistencia evitando los problemas de no comparabilidad de condiciones del entorno entre pruebas.

Demostrar que la evaluación de un modelo del conductor en entornos simulados es equivalente a la evaluación de conductores en entornos reales implica que se pueden comparar dos conductores usando un criterio objetivo, es decir, sin depender del estado del resto de factores a la hora de realizar la prueba de campo. Dicho de otro modo, implicaría que es posible comparar la eficiencia de dos conductores independientemente del estado del tráfico e, incluso, sobre rutas diferentes.

Objetivos

El objetivo de esta tesis doctoral es la de demostrar la hipótesis 1, quedando dicha demostración dentro de los límites impuestos por los supuestos y restricciones indicados más adelante.

Hipótesis 1 (H1): *La aplicación de técnicas pertenecientes al campo de la CI con datos extraídos de un entorno de micro-simulación permitirá modelar, de manera fiel a la realidad, el comportamiento de conductores reales.*

Por tanto, el objetivo de la tesis es el de simular el comportamiento de conductores en entornos de micro-simulación a partir de su comportamiento en entornos reales usando técnicas de CI. Para ello se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y aplicar técnicas de la CI sobre el área de la conducción.
- Implementar métodos de generación de modelos personalizados a partir de datos de conductores.

- Aplicar modelos de conductores a entornos de simulación multi-agente.
- Validar los modelos de conductor contra conductores reales.
- Estudiar la efectividad de sistemas de asistencia encaminados a mejorar la eficiencia y analizar el comportamiento de conductor.

Supuestos

- Se supone que el comportamiento de un conductor es el comportamiento en línea y el comportamiento de cambio de carril⁴.
- Los datos de los que extraer el comportamiento se corresponderán con lecturas realizadas durante el día, con buena visibilidad y sin lluvia.
- El tipo de vehículo sobre el que modelar el comportamiento será el de un utilitario.
- El conductor a modelar pertenecerá al grupo más representativo de conductores. Esto se corresponde con varón de 35 a 39 años (ver figura 1.2).

⁴ Son conocidos en la literatura como *car-following* y *lane-changing* respectivamente. Entraremos en detalle sobre ambos conceptos en el capítulo [Modelos de comportamiento](#)

Restricciones

- La resolución máxima del modelo creado es de 1Hz.
- En el caso de los modelos que hacen uso de redes neuronales artificiales, no se pueden explicar las razones del comportamiento inferido.

Estructura de la tesis

La tesis está estructurada de la siguiente manera:

En los capítulos ??, 2 y 5 se expone la revisión realizada del estado de la cuestión donde se explica en qué punto se encuentra la literatura de los temas en los que se apoya la presente tesis.

En el capítulo XXX se explica el método seguido para la confirmación de la hipótesis describiendo además las instrumentaciones, los conjuntos de datos obtenidos, las técnicas utilizadas y las aplicaciones desarrolladas.

Por último en el capítulo 8 se exponen los resultados y las conclusiones extraídas de la tesis. Además, tras las conclusiones se indican una serie de posibles líneas futuras de trabajo consideradas interesantes tras la realización de la tesis.

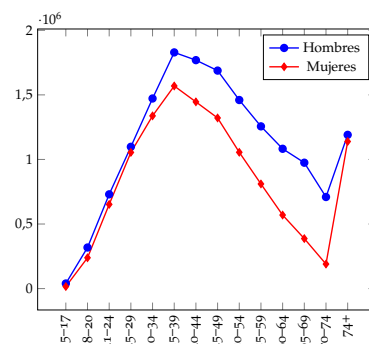


Figura 1.2: Último censo de conductores segmentado por edades. Fuente: Dirección General de Tráfico ([dgt.es](#)).

Capítulo 2

inteligencia computacional

El comportamiento de una persona se ve influenciado por una infinidad de variables. Identificar las relaciones entre éstas es en la mayoría de las ocasiones una tarea que va de lo muy difícil a lo imposible, más aún si añadimos que éstas son muy numerosas y pueden llegar a ser imposibles de cuantificar o incluso de detectar.

La **CI** engloba un conjunto de técnicas que facilitan enormemente estas tareas. En este capítulo se ofrece una perspectiva de la literatura actual sobre las técnicas de la **CI** que son de interés para esta tesis. Introduciremos el concepto y las nociones de “agente” y de “aprendizaje” para posteriormente introducir algunas de las técnicas utilizadas dentro del área. Por último, desarrollaremos las tres técnicas principales sobre las que reposa el trabajo teórico de esta tesis: redes neuronales artificiales, lógica difusa y computación evolutiva.

inteligencia artificial vs. inteligencia computacional

¿Qué es la **CI**? Para entender el significado de éste término tenemos que entender cómo ha evolucionado el término **AI** a lo largo de los años.

El primer concepto a introducir es el de “conexionismo”. Se puede considerar a Santiago Ramón y Cajal como principal precursor de esta idea por sus trabajos acerca de la estructura de las neuronas y de sus conexiones (e.g. [y Cajal, 1888] y [Ramón and Cajal, 1904]). Otros prefieren citar los trabajos sobre **redes neuronales artificiales (ANNs, artificial neural networks)** de McCulloch y Pitts ([McCulloch and Pitts, 1943]) o de Donald Hebb ([Hebb, 1968]) acerca de la teoría del aprendizaje como primeros trabajos sobre este tema. Independientemente de su origen, el conexionismo postula que la mente y el conocimiento surgen de redes formadas por unidades sencillas interconectadas (i.e. neuronas).

Por otro lado, en 1950, Alan Turing publicó un artículo que comenzaba con la frase “*Can machines think?*” [Turing, 1950], introduciendo el famoso Test de Turing para determinar si una máquina

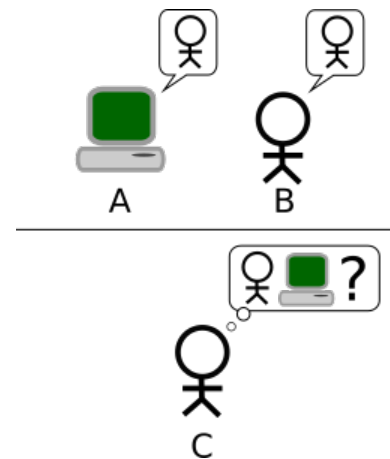


Figura 2.1: Ilustración del Test de Turing. Propuesto modelo para probar si una máquina es capaz de exhibir comportamiento inteligente similar al del ser humano. Hay tres participantes, dos humanos (A y C) y una máquina (B), separados entre sí pero pudiendo intercambiarse mensajes de texto. C envía preguntas a A y B sin saber quién es humano y quién es máquina y éstos le responden. Si C no es capaz de identificar qué participante es la máquina, se puede concluir que la máquina es inteligente. Fuente: Hugo Féréé, via Wikimedia Commons.

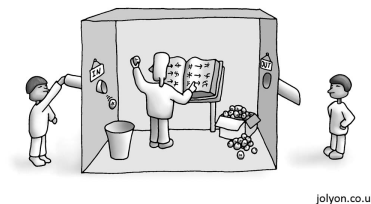


Figura 2.2: El experimento mental de la habitación china (ver [Preston and Bishop, 2002]) propuesto por John Searle. Se trata de un Test de Turing donde la máquina ha aprendido a hablar chino y es reemplazada por una persona que no sabe nada del idioma pero que va equipada con manual de correspondencias del tipo “entra esta secuencia de ideogramas, sale esta secuencia de ideogramas”. Cuando una persona le manda mensajes en chino, esta otra responde, pero ¿podemos decir que dicha persona sabe chino? Evidentemente no. Entonces, cómo podemos asegurar que la máquina reemplazada ha “aprendido” chino. Autor: Jolyon Troscianko (<http://www.jolyon.co.uk/>)

¹ El propio concepto de “pensar” es en sí un tema controvertido en el propio ser humano: ¿pensar es algo inherentemente biológico? ¿surge de la mente? Tanto si sí como si no, ¿de qué forma lo hace? Por ello existen detractores de la validez del Test de Turing. Por ejemplo, el experimento de la habitación china (figura 2.2) nace precisamente como refutación de dicho test, aunque puede llevar a cuestiones quizá más intrigantes. Por ejemplo, si la máquina es capaz de realizar una acción sin entender lo que hace y por qué lo hace, ¿qué garantías tenemos de que el humano sí es capaz? Si los ordenadores operan sobre símbolos sin comprender el verdadero contenido de éstos, ¿hasta qué punto los humanos lo hacen de forma diferente?

² Es injusto achacar el *AI Winter* sólo al libro *Perceptrons*. El “efecto gurú” del libro fue sólo la gota que colmó el vaso. A la emoción inicial por los avances le siguieron muchos años de promesas incumplidas, investigación sin resultados significativos, limitaciones de hardware, aumento de la complejidad del software (los comienzos de la crisis del software. Ver [Dijkstra, 1972]). Todo ello provocó un desinterés y una disminución de la financiación que se retroalimentaron la una a la otra.

³ A esta década se la conoce como segundo *AI Winter* dado que la investigación sobre Sistemas Expertos disminuye. Sin embargo no fue un abandono tan acusado como el del primer *AI Winter*.

⁴ Es comprensible ya que el método clásico produce modelos fáciles de interpretar mientras que el enfoque conexionista produce modelos cuyo funcionamiento en general no es del todo deducible. Sin embargo, existen problemas con alto grado de complejidad muy difíciles (o imposibles) de modelar. Más aún cuando éstos son de naturaleza estocástica [Siddique and Adeli, 2013].

es o no inteligente (figura 2.1). Se puede considerar este momento como el punto donde se estableció el objetivo a largo plazo del campo de la *AI*, ya que en el artículo Turing propuso un método para determinar si una máquina era capaz de exhibir comportamiento inteligente. Sin embargo, no fue hasta 1956 en la Conferencia de Dartmouth [McCarthy et al., 1956] donde John McCarthy acuñó el término *AI* a la vez que presentó el tema de la conferencia como la pregunta realizada por Turing en dicho artículo.

A partir de este punto la investigación en *AI* recibió muchísima atención por parte de investigadores y gobiernos, lo que se tradujo en financiación. Los estudios estaban dominados por aquellos relacionados con las ideas del conexionismo hasta que en 1969, se publicó el libro *Perceptrons* [Minsky and Papert, 1969] de Marvin Minsky y Seymour Papert, donde se expusieron las limitaciones de los modelos de *ANNs* desarrollados hasta la fecha. El impacto fue tal que la investigación en *AI* se abandonó casi por completo. Concretamente el conexionismo dejó de estar presente en la literatura científica durante dos décadas. Es lo que se conoce como *AI Winter*².

El interés por el campo volvió de nuevo a principios de 1980 con la aparición en escena de los primeros Sistemas Expertos, los cuales se consideran como el primer caso de éxito en la *AI* ([Russell et al., 2003]). A finales de la década, sin embargo, empezaron a resurgir los enfoques conexionistas, en gran parte por la aparición de nuevas técnicas de entrenamiento en perceptrones multicapa o por conceptos como activación no lineal en neuronas (e.g. [Rumelhart et al., 1985] o [Cybenko, 1989]). En este momento los sistemas expertos empezaron a perder interés frente al nuevo avance del conexionismo³.

Mientras que el enfoque clásico de la *AI* postulaba que la mente operaba de la misma manera que una máquina de Turing, es decir, mediante operaciones sobre un lenguaje de símbolos, el enfoque del conexionismo postulaba que la mente, el comportamiento inteligente, emergía de modelos a más bajo nivel. Esto provocó que algunas voces se alzaran contra lo que se consideraba el “enfoque incorrecto” de la *AI*. Sin embargo, otras técnicas alineadas con el conexionismo (debido a su enfoque de comportamiento emergente y aproximación como lo son la lógica difusa (FL, fuzzy logic) o los algoritmos genéticos (GAs, genetic algorithms)) ganaban popularidad y alimentaban el éxito cosechado por este “enfoque incorrecto”⁴.

Esto provocó una explosión de terminologías para diferenciar las investigaciones de la propia *AI* clásica. Por un lado se evitaba el conflicto, nombrando las áreas de trabajo con un término más acorde con el comportamiento o técnica utilizada. Por otro, se separaba de las connotaciones negativas que fue cosechando la *AI* con el paso de los años, “promesas, pero no resultados”).

Lo verdaderamente interesante es ver la evolución de la literatura, y por tanto de los objetivos de la *AI* durante estos años. En el

nacimiento del campo, se buscan literalmente máquinas que piensen como humanos, o al menos seres racionales, con mente. Con el paso de los años (y los continuos choques contra la realidad), la literatura va tendiendo hacia la búsqueda de conductas y comportamientos inteligentes cada vez más específicos. Este hecho se hace más patente en este momento, donde cada investigación se nombra de cualquier forma menos con el término **AI** (e.g. **aprendizaje automático** (ML, *machine learning*), **sistemas de recomendación** (RSs, *recommender systems*), o **procesamiento de lenguaje natural** (NLP, *natural language processing*)). Es evidente que la **AI** se puede observar desde diferentes puntos de vista, todos perfectamente válidos. En [Russell et al., 2003], tras un análisis de las definiciones existentes en la literatura por parte de diferentes autores, se hace énfasis en este hecho mostrando los diferentes puntos de vista a la hora de hablar de lo que es la **AI**. El resumen se puede observar en la figura 2.3.

Thinking Humanly "The exciting new effort to make computers think ... <i>machines with minds</i> , in the full and literal sense." (Haugeland, 1985) "[The automation of] activities that we associate with human thinking, activities such as decision-making, problem solving, learning .. ." (Hellman, 1978)	Thinking Rationally "The study of mental faculties through the use of computational models." (Charniak and McDermott, 1985) "The study of the computations that make it possible to perceive, reason, and act." (Winston, 1992)
Acting Humanly "The art of creating machines that perform functions that require intelligence when performed by people." (Kurzweil, 1990) "The study of how to make computers do things at which, at the moment, people are better." (Rich and Knight, 1991)	Acting Rationally "Computational Intelligence is the study of the design of intelligent agents." (Poole et al, 1998) "AI ... is concerned with intelligent behavior in artifacts." (Nilsson, 1998)

Figura 2.3: Objetivos que persigue la inteligencia artificial. Las filas diferencian entre pensamiento o comportamiento mientras que las columnas separan entre inteligencia humana o inteligencia racional. Fuente: *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd Ed.), [Russell et al., 2003].

Volviendo al tema de la terminología, muchas de las diferentes técnicas se fueron agrupando dentro de diferentes áreas. Una de ellas es la conocida como *computational intelligence*. Dado que persigue el mismo objetivo a largo plazo y que surge de la propia **AI** parece lógico mantenerla como un subconjunto y no como un nuevo campo del conocimiento humano. Sin embargo, algunos autores abogan por que la **CI** es un campo diferenciado de la **AI**.

Podemos definir la **CI** como la "*rama de la **AI** que aporta soluciones a tareas específicas de forma inteligente a partir del aprendizaje mediante el uso de **datos experimentales***". A diferencia de la aproximación clásica de la **AI**, se buscan aproximaciones a las soluciones y no las soluciones exactas. Esto es debido a que muchos problemas son de naturaleza compleja, ya sea por la relación entre sus múltiples variables, a la falta de información o a la imposibilidad de traducirlos a lenguaje binario.

Se puede fijar el año 1994 como el que el término **CI** nace como área, coincidiendo con el cambio de nombre del *IEEE Neural Networks*

Council a IEEE Computational Intelligence Society (<http://cis.ieee.org/>). Poco antes, en 1993, Bob Marks en su trabajo [Bezdek, 1993] presentó las que él consideraba diferencias fundamentales entre la AI y la CI resumiéndolas en la siguiente frase.

“Neural networks, genetic algorithms, fuzzy systems, evolutionary programming, and artificial life are the building blocks of CI.”

Durante estos años ganaba popularidad también el concepto del *soft computing* (SC). Éste engloba las técnicas que buscan resolver problemas con información incompleta o con ruido. Debido a que el conjunto de técnicas definidas como consituyentes del SC son las mismas que las de la CI algunos autores consideran ambos términos equivalentes. Nosotros consideramos que el SC es un punto de vista de la computación más que de la AI en contraposición con el *hard computing* (HC), y que la CI hace uso de métodos del SC⁵.

⁵ El HC es como se define la computación convencional frente al SC. El HC basa sus técnicas en aquellas basadas en modelos analíticos definidos de forma precisa y que en ocasiones requieren mucho tiempo de cómputo. Están basados en lógica binaria, análisis numérico, algoritmos y respuestas exactas. El SC por otro lado es tolerante a la imprecisión y al ruido y tiende a llegar a soluciones aproximadas de manera más rápida. Se basa en modelos aproximados, emergencia de algoritmos y modelos estocásticos.

Concepto de agente

Aprendizaje

La resolución clásica a un problema suele ser la aplicación de una secuencia de instrucciones basadas en un conjunto de símbolos (e.g. una función escrita en el lenguaje de programación C). Esta forma de solucionar un problema no *aprende* a solucionarlo. Se puede interpretar como que la solución está grabada en su memoria.

En la aproximación de la CI, existen modelos y existen técnicas para hacer aprender esos modelos. La aplicación de dichas técnicas es lo que se conoce como **aprendizaje**. Las técnicas de aprendizaje en CI se suelen clasificar en 2 paradigmas:

- **Supervisado.** El entorno presentado al modelo consiste en un conjunto de la forma $D = (I_i, O_i) | \forall i \in \mathbb{N}$, donde cada O_i es la salida esperada del modelo a la entrada I_i . Los algoritmos tratarán de ajustar el modelo todo lo posible para que las salidas obtenidas sean lo más parecidas a las salidas originales. Este paradigma de entrenamiento suele estar relacionado con problemas de *regresión*.
- **No supervisado.** Al modelo se le ofrece un conjunto de la forma $D = I_i | \forall i \in \mathbb{N}$, donde cada I_i es una entrada al problema, pero del que no conocemos la salida. Los algoritmos dentro de esta categoría harán uso de estos datos para ir reajustando el modelo tratando de encontrar las estructuras ocultas entre dichos datos (e.g. patrones, correlaciones o clases). Es un paradigma de entrenamiento íntimamente relacionado con problemas de *clasificación*.

Algunos autores hacen uso de técnicas pertenecientes a ambos paradigmas en forma de aproximación híbrida (**TODO!** buscar refe-

rencias) para **TODO!** ver qué coño buscan con este tipo de aproximaciones. Creo que los auto-encoders en deep learning serían un buen ejemplo.

Otros, añaden un paradigma más a estos dos existentes, el denominado aprendizaje **por refuerzo**. Sin embargo, nosotros preferimos considerarlo como un tipo de aprendizaje supervisado, ya que la única característica que lo diferencia es que es un tipo de aprendizaje que se usa en entornos de aprendizaje *on line* ajustando el modelo en función de los estímulos percibidos del entorno por sus acciones sobre el mismo, y no en un entorno aislado previo de entrenamiento (*off line*), como la práctica totalidad de técnicas supervisadas y no supervisadas.

Técnicas en la Inteligencia computacional

¿Qué técnicas se usan actualmente y sobre qué problemas?

Redes neuronales artificiales

Una **red neuronal artificial** puede considerarse como una herramienta que trata de replicar las funciones cerebrales de un ser vivo de una manera muy fundamental (esto es, desde sus componentes más básicos, las neuronas) basándose para ello en estudios de neurobiología y de ciencia cognitiva moderna del cerebro humano⁶.



Se puede establecer el trabajo “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity” ([McCulloch and Pitts, 1943]) como el primero en esta disciplina y, aunque existen muchas y muy diferentes tipologías y formas de operar con redes, la conceptualización de su funcionamiento es la misma: unidades (i.e. neuronas) interconectadas mediante enlaces por los que fluye la información de manera unidireccional, donde algunas de dichas unidades sirven de entrada al sistema (i.e. entradas o sensores), otras sirven de salida del sistema (i.e. salidas y actuadores) y otras como elementos internos (i.e. ocultas), y donde las conexiones se ajustan mediante un proceso denominado *entrenamiento*.

⁶ Aún apoyándose en la topología y funcionamiento del cerebro humano para realizar el símil, lo cierto es que dichos modelos distan aún de considerarse *Figuras artificiales* de la mente humana. En la región asociada a la percepción, el cerebro humano tiene unos 160.000 millones de neuronas, cada una de las cuales está conectada a entre 100 y 100.000 neuronas vecinas ([Pakkenberg and Gundersen, 1997]). Esto supone entre $2 \cdot 10^{12}$ y $2 \cdot 10^{15}$ conexiones. Tecnológicamente hablando, la sensación es que estamos aún a años luz de aproximarnos siquiera a la complejidad de un cerebro humano.

Una ANN es independiente del modelo del problema a solucionar. Se la puede considerar como una caja negra que aprende las relaciones que subyacen en los datos del problema para abstraer el modelo a partir de éstas. Estas características de aprendizaje y abstracción son los factores determinantes por los que son usadas en prácticamente todas las áreas de la ciencia y de la ingeniería ([Du and Swamy, 2006]).

Neurona artificial

Caracterización y topologías

Aprendizaje en redes neuronales artificiales

Lógica difusa

⁷ Se puede establecer el siglo IV a.C. como el momento del nacimiento de la lógica dentro de la física Aristotélica, que permaneció inalterada hasta los trabajos de Galileo (cita?) y Newton (cita, seguramente el Principia Mathematica) en el siglo XVI. d.C., momento en que se separó y permaneció como disciplina paralela perteneciente más al campo de la filosofía que de la física y la matemática. Empezó a relacionarse de nuevo con la matemática a principios del siglo XIX y a principios del siglo XX la lógica y la teoría de conjuntos pasaron a convertirse en partes indispensables la una de la otra. Por ello suelen ir de la mano cada vez que se habla de la una y de la otra. La evolución de la teoría de conjuntos (Cantor, finales del siglo XIX, buscar referencia) y su unión con la lógica es una época bastante convulsa dentro de la historia de la matemática pero esta tesis no es lugar para su desarrollo. Por ello se ofrece la referencia al libro *La historia de la matemática* de Miguel de Guzmán (referencia. Poner la página. Lo mismo no es de aquí y es del libro de "Los lógicos", pero estoy casi seguro de que es aquí.) en caso de que el lector tenga interés en el tema.

La lógica matemática (y por extensión la teoría de conjuntos)⁷ tiene como misión servir de fundamento del razonamiento matemático. Se basa en la definición precisa y con rigor de un razonamiento evitando cualquier tipo de ambigüedad y de contradicción. Es por ello que la lógica tradicional no suele servir como fundamento de razonamientos del mundo real.

Los conceptos que se manejan en el mundo real suelen ser vagos, llenos de imprecisiones. Además tienden a ser nombrados cualitativamente, no cuantitativamente, y cuando existe una correspondencia, ésta suele estar marcada por la subjetividad de los términos.

Explicar lógica difusa y control difuso. Indicar los controladores difusos de segundo, tercer y sucesivos niveles.

Teoría de conjuntos difusos

A diferencia de los conjuntos tradicionales, los conjuntos difusos expresan el grado de pertenencia de un elemento a la categoría representada por el conjunto. La definición podría escribirse de la siguiente manera:

TODO!Creo que habría que definir antes qué es un dominio

Definición 1: Sea X una colección de elementos. Se define al **conjunto difuso** F como un conjunto ordenado de pares de la forma $F = (x, \mu_F(x)) | x \in X$, siendo $\mu_F(x) \in [0, 1] \forall x \in X$.

La función de la definición 1 se denomina **función de pertenencia**, y caracteriza unívocamente a un conjunto difuso del dominio de X .

TODO!Quizá aquí habría que decir qué es una partición de un dominio

Operaciones entre conjuntos

La unión, intersección y el complemento son operaciones básicas en la teoría de conjuntos. **TODO!** hablar aquí de t_{norm} , t_{conorm} y complemento, pero someramente. No hay que enrollarse demasiado.

Razonamiento

En [Ma,] hay un capítulo de razonamiento que parece que está guay. Revisarlo un poco a fondo a ver si merece la pena tirar or ahí.

Sistemas de inferencia difusa

Los **sistemas de inferencia difusa** (FISs, *fuzzy inference systems*) o **sistemas de control difuso** (FCSs, *fuzzy control systems*) son sistemas que utilizan el razonamiento difuso para inferir una respuesta a partir de un conjunto de entradas. Habitualmente son divididos en tres bloques conceptuales, los cuales se ilustran en la figura XXX:

- **Fuzzificación.** Traducir los valores de entrada en crudo del dominio sobre el que está definida cada variable lingüística a sus respectivos grados de pertenencia a conjuntos difusos a través de sus funciones de pertenencia. **TODO!** Ojo, algunos controladores toman como valores de entrada conjuntos difusos según [Ma,]. Habrá que buscar sobre ello.
- **Inferencia.** Realiza todo el proceso de razonamiento difuso a partir del conjunto de reglas que dan significado a este controlador difuso.
- **Defuzzificación.** Traduce los conjunto difuso resultado del proceso de inferencia a valores de los dominios sobre los que están definidos dichos conjuntos difusos. **TODO!** En un sugeno, la salida es una función directamente así que se podría especificar que en un tipo Sugeno, se puede ver como que la salida son sólo singletons, manteniendo la generalización del proceso de funcionamiento de un FIS.

Hablar someramente de los tres tipos clásicos que se usan, e indicar que al final los más usados son el Mandamni y el Sugeno. Añadir también quizá una tabla comparativa entre los tres o al menos entre los dos principales:

El consecuente de un FIS de tipo Mandamni siempre es un conjunto difuso. Por tanto, el proceso de sacar un valor crisp es costoso. Lo bueno, se mantiene significado semántico de las salidas. El consecuente en un Sugeno es un valor, y se puede decir que no necesita

proceso de defuzzificación. Si embargo, la respuesta pierde significado semántico si la suma de la fuerza de salida no es 1 (no entiendo qué quiero decir con esto).

Computación evolutiva

Explicar qué es la cev, la evolución de conceptos distintos a distintas escuelas de pensamiento del mismo concepto.

Capítulo 3

Agentes inteligentes y sistemas multiagentes

Concepto de agente, agente inteligente y agente racional

Sistemas multiagente

Capítulo 4

Simulación de tráfico

El tráfico es un sistema caótico en el que intervienen un número muy elevado de diferentes variables, muchas de las cuales relacionadas entre si. Debido a esto, obtener modelos exactos de tráfico es una tarea prácticamente imposible y es por ello que la mayoría del trabajo cuyo objetivo es la predicción se realice en base a simuladores.

Los simuladores de tráfico son herramientas de software que, usando diferentes modelos, describen el tráfico como sistema, permitiendo:

- Extraer resultados y conclusiones de escenarios de tráfico determinados.
- Implementar técnicas de tráfico sin necesidad de alterar el tráfico real.
- Reproducir exactamente un escenario.
- Introducir modificaciones en puntos determinados (e.g. espaciales o temporales) de un escenario conocido para evaluar la divergencia en su evolución.

Los objetivos en la simulación de tráfico son los de hacer que los modelos se parezcan lo máximo posible a la realidad. En este capítulo vamos a ver cuál es la realidad actual de este tipo de simuladores, cuáles son sus diferentes tipologías y maneras de modelar los diferentes aspectos del tráfico y, posteriormente, realizaremos una evaluación de cuáles son los idóneos para nuestro trabajo.

Limitaremos el estudio no obstante a los simuladores de vehículos, obviando otros tipos de simulación de tráfico que no tienen que ver con esta temática, como por ejemplo los orientados a la evaluación de sistemas de señalización inteligentes (e.g. [Jin et al., 2016]) o a la estimación de emisiones (e.g. [Quaassdorff et al., 2016]).

Clasificación de simuladores de tráfico

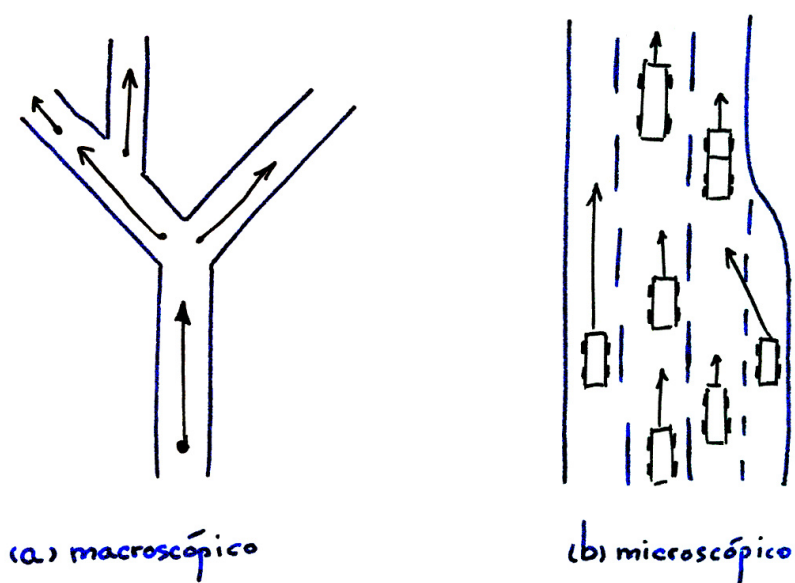
Los aspectos simulables y medibles del problema tráfico son muy diversos, dependiendo sobre todo del nivel de complejidad del tráfico¹, de qué queremos medir² y de cómo lo modelamos³.

El resto de la sección ofrece una visión de las diferentes categorías en las que se clasifican los simuladores de tráfico.

Tipos de simulador en función de la complejidad

La complejidad en una simulación se refiere al nivel de detalle al que queremos llegar a la hora de modelar nuestra solución. Es evidente que según aumentamos el detalle en la simulación aumenta la cantidad de cálculo. Por ejemplo, si queremos modelar el comportamiento de 10 billones de canicas cayendo por un tubo es considerablemente más eficiente modelarlas como un fluido con una serie de propiedades características que como una colección de elementos individuales, cada uno con sus propiedades (e.g. masa, aceleración, ...) e interaccionando entre sí.

Figura 4.1: Taxonomía clásica de los simuladores en función de la granularidad (complejidad) de la simulación.



En el caso de los simuladores de tráfico es lo mismo. En éstos existe un amplio intervalo de granularidades, desde por ejemplo el flujo de entrada en una autovía hasta el consumo de carburante de un vehículo en ciudad. Lo más común es clasificar los simuladores dentro de dos grandes grupos, los cuales se ilustran en la Figura 4.1:

- **Microsimulación** o simulación de tipo **micro**. Su objetivo es estudiar, desde un punto de vista de granularidad fina como puede ser vehículos o peatones, las micropropiedades del flujo de tráfico como, por ejemplo, los cambios de carril, las aproximacio-

¹ Modelar una vía por la que circula un centenar de coches no es lo mismo que modelar una ciudad donde circulan millones.

² Evaluar a un conductor en una situación determinada o evaluar la evolución del flujo de tráfico en un cuello de botella causado por un accidente.

³ Un autómatas celular se modela de forma diferente a un modelo lineal de vías o carriles.

nes a vehículos delanteros o los adelantamientos, para evaluar su comportamiento. Tiene dos principales ventajas, la posibilidad de estudiar el tráfico como un todo a partir de sus elementos más simples (ofreciendo una representación más fiel de éste) y la posibilidad de estudiar cada elemento por separado. Sin embargo, la principal desventaja de este tipo de modelos es que cada elemento de la simulación requiere de cómputo independiente y por tanto simulaciones con alto contenido de elementos pueden llegar a ser inviables⁴.

- **Macrosimulación** o simulación de tipo **macro**. Este tipo de modelos centran su esfuerzo en estudiar el flujo de tráfico como un todo, explorando sus macropropiedades (e.g. evolución del tráfico, efectos onda, velocidad media o flujo en vías). Su ventaja principal es que a nivel macroscópico permiten estudiar propiedades que a nivel microscópico requeriría una cantidad ingente de recursos. Sin embargo, con este modelo es imposible obtener información precisa de un elemento en particular del tráfico.

Aunque esta es la categorización típica de modelos, en la literatura aparecen otros tipos de modelo con granularidades que pueden considerarse no pertenecientes a ninguno de estos dos conjuntos. Este es el caso de los simuladores de tipos **sub-micro** y los **meso** (ver figura 4.2).

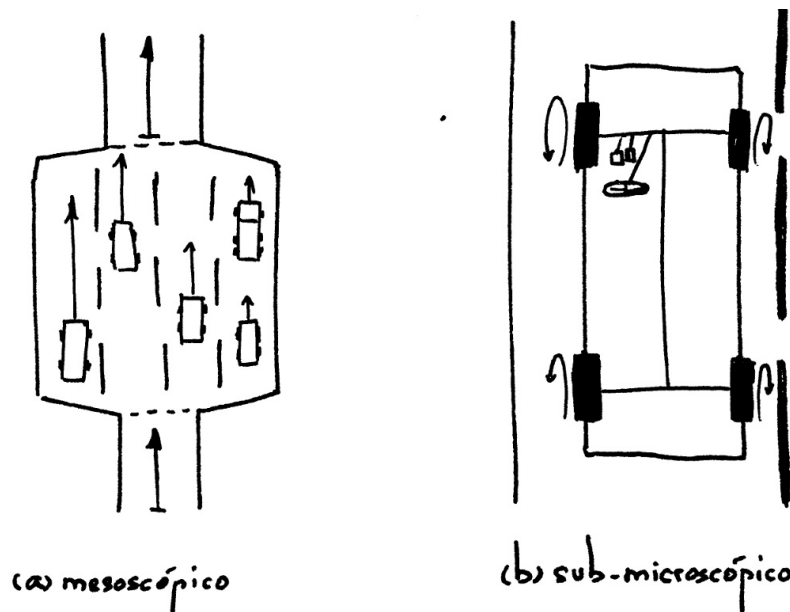


Figura 4.2: Aproximaciones alternativas de modelos en función de la complejidad. Ejemplo de mesosimulación como ventana de microsimulación dentro de un flujo en un macrosimulador (e.g. [Munoz et al., 2001]) y ejemplo de submicrosimulación donde se modelan componentes internos del vehículo.

Los **sub-micromodelos** especifican granularidades por debajo del nivel de “vehículo” o “peatón”. Por ejemplo, en ([Minderhoud, 1999]) trabaja a nivel de funcionamiento del control de cruce inteligente de un vehículo en función del entorno del vehículo.

Por otro lado los **mesosimuladores** (e.g. [Munoz et al., 2001] o [Casas et al., 2011]) nacen para amortiguar los problemas inherentes a la complejidad en

⁴ Existen técnicas de computación distribuida que superan ampliamente los límites impuestos por la computación en un único nodo, por ejemplo, el simulador de IBM *Megaffic*. Éste implementa un modelo de granularidad micro donde cada elemento es un agente independiente (i.e. sistema multiagente) usando para ello entornos con cientos de núcleos de proceso que proveen de capacidad suficiente para modelar ciudades enteras como Tokio (ver [Osogami et al., 2012] y [Suzumura and Kanezashi, 2012]).

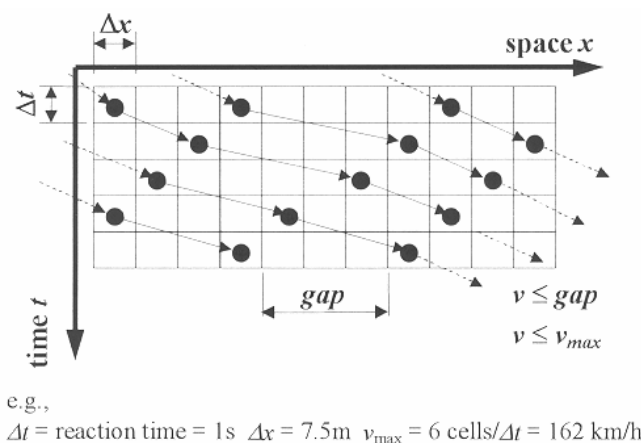
los micromodelos y a la falta de resolución en los macromodelos.

Dado que en nuestro discurso trabajaremos en la evaluación de modelos de comportamiento de conductores, nos ceñiremos al uso de simuladores que modelen un nivel de granularidad **micro**.

Tipos de simulador en función del espacio y el tiempo

Existen otras dos formas de clasificar los simuladores en función de cómo evolucionan en la simulación el **tiempo** y el **espacio**. Sin embargo, aunque *complejidad*, *tiempo* y *espacio* son dimensiones diferentes a la hora de clasificar simuladores, el tipo de simulador según complejidad determina en gran medida los tipos según las dimensiones espacio y tiempo.

Figura 4.3: Ejemplo de un simulador de tráfico basado en autómatas celulares. En éste, el espacio se divide en celdas que pueden, o bien estar vacías, o bien ocupadas por un vehículo. La ilustración representa la evolución de los tiempos para cada vehículo (representado por un punto) según se desplaza a través del espacio discretizado en celdas de $7,5m$. Concretamente muestra la evolución a lo largo del tiempo del movimiento de un modelo de *car-following* de tres vehículos. Fuente: [Brilon and Wu, 1999].



En el caso del espacio, la clasificación diferencia las simulaciones que se mueven por un espacio discreto o por uno continuo:

- De espacio **discreto**. Simulación donde el espacio está dividido en celdas que normalmente sólo pueden estar ocupadas por un elemento en un momento determinado. Este es el caso, por ejemplo, de los simuladores basados en autómatas celulares. La figura 4.3 ilustra el comportamiento de uno de estos tipos de simulador.
- De espacio **continuo**. Simulación que transcurre en una secuencia infinita de puntos en el espacio. Es el caso por ejemplo de los simuladores basados en modelos lineales, como podemos ver en el ejemplo de la figura 4.4.

En el caso del tiempo, la división se realiza en los mismos términos que en los del espacio:

- De tiempo **discreto**. También denominada de *simulación de eventos discretos*, divide el tiempo en intervalos discretos, generalmente (aunque existen excepciones) de longitud fija durante toda la simulación. Los simuladores basados en autómatas celulares son

también simuladores típicos discretos, ya que cada posición en el espacio se va calculando para cada intervalo discreto de tiempo (ver figuras 4.3 y 4.5).

- De tiempo **continuo**. En estos simuladores el tiempo es un factor más para un modelo de ecuaciones diferenciales. La figura 4.4 ilustra un modelo de *car-following* que puede implementarse en una simulación de tiempo continuo si la aceleración viene determinada por un modelo que entre otros factores incluye el tiempo.

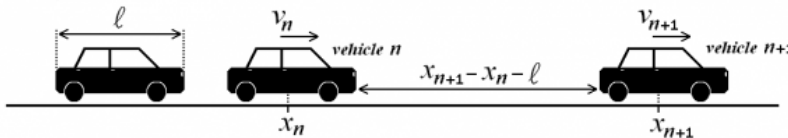


Figura 4.4: Ejemplo de un modelo lineal en un espacio continuo. La posición del vehículo es un valor $x \in \mathbb{R}$. Este ejemplo representa un modelo de *car-following* donde el comportamiento de la aceleración del vehículo es determinado por la distancia al coche siguiente. Fuente: [Tordeux et al., 2011].

En nuestro caso, queremos conocer la situación exacta del vehículo y no una situación aproximada en una separación discreta del espacio. Esto nos dirige hacia simuladores de espacio continuo. Por otro lado, nosotros realizamos la recolección de datos en intervalos cuantificables de tiempo, los cuales serán usados para modelar los comportamientos de los conductores y para contrastar los resultados; por tanto, la elección está sesgada hacia simulación de tiempo discreto.

Modelos de microsimulación

Si bien es cierto que los sistemas de partículas son usados también para simulación de tráfico microscópico, su ámbito de aplicación es el mismo que el del punto de vista macroscópico, esto es, usar sistemas de partículas para el análisis del tráfico como fluido. Por ello como vertientes principales para representación del tráfico exploraremos los puntos de vista que se ocupan de éste desde el punto de vista del individuo: los autómatas celulares y los sistemas multiagentes.

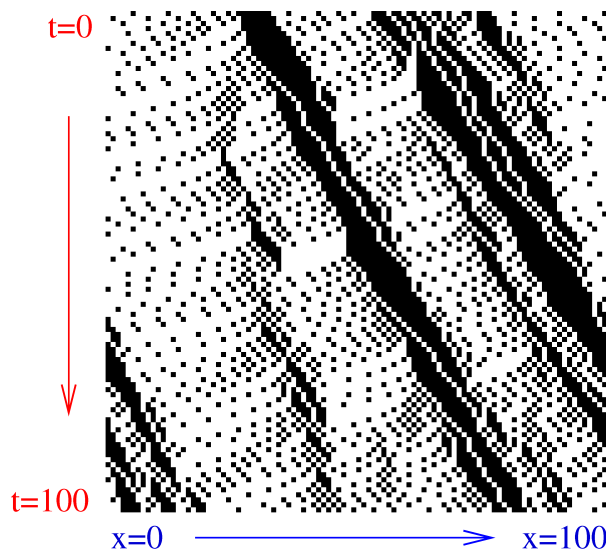
Microsimulación basada en autómatas celulares

Un autómata celular es una colección ordenada de celdas o *células* n -dimensionales que parcelan el universo en estudio. Cada una de dichas celdas se encuentra en un estado (e.g. contiene un valor numérico), y el estado de todas ellas se actualiza sincronamente (esto es, todas a la vez) en intervalos regulares de tiempo denominados *ciclos*. El cambio de estado de cada célula depende de los valores de las células vecinas y del algoritmo de modificación al que responden todas y cada una de las células.⁵

Estos modelos de microsimulación, debido a la propia naturaleza de los autómatas celulares, se encuentran clasificados como simula-

⁵ Hay realmente máquinas capaces de operar de esta manera, es decir, arquitecturas basadas en autómatas celulares. En ellas, cada ciclo de reloj actualiza todas las celdas de memoria del autómata. Estas arquitecturas se suelen usar para la implementación de modelos físicos **TODO!** buscar referencias, superando en varios órdenes de magnitud la capacidad computacional de las arquitecturas tradicionales.

Figura 4.5: Representación de la evolución de un atasco en una autopista de 100 celdas de longitud usando el modelo Nagel-Scherckenberg. Con una densidad de ocupación $\rho = 0,35$ y una probabilidad de frenada de $p = 0,35$ se puede observar en la figura cómo se desplazan las olas del atasco a lo largo de los 100 ciclos de la simulación. Fuente: Wikimedia



El modelo clásico de esta aproximación es el de Nagel-Scherckenberg ([Nagel and Schreckenberg, 1992]), un modelo teórico creado para la simulación de tráfico en autopistas. La figura 4.5 muestra la evolución del tráfico en una autopista a lo largo del tiempo de un autómata de este tipo. El resumen de su funcionamiento es el siguiente:

- La vía está dividida en celdas de longitud $7,5m$ debido a que esta distancia es la media entre los parachoques traseros de dos coches consecutivos en un atasco.
- La celda puede tener dos estados, vacía o con un coche a una velocidad $v = \{0, \dots, v_{max}\} \in \mathbb{N}$, esto es, discreta. La unidad de medida es $c/\Delta t$ siendo c un número de celdas.
- Δt queda establecido en $1s$, considerado el tiempo medio de reacción de un conductor ante una eventualidad. Esto hace, por ejemplo, que una velocidad de $6c/\Delta t$ sea $45m/s$ ($162km/h$).
- En cada ciclo, se realizan cuatro acciones de manera simultánea: acelerar (nueva unidad si no están a la máxima velocidad), frenar (si se ven obligados en función de la velocidad y la distancia del siguiente vehículo), freno aleatorio (con una probabilidad de $p = 0,5$ la velocidad se reduce en una unidad hasta un mínimo de $v = 1c/\Delta t$) y reposicionamiento (se avanzan tantas celdas como indica la velocidad.)

En general los modelos de la literatura suelen ser una variación de éste con ligeras modificaciones para estudiar aspectos concretos de modelos de tráfico, como la modificación del paso de aleatorización (e.g. [Barlovic et al., 1998]) o celdas más pequeñas (e.g. [Krauss et al., 1997]) para comprobar la metaestabilidad del flujo de tráfico, o modelos y reglas para vías de dos carriles (e.g. [Brilon and Wu, 1999] en la figura 4.3 y [Nagel et al., 1998]).

Microsimulación basada en sistemas multiagentes

Los modelos basados en autómatas celulares, aunque interesantes, no son suficientemente realistas desde un punto de vista microscópico. Unos ejemplos: en una situación típica de un modelo Nagel-Scherckenberg, las posiciones de los vehículos se dan en múltiplos de 7,5 metros. Además, un vehículo realiza aleatoriamente aceleraciones y deceleraciones de 27km/h . Incluso en una situación favorable, cualquier vehículo puede realizar una aceleración de 0 a 162km/h en sólo 6 segundos. Por tanto, no ofrecen una visión fiable en caso de querer realizar estudios muy detallados del tráfico a nivel micro.

Los sistemas multiagentes ofrecen otro punto de vista a la simulación de tráfico dado que cada vehículo es modelado como un agente independiente. Este paradigma se ha desarrollado en detalle en la sección 3.2 del capítulo 3. Por ello en este apartado se explicará únicamente el por qué de la elección de este modelo describiendo sus ventajas frente a los sistemas basados en autómatas celulares.

Una de las principales razones por las que usar un sistema multiagente es que cada uno de los individuos o "agentes" tienen su propia entidad dentro del sistema. Esto es, perciben tanto el entorno como el resto de agentes y actúan de acuerdo a lo percibido y a su comportamiento preestablecido. Basarse no sólo en las magnitudes físicas del resto de vehículos (e.g. distancia, aceleración, ...) sino también en un comportamiento de conducción ofrece un interesante campo de estudio a nivel cognitivo.

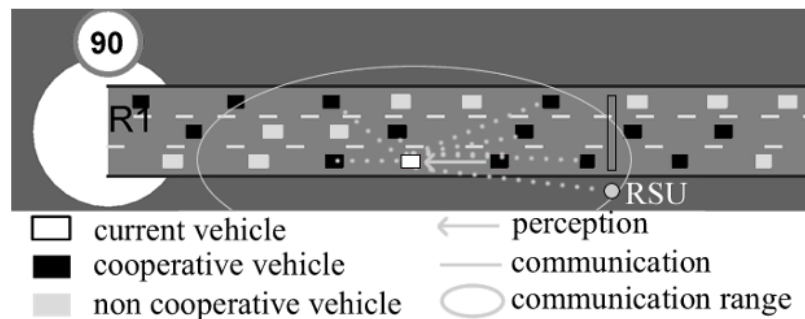
Además, y a diferencia de los autómatas celulares, los sistemas multiagentes pueden emplazarse en un entorno virtual que represente un espacio continuo y no discreto. Esto permite modelar con mayor fidelidad magnitudes físicas asociadas a cada agente (e.g. posición y velocidades actuales, dimensiones del vehículo, masa, velocidad máxima permitida, ...).

Cada uno de los agentes es independiente del resto. Esta independencia da la posibilidad de tener todos los agentes diferentes entre sí. Aunque esto de por sí no tiene por qué tener demasiada utilidad, sí que lo tiene poder experimentar con diferentes perfiles de conducción (e.g. un perfil agresivo en un flujo de tráfico dominado por conductores tranquilos). Esto es debido a que en un sistema multiagente cada agente es una parte del sistema y las decisiones de cómo se ha de comportar un agente se toman desde el propio agente. Desde el punto de vista de un autómata celular, el comportamiento existe en cada celda, dando control parcial o nada de control al estado de cada celda.

Los estudios en materia de simuladores de tráfico con sistemas multiagente no se limitan a vehículos, sino que se usan también en áreas como el control de luces de tráfico o agentes para peatones entre otros. Un ejemplo es el estudio presentado en [Clymer, 2002]

donde los agentes del sistema son las señales de tráfico luminosas y no los vehículos, y donde el objetivo es adaptar la señalización en una red de carreteras para minimizar al máximo el tiempo de espera por parte de los vehículos en las intersecciones gestionadas por las señales.

Figura 4.6: Captura de pantalla del simulador MovSim. Este simulador implementa un modelo multiagente donde los vehículos incorporan sistemas de comunicación vehicular. El estudio se centra en el uso de la comunicación entre vehículos para el acoplamiento dinámico de vehículos en sus respectivos carriles. Fuente: [Gu et al., 2015].



Otra ventaja de este modelo es en el área de las comunicaciones extravehiculares (V2I) e intervehiculares (V2V). Es relativamente rápida la implementación de diferentes políticas y protocolos de comunicación via sensores y actuadores para estudiar estos tipos de redes de comunicación (ver figura 4.6). En [Shiose et al., 2001], por ejemplo, se hace uso de un sistema multiagente para implementar diferentes formas de comunicación intervehicular con el objetivo de aliviar congestiones de tráfico. En el caso de redes extravehiculares, un buen ejemplo es [Dresner and Stone, 2004], donde se representan como agentes tanto los vehículos como las intersecciones de la vía. Éstas gestionan un sistema de reservas que los vehículos que van a entrar en la intersección solicitan, gestionando comunicando en todo momento mediante eventos los cambios en dicho sistema. El estudio concluye que una comunicación de este tipo es más eficiente que una intersección clásica basada en señales de tráfico luminosas.

El vehículo como agente inteligente

En nuestra tesis el trabajo se basa en la representación del comportamiento de un conductor. Para simplificar el problema asumiremos que los términos “conductor” y “vehículo” son equivalentes y que se refieren a la tupla “(vehículo, conductor)”.

No sé cómo ponerlo, pero esta información puede ser útil aquí. A lo mejor hay que separarlo, no sé. Yo lo pongo aquí porque me ha venido ahora.

- **Percepción.** Característica intrínseca a todo ser vivo para la obtención de información del entorno. Pues para los agentes inteligentes, lo mismo. Puede ser en forma de sensores (e.g. sensor de velocidad, acelerómetro, sensor de distancia, lidar, cámaras, termómetros, gps, ...), conocimiento (e.g. controlador difuso, siste-

ma experto, red neuronal, es decir, información procesada que ad valor añadido), datos GIS, comunicación con otros vehículos (e.g. V2V, V2E, ...). Un simulador nos ofrece estos sensores casi gratis, pero nuestro problema es que para la generación de modelos necesitamos previamente haber capturado información con dichos sensores y en físico ya es otra cosa.

- **Toma de decisiones.** Un agente racional en un sistema multiagente ha de ser capaz de razonar acerca del mundo, de su propio estado y del estado del resto de agentes.
- **Actuación.** La actuación es la consecuencia natural de las anteriores características. Dado un estado del mundo y un proceso cognitivo surgen acciones a realizar, tras las cuales se llega a un nuevo estado del entorno que provee de información actualizada para seguir actuando.

Elección de software para las simulaciones

En este apartado se facilita la comparativa realizada para la elección de simulador sobre el que basar los escenarios a plantear en las simulaciones de los modelos de conductor.

Hoy en día existe una oferta muy amplia de simuladores en el mercado, cada uno implementando uno o varios modelos diferentes y bajo diferentes licencias.

Cada simulador tiene sus ventajas e inconvenientes, y es por ello importante realizar un estudio previo para conocerlos y no llevarse sorpresas una vez se llega a estadios más avanzados del estudio. No se trata de realizar una comparativa en busca del mejor simulador de tráfico del mercado, sino en encontrar el simulador que más se adecúa a los criterios concretos para los propósitos de esta tesis.

Entornos de simulación a estudiar

El siguiente listado muestra la lista de simuladores de tráfico sobre los que se realizarán las comparativas. Por motivos de espacio no se han incluido todos los simuladores encontrados en la literatura, sino que se han seleccionado únicamente aquellos que (i) aun existen y se pueden adquirir, y (ii) son entornos de microsimulación.

1. **AIMSUN.** Entorno de simulación de granularidad micro, meso y macro desarrollado por la empresa *Transport Simulation Systems*. Url: <http://www.aimsun.com/>.
2. **TSIS-CORSIM.** Entorno de microsimulación compuesto de dos simuladores para distintos modos de tráfico (NETSIM para entornos urbanos y FRESIM para entornos interurbanos) desarrollado

dentro de la Universidad de Florida por el centro *McTrans*. Url: <http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/>.

Simuladores de pago:

Quadstone paramics (microscopic) VISSUM (macroscopic) VISSIM (microscopic) ARCHISIM

Simuladores gratuitos:

Matsim SUMO (microscopic) Repast MAINSIM Synchro

Ni puta idea:

CUBE SATURN PARAMICS TRANSIMS

Criterios de selección

Los criterios se muestran ordenados alfabéticamente:

1. **Activo.** Si el simulador está activaemnte desarrollado o si por el contrario se trata de un proyecto con poca actividad por parte de sus autores. Es interesante hacer uso de un simulador que esté siendo activamente desarrollado porque eso favorece la aparición de parches y mejoras sobre el software.
2. **Extensibilidad.** Si el simulador permite extender sus funcionalidades de alguna manera. Aunque se puede considerar que si es Open Software, es posible modificar su comportamiento para aducarlo a los modelos desarrollados, es mejor que el propio software ofrezca los mecanismos necesarios para la integración sin necesidad de tocar el núcleo.
3. **Granularidad.** Si el simulador es de tipo micro, meso o macro. Para nuestras necesidades es necesario un simulador que implemente microsimulación, ya que es el único tipo de granularidad que permite evaluar el comportamiento de un conductor independientemente del resto de la simulación.
4. **Licencia.** Especifica con qué tipo de licencia se distribuye el software. Es preferible una licencia de tipo Open Software (**TODO!** hay que ver si esto está bien dicho o no) ya que de esta manera es posible modificar el software en caso de encontrar algún error o falta de funcionalidad que el fabricante no tenga pensado codificar.
5. **Sistema operativo.** Sobre qué sistemas operativos está soportado el entorno de simulación. Es imprescindible que el software se ejecute sobre sistemas operativos GNU/Linux por la configuración de los sistemas sobre los que se trabaja, aunque es interesante también su funcionamiento en entornos tipo OS-X.

6. **Tipo de simulación.** Qué modelo interno usa el motor para la simulación (e.g. automatas celulares, sistemas multiagentes, ...). particle system simulation).

Comparativa

Al haber tal cantidad de simuladores, la comparativa se ha realizado descartando aquellos simuladores que no cuentan con características necesarias o que son de una tipología no deseada. A continuación se enumera la lista de razones por las que se han descartado simuladores junto con aquellos afectados por la decisión:

1. Debe ser (o al menos soportar) un entorno de microsimulación.
2. Debe ofrecer un entorno de simulación de tráfico general, no sólo casos particulares como congestión o colisiones.
3. ...

	Aimsun	SUMO	TSIS-CORSIM	
Activo	sí	sí	sí	–
Extensibilidad	–	sí	no	–
Granularidad				
Micro	sí	sí	–	–
Meso	sí	no	–	–
Macro	sí	no	–	–
Licencia				
Propietaria	sí	sí	–	–
Open Software	no	no	–	–
Compatible GPL	no	no	–	–
Sistema operativo				
GNU/Linux	sí	no	–	–
OS X	sí	no	–	–
Windows	sí	sí	–	–
Tipo de simulación	–	MAS	italics	upright, caps

Entorno seleccionado: SUMO

En definitiva, el simulador que más se adapta a nuestras necesidades y el que se usará como simulador base en el desarrollo de esta tesis será SUMO⁶. SUMO es un entorno de microsimulación de código abierto⁷ que implementa un modelo discreto en el tiempo y continuo en el espacio.

Además de simulación clásica, SUMO provee de una interfaz gráfica (se puede ver un pantallazo en la figura 4.7) donde se puede ver el comportamiento de cada vehículo durante la simulación. Es interesante para obtener de un vistazo información acerca del funcionamiento del modelo en concreto a controlar. Otras de las características que el simulador ofrece son las siguientes:

⁶ Sus principales publicaciones son [Krajewicz et al., 2002], [Behrisch et al., 2011] y [Krajewicz et al., 2012].

⁷ Licenciado bajo la [general public license \(GPL\)](#), concretamente la versión 3.0.

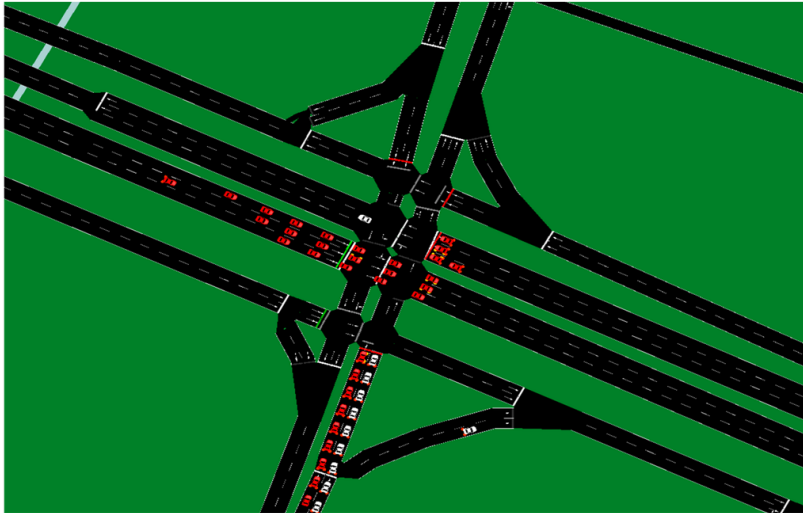


Figura 4.7: Ejemplo de pantalla del simulador SUMO. Además de entorno de simulación propiamente dicho, SUMO provee de una interfaz gráfica que permite una visualización general, de zonas y de elementos en concreto a la vez que permite la variación de configuración de la simulación durante el desarrollo de la misma.

- Multimodalidad permitiendo modelar no sólo tráfico de vehículos sino de peatones, bicicletas, trenes e incluso de barcos.
- Vehículos de diferentes tipologías, Simulación con y sin colisiones de vehículos.
- Diferentes tipos de vehículos y de carreteras, cada una con diferentes carriles y éstas con diferentes subdivisiones de subcarriles (diseño conceptual para permitir las simulaciones)

Al estar licenciado bajo la licencia [GPL](#), su distribución implica a su vez la distribución de su código fuente. Esto permite la modificación de su comportamiento y el desarrollo de nuevos modelos integrados dentro del simulador. Sin embargo nosotros no haremos uso de esta característica, sino que usaremos SUMO como aplicación servidor y el módulo [Traffic Control Interface \(TraCI\)](#) como aplicación cliente desde donde gestionar todos los aspectos de cada simulación.

La interfaz Traffic Control Interface

Capítulo 5

Modelos de comportamiento

En un simulador de tráfico que basa su funcionamiento en un modelo micro de múltiples agentes haciendo las veces de conductores, el comportamiento de éstos es crucial para que éste describa su evolución de una manera veraz, lo más aproximada a un sistema de tráfico real. Por ello, el conductor ha de ser diseñado teniendo en cuenta que ha de actuar tanto con el vehículo (en mayor o menos detalle) y su entorno (e.g. el resto de conductores, señales de tráfico, etc). driver has to be designed to interact with other drivers, traffic signals, pedestrians and ITS systems.

A lo largo de los años se han estudiado diferentes modelos de comportamiento de conductor. Éstos suelen caer dentro de dos categorías principalmente, el **car-following** o *seguimiento de vehículos* que se ocupa de determinar el comportamiento de un vehículo en función del comportamiento del inmediatamente siguiente y el **lane-changing** o *cambio de carril* que estudia la forma en la que un conductor decide realizar un cambio de un carril origen a un carril destino. Y aunque tradicionalmente se han tratado como dos modelos independientes y ha sido estudiado más el primero que el segundo desde los años 1950, en los últimos 20 años se ha tendido a modelar ambos problemas como un único mecanismo [Ma,].

La mayoría de los modelos basan su funcionamiento en técnicas pertenecientes al **hard computing** o lo que es lo mismo, están basados en fórmulas matemáticas y reglas de la lógica convencional con parámetros que se ajustan a partir de la observación de datos reales. No son los únicos modelos que existen, ya que en los últimos años ha empezado a crecer el interés por las técnicas de la **CI** en el campo y por tanto existen ciertos estudios de técnicas más acorde con este punto de vista. En éstas es en las que nos centraremos en este capítulo, el cual desarrollará qué entendemos por comportamiento en conducción y qué modelos de interés dentro de la **CI** se han desarrollado hasta ahora.

Comportamiento en la conducción

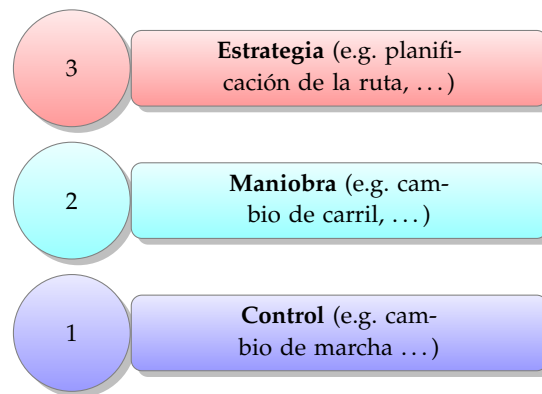
¿A qué nos referimos cuando hablamos del comportamiento? Según el diccionario de la real academia, “comportar” se define como *actuar de una manera determinada*. Sin embargo, no queda claro qué factores constituyen el comportamiento al volante.

Atendiendo a la literatura, **TODO!** un par de párrafos para hablar de comportamiento

¿Cómo se define el comportamiento de un conductor?

En [Michon, 1985] describen la conducción como una tarea separada en 3 niveles jerárquicos, el de estrategia, el de maniobra y el de control. En la figura 5.1. se ve mejor.

Figura 5.1: Los tres niveles jerárquicos que describen la tarea de conducción según [Michon, 1985]: *estrategia* (i.e. las decisiones generales), la *maniobra* (i.e. decisiones durante la conducción de más corto plazo) y *control* (i.e. comportamientos automáticos). (**TODO!**Hacer mejor esta figura)



SUMO usa (al menos así lo indican en el paper del 2002) el modelo Gipps[Krajzewicz et al., 2002]. No sé si ellos han hecho una extensión del modelo o están referenciando la extensión y ellos sólo la implementan. En el paper del 2012 citan que el modelo car-following que usan por defecto es el desarrollado por Stefan Krauß[Jin et al., 2016], debido a su simplicidad y su velocidad de ejecución.

El modelo ha probado ser válido, pero tiene algunos defectos, por lo que existe un API para implementar otros modelos. En la actualidad están incluidos en el sistema los modelos IDM[Treiber et al., 2000] (*Intelligent Driver Model*), el modelo de tres fases de Kerner[Kerner et al., 2008] y el modelo de Wiedemann[Wiedemann, 1974].

La práctica totalidad de modelos para el comportamiento de conductores en tráfico se basan en una estructura jerárquica de control[Michon, 1985]. Por lo que veo este paper es de 1985, así que afirmar eso 30 años después es una barrabasada. Hay que buscar algo más para apoyar eso o para indicarlo como una anécdota.

En el paper [Al-Shihabi and Mourant, 2001] describen un framework para la modelización de comportamiento de conductores dentro de simuladores.

En [Tang et al., 2014] los autores proponen un modelo de car fo-

llowing teniendo en cuenta comunicación entre vehículos.

TODO! Hoy he descubierto que hay una cosa que se llama naturalistic traffic study o naturalistic traffic observation ([Estudio Naturalista de Conducción](#) (NDS, [Naturalistic driving study](#))) que es un estudio naturalístico, es decir, observar en el mundo real con detalle y extraer datos de ello. A lo mejor hablando así queda como más profesional :D.

Los NDS basan su funcionamiento en la captura masiva de datos de conducción, normalmente involucrando una gran cantidad de sensores, para analizar el comportamiento del conductor, las características del vehículo, la vía, etcétera. La cantidad de sensores y la velocidad de captura hacen que la tarea de analizar y extraer conclusiones sea una tarea prácticamente imposible para un humano, por lo que es necesario el uso de técnicas de análisis de datos que suelen recaer en los campos de la estadística y del aprendizaje automático.

En [\[Sekizawa et al., 2007\]](#) describen modelos supervisados offline para capturar el comportamiento del conductor basados en auto-regresión a trozos. Más adelante lo extienden en [\[Terada et al., 2010\]](#), aunque los datos de entrenamiento son extraídos directamente de simulaciones, no del “mundo realTM”.

En [\[Bando et al., 2013\]](#) describen otro modelo no supervisado offline basado en un modelo bayesiano no paramétrico para la clusterización, combinado con un LDA (Latent Dirichlet Allocation, sea lo que sea esto) para la clusterización a más alto nivel. (**TODO!** ¿este método usa datos reales?)

Estos trabajos ([\[Sekizawa et al., 2007\]](#), [\[Terada et al., 2010\]](#) y [\[Bando et al., 2013\]](#)) tienen la desventaja de ser computacionalmente muy costosos y con poca precisión en el caso de variar mucho los escenarios de entrenamiento y de test.

En [\[Maye et al., 2011\]](#) se presenta un modelo online donde se infiere el comportamiento del conductor haciendo uso de una IMU (Intertial Measurement Unit) y una cámara. Primero de la IMU se sacan datos que se separan en fragmentos para luego relacionarlos con las imágenes obtenidas de la cámara. (**TODO!** ¿Hacia dónde mira la cámara?). Los modelos propuestos en [\[Johnson and Trivedi, 2011\]](#) y [\[Van Ly et al., 2013\]](#) también se apoyan en el funcionamiento de clasificar las segmentaciones de una IMU, pero con técnicas distintas y sin cámara (**TODO!** Que digo yo, ¿qué clasifican exactamente? es más, dependiendo de qué clasifican, para qué vale la camarita del [\[Maye et al., 2011\]](#)?). Además hacen uso de señales externas y umbrales de activación para hacer más efectiva la clasificación (**TODO!** corroborar).

En el artículo [\[Bender et al., 2015\]](#) se usa también un modelo no supervisado online con una aproximación bayesiana para identificar los puntos de cambio sin depender de parámetros externos (e.g.

umbrales o señales). Se basa también en (1) segmentar los datos de conducción y (2) asignar estos datos a clases que se corresponde n con comportamientos de conducción. Tiene la ventaja de ser más eficiente y rubusto que los anteriores.

La idea de estos métodos desde el [Sekizawa et al., 2007] hasta el [Bender et al., 2015] creo que es el de un sistema que traduzca datos en crudo a datos de más alto nivel. Esto es debido a que la cantidad de datos que se pueden generar en un sólo coche (no digamos ya una flota de ellos) es tan grande que para determinados sistemas disponer de información de más alto nivel haría más sencillo su desempeño (por ejemplo, Sistema Avanzado de Ayuda a la Conducción (ADAS, Advanced Driver Assistance System) que funcionasen con datos de “adelantando” que sus valores de giro, aceleración en una ventana temporal).

En [Satzoda et al., 2013], haciendo uso de la información combinada de bus CAN, cámaras, GPS e información digitalizada el mapa donde se circula se determina una amplio abanico de información crítica en diferentes condiciones de la carretera. La información que sacan es: número de cambios de carril a la derecha, a la izquierda, tiempo en autopista y carretera urbana, distancia recorrida, velocidades medias en autopista y urbano, paradas, giros a la derecha, a la izquierda, incorporaciones y salidas de autopsta, tiempo gastado en un sólo carril, curvas a la izquierda, curvas a la derecha y distancia media al carril central

En [Al-Shihabi and Mourant, 2001] describen un framework para la modelización de comportamiento de conductores dentro de simuladores. Se basa en cuatro unidades de funcionamiento interconectadas, la de percepción (percibe el entorno en términos locales y globales), la de emoción (cómo responde emocionalmete al entorno), la de decision-making (investiga posibles acciones que podrían servir a las necesidades del módulo emocional) y la de decision-implementation (intenta implementar las decisiones cuando emergen condiciones de tráfico lo suficientemente seguras para llevarlas a cabo). Tengo que volver a leerlo después de hacer una primera introducción en el tema de agentes, porque me parece poner nombrecitos a un tipo de agente que funciona de esa misma manera, pero lo mismo no.

En [Terroso-Sáenz et al., 2015] analizan lo que ellos denominan el concepto del Reconocimiento el Entorno Intravehicular (IvCA, Intra-vehicular Context Awareness), lo que viene a ser el contexto definido **dentro** del vehículo, llegando a intentar predecir no sólo el número de ocupantes (ese es un problema sobradamente superado) sino la tipología o clase de ocupante (e.g. niños, adultos, ... **TODO!** buscar cuáles son las tipologías). Para ello hacen uso de un Procesamiento Complejo de Eventos (CEP, Complex Event Processing)¹ para procesar los datos de los diferentes sensores del vehículo y así detectar y analizar patrones característicos.

¹ Un CEP es un método por el cual se lee un flujo de información compuesta de flujos de distintas fuentes (de ahí el *complex*) para detectar eventos o patrones que pueden indicar la presencia de situaciones a analizar lo más rápido posible.

El artículo [Muñoz et al., 2010] es muy interesante ya que para la competición 2010 *Simulated Car Racing Championship* desarrollaron un controlador no para minimizar el tiempo en realizar las carreras, sino para hacerlo lo más parecido posible a cómo se comporta un humano. Para ello hicieron uso de redes neuronales para calcular trayectorias y de un proceso de aprendizaje a partir de información extraída de un conductor real en el simulador *The Simulated Car Racing Championship* (TORCS).

Aunque TORCS es usado como entorno de simulación en diversos concursos e investigaciones, se trata de un juego, y es que los juegos son un sandbox perfecto como entorno de simulación, ya que presentan una abstracción del dominio sobre el que trabajar. Otros trabajos en esta línea (entrenamiento de redes neuronales en este simulador) son los de [Munoz et al., 2009] y [Van Hoorn et al., 2009], el primero entrenando perceptrones multicapa (TODO! verificar) con un back-propagation haciendo uso de un dataset proporcionado por un bot y otro haciendo uso de un algoritmo evolutivo multiobjetivo para optimizar la red de acuerdo a un conjunto de datos proporcionado por un conductor real. Sin embargo, este tipo de modelos se encuentran más cercanos al nivel de control que al nivel de maniobra descritos en la figura 5.1.

En [Van Ly et al., 2013] hacen uso de los sensores de inercia de un coche (a saber qué coche tienen) para construir un perfil de conductor. Concluyen que frenar y girar caracterizan mejor a los conductores frente a acelerar.

lane change y car following

MOBIL → <http://www.traffic-simulation.de/MOBIL.html>, http://www.mtreiber.de/publications/MOBIL_TRB.pdf y http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-77074-9_19#page-1

car-following

En un modelo de tipo car-following los vehículos están representados por una tupla del estilo (x_n, v_n, a_n, t_n) donde x_n es la localización espacial, v_n la velocidad, a_n la aceleración y t_n el momento en el tiempo del vehículo n . El modelo es una serie de reglas o ecuaciones que actualizan estos valores a lo largo de t_n . Cambiar la definición a algo que sea más claro o citar esta que sale en [Aghabayk et al., 2015].

En [Aghabayk et al., 2015] realizan un estado de la cuestión en materia de modelos de tipo car-following. El autor divide en dos categorías los modelos, los clásicos y los basados en inteligencia artificial.

1. **Clásicos.** Son aquellos modelos donde la acción que realiza el vehículo viene determinada por una o más ecuaciones en función de las acciones que toma el vehículo delantero. Se pueden considerar limitados porque se centran en los resultados del comportamiento y no en el comportamiento en sí. Además se basan en que determinadas variables (e.g. tiempo de reacción) son las mismas para cada conductor.
 - a) **De estímulo-respuesta.** La respuesta está directamente relacionada con el estímulo creado por el comportamiento del coche de delante, generalmente una respuesta de tipo aceleración o deceleración aplicada con un pequeño retardo t . Los métodos de esta clase de modelo suelen ser sencillos, pero tiene dos problemas principales, (i) que los modelos no capturan los comportamientos de diferentes tipos de conductores o vehículos y (ii) supone que el conductor es capaz de observar los más mínimos cambios en el coche delantero cuando esto en realidad no es así (4-7).
 - b) **De distancia segura.** También denominados de prevención de colisión, basan su funcionamiento en dejar una distancia segura entre el coche delantero y el actual. El principal problema de estos modelos es que no se corresponden con la realidad, ya que un conductor obtiene información de muchas más fuentes y reaccionan en consecuencia y por tanto el comportamiento exhibido en estas simulaciones no se corresponde con el comportamiento real [Pipes, 1953].
 - c) **De avance deseado.** Similares al anterior, estos modelos basan su funcionamiento en tratar de mantener una distancia entre el parachoques trasero del coche frontal y el coche actual. Como en el caso anterior, este modelo no modela correctamente el comportamiento de un conductor debido a que hay muchos parámetros que no se miden para determinar la distancia a mantener en cada momento.
 - d) **Psicofísicos.** En este modelo, la suposición es que un conductor es capaz de detectar los cambios de velocidad en el vehículo frontal a partir del cambio en el ángulo visual con éste (8-10).
2. **Basados en inteligencia artificial.** Son todos aquellos modelos que están basados en técnicas del campo de la AI.

Nosotros nos centramos en AI, seguramente haya que recortar un poco lo de arriba para nombrarlo por encima. Quizá apuntando a los distintos tipos y ya. Según [Aghabayk et al., 2015], los modelos basados en **inteligencia artificial** funcionan en base a dos técnicas principalmente, las **redes neuronales artificiales** y la **lógica difusa**.

Modelos basados en lógica difusa

Los modelos de car following que se basan en la lógica difusa suelen apoyarse en la convicción de que la información que maneja el conductor a la hora de tomar decisiones proviene de un análisis no demasiado detallado de la situación que le rodea, y que por tanto que su razonamiento parte de conceptos imprecisos y vagos que llevan a una respuesta no demasiado bien definida.

[Kikuchi and Chakroborty, 1992] fueron los primeros en aplicar lógica difusa a modelos de conducción. Usaron el modelo GHR ([Chandler et al., 1958]). Las entradas al modelo eran distancia al coche delantero, diferencia de velocidades, aceleración y deceleración del coche delantero. La aceleración y deceleración se toman como entradas diferentes porque postulaban que el comportamiento antes ambos casos era diferente (aunque creo que esto es equivalente a usar particiones no simétricas de la variable lingüística. Como salida, la aceleración/deceleración del coche actúa

Otros trabajos que trabajan con lógica difusa: (Chakroborty y Kikuchi, 1999, 2003; Das, Bowles, Houghland, Hunn y Zhang, 1999; Gao, Hu, y Dong, 2008; Gonzalez-Rojo, Slama, Pereira y Mora-Camino, 2000, 2002; Hatipkarasulu y Wolshon, 2003; McDonald et al., 1997; Rekersbrink, 1995; Won, Lee, Lee, y Kim, 2007; Zheng y McDonald, 2005; Wu, Brackstone y McDonald, 2003). Ninguno de estos estudios considera diferentes tipologías de vehículos para el car following

Problemas:

1. ¿Qué reglas usan los humanos para modelar su comportamiento? Desconocerlas implica modelos no realistas. En (Wu, Brackstone, y McDonald, 2003) intenta suplir este problema con encuestas a conductores.
2. Los problemas inherentes de los controladores difusos. ¿Cómo validar las funciones de pertenencia? ¿cómo determinar las reglas difusas?

Modelos basados en redes neuronales artificiales

Las redes neuronales se han aplicado mucho sobre el campo de las ITS en general, y sobre la conducción autónoma y el análisis del comportamiento de los conductores (Dougherty, 1995).

En (Fix y Armstrong, 1990) implementaron un controlador basado en redes neuronales para el comportamiento del car following en un microsimulador entrenando dicho modelo previamente con datos extraídos de un conductor en dicho simulador.

En (Dougherty, Kirby y Boyle, 1993) usan redes para determinar el nivel de congestión en la vía.

(Hongfei, Zhicai y Anning, 2003) son los primeros en usar datos reales de un coche instrumentado usando el método Five-Wheel-System, que está especificado en su paper de aquella manera y que no me entero de nada. A partir de las entradas correspondientes a velocidad relativa, espacio relativo, velocidad y velocidad deseada (para ello, clasifican al conductor de agresivo, normal, conservador) determinan la aceleración/deceleración del vehículo. No lo aplican a ningún simulador, sólo que los valores se ajustan.

(Panwai and Dia, 2007) redes neuronales usando el dataset de (Manstetten, Krautter y Schwab, 1997) desarrollan una red neuronal para mantener la distancia con el siguiente vehículo. Este modelo sí se evaluó en el simulador AIMSUN, y los resultados muestran una buena correspondencia entre los datos y la realidad. No replica sin embargo el comportamiento de frenar hasta parar o de acelerar desde parado.

Problemas:

1. Es imposible determinar por qué la red funciona como está funcionando.
2. Los clásicos de los problemas de redes, el no aprendizaje y la especialización.

Otras técnicas

Aproximaciones híbridas

(Li, 2003) y (Ma, 2004) usan aproximaciones de fuzzy neural networks y neurofuzzy respectivamente. No proveen sin embargo de documentación y no se investiga la aplicación de estos modelos a microsimuladores de tráfico.

(Aghabayk, Forouzideh y Young, 2013) usan el modelo de árboles lineales locales (LOLIMOT, (Nelles, 2001)) que no deja de ser una aproximación neuro-fuzzy del comportamiento. Intenta incorporar imperfecciones perceptuales en un modelo de car following. El modelo está basado usando datasets reales y los resultados indican que se ajusta lo predicho con la realidad, pero no hay pruebas realizadas en microsimuladores.

En [Ma,], bajo la suposición de que el ser humano toma múltiples decisiones relacionadas basándose en su percepción (imprecisa) del entorno propone un método masado en un sistema de inferencia difusa para tomar decisiones tanto para el problema del *car following* como para el del *lan changing*, calibrando y ajustando dicho controlador mediante el uso de redes neuronales (aproximación Neuro-Fuzzy).

lane-changing

(Gipps, 1986, A Model for the Structure of Lane-Changing Decisions) propone un framework para el problema de cambio de carril que incluye numerosos factores, entre ellos señales de tráfico, tipos de vehículo (e.g. camiones) o “urgencia” en el cambio de carril (e.g. proximidad a una salida o giro). El principal problema de las reglas de este modelo es que asumen que el cambio de carril ocurre sin forzar a los vehículos del carril de destino a modificar su comportamiento como disminuir la velocidad o parar.

En (Fritzsche, 1994, A model for traffic simulation) se describe un modelo de microsimulación para analizar cuellos de botella (e.g. un accidente donde se bloquea uno de los carriles). Es un caso típico donde los vehículos no pueden cambiar de carril sin la participación activa del resto de vehículos (colaboración). El modelo lo describe de una manera muy sucinta y no considera comportamiento colaborativo en el cambio de carril.

Yousif and Hunt (1995) developed a microscopic simulation model for the investigation of lane changing behaviour on multi-lane unidirectional roadways. The rules pertaining to the desire and the possibility to change lane are based on similar logic to that described by Gipps (1986). Again, the assumption of the model is that if the available gap in the target lane is smaller than a given acceptable limit, no lane changing will take place. The main concern of the study is the relationship between lane utilisation and traffic flow on dual-carriageway roads under normal flow conditions (i.e. without incidents) and the model is adequate for this purpose. However, it could not produce realistic results when incidents or lane closures affect the flow conditions.

(Barcelo et al., 1996, PETRI: A parallel environment for a real-time traffic management and information system) describen el simulador AIMSUN. El comportamiento de cada vehículo en la simulación es modelado a través de múltiples modelos de comportamiento (e.g. car following, lane changing, gap acceptance). El modelo de cambio de carril es el usado en el modelo de Gipps, aunque el propio simulador permite la modelización de incidentes por lo que debe existir alguna variación del modelo original o un nuevo modelo para ese caso concreto.

(Wagner et al., 1997, Realistic multi-lane traffic rules for cellular automata) describe “un modelo de microsimulación mínimo para reproducir características macroscópicas en el flujo de tráfico”. El objetivo: definir reglas realísticas para modelar el cambio de carril usando carreteras con múltiples carriles. Para el cambio de carril, describen una serie de reglas para describir “cuando” cambiar de carril, y una “regla restrictiva de seguridad” que especifica que un coche que quiere cambiar de carril no moleste al coche de detrás

en el carril objetivo. El modelo fue capaz de reproducir de forma satisfactoria las características de uso de los carriles en carreteras de múltiples carriles con diferentes flujos de tráfico sobre condiciones normales (i.e. sin incidentes) de tráfico.

En (Hunt and Lyons, 1994, *Modelling of dual-carriageway lane-changing using neural networks*) desarrollan un modelo de decisión usando redes neuronales. El modelo funciona a partir de presentarle una entrada visual del entorno alrededor del vehículo que quiere cambiar de carril. Sin embargo, no considera la cooperación entre vehículos.

En (Yang and Koutsopoulos, 1996, *A Microscopic Traffic Simulator for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems*) presentan el simulador MITSIM, desarrollado por el MIT (creo) en el que se habla específicamente de comportamiento colaborativo en cambio de carriles haciendo uso de lo que denominan *courtesy yielding function* (algo así como función de cesión de paso de cortesía), la cual se usa para hacer espacio al vehículo que va a incorporarse al carril. Sin embargo, los detalles de dicho proceso no están especificados en el paper.

En (*Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation*, 2002) (simulador SITRAS) dicen que según el comportamiento de (Gipps, 1986), el cambio de carril no ocurre nunca en una situación de congestión, y por tanto en este tipo de situaciones el vehículo tiene que forzar su movimiento hacia el carril. Como la interacción entre conductores en ese tipo de maniobras requiere comportamiento complejo de toma de decisiones, éstos pueden ser modelados con técnicas de agentes autónomos. También aquí hablan de los DVOs (driver-vehicle objects). Tienen características individuales como (i) tipo de vehículo, (ii) magnitudes físicas (tamaño, velocidad máxima, ...), (iii) tipo de conductor y (iv) nivel de conocimiento de la red (porque afecta en la elección de ruta). Tienen un objetivo, llegar del origen al destino tan rápido como puedan. Esto implica un conjunto de decisiones a hacer en intervalos periódicos durante su funcionamiento (i) selección de ruta cada vez que se entra en un nuevo tramo y (ii) cálculo de la aceleración en cada intervalo).

En (Chaib-draa and Levesque, 1996,) proponen un framework para trabajar con tres tipos diferentes de situaciones (rutina, familiar y no familiar) en sistemas multiagente, demostrando la aplicación en escenarios de microsimulación urbana). Su modelo se basa en una estructura jerárquica definida por los niveles de comportamiento humano y de técnicas de razonamiento propuestas por (Rasmussen, 1986,) (skill-rule-knowledge). El comportamiento basado en habilidades (skills) se refiere a las actividades completamente automatizadas (percepción-ejecución) usadas típicamente en situaciones rutinarias. comportamiento basado en reglas se refiere a situaciones estereotipadas (percepción-reconocimiento de la situación-planificación-ejecución) aplicable en su mayoría en situaciones fami-

liares. El comportamiento basado en el conocimiento se refiere a actividades conscientes que implican trabajo de resolución de problemas y toma de decisiones (perception–reconocimiento de la situación–toma e decisión–planificación de la ejecución) que suelen ser necesarias en situaciones poco familiares. En SITRAS se ven estas diferencias claramente en el cálculo de la aceleración. (i) si no hay ninguna otra restricción, llegar a la máxima velocidad es acelerar hasta la máxima velocidad (skill), (ii) si hay una luz roja más adelante, se va frenando hasta para el coche (rule) y (iii) si se recibe información de coches alrededor (por ejemplo se está incorporando un nuevo coche a nuestro carril) se requiere un conocimiento más complejo (knowledge). Los DVO aquí tienen las siguientes debilidades: no tienen memoria (sólo planean el segundo siguiente de acuerdo a la información actual) y tienen poco contacto directo con los demás DVOs de alrededor (saben del de delante y del de detrás, pero no de los lados).

gap-acceptance

¿Qué coño es esto?

merging

Prestar atención al "merging", un caso especial del lane-changing.

Capítulo 6

Sistemas desarrollados

Este capítulo describe todos los sistemas y el software desarrollados e implementados para realizar la tesis. Éstos son tanto los encargados de la captura de datos de los conductores, los que trabajan directamente con el simulador para integrar los controladores generados y los desarrollos para la generación de Software.

ScanBUS

ScanBUS es un software para la identificación de paquetes enviados por dispositivos a través del Bus CAN del vehículo.

Sistema para la captura de datos multidispositivo

Para la obtención de los datos de conducción se ha desarrollado un sistema que permite la conexión a múltiples dispositivos desde diferentes interfaces. Las razones para su desarrollo son las siguientes

- Sincronización automática de datos de dispositivo en intervalos configurables de tiempo. El sistema permite la configuración de la frecuencia de captura sincronizando los datos recibidos a esa frecuencia.
- Diseño extensible a otros dispositivos. Es software está diseñado para facilitar en la medida de lo posible la introducción de nuevos dispositivos usando, para ello, las interfaces apropiadas.
- Hardware compacto. El sistema está integrado en un ordenador de tipo Raspberry PI, aunque es factible su integración en otros sistemas siempre y cuando funcionen con un sistema GNU/Linux e incluyan el hardware necesario para las capturas.

Biblioteca para la incorporación de modelos de conductor personalizados en SUMO

Hace uso de [TraCI](#).

Modelos de comportamiento

Entrenamiento de controladores difusos mediante [computación evolutiva \(EC, evolutionary computation\)](#)

Capítulo 7

Estudio de modelos de comportamiento

Creo que además de crear modelos adaptados al conductor de car following y de lane change, estaría bien adaptar los parámetros de los modelos existentes y comparar.

Cosas que se me ocurren. Habría que tener un módulo que se plantea qué acción tomar en función del entorno y qué acciones ocurren alrededor nuestro. Quiero cambiar de carril, está entrando un usuario al carril,

Resultados

Factores a mirar del tráfico. En un paper ponen esto: the simulation results indicate that the proposed model is explainable, and it can represent equilibrium and disequilibrium states of microscopic and macroscopic traffic, such as: stable traffic, unstable traffic, equilibrium speed-flow relationship, closing-in, shying-away, capacity drop, and traffic hysteresis.

Realizar comparativa de modelos existentes contra modelos de parámetros ajustados contra modelos creados.

Capítulo 8

Conclusiones

¿Pierde rendimiento el sistema cuando se aplican los modelos a escenarios significativamente diferentes de los escenarios de test? Si sí, un trabajo futuro y algo para escribir en conclusiones sería hablar de este defecto y de cómo subsanarlo.

Aportaciones

Futuras líneas de investigación

¿A lo mejor se podría tirar por el campo de las V2X desde esta tesis?

¿Entrar en el tema de la mesosimulación?

Intersection model (lo he visto nombrar por primera vez en http://elib.dlr.de/89233/1/SUMO_Lane_change_model). Habrán creado también un concepto así rotondas?

No sé, pero me parece lógico tratar de realizar una disociación entre vehículo y conductor en lugar de contemplar el binomio vehículo/conductor como uno sólo. Es más, creo que resultaría interesante evaluar comportamientos de conductores sobre diferentes tipologías de vehículos. La librería de todas formas debería soportar esta disociación (y se debería indicar).

Bibliografía

- [par, 2010] (2010). Directive 2010/40/eu of the european parliament and of the council of 7 july 2010 on the framework for the deployment of intelligent transport systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport text with eea relevance. *Official Journal of the European Union*, 50:207.
- [Aghabayk et al., 2015] Aghabayk, K., Sarvi, M., and Young, W. (2015). Transport Reviews : A Transnational A State-of-the-Art Review of Car- Following Models with Particular Considerations of Heavy Vehicles. *Transport Reviews*, 35(May 2015):37–41.
- [Al-Shihabi and Mourant, 2001] Al-Shihabi, T. and Mourant, R. R. (2001). A framework for modeling human-like driving behaviors for autonomous vehicles in driving simulators. In *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, pages 286–291. ACM.
- [Bando et al., 2013] Bando, T., Takenaka, K., Nagasaka, S., and Taniguchi, T. (2013). Unsupervised drive topic finding from driving behavioral data. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, pages 177–182. IEEE.
- [Barlovic et al., 1998] Barlovic, R., Santen, L., Schadschneider, A., and Schreckenberg, M. (1998). Metastable states in cellular automata for traffic flow. *Eur. Phys. J. B*, 5:793–800.
- [Behrisch et al., 2011] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., and Krajzewicz, D. (2011). Sumo-simulation of urban mobility: an overview. In *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. ThinkMind.
- [Bender et al., 2015] Bender, A., Agamennoni, G., Ward, J. R., Worrall, S., and Nebot, E. M. (2015). An unsupervised approach for inferring driver behavior from naturalistic driving data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(6):3325–3336.
- [Bezdek, 1993] Bezdek, J. C. (1993). Intelligence: Computational versus artificial. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 4(5):737.
- [Brilon and Wu, 1999] Brilon, W. and Wu, N. (1999). Evaluation of cellular automata for traffic flow simulation on freeway and urban streets. *Traffic and Mobility*.

- [Casas et al., 2011] Casas, J., Perarnau, J., and Torday, A. (2011). The need to combine different traffic modelling levels for effectively tackling large-scale projects adding a hybrid meso/micro approach. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 20:251–262.
- [Chandler et al., 1958] Chandler, R. E., Herman, R., and Montroll, E. W. (1958). Traffic Dynamics: Studies in Car Following. *Operations Research*, 6(2):165–184.
- [Clymer, 2002] Clymer, J. (2002). Simulation of a vehicle traffic control network using a fuzzy classifier system. In *Proceedings 35th Annual Simulation Symposium. SS 2002*, pages 285–291. IEEE Comput. Soc.
- [Cybenko, 1989] Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of control, signals and systems*, 2(4):303–314.
- [Dijkstra, 1972] Dijkstra, E. W. (1972). The humble programmer. *Communications of the ACM*, 15(10):859–866.
- [Dingus et al., 2006] Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S., Sudweeks, J., Perez, M., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., et al. (2006). The 100-car naturalistic driving study, phase ii-results of the 100-car field experiment. Technical report.
- [Dresner and Stone, 2004] Dresner, K. and Stone, P. (2004). *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems : AAMAS 2004 : New York City, New York, USA : July 19-23, 2004*. IEEE Computer Society.
- [Du and Swamy, 2006] Du, K. and Swamy, M. (2006). Neural networks in a softcomputing framework.
- [Gu et al., 2015] Gu, M., Billot, R., Faouzi, N.-e. E., Lyon, D., and Hassas, S. (2015). Multi-Agent Dynamic Coupling for Cooperative Vehicles Modeling. pages 4276–4277.
- [Hebb, 1968] Hebb, D. (1968). o.(1949) the organization of behavior.
- [Imprialou et al., 2016] Imprialou, M.-I. M., Quddus, M., Pitfield, D. E., and Lord, D. (2016). Re-visiting crash–speed relationships: A new perspective in crash modelling. *Accident Analysis & Prevention*, 86:173–185.
- [Jin et al., 2016] Jin, J., Ma, X., Koskinen, K., Rychlik, M., and Kosonen, I. (2016). Evaluation of fuzzy intelligent traffic signal control (fits) system using traffic simulation. In *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, number 16-4359.
- [Johnson and Trivedi, 2011] Johnson, D. A. and Trivedi, M. M. (2011). Driving style recognition using a smartphone as a sensor platform. In *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1609–1615. IEEE.

- [Kerner et al., 2008] Kerner, B., Klenov, S., and Brakemeier, A. (2008). Testbed for wireless vehicle communication: A simulation approach based on three-phase traffic theory. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, pages 180–185. IEEE.
- [Kikuchi and Chakroborty, 1992] Kikuchi, S. and Chakroborty, P. (1992). *Car-following model based on fuzzy inference system*. Number 1365.
- [Krajzewicz et al., 2012] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., and Bieker, L. (2012). Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4):128–138.
- [Krajzewicz et al., 2002] Krajzewicz, D., Hertkorn, G., Rössel, C., and Wagner, P. (2002). Sumo (simulation of urban mobility) – an open-source traffic simulation. In *Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM20002)*, pages 183–187.
- [Krauss et al., 1997] Krauss, S., Wagner, P., and Gawron, C. (1997). Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Physical Review E*, 55(5):5597–5602.
- [Lerner et al., 2010] Lerner, N., Jenness, J., Singer, J., Klauer, S., Lee, S., Donath, M., Manser, M., and Ward, N. (2010). An exploration of vehicle-based monitoring of novice teen drivers. *Final Report. NHTSA, Report No. DOT HS, 811:333*.
- [Ma,] Ma, X. Toward An Integrated Car-following and Lane- changing Model by A Neural Fuzzy Approach.
- [Maye et al., 2011] Maye, J., Triebel, R., Spinello, L., and Siegwart, R. (2011). Bayesian on-line learning of driving behaviors. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 4341–4346. IEEE.
- [McCarthy et al., 1956] McCarthy, J., Minsky, M., Rochester, N., and Shannon, C. (1956). Dartmouth conference. In *Dartmouth Summer Research Conference on Artificial Intelligence*.
- [McCulloch and Pitts, 1943] McCulloch, W. S. and Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4):115–133.
- [Michon, 1985] Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In *Human behavior and traffic safety*, pages 485–524. Springer.
- [Minderhoud, 1999] Minderhoud, M. (1999). *Supported Driving: Impacts on Motorway Traffic Flow*. PhD thesis.
- [Minsky and Papert, 1969] Minsky, M. and Papert, S. (1969). Perceptrons.

- [Munoz et al., 2009] Munoz, J., Gutierrez, G., and Sanchis, A. (2009). Controller for torcs created by imitation. In *2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*, pages 271–278. IEEE.
- [Muñoz et al., 2010] Muñoz, J., Gutierrez, G., and Sanchis, A. (2010). A human-like torcs controller for the simulated car racing championship. In *Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games*, pages 473–480. IEEE.
- [Munoz et al., 2001] Munoz, L., Gomes, G., Yi, J., Toy, C., Horowitz, R., and Alvarez, L. (2001). Integrated meso-microscale traffic simulation of hierarchical ahs control architectures. In *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE*, pages 82–87. IEEE.
- [Nagel and Schreckenberg, 1992] Nagel, K. and Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic.
- [Nagel et al., 1998] Nagel, K., Wolf, D. E., Wagner, P., and Simon, P. (1998). Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach. *Physical Review E*, 58(2):1425–1437.
- [OICA, 2015] OICA (2015). Motorization rate 2014 – worldwide.
- [Osogami et al., 2012] Osogami, T., Imamichi, T., Mizuta, H., Morimura, T., Raymond, R., Suzumura, T., Takahashi, R., and Idé, T. (2012). IBM Mega Traffic Simulator.
- [Pakkenberg and Gundersen, 1997] Pakkenberg, B. and Gundersen, H. J. (1997). Neocortical neuron number in humans: effect of sex and age. *The Journal of comparative neurology*, 384(2):312–20.
- [Pipes, 1953] Pipes, L. (1953). An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of applied physics*.
- [Preston and Bishop, 2002] Preston, J. and Bishop, M. (2002). Views into the chinese room: New essays on searle and artificial intelligence.
- [Quaassdorff et al., 2016] Quaassdorff, C., Borge, R., Pérez, J., Lumbreras, J., de la Paz, D., and de Andrés, J. M. (2016). Microscale traffic simulation and emission estimation in a heavily trafficked roundabout in madrid (spain). *Science of The Total Environment*, 566:416–427.
- [Ramón and Cajal, 1904] Ramón, S. and Cajal, S. (1904). *Textura del Sistema Nervioso del Hombre y de los Vertebrados*, volume 2. Madrid Nicolas Moya.
- [Rumelhart et al., 1985] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1985). Learning internal representations by error propagation. Technical report, DTIC Document.
- [Russell et al., 2003] Russell, S. J., Norvig, P., Canny, J. F., Malik, J. M., and Edwards, D. D. (2003). *Artificial intelligence: a modern approach*, volume 2. Prentice hall Upper Saddle River.

- [Satzoda et al., 2013] Satzoda, R., Martin, S., Van Ly, M., Gunaratne, P., and Trivedi, M. M. (2013). Towards automated drive analysis: A multimodal synergistic approach. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, pages 1912–1916. IEEE.
- [Sekizawa et al., 2007] Sekizawa, S., Inagaki, S., Suzuki, T., Hayakawa, S., Tsuchida, N., Tsuda, T., and Fujinami, H. (2007). Modeling and recognition of driving behavior based on stochastic switched arx model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(4):593–606.
- [Shiose et al., 2001] Shiose, T., Onitsuka, T., and Taura, T. (2001). Effective information provision for relieving traffic congestion. In *Proceedings Fourth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications. ICCIMA 2001*, pages 138–142. IEEE.
- [Siddique and Adeli, 2013] Siddique, N. and Adeli, H. (2013). *Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural networks and evolutionary computing*. John Wiley & Sons.
- [Suzumura and Kanezashi, 2012] Suzumura, T. and Kanezashi, H. (2012). Highly scalable x10-based agent simulation platform and its application to large-scale traffic simulation. *Proceedings of the 2012 IEEE/ACM 16th*.
- [Tang et al., 2014] Tang, T., Shi, W., Shang, H., and Wang, Y. (2014). A new car-following model with consideration of inter-vehicle communication. *Nonlinear dynamics*, 76(4):2017–2023.
- [Terada et al., 2010] Terada, R., Okuda, H., Suzuki, T., Isaji, K., and Tsuru, N. (2010). Multi-scale driving behavior modeling using hierarchical pwarx model. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on*, pages 1638–1644. IEEE.
- [Terroso-Sáenz et al., 2015] Terroso-Sáenz, F., Valdés-Vela, M., Campuzano, F., Botia, J. A., and Skarmeta-Gómez, A. F. (2015). A complex event processing approach to perceive the vehicular context. *Information Fusion*, 21:187–209.
- [Tordeux et al., 2011] Tordeux, A., Lassarre, S., and Roussignol, M. (2011). A study of the emergence of kinematic waves in targeted state car-following models of traffic. <http://cybergeorevues.org>.
- [Trask ANDREWTRASK et al.,] Trask ANDREWTRASK, A., Gilmore DAVIDGILMORE, D., and Russell MATTHEWRUSSELL, M. Modeling Order in Neural Word Embeddings at Scale.
- [Treiber et al., 2000] Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical review E*, 62(2):1805.

- [Turing, 1950] Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236):433–460.
- [Van Hoorn et al., 2009] Van Hoorn, N., Togelius, J., Wierstra, D., and Schmidhuber, J. (2009). Robust player imitation using multi-objective evolution. In *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pages 652–659. IEEE.
- [Van Ly et al., 2013] Van Ly, M., Martin, S., and Trivedi, M. M. (2013). Driver classification and driving style recognition using inertial sensors. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, pages 1040–1045. IEEE.
- [Wiedemann, 1974] Wiedemann, R. (1974). Simulation des strassenverkehrsflusses.
- [y Cajal, 1888] y Cajal, S. R. (1888). *Estructura de los centros nerviosos de las aves*.

Acerca del código fuente

La presente tesis lleva consigo numerosas horas de programación y, por tanto, muchísimas líneas de código. Éste se encuentra en formato electrónico como datos adjuntos a la memoria y no como capítulo o anexo a ésta, una forma más manejable para su consulta y a la vez respetuosa con el medio ambiente. No obstante sí es posible que existan pequeños fragmentos de código para apoyar explicaciones. En caso de necesitar los fuentes y no estar disponibles los datos anexos a la memoria, se puede contactar directamente conmigo, el autor, en .

Cómo citar esta tesis

Si deseas citar esta tesis, lo primero gracias. Me alegro de que te sirva para tu investigación. Si lo deseas, incluye el siguiente código en bibtex:

TODO A ver cómo coño meto en el paquete listings caracteres acentuados...