

---

# ***Algoritmos de control y de decisión***

***José Eugenio Naranjo***  
 *joseeugenio.naranjo@upm.es*

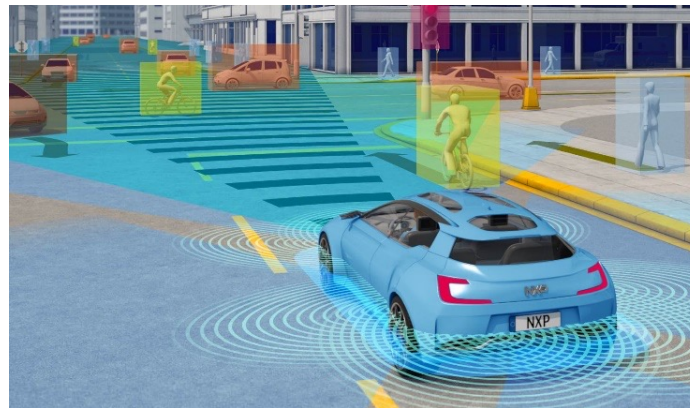


***Curso de Especialización en  
Vehículo Autónomo y Conectado***  
***Marzo 2026***



# Introducción

- ❖ Un vehículo autónomo es un vehículo con la capacidad de realizar la tarea de conducción dinámica (DDT). Esta tarea incluye todas las funciones operativas y tácticas en tiempo real necesarias para operar un vehículo en el tráfico en carretera, excluyendo las funciones estratégicas como la programación de viajes y la selección de destinos y rutas, e incluyendo:
  - ❖ 1. Control del movimiento lateral del vehículo mediante la dirección (operacional).
  - ❖ 2. Control del movimiento longitudinal del vehículo a través de la aceleración (operacional).
  - ❖ 3. Monitorización del entorno de conducción mediante la detección de objetos y eventos, reconocimiento, clasificación y preparación de respuesta (operacional y táctica).
  - ❖ 4. Ejecución de la respuesta a objetos y eventos (operacional y táctica).
  - ❖ 5. Planificación de maniobras (táctica).
  - ❖ 6. Mejora la percepción a través de la iluminación, señalización y gestos, etc. (táctica).



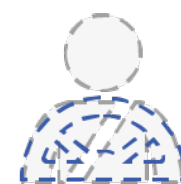
# Introducción

## ❖ Niveles de automatización

### ❖ SAE J3016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE) AUTOMATION LEVELS

Full Automation



0

#### No Automation

Zero autonomy; the driver performs all driving tasks.

1

#### Driver Assistance

Vehicle is controlled by the driver, but some driving assist features may be included in the vehicle design.

2

#### Partial Automation

Vehicle has combined automated functions, like acceleration and steering, but the driver must remain engaged with the driving task and monitor the environment at all times.

3

#### Conditional Automation

Driver is a necessity, but is not required to monitor the environment. The driver must be ready to take control of the vehicle at all times with notice.

4

#### High Automation

The vehicle is capable of performing all driving functions under certain conditions. The driver may have the option to control the vehicle.

5

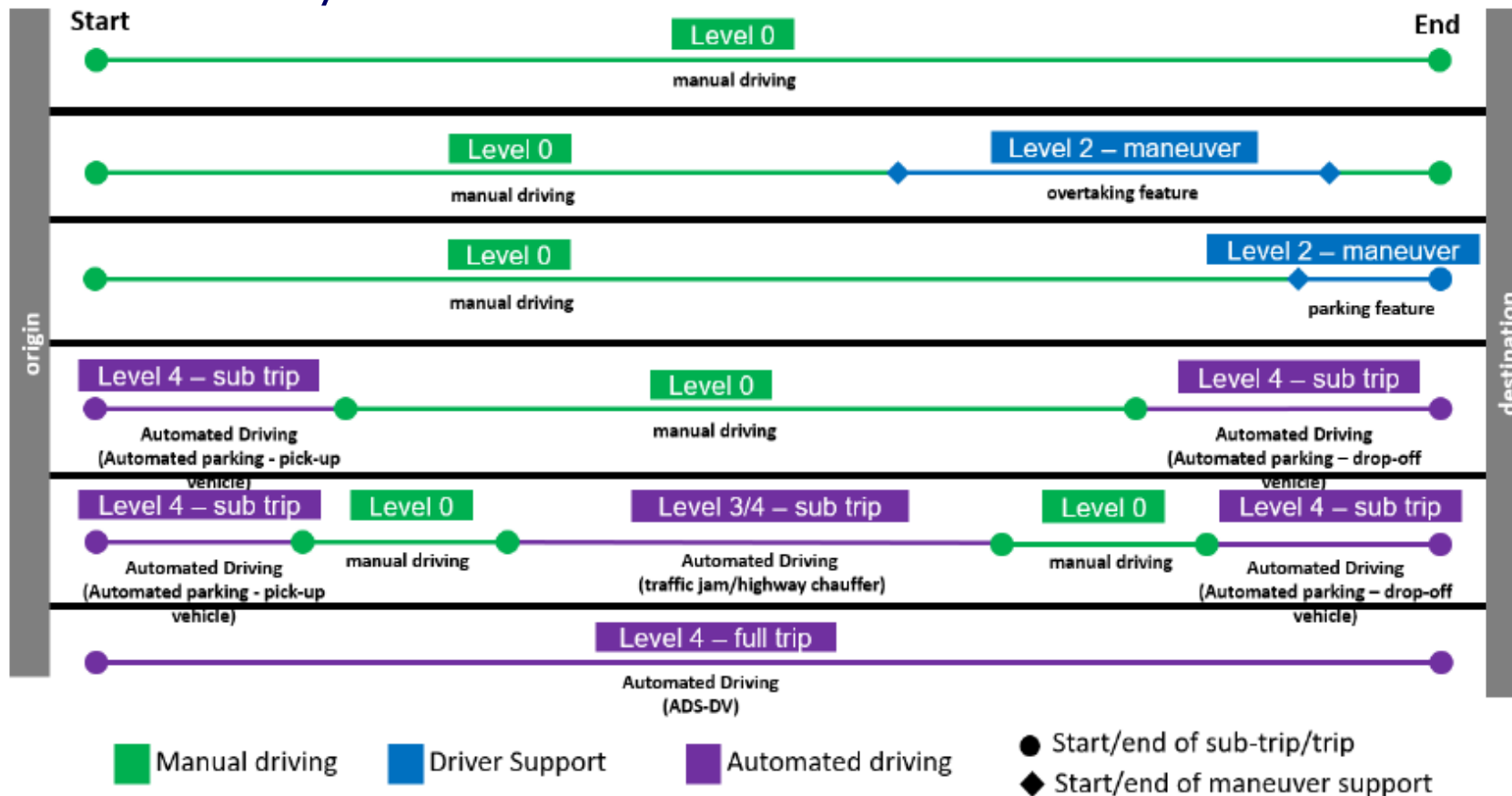
#### Full Automation

The vehicle is capable of performing all driving functions under all conditions. The driver may have the option to control the vehicle.

# Introducción

## ❖ Niveles de automatización

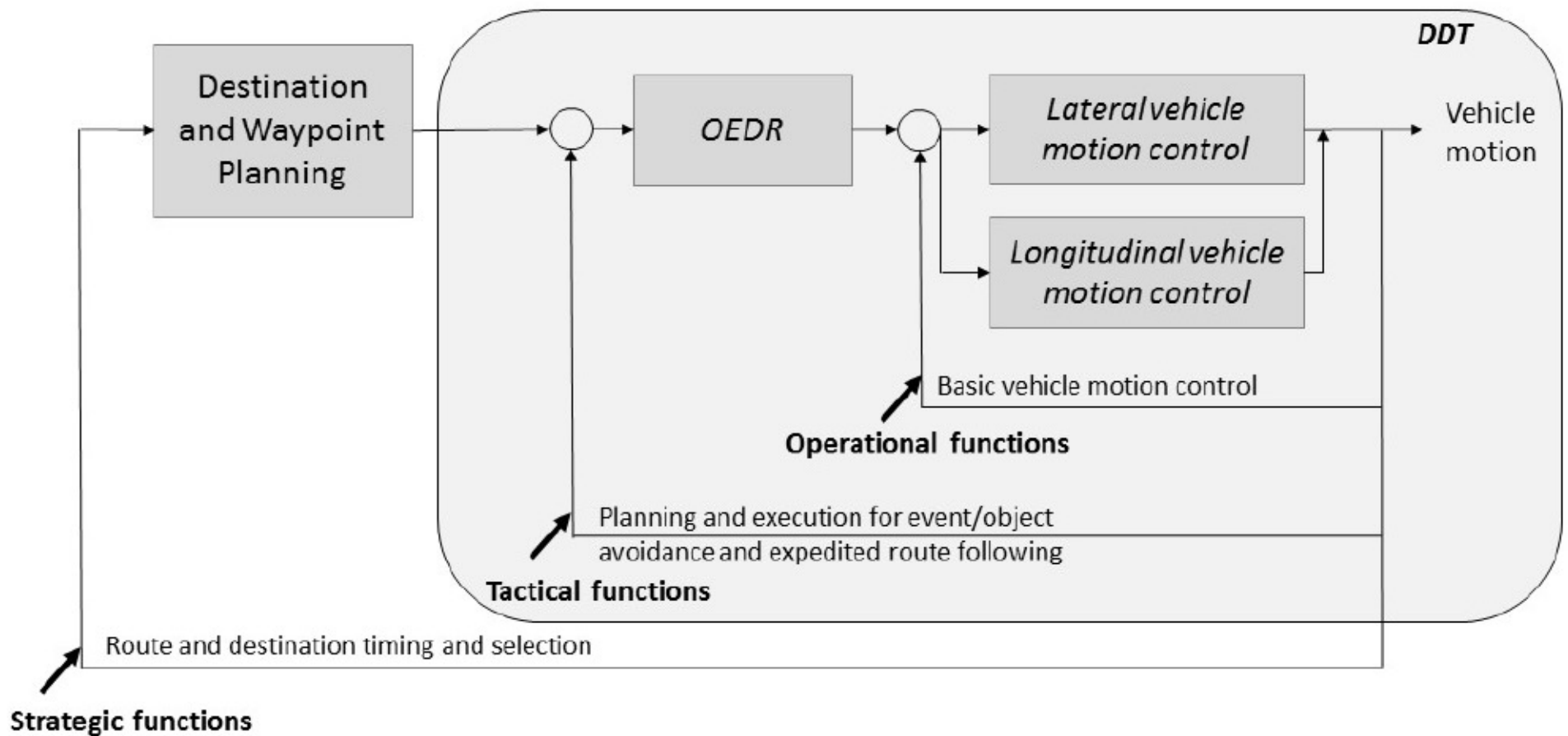
## ❖ SAE J3016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles



# Introducción

## ❖ Arquitectura de control de un vehículo autónomo

*Vista esquemática de la tarea dinámica de conducción - Dynamic driving task (DDT).*



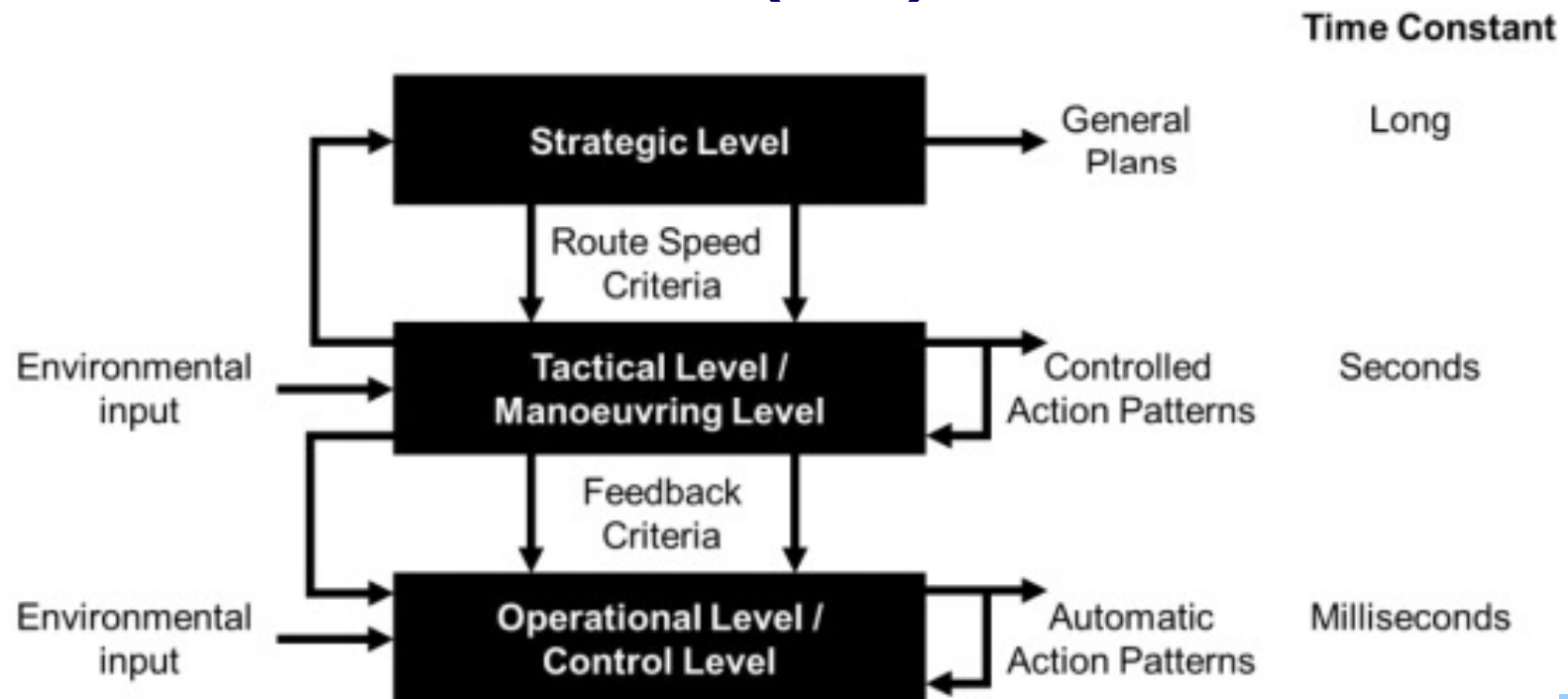
# Introducción

---

- ❖ El acto general de conducir se puede dividir en tres niveles de esfuerzo del conductor en relación con las habilidades y el control: estratégico (planificación), táctico (maniobras) y operacional (control) (Michon, 1985). Global Forum for Road Traffic Safety (UE).
- ❖ El **nivel estratégico** define la etapa de planificación general de un viaje, incluida la determinación de los objetivos del viaje, la ruta y la elección modal, además de una evaluación de los costos y riesgos involucrados. Los planes se derivan además de consideraciones generales sobre el transporte y la movilidad, y también de factores concomitantes como la estética, satisfacción y comodidad.
- ❖ A **nivel táctico**, los conductores ejercen el control de las maniobras, lo que les permite negociar las circunstancias directamente predominantes. Aunque en gran medida limitadas por las exigencias de la situación real, maniobras como la evitación de obstáculos, la aceptación de espacios, los giros y los adelantamientos deben cumplir los criterios derivados de los objetivos generales establecidos a nivel estratégico.

# Introducción

- ❖ El **nivel operacional** implica reacciones en una fracción de segundo que pueden considerarse precognitivas o innatas, como hacer microcorrecciones en la dirección, el frenado y la aceleración para mantener la posición del carril en el tráfico o para evitar un obstáculo repentino o un evento peligroso en la vía del vehículo.
- ❖ **Juntos, los niveles operacional y táctico constituyen la tarea de conducción dinámica (DDT).**



## ❖ Arquitectura de control de un vehículo autónomo

### ❖ Elementos fundamentales:

- **Dynamic driving task (DDT):** Conjunto de funciones operativas y tácticas en tiempo real necesarias para operar un vehículo en el tráfico en carretera, excluidas las funciones estratégicas como la programación de viajes y la selección de destinos y puntos de referencia, e incluyen, entre otras, las siguientes subtareas:
  - 1. Control de movimiento lateral del vehículo a través de la dirección (nivel operacional).
  - 2. Control de movimiento longitudinal del vehículo mediante aceleración y desaceleración (nivel operacional).
  - 3. Supervisión del entorno de conducción mediante la detección, el reconocimiento, la clasificación y la preparación de respuestas de objetos y eventos (nivel operacional y táctico).
  - 4. Ejecución de respuesta a objetos y eventos (nivel operacional y táctico).
  - 5. Planificación de maniobras (nivel táctico).
  - 6. Mejorar la visibilidad mediante la iluminación, el sonido de la bocina, la señalización, los gestos, etc. (nivel táctico).

## ❖ Arquitectura de control de un vehículo autónomo

### ❖ Elementos fundamentales:

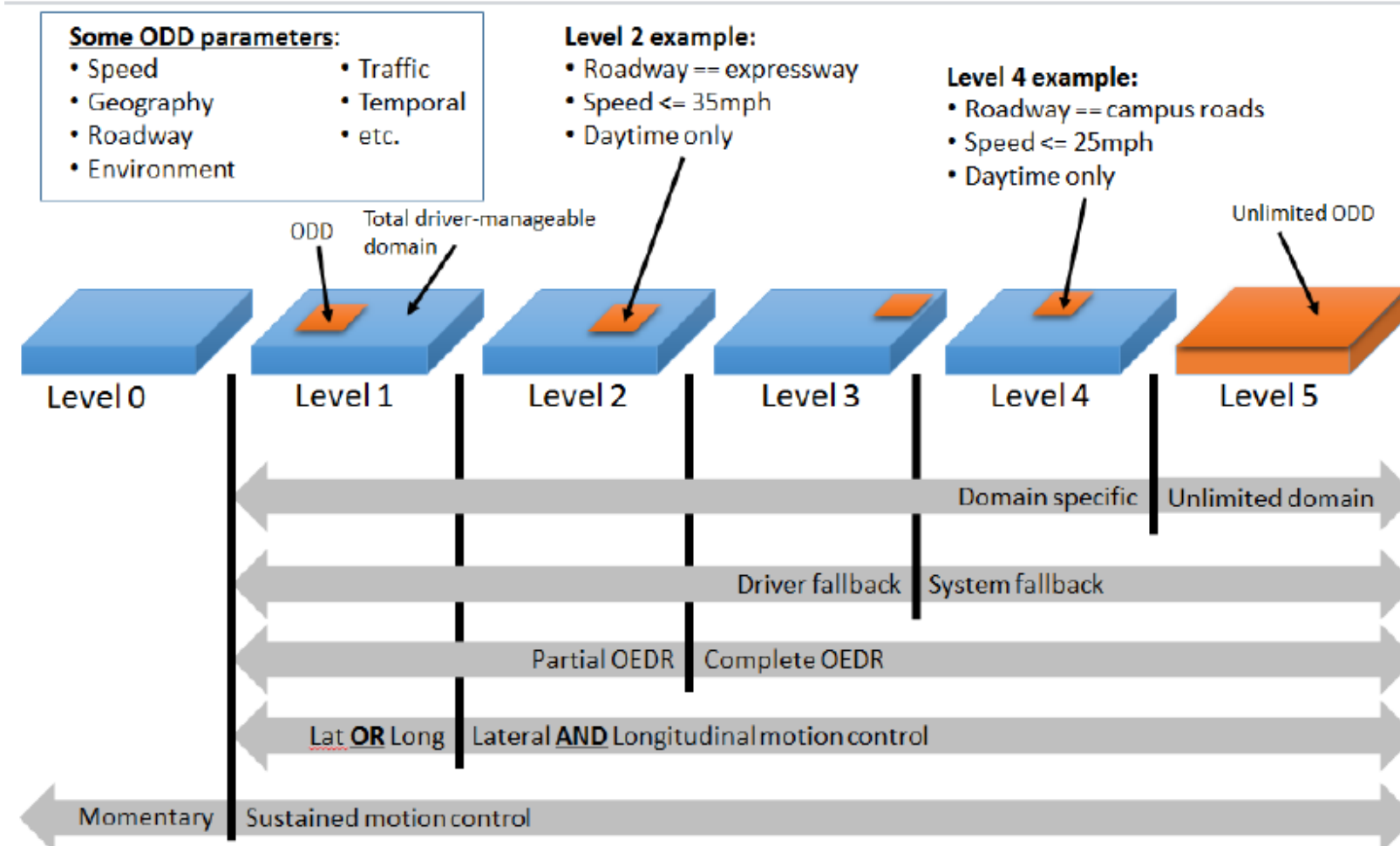
- **Object and event detection, recognition, classification, and response (OEDR):** Conjunto de actividades relacionadas con carga de trabajo del conductor. En el caso de los sistemas de automatización de conducción, OEDR también incluye eventos asociados con acciones o resultados del sistema, como errores no diagnosticados del sistema de automatización de conducción o cambios de estado.

**Operational Design Domain (ODD):** Condiciones de funcionamiento bajo las cuales un sistema de automatización de conducción determinado o una característica del mismo está diseñado específicamente para funcionar, incluidas, entre otras, restricciones ambientales, geográficas y de hora del día, y/o el requisito de presencia o ausencia de ciertas características del tráfico o la carretera.

# Introducción

## ❖ Arquitectura de control de un vehículo autónomo

- *ODD relativo a los diferentes niveles de automatización*



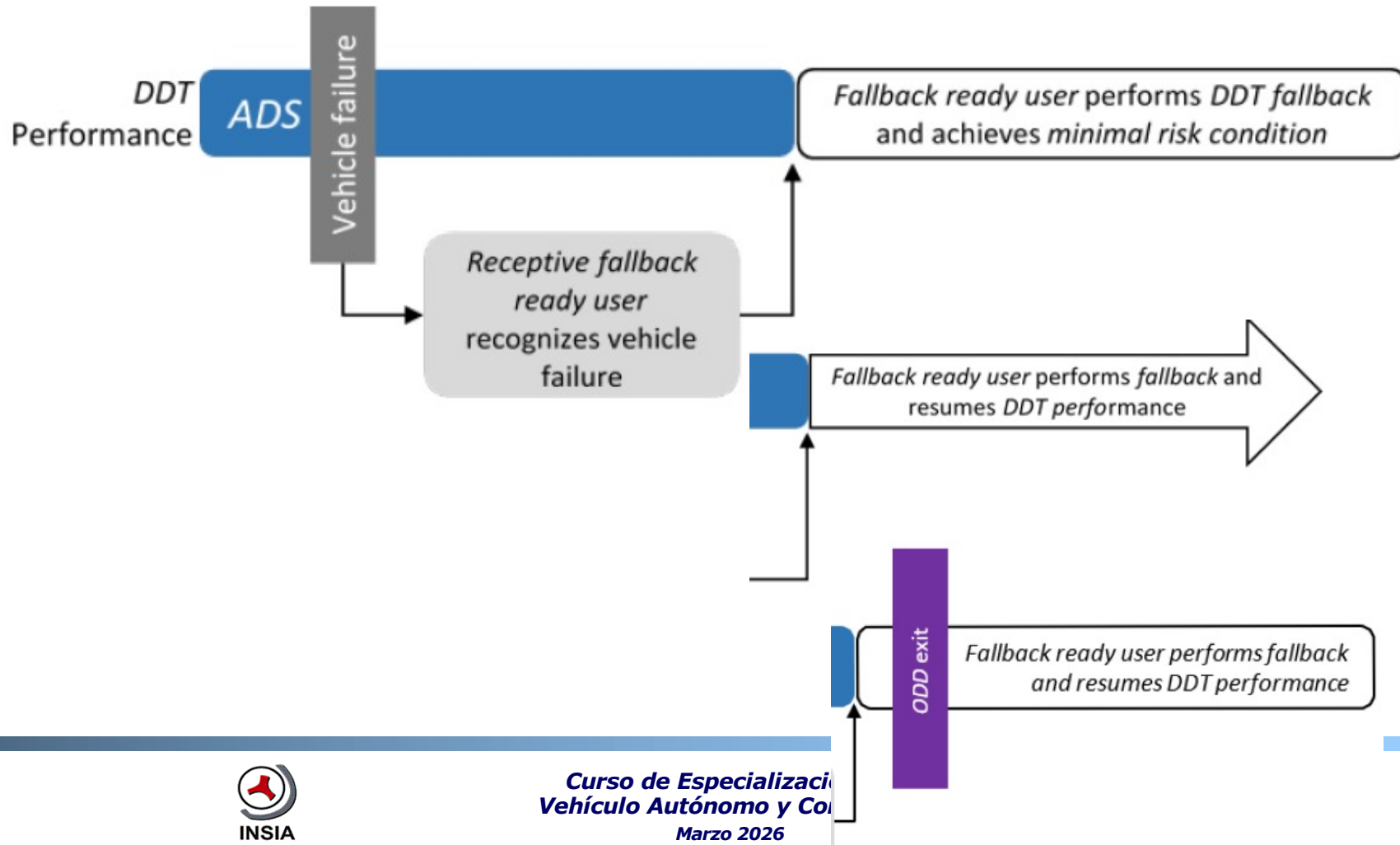
## ❖ Arquitectura de control de un vehículo autónomo

- **Self-Driving System (SDS):** Es la combinación de hardware y software que colectivamente son capaces de realizar toda la tarea de conducción dinámica de forma sostenida, independientemente de si se limita a un dominio de diseño operativo específico. La SDS se puede encontrar en un vehículo condicionalmente automatizado (nivel 3), un vehículo altamente automatizado (nivel 4) o un vehículo completamente automatizado (nivel 5).
- **DDT Fallback:** Respuesta del usuario o de una SDS para realizar la DDT o lograr una condición de riesgo mínimo después de la ocurrencia de un fallo del sistema relevante para el desempeño del DDT o al salir de ODD.
- **(DDT) Fall back ready user:** Es el usuario de un vehículo equipado con un la función SDS activada en un nivel SAE 3, que puede operar el vehículo siguiendo las solicitudes emitidas por el sistema para intervenir ante fallos del sistema relevantes para el desempeño del DDT en el vehículo que los obligan a realizar el retroceso del DDT.

# Introducción

## ❖ Arquitectura de control de un vehículo autónomo

- Ejemplo de caso de uso en el Nivel 3 que muestra el ADS activado y la ocurrencia de un fallo del ADS del vehículo que impide el desempeño continuo del DDT. El usuario realiza el fallback.



## ❖ Arquitectura de control de un vehículo autónomo

- Ejemplo de secuencia de casos de uso en el Nivel 4 que muestra el ADS activado y la ocurrencia de una falla del sistema del vehículo que impide el desempeño continuo del DDT. ADS realiza el fallback.



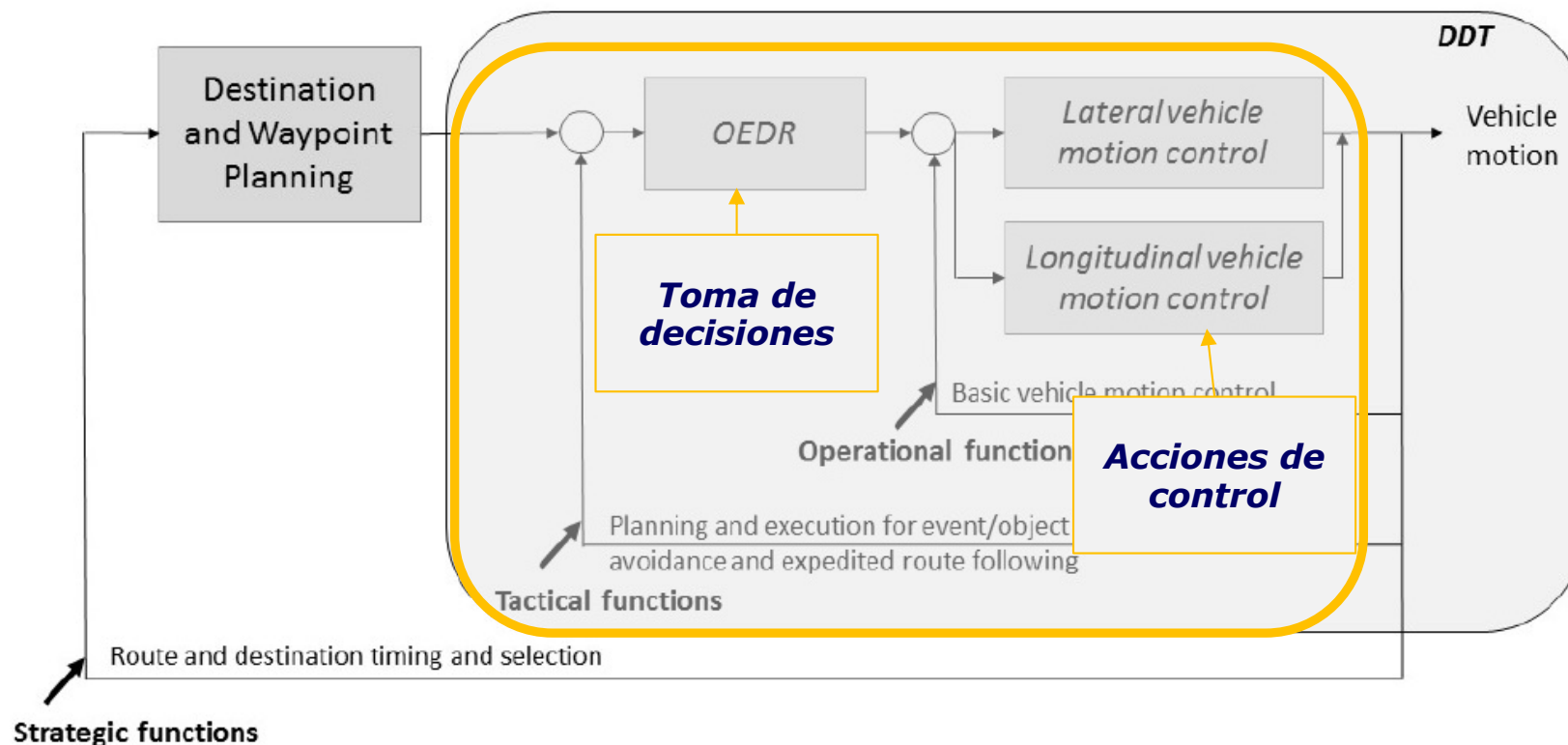
# Introducción

---

- ❖ **Esta arquitectura general para vehículos autónomos, tiene que ser instanciada mediante una arquitectura de control concreta, que incluya la toma de decisiones y el control de bajo nivel.**

# Arquitecturas de control

- ❖ Una arquitectura del sistema de control define cómo interactúan sus controladores con el sistema bajo control. La arquitectura comprende los elementos de control sintonizables de su sistema, componentes adicionales de filtros y sensores, el sistema bajo control y las interconexiones entre todos estos elementos.



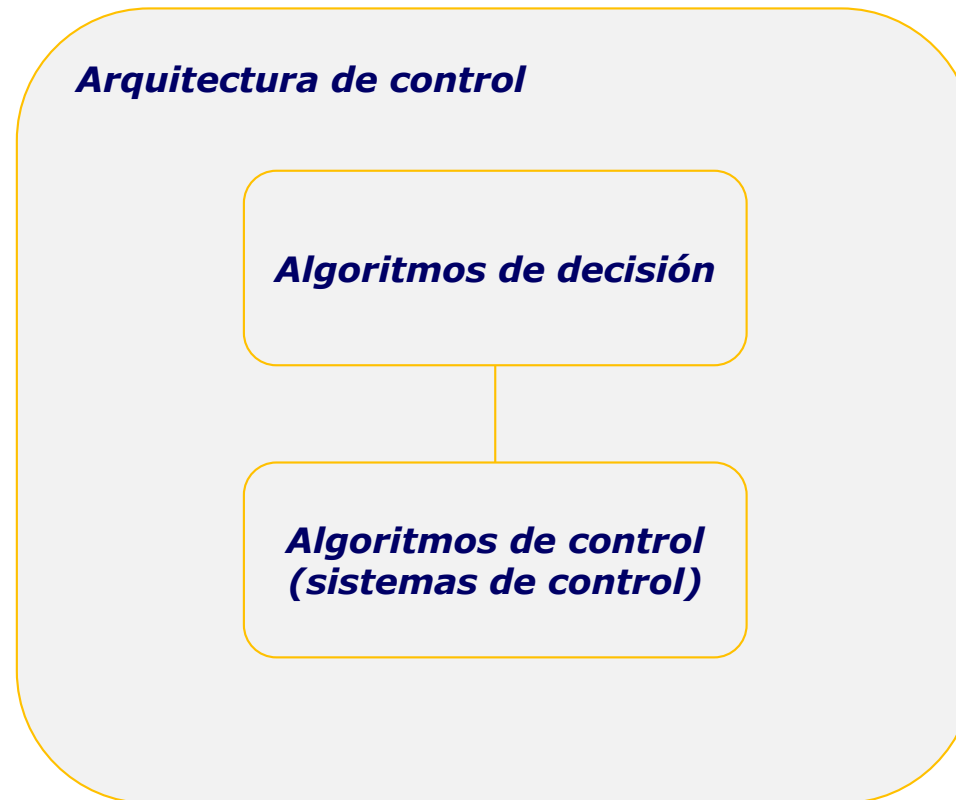
# Arquitecturas de control

---

- ❖ Los vehículos autónomos son considerados sistemas automáticos, no muy diferentes de los existentes en otros sectores a efectos de teoría de control.
- ❖ Sus sistemas de control y arquitecturas vienen derivadas de la robótica móvil clásica.
- ❖ Sin embargo, sus paradigmas de control han tenido que evolucionar (y siguen evolucionando) para:
  - Circular a grandes velocidades.
  - Actuadores con altas no linealidades.
  - Moverse en entornos muy complejos y de alta incertidumbre.
  - Priorizar la seguridad de los ocupantes.
  - Convivir con otros vehículos autónomos y no autónomos.
  - Tener en cuenta el factor humano.
- ❖ Todos estos factores deben ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar la arquitectura de control y decisión.

# Arquitecturas de control

---



# Arquitecturas de control

---

## ❖ *Arquitectura de control de un vehículo autónomo:*

- Organización de los diferentes sistemas de un vehículo autónomo, percepción, computación y actuación, para lograr los objetivos para los que ese sistema ha sido diseñado.
- Gran importancia del diseño software.
- Una arquitectura proporciona una forma de organizar un sistema de control por principios. Sin embargo, además de proporcionar estructura, impone condiciones sobre la manera de resolver el problema de control (Mataric).
- Las arquitecturas utilizadas en vehículos autónomos vienen derivadas de la robótica móvil.

# Arquitecturas de control

---

- ❖ Deliberativa
- ❖ Reactiva
- ❖ Basada en comportamiento
- ❖ Híbridas

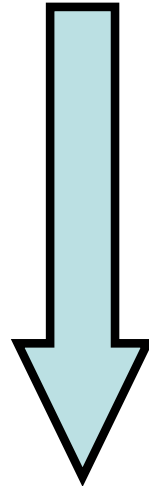
- ❖ **Arquitectura de control Deliberativa**
- ❖ **Caracterización.**
- ❖ Suelen considerarse los sistemas clásicos.
- ❖ Se usaron en otros dominios: Ajedrez, logística, etc.
- ❖ Shakey (fin de los 60's) empleaba un *planificador* para decidir la acción siguiente, lo que influyó en el desarrollo de la robótica móvil en más de 20 años.
- ❖ Planificación: Búsqueda hacia delante.
- ❖ El espacio de estados del robot debe ser numerado. Autómata finito.
- ❖ El objetivo o meta es uno de esos estados.
- ❖ Es estado actual o inicial es otro de esos estados.
- ❖ Planificar: Buscar el mejor camino del estado inicial al final.

# Arquitecturas de control

---

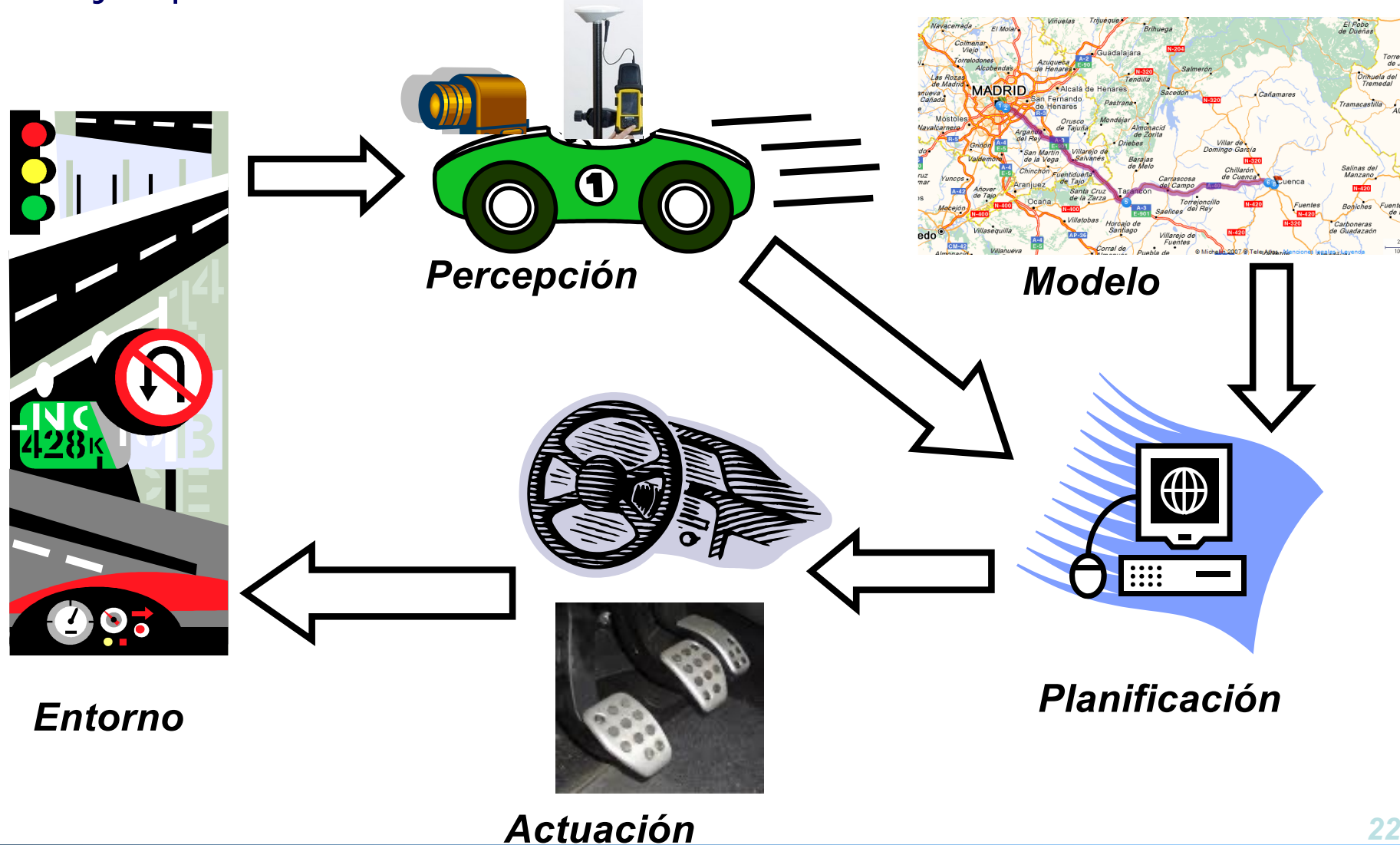
- ❖ PPA. (Percibe – Planea – Actúa.)
- ❖ PMPA. (Percibe – Modela – Planea– Actúa.)
- ❖ Descomposición Funcional Clásica de una arquitectura deliverativa:

1. Percepción
2. Modelo
3. Plan
4. Ejecución
5. Control motriz.



# Arquitecturas de control

## ❖ Ejemplo: Conducción automática de vehículos



## ❖ Limitaciones de las arquitecturas deliberativas.

- 1. Escala de tiempo:
  - Las búsquedas exhaustivas pueden requerir mucho tiempo.
  - Procesamiento de gran cantidad de información sensorial.
- 2. Espacio:
  - Se necesita mucha potencia computacional para representar el espacio de estados.
  - La representación debe incluir toda la información necesaria en la planificación.
- 3. Información:
  - Se asume que la representación es completa y actualizada: Se debe actualizar constantemente.
  - En la realidad no se tiene toda la información.

- 4. Uso de planes:
  - El entorno no cambia durante la ejecución del plan.
  - La representación permite construir un plan adecuado.
  - La arquitectura asume que el vehículo es capaz de ejecutar correctamente los planes.

## ❖ Ventajas de las de las arquitecturas deliberativas.

- Son relativamente buenas para controlar sistemas en ambientes bien estructurados → Autómata.
- Los vehículos autónomos, ¿operan en ambiente controlado?

## ❖ Arquitectura de control reactiva

### ❖ Caracterización.

- Colección de reglas de correspondencia situación-acción.
- Escala de tiempo: corto plazo.
- Capacidad de predicción.
- Menor necesidad de capacidad de cálculo.
- No suele usar interpretación interna del mundo.
- Bucle cerrado sensores-actuadores.
- El mundo es dividido situaciones *mutuamente excluyentes*.
- Cada "situación" dispara una o más acciones.
- Una situación puede venir definida por uno o más sensores.
- En el caso más simple es un controlador tradicional

Se elimina el módulo de planificación, dejando los módulos de control conectados directamente con los sensores y actuadores.

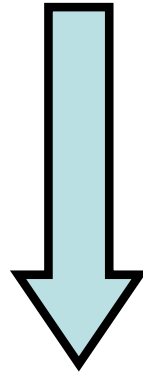
El comportamiento global del sistema se determina por sus conductas mas que por un proceso de razonamiento deliberativo.

# Arquitecturas de control

---

- ❖ PA. (Percibe – Actúa.)
- ❖ Descomposición Funcional Clásica de una arquitectura reactiva:

1. Percepción
2. Ejecución
3. Control motriz.



# Arquitecturas de control

- ❖ Ejemplo: Conducción automática de vehículos

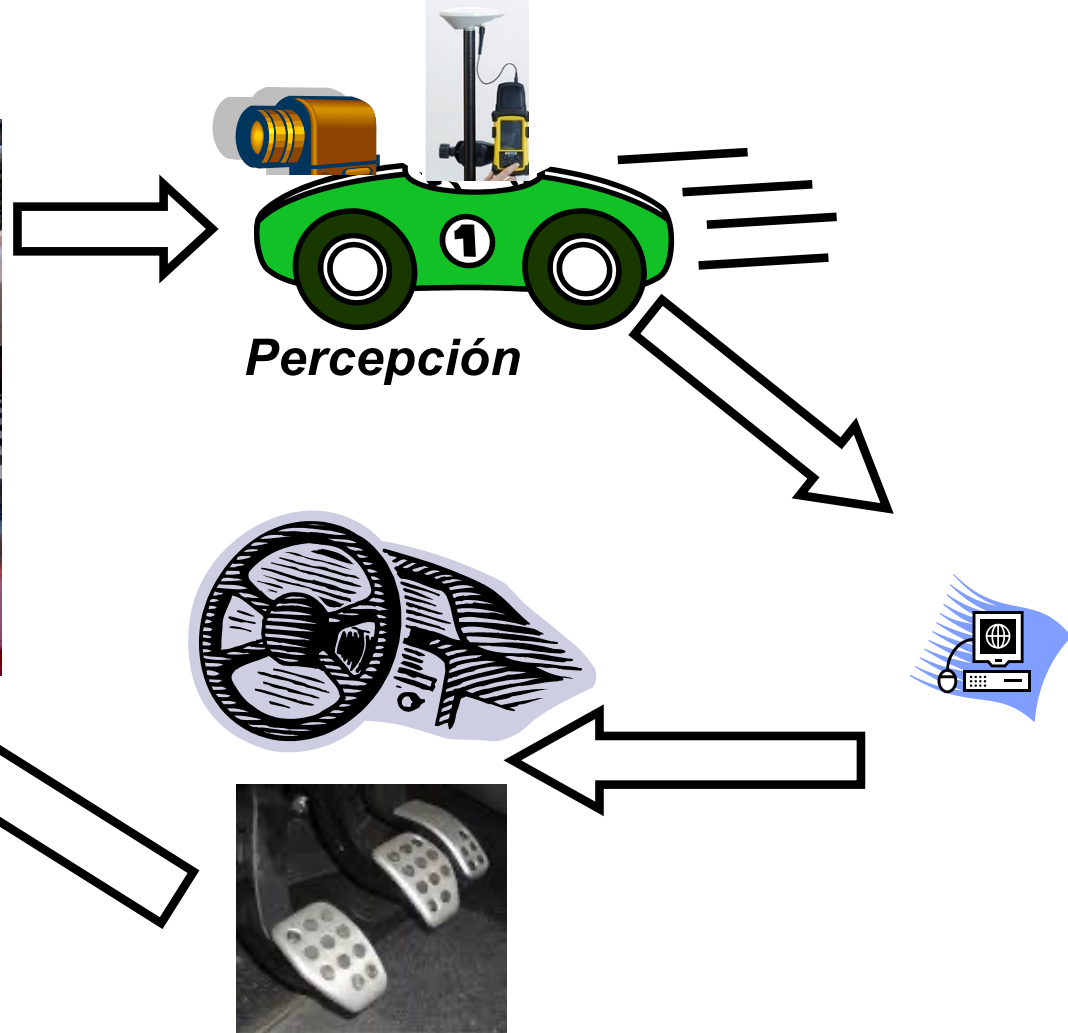


**Entorno**

[Volvo crash](#)

[Volvo pedestrian](#)

[Volvo real test](#)



**Actuación**



## ❖ Limitaciones de las arquitecturas reactivas.

- Es difícil “separar” las situaciones del mundo.
- Número exponencial de situaciones en función del número de sensores.
- Se suelen usar simplificaciones: Considerar sólo acciones para “ciertas” situaciones.
- Si no se consideran todas las situaciones y sus combinaciones se llega al problema del “arbitraje”.
- El arbitraje se puede basar en:
  - Prioridades fijas.
  - Jerarquía dinámica.
  - Aprendizaje.

## ❖ Ventajas de las arquitecturas reactivas

- Permite atacar múltiples objetivos en forma simultánea.
- Permite manejar la información de múltiples sensores eficientemente, considerando sus respectivos tiempos de latencia.
- Robusto, en general existe una mayor probabilidad de que el sistema continúe en operación frente a fallas en sensores o actuadores.
- Permite una mayor flexibilidad en el diseño.

## ❖ Arquitecturas híbridas

### ■ ¿POR QUÉ LA HIBRIDACIÓN?

- El control de un sistema basado en comportamientos reactivos puede producir un desempeño robusto en dominios complejos y dinámicos. Sin embargo las limitaciones intrínsecas de esta arquitectura ser una desventaja en situaciones típicas de vehículos autónomos:
  1. El medio carece de estabilidad y consistencia
  2. Es difícil localizar un vehículo de manera relativa en un modelo del mundo.
  3. El conocimiento simbólico iconográfico del mundo es de poco o ningún valor.

# Arquitecturas de control

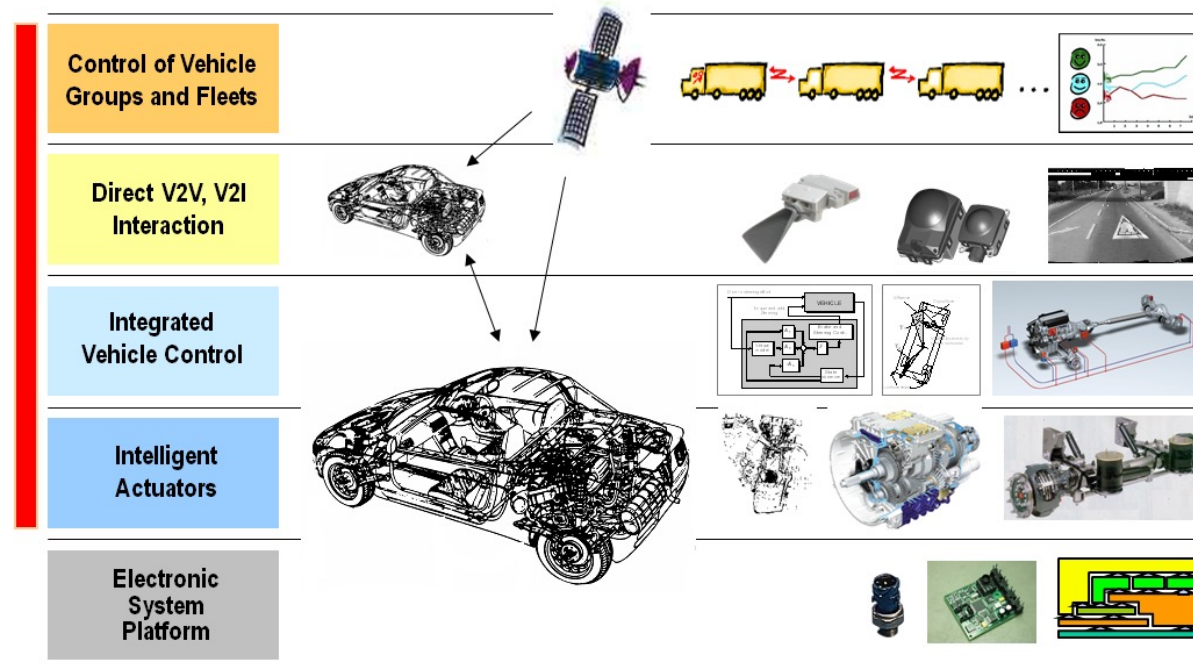
---

- ❖ Los sistemas puramente reactivos no son adecuados para todas las aplicaciones.
- ❖ Cuando el mundo puede modelarse de manera exacta, la incertidumbre está restringida y existe cierta garantía de que la virtualidad no cambia, los métodos deliberativos son preferidos.
- ❖ En el mundo real no existen las condiciones que favorezcan a los planificadores puramente deliberativos.
- ❖ Si se espera las máquinas se desempeñen del modo que lo hacen los humanos, son necesarios métodos de control reactivo basado en comportamiento.
- ❖ Los sistemas híbridos, capaces de incorporar al razonamiento deliberativo y a la ejecución basada en comportamiento, son capaces de liberar todo el potencial

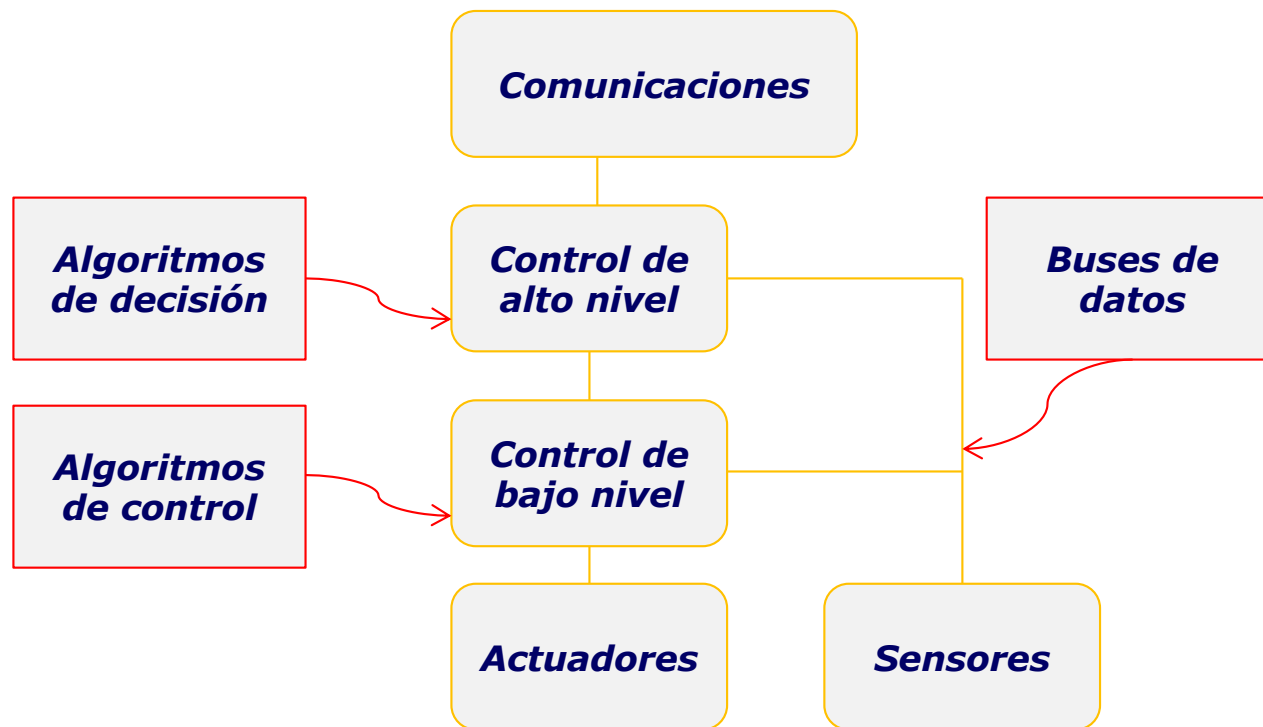
# Arquitecturas de vehículos autónomos

## ❖ Arquitecturas de vehículos autónomos

- Las tareas complejas de un vehículo de control deben estructurarse en forma de pasos lógicos que se construyen unos sobre los otros y cuya complejidad puede simplificarse mediante una descomposición en bloques funcionales.



# Esquema de control



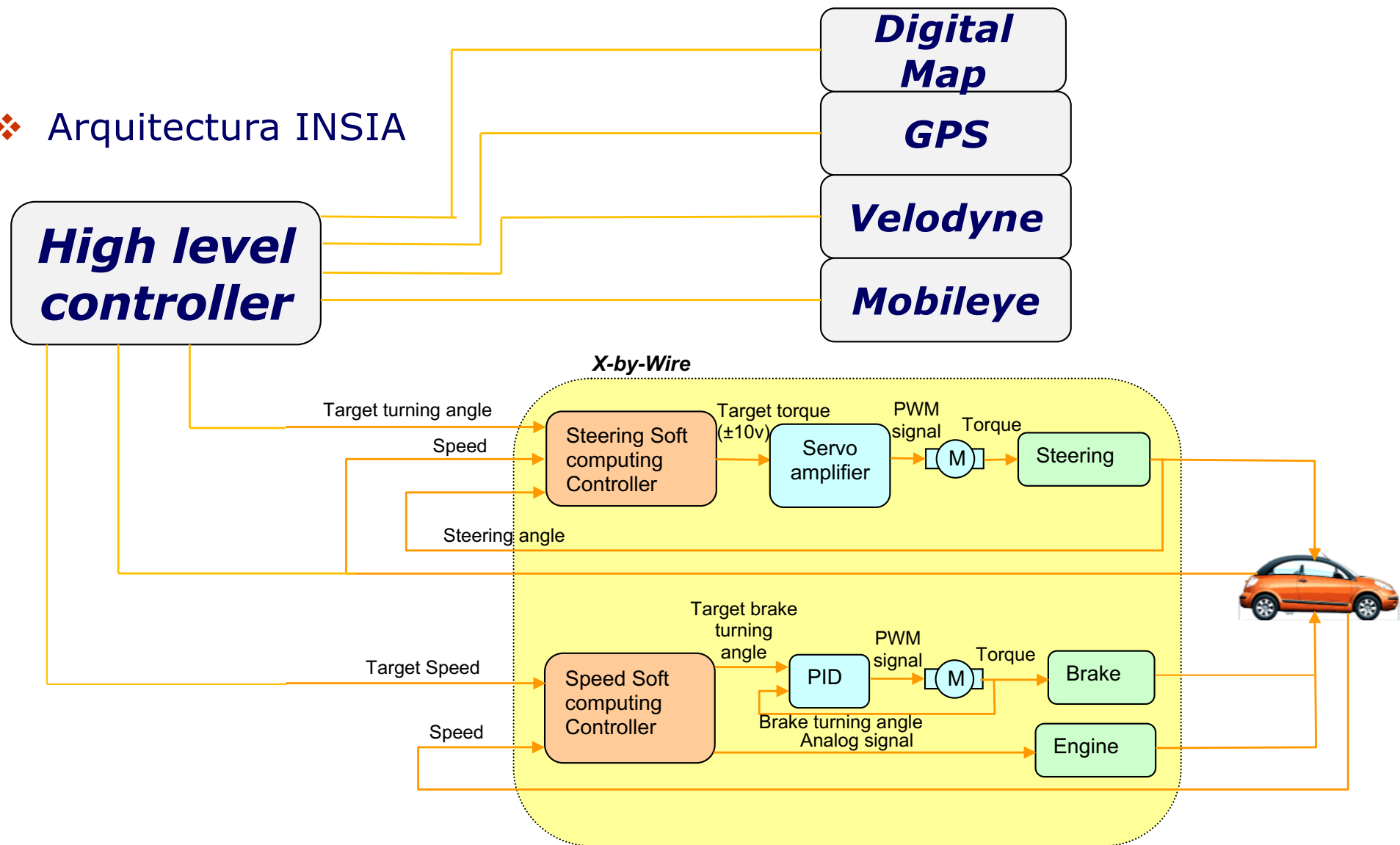
# Esquema de control

---



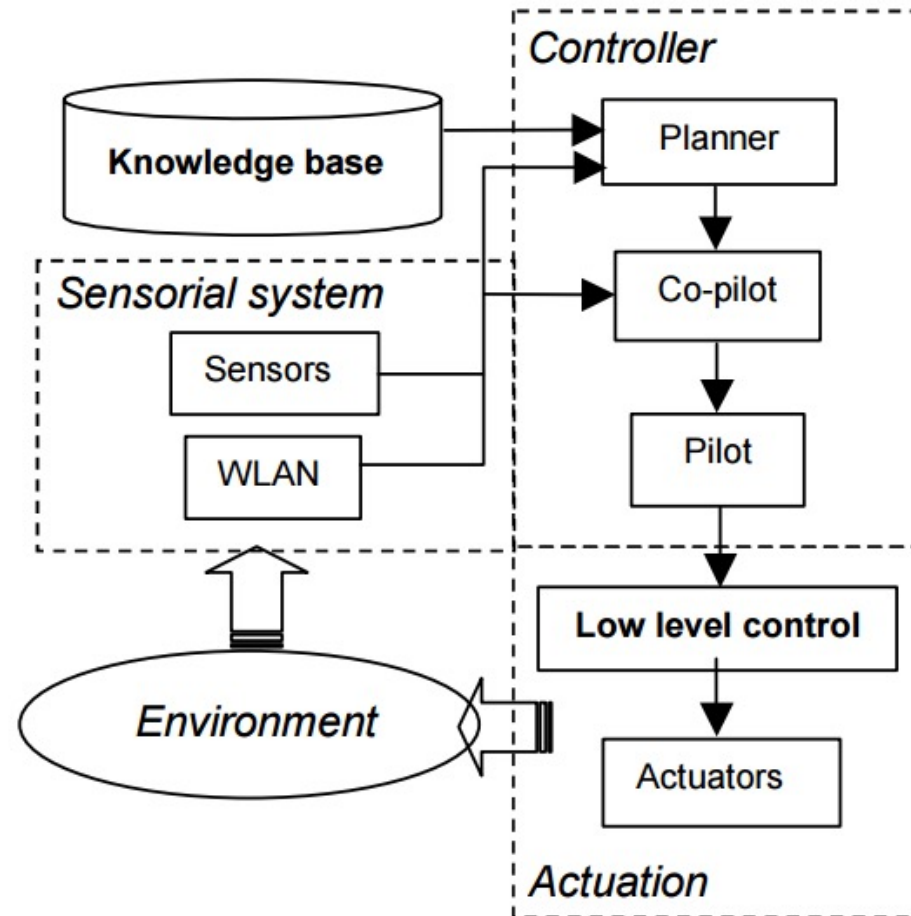
# Control de alto nivel

## ❖ Arquitectura INSIA



# Control de alto nivel

## ❖ Arquitectura Autopia



# Control de alto nivel

- ❖ Arquitectura DARPA
  - Tartan Racing Team (CMU)

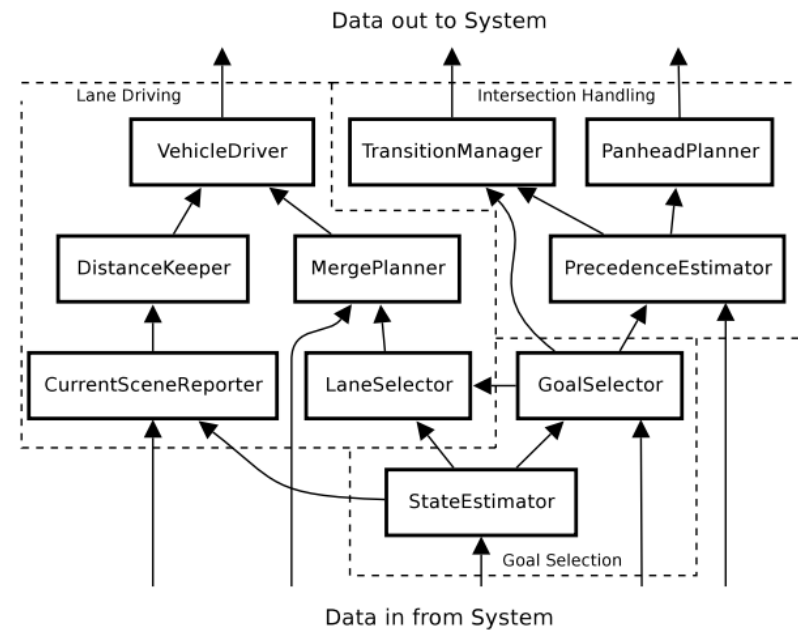
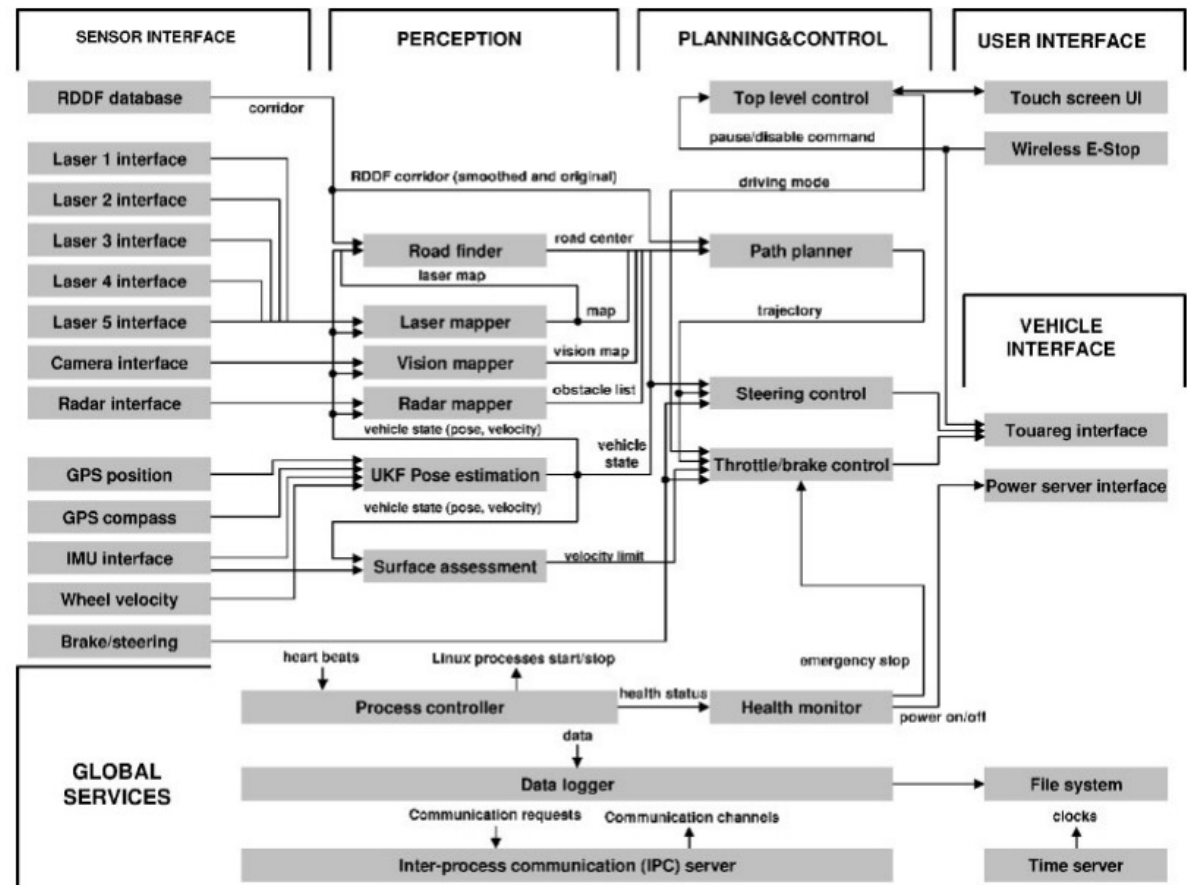


Figure 14. High-level behaviors architecture.

# Control de alto nivel

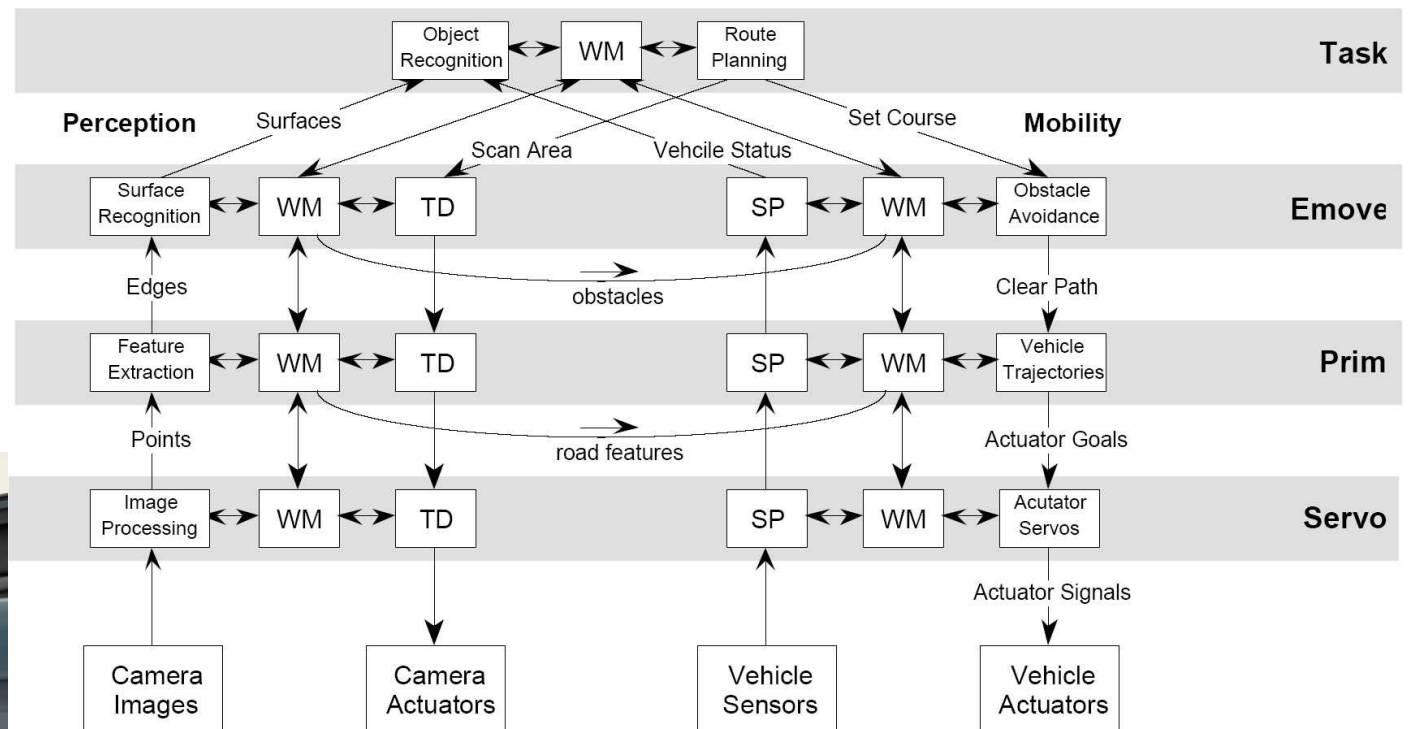
- ❖ Arquitectura DARPA
  - Stanley (Stanford U.)



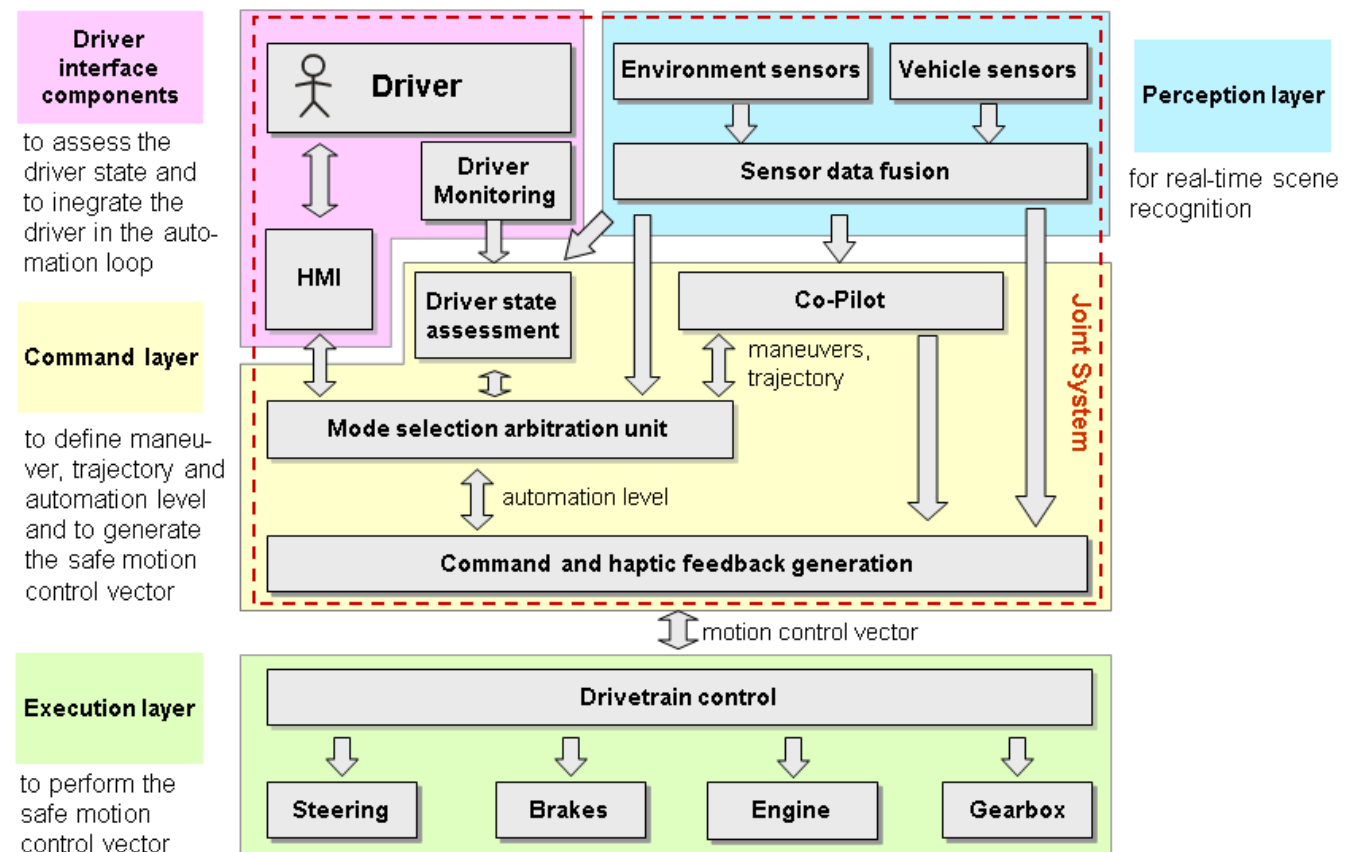
# Control de alto nivel

## ❖ Arquitectura Google - Waymo (NIST)

Vehicle

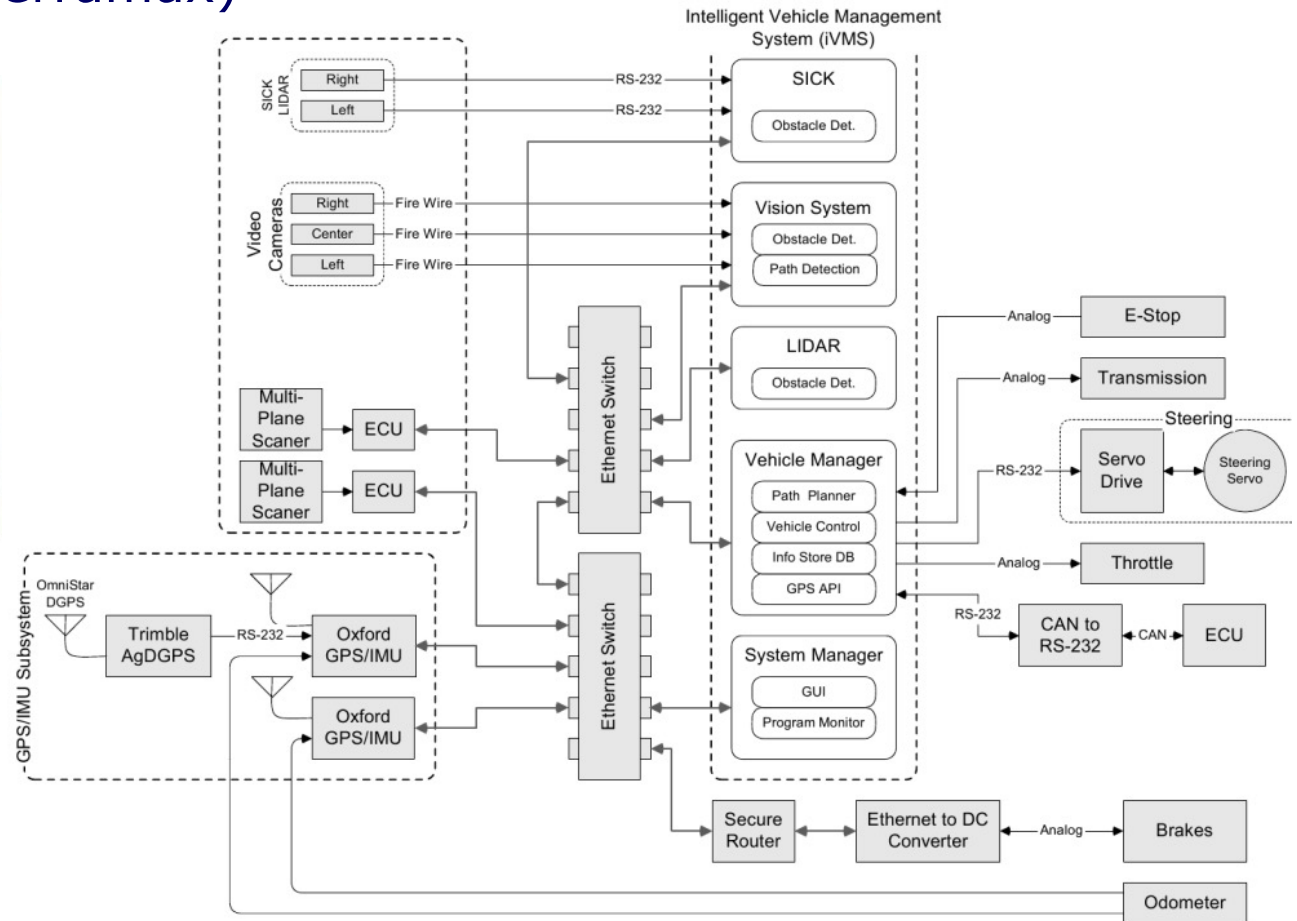


## ❖ Arquitectura HAVEit



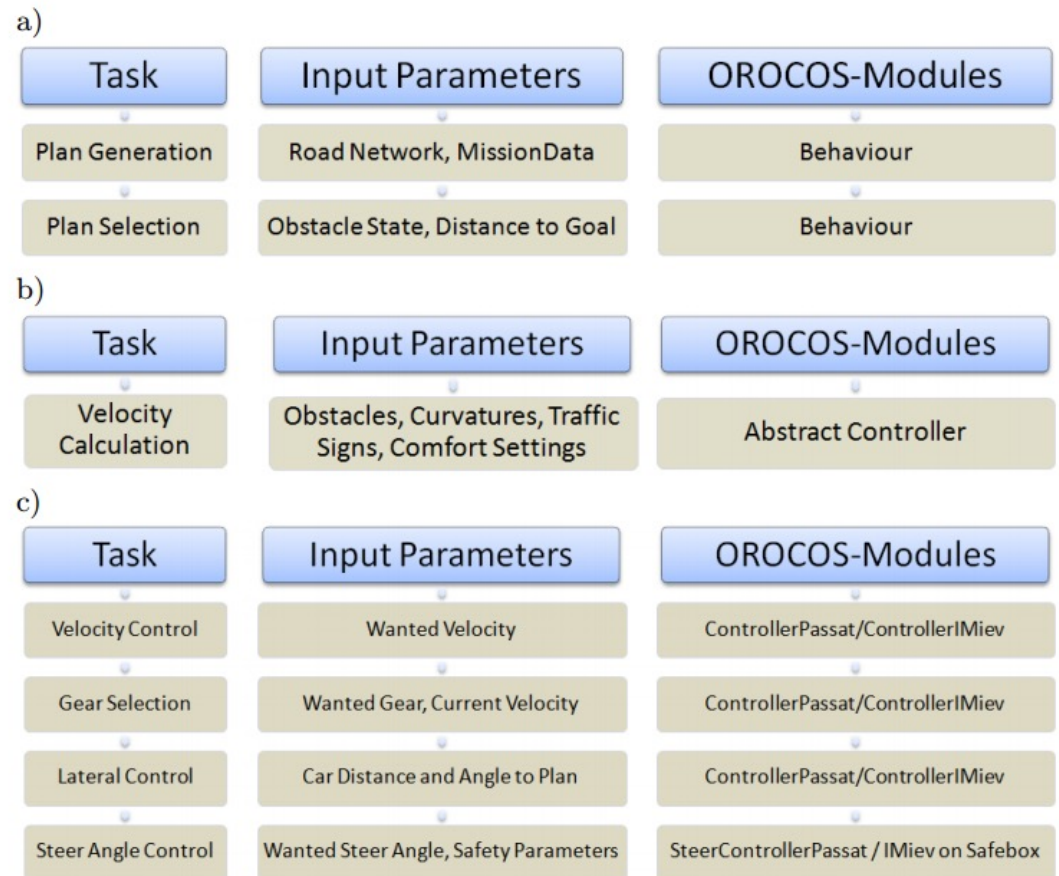
# Control de alto nivel

## ❖ Arquitectura Parma (Terramax)



# Control de alto nivel

## ❖ Arquitectura Berlín



# Control de alto nivel

- ❖ En base a estas arquitecturas de alto nivel, podemos definir cómo nuestro vehículo autónomo ve el mundo y cómo funciona:
- ❖ **1. ¿Dónde estoy?**
- ❖ Antes de que nuestros automóviles conduzcan en cualquier lugar, es necesario crear mapas tridimensionales detallados que resalten información como perfiles de carreteras, bordillos y aceras, marcas de carriles, cruces peatonales, semáforos, señales de alto y otras características de la carretera.

Vista de mapa a bordo de un vehículo Waymo de la intersección de W. Middlefield Road en Rengstorff Avenue, Mountain View, CA.

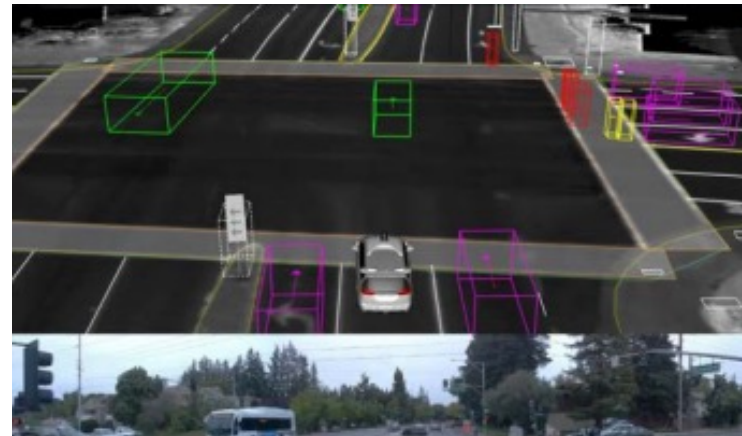


# Control de alto nivel

## ❖ 2. ¿Qué hay a mi alrededor?

- ❖ Los sensores y software escanean constantemente en busca de objetos alrededor del vehículo (peatones, ciclistas, vehículos, trabajos en la carretera, obstrucciones) y leen continuamente los controles de tráfico, desde el color del semáforo y las puertas de los cruces de ferrocarril hasta las señales de alto temporales. El conjunto de sensores tienen una vista de 360 ° alrededor del vehículo y está diseñado para responder a objetos a una distancia de hasta 300 metros (casi tres campos de fútbol).

En este ejemplo, nuestro Waymo Driver ha detectado vehículos (representados por recuadros verdes y morados), peatones (en amarillo) y ciclistas (en rojo) en la intersección, y una zona de construcción más adelante.



# Control de alto nivel

## ❖ 3. ¿Qué pasará después?

- ❖ Para cada objeto dinámico en la carretera, nuestro software predice movimientos futuros en función de la velocidad y la trayectoria actuales. Entiende que un vehículo se moverá de manera diferente a un ciclista o peatón. Luego, el software usa esa información para predecir los muchos caminos posibles que pueden tomar otros usuarios de la carretera. Nuestro software también tiene en cuenta cómo las condiciones cambiantes de la carretera, como un carril bloqueado, pueden afectar el comportamiento de los demás a su alrededor.

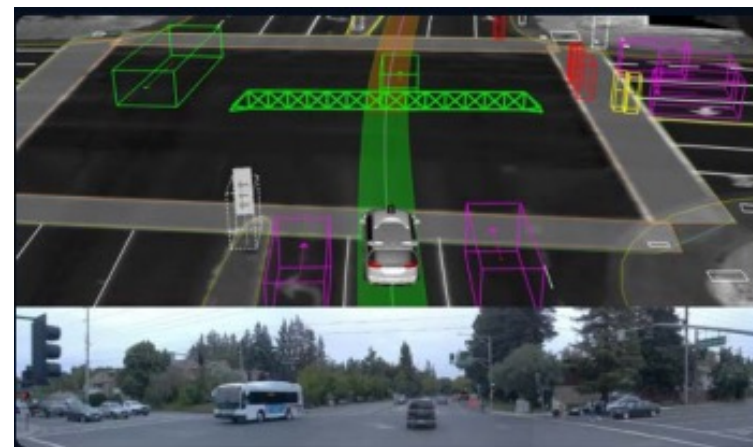


Las imágenes simuladas que se muestran demuestran cómo el software de control asigna predicciones a cada objeto que rodea nuestro vehículo: otros vehículos, ciclistas, peatones y más.

# Control de alto nivel

## ❖ 4. ¿Qué tengo que hacer?

- ❖ El software de control considera toda esta información a medida que encuentra una ruta adecuada para el vehículo, luego selecciona la trayectoria exacta, la velocidad, el carril y las maniobras de dirección necesarias para avanzar a lo largo de esta ruta de manera segura. Debido a que el ADS monitoriza constantemente el entorno y predice el comportamiento futuro de otros usuarios de la carretera en 360° alrededor de nuestros vehículos, el ADS puede responder de manera rápida y segura a cualquier cambio en la carretera.

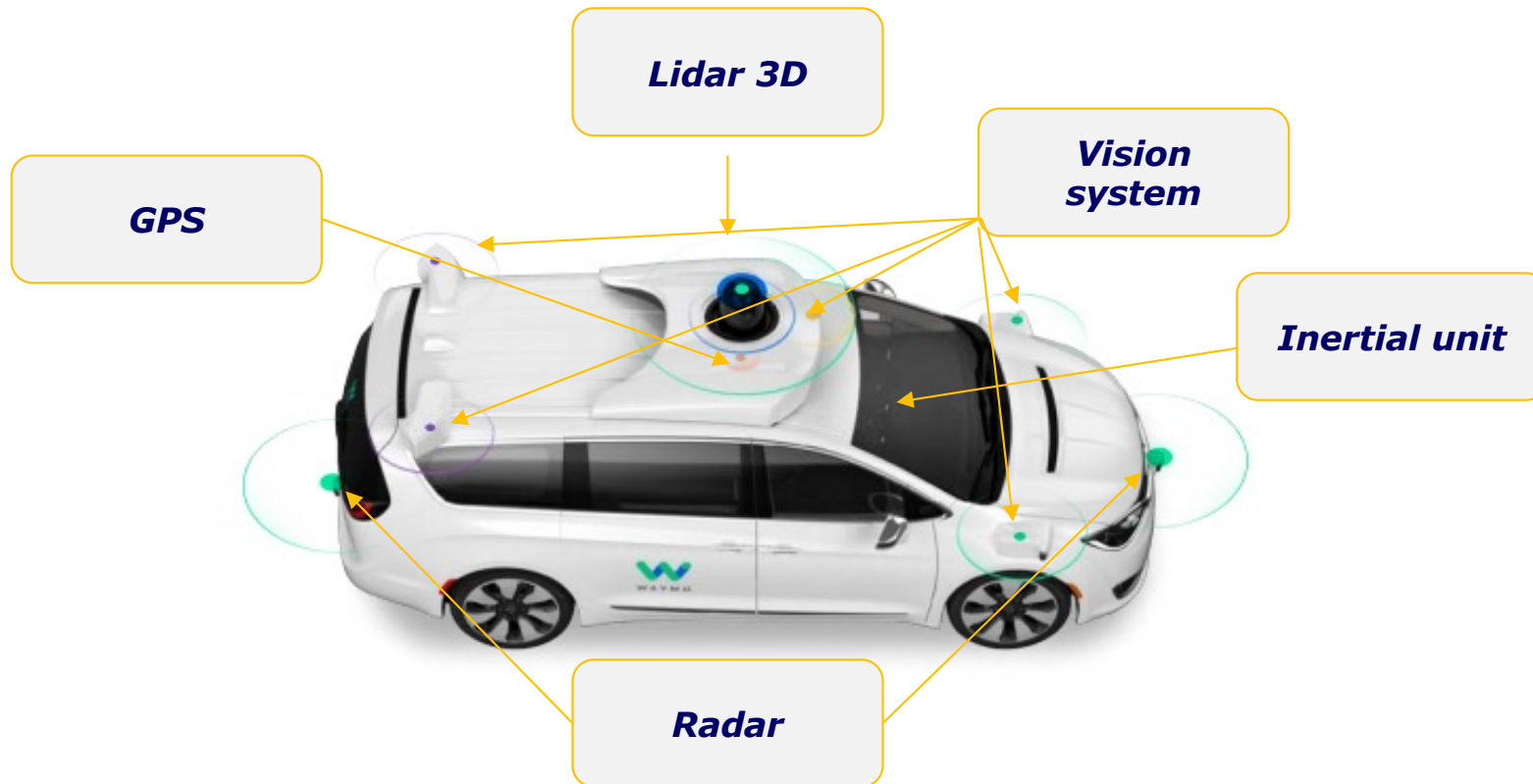


El camino verde indica la trayectoria por la que nuestro vehículo puede avanzar. La serie de vallas verdes indican que el vehículo autónomo puede avanzar y que el ADS ha identificado los vehículos que van delante y comprende que debe mantener cierta distancia.

# Control de alto nivel

## ❖ Waymo Object and Event Detection and Response

- ❖ Para satisfacer las complejas demandas de la conducción autónoma, Waymo ha desarrollado una serie de sensores que permiten que nuestro vehículo vea 360 °, tanto de día como de noche, y hasta casi 300m de distancia.



# Control de alto nivel

---

## ❖ **Waymo Object and Event Detection and Response**

❖ El software de conducción autónoma es el "cerebro" del Waymo Driver. Da sentido a la información que proviene de nuestros sensores y utiliza esa información para tomar las mejores decisiones de conducción para cada situación.

## ❖ **Percepción**

La percepción es la parte de nuestro software que detecta y clasifica objetos en la carretera y estima sus estados a lo largo del tiempo (por ejemplo, velocidad, rumbo y aceleración), al tiempo que produce una comprensión de la escena del entorno.

## ❖ **Predicción de comportamiento**

Con la predicción del comportamiento, nuestro software está diseñado para modelar, predecir y comprender la intención de cada objeto en el camino.

## ❖ **Planificador**

El planificador considera toda la información que nuestro software ha recopilado a partir de la percepción y la predicción del comportamiento, y traza un camino para nuestros vehículos.