

# Capítulo 1

---

Introducción

# 1. INTRODUCCIÓN

---

A principios de los años sesenta se introducen en la industria, de modo significativo, los robots manipuladores como un elemento más del proceso productivo. Esta proliferación, motivada por la amplia gama de posibilidades que ofrecía, suscitó el interés de los investigadores para lograr manipuladores más rápidos, precisos y fáciles de programar. La consecuencia directa de este avance originó un nuevo paso en la automatización industrial, que flexibilizó la producción con el nacimiento de la noción de célula de fabricación robotizada.

Los trabajos desarrollados por los robots manipuladores consistían frecuentemente en tareas repetitivas, como la alimentación de las distintas máquinas componentes de la célula de fabricación robotizada. Ello exigía ubicarlas en el interior de un área accesible para el manipulador, caracterizada por la máxima extensión de sus articulaciones, lo cual podría resultar imposible a medida que la célula sufría progresivas ampliaciones. Una solución a este problema se logra al desarrollar un vehículo móvil sobre raíles para proporcionar un transporte eficaz de los materiales entre las distintas zonas de la cadena de producción. De esta forma, aparecen los primeros *vehículos guiados automáticamente* (AGV's). Una mejora con respecto a su concepción inicial estriba en la sustitución de los raíles como referencia de guiado en la navegación por cables enterrados, reduciéndose, con ello, los costes de instalación.

La posibilidad de estructurar el entorno industrial permite la navegación de vehículos con una capacidad sensorial y de razonamiento mínimas. De este modo, la tarea se estructura en una secuencia de acciones en la que a su término el vehículo supone que ha alcanzado el objetivo para el que está programado. Ante cualquier cambio inesperado en el área de trabajo que afecte el desarrollo normal de la navegación, el sistema de navegación del vehículo se encontrará imposibilitado para ejecutar acciones alternativas que le permitan reanudar su labor. Sin embargo, por sus potenciales aplicaciones fuera del ámbito industrial, donde resulta costoso o imposible estructurar el entorno, se les dotó, en la búsqueda de un vehículo de propósito general apto para desenvolverse en cualquier clase de ambiente, de un mayor grado de inteligencia y percepción. Una definición correcta de robot móvil plantea la capacidad de movimiento sobre entornos no estructurado, de los que se posee un conocimiento incierto, mediante la interpretación de la información suministrada a través de sus sensores y del estado actual del vehículo.

El uso de robots móviles está justificado en aplicaciones en las que se realizan tareas molestas o arriesgadas para el trabajador humano. Entre ellas, el transporte de material peligroso, las excavaciones mineras, la limpieza industrial o la inspección de plantas nucleares son ejemplos donde un robot móvil puede desarrollar su labor y evita exponer, gratuitamente, la salud del trabajador. Otro grupo de aplicaciones donde este tipo de robots complementa la actuación del operador lo componen las labores de vigilancia, de inspección o asistencia a personas incapacitadas. Asimismo en aplicaciones de teleoperación, donde existe un retraso sensible en las comunicaciones, resulta interesante el uso de vehículos con cierto grado de autonomía.

El robot móvil autónomo se caracteriza por una conexión *inteligente* entre las operaciones de percepción y acción, que define su comportamiento y le permite llegar a la consecución de los objetivos programados sobre entornos con cierta incertidumbre.

El grado de autonomía depende en gran medida de la facultad del robot para abstraer el entorno y convertir la información obtenida en órdenes, de tal modo que, aplicadas sobre los actuadores del sistema de locomoción, garantice la realización eficaz de su tarea. De este modo, las dos grandes características que lo alejan de cualquier otro tipo de vehículo se relacionan a continuación:

- **Percepción:** determina la relación del robot con su entorno de trabajo, mediante el uso de los sensores de a bordo.
- **Razonamiento:** determina las acciones que se han de realizar en cada momento, según el estado del robot y su entorno, para alcanzar las metas asignadas.

De este modo, la capacidad de razonamiento del robot autónomo móvil se traduce en la planificación de unas trayectorias seguras que le permitan la consecución de los objetivos encomendados. La ejecución de la tarea debe realizarla en bucle cerrado para adaptarse a la navegación sobre entornos no estructurados. No se emplea un bucle de control tradicional, ya que la acción no se genera por la simple realimentación de la salida.

Por tanto, resulta necesario el uso de un planificador con capacidad de análisis geométrico que conozca el estado del entorno y del robot junto a sus características cinemáticas y dinámicas. De este modo, se realiza la transformación de los datos suministrados por la percepción en referencias de control adecuadas que no traspasen ninguna de las limitaciones físicas del vehículo, y que definan una trayectoria libre de obstáculos que garantice el logro de las metas determinadas en la tarea. Así, el planificador se configura como el responsable, en gran medida, de la eficacia del vehículo en la navegación, por lo que en consecuencia, su diseño precisa una especial atención.

A continuación, se centrará la atención en el estudio de los robots móviles, y más concretamente en los vehículos con ruedas, ya que el trabajo desarrollado en este Proyecto Fin de Carrera versa sobre uno de ellos, el ROMEO-4R.

## **1.1. Robots móviles**

---

Los robots móviles fueron desarrollados para cubrir el campo de aplicaciones que los robots manipuladores, debido a sus limitaciones de espacio, no podían realizar.

Aunque los primeros robots móviles necesitaban un entorno fuertemente estructurado para desarrollar su trabajo, en la actualidad, están dotados de una mayor autonomía, que les permite tener una inteligencia suficiente como para reaccionar y tomar decisiones basándose en observaciones de su entorno, sin suponer que este entorno es perfectamente conocido.

La autonomía de un robot móvil se basa en el sistema de navegación automática, en los cuales se incluyen tareas de planificación y generación de trayectorias, seguimiento de las mismas, percepción y control. De esta forma, un robot con suficiente

grado de autonomía es capaz de percibir el entorno, modelarlo, planificar y actuar para alcanzar objetivos sin la intervención, o con una intervención mínima, de supervisores humanos.

Pueden trabajar en entornos poco estructurados y dinámicos, realizando acciones en respuesta a los posibles problemas que puedan surgir en los mismos. Así, se definen los dos métodos más extremos de planificación:

- **Planificación puramente estratégica:** se supone que la situación en la que va a ejecutarse el plan puede ser predecida de forma suficientemente precisa.
- **Planificación puramente reactiva:** se supone que el entorno es incierto, buscándose la mayor flexibilidad posible para reaccionar en cualquier instante lo suficientemente rápido a las discrepancias entre el modelo actual y la realidad observada en el entorno.

Una vez realizada la planificación de la trayectoria, es necesario realizar el seguimiento del camino trazado mediante el control de los movimientos oportunos para mantener al vehículo en la trayectoria planificada. En el caso de vehículos con ruedas, esto consistirá en determinar el ángulo de dirección, a partir de la posición y la orientación actual del vehículo con respecto a la trayectoria que debe seguir, y la velocidad del mismo.

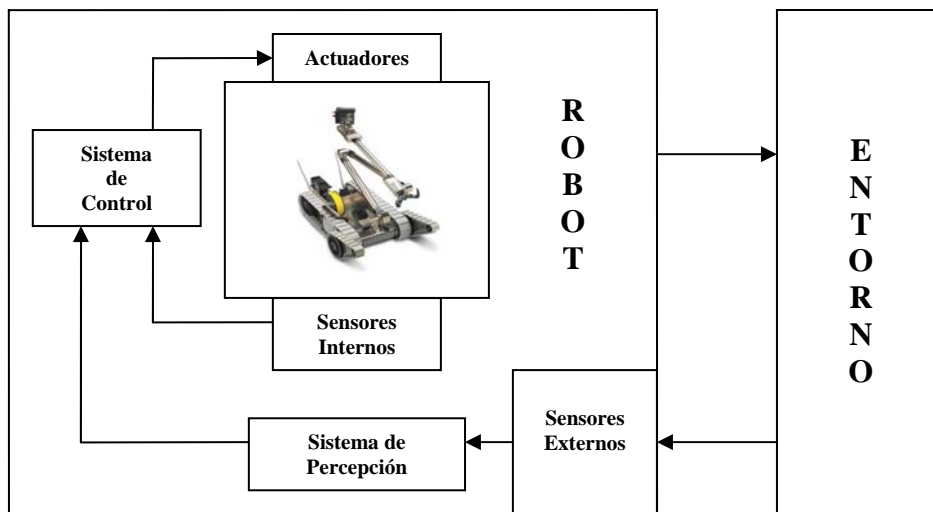
Un robot móvil tiene básicamente una estructura formada por los siguientes elementos:

1. **Sensores:** son los distintos dispositivos de los que se sirve el robot para tener conocimiento tanto de su propio estado como del estado de su entorno. Se pueden clasificar en dos tipos:
  - *Sensores internos:* son sensores integrados en la propia estructura mecánica del robot, que dan información del estado del mismo, fundamentalmente de la posición, velocidad y aceleración de las articulaciones.
  - *Sensores externos:* dan información del entorno del robot, es decir, alcance, proximidad, contacto, fuerza, etc. Se utilizan para guiado de robots, para identificación y manipulación de objetos.
2. **Sistema de percepción:** la información obtenida a partir de los sensores externos es procesada por el sistema de percepción para crear un modelo del entorno, de forma que pueda adaptarse automáticamente a los cambios del mismo.
3. **Sistema de control:** la información recibida por el sistema de percepción es procesada por el sistema de control, el cual se encarga de suministrar la actuación adecuada. Se puede dividir en dos tipos:

- *Control de bajo nivel:* actúa sobre el sistema de tracción y dirección.
- *Control de alto nivel:* actúa desde la planificación global de la misión a la evitación de obstáculos no esperados.

4. **Actuadores:** son los distintos dispositivos de los que se sirve el robot para ejecutar las ordenes de control emitidas por el sistema de control.

La estructura básica que define a los robots móviles viene dada por la siguiente figura:

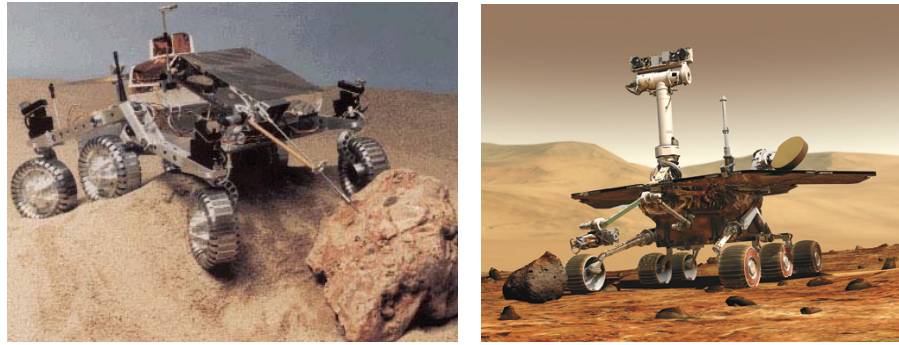


*Figura 1.1-1: Estructura básica de un robot móvil*

Toda esta estructura se desarrolla con el objetivo de que el robot tenga la suficiente inteligencia como para reaccionar y tomar decisiones basándose en observaciones de su entorno, sin suponer que este entorno es perfectamente conocido

Atendiendo al sistema de locomoción utilizado, existe una gran variedad de modos de moverse sobre una superficie sólida, entre los que destacan las ruedas, las patas y las configuraciones articuladas:

- **Vehículos con ruedas:** son, con mucho, los más populares por varias razones prácticas. Los robots con ruedas son más sencillos y más fáciles de construir, y la carga que pueden transportar es mayor, relativamente. A esto, cabe añadir el que se pueden transformar vehículos de ruedas de radio control para usarlos como bases de robots. La principal desventaja de las ruedas es su empleo en terreno irregular, en el que se comportan bastante mal. Normalmente un vehículo de ruedas podrá sobrepasar un obstáculo que tenga una altura no superior al radio de sus ruedas, entonces una solución es utilizar ruedas mayores que los posibles obstáculos a superar. Sin embargo esta solución, a veces, puede no ser práctica.



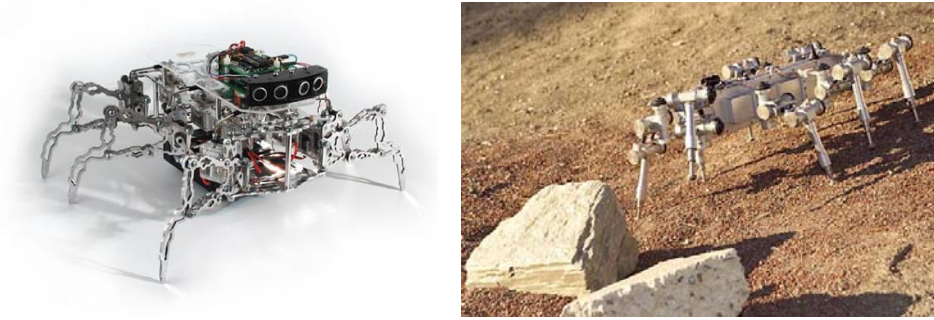
*Figura 1.1-2: Robots móviles con ruedas*

Para robots que vayan a funcionar en un entorno natural las pistas de deslizamiento son una opción muy buena, ya que permiten a los mismos superar obstáculos relativamente mayores y son menos susceptibles que las ruedas de sufrir daños por el entorno, como piedras o arena. El principal inconveniente de estas es su ineficacia, puesto que se produce deslizamiento sobre el terreno al avanzar y al girar. Si la navegación se basa en el conocimiento del punto en que se encuentra el robot y el cálculo de posiciones futuras sin error, entonces las pistas de deslizamiento acumulan tal cantidad de error que hace inviable la navegación por este sistema. En mayor o menor medida cualquiera de los sistemas de locomoción contemplados aquí adolece de este problema.



*Figura 1.1-3: Robots móviles basado en pistas de deslizamiento*

- **Robots con patas:** potencialmente los robots con patas pueden superar con mayor facilidad que los anteriores, los problemas de los terrenos irregulares. A pesar de que hay un gran interés en diseñar este tipo de robots, su construcción plantea numerosos retos. Estos retos se originan principalmente en el gran número de grados de libertad que requieren los sistemas con patas. Cada pata necesita como mínimo un par de motores, lo que produce un mayor coste, así como una mayor complejidad y menor fiabilidad. Es más, los algoritmos de control se vuelven mucho más complicados por el gran número de movimientos a coordinar.



*Figura 1.1-4: Robots móviles con patas*

Existen también robots bípedos, los cuales han tenido un gran desarrollo en los últimos años, llegándose a alcanzar configuraciones muy parecidas a la humana:



*Figura 1.1-5: Robot móvil con forma humana*

- **Configuraciones articuladas:** en terrenos con difícil acceso, que requieren la adaptación del cuerpo del robot, la solución más simple consiste en articular dos o más módulos con locomoción mediante ruedas. Así, para caminos estrechos suelen usarse configuraciones articuladas con un elevado número de eslabones. Sin embargo, este tipo de robots requieren aun de un gran desarrollo que permita resolver los complejos problemas de control para dotarlos de la autonomía necesaria.



*Figura 1.1-6: Robot móvil articulado*

Por último, cabe mencionar que la forma de un robot puede tener un gran impacto en sus prestaciones. Un robot cilíndrico corre menor riesgo de quedar atrapado por una disposición desfavorable de obstáculos o de fallar en encontrar un camino en un espacio estrecho o intrincado. Así, considérese que dos robots del mismo tamaño, uno cilíndrico y el otro cuadrado, encuentran un paso estrecho según se mueven. Un algoritmo sencillo permitirá al robot cilíndrico pasar, el robot choca, gira y lo intenta de nuevo hasta que pasa. Esto es así de simple porque el robot es capaz de girar estando en contacto con el obstáculo. El robot cuadrado, por el contrario, tiene que retroceder y girar si quiere usar la misma táctica. Por tanto, siempre se requiere un algoritmo más complejo para la navegación de un robot cuadrado que para la de uno cilíndrico.

A continuación se verá con más detalle los vehículos con ruedas, debido a que este Proyecto Fin de Carrera está basado en el ROMEO-4R, un vehículo convencional de cuatro ruedas.

### 1.1.1. Vehículos con ruedas

Los vehículos con ruedas son la solución más simple y eficiente para conseguir la movilidad en terrenos suficientemente duros y libres de obstáculos, permitiendo conseguir velocidades relativamente altas. Por otra parte, la limitación más significativa que presentan, es el deslizamiento que sufren tanto en el momento de la impulsión como en el paso por terrenos irregulares.

Estos vehículos se pueden clasificar atendiendo a la configuración de sus ruedas, lo que les confiere unas características y propiedades específicas en cuanto a la eficiencia energética, las dimensiones, las cargas útiles y la maniobrabilidad. De esta forma, las configuraciones más destacadas son las siguientes:

- **Configuración Ackerman:** se usa casi exclusivamente en la industria del automóvil, siendo la configuración que llevan los coches, formada por dos ruedas traseras con tracción y dos ruedas delanteras de dirección. Esta configuración está diseñada para que al girar, la rueda delantera interior tenga un ángulo ligeramente más agudo que la exterior, y evitar así el deslizamiento de las mismas.

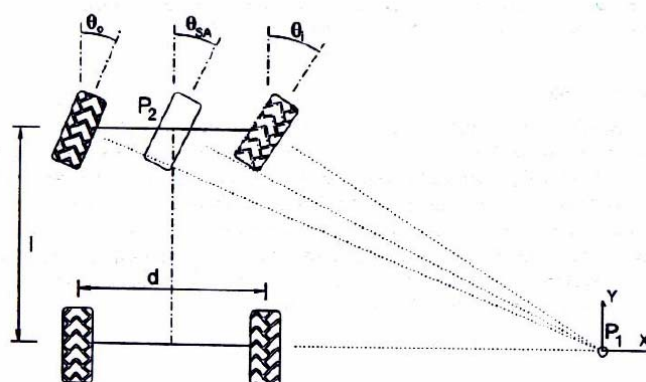


Figura 1.1.1-1: Configuración Ackerman



Como se puede apreciar, las normales a ambas ruedas se cortan en un punto, que se encuentra sobre la prolongación del eje de las ruedas traseras. Así, se puede comprobar que las trayectorias de ambas ruedas para ángulos de giro constantes son circunferencias concéntricas. La relación entre los ángulos de las ruedas de dirección, viene dada por la ecuación de Ackerman:

$$\cot \theta_i - \cot \theta_o = \frac{d}{l}$$

donde:

$\theta_i$  = ángulo relativo de la rueda interior

$\theta_o$  = ángulo relativo de la rueda exterior

$l$  = separación longitudinal entre ruedas

$d$  = separación lateral entre ruedas

Para poder reducir la cinemática se puede suponer que existe una rueda *virtual* entre las dos ruedas delanteras, quedando:

$$\cot \theta_{SA} - \cot \theta_o = \frac{d}{2 \cdot l}$$

donde:

$\theta_{SA}$  = ángulo relativo de la rueda *virtual* intermedia

Esta configuración da una solución bastante precisa para la odometría, a la vez que constituye un buen sistema de tracción, incluso en terrenos inclinados. Sin embargo, el mayor problema de este sistema es la limitación en la maniobrabilidad.

- **Configuración en triciclo:** se dispone de tres ruedas en el robot, situadas de forma similar a los triciclos de los niños, de ahí su nombre. Está formada por dos ruedas traseras que no llevan acopladas ningún motor, y una rueda delantera que se encarga de la tracción y el direccionamiento del robot.

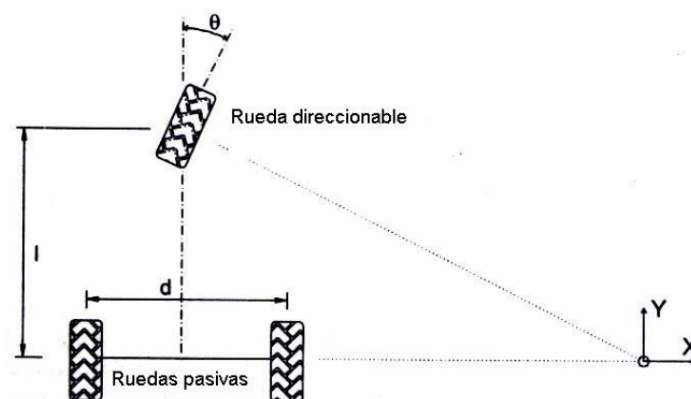


Figura 1.1.1-2: Configuración en triciclo

La posición del robot, mediante la odometría, vendrá dada por el número de pulsos que avanza el *encoder* de la rueda motora, y la dirección es simplemente la que lleva dicha rueda.

Un problema asociado a esta configuración es que el centro de gravedad tiende a alejarse de la rueda de tracción al ascender por terrenos inclinados, lo que origina la correspondiente pérdida de tracción, ya que la rueda motora pierde contacto con el suelo, y sigue girando pero sin avanzar. Esto supone un error grande al hacer el cálculo de la odometría, ya que el robot indica que está en un punto más avanzado de lo que en realidad se encuentra.

- **Configuración diferencial:** es la más sencilla de todas, estando formada por dos ruedas situadas diametralmente opuestas, en un eje perpendicular a la dirección del robot. Cada una de ellas irá dotada de un motor, de forma que los giros se realizan dándoles diferentes velocidades. Así, si se quiere girar a la derecha, se dará mayor velocidad al motor izquierdo, y viceversa. Como con dos ruedas es imposible mantener la horizontalidad del robot, produciéndose cabeceos al cambiar de dirección, se colocan una o más ruedas *locas*, las cuales no llevan asociadas ningún motor, girando libremente según la velocidad y dirección del robot.

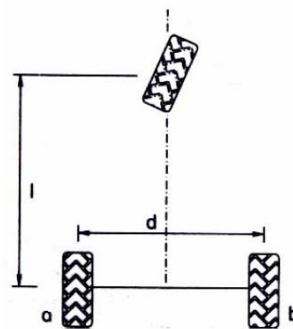


Figura 1.1.1-3: Configuración diferencial con una rueda loca al frente

Sin embargo, la presencia de más de tres apoyos en el robot (incluidas las dos ruedas de tracción), puede llevar a graves cálculos de odometría en terrenos irregulares, e incluso a la pérdida total de tracción. En la siguiente figura se aprecia este problema:

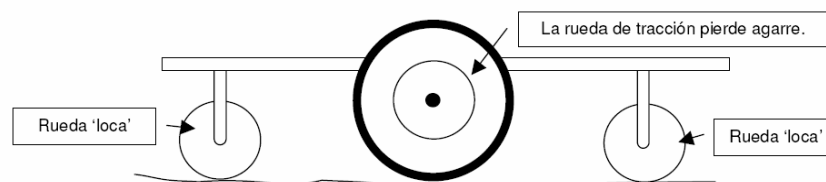


Figura 1.1.1-4: Problema de tracción en la configuración diferencial

Otro problema aparece cuando los motores encuentran diferentes resistencias (una rueda sobre moqueta y la otra sobre terrazo). Las velocidades de los motores varían, y el robot girará incluso cuando se le haya ajustado inicialmente para que vaya recto. Esto quiere decir que la velocidad debe ser controlada dinámicamente, es decir, debe existir un medio de monitorizar y cambiar la velocidad del motor mientras el robot avanza. De esta manera, la simplicidad del diseño queda minimizada por la complejidad del sistema de control de la velocidad.

Para llevar a cabo una navegación por odometría, es necesario acoplar a los motores de las ruedas de tracción sendos *encoders*, de forma que contando los pulsos que avanza cada rueda, teniendo en cuenta el radio de la misma y la reducción del motor, no hay más que aplicar las ecuaciones cinemáticas del robot para hallar la posición exacta en la que se encuentra y el ángulo de desviación respecto a la dirección de referencia.

- **Configuración síncrona:** en este diseño todas las ruedas son tanto de dirección como motrices, estando todas enclavadas de tal forma que siempre apuntan en la misma dirección. Para cambiar de dirección, el robot gira simultáneamente todas sus ruedas alrededor de un eje vertical, de modo que la dirección del robot cambia, pero su chasis sigue apuntando en la misma dirección que tenía. Si el robot tiene una parte delantera (es asimétrico) presumiblemente donde se concentran sus sensores, se tendrá que arbitrar un procedimiento para que su cuerpo se oriente en la misma dirección que sus ruedas. El diseño sincronizado supera muchas de las dificultades que plantean el diseño diferencial, el triciclo y el coche, pero a costa de una mayor complejidad mecánica.

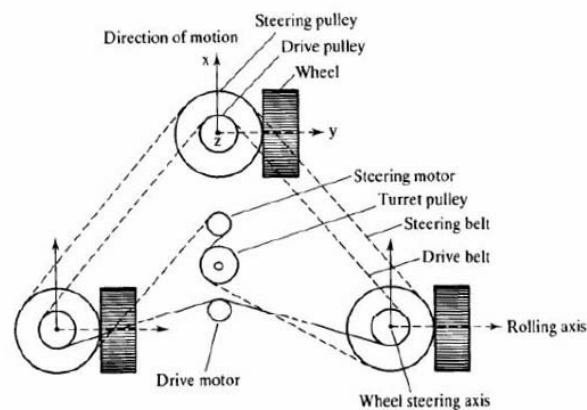


Figura 1.1.1-5: Configuración síncrona

Los diseños diferencial y sincronizado tienen una ventaja sutil sobre los otros dos tipos, y ésta estriba en sus cinemáticas. Considere un triciclo, el cual tiene tres grados de libertad cuando se mueve sobre una superficie plana. Es decir, en relación con un sistema global de coordenadas, el robot puede estar en cualquier posición especificado por dos coordenadas  $x$  e  $y$ , y apuntando en una dirección especificada por una tercera coordenada, el ángulo  $\varphi$ . Estos tres grados de libertad ( $x$ ,  $y$ ,  $\varphi$ ) proporcionan

la distancia y el ángulo entre el sistema de coordenadas global, y una referencia local en el robot. Se desearía tener la posibilidad de posicionar y orientar el robot en cualquier lugar sobre el plano, es decir, sin considerar de donde arranca. Así, si se le asignan valores cualesquiera a esas tres coordenadas, el robot debe poder moverse a esa posición. Sin embargo, hay un problema, para alcanzar esos tres grados de libertad el robot sólo puede controlar dos parámetros: la dirección (ángulo) y la distancia total recorrida. Esto quiere decir que la orientación del robot y su posición están ligados, y para girar tiene que moverse hacia delante o hacia atrás. El robot no puede ir directamente de una posición y/o orientación a otra, incluso aún cuando no haya nada en su camino. Para alcanzar una posición y orientación deseadas simultáneamente, el robot tiene que seguir algún camino, posiblemente complejo. Los detalles de ese camino se complican todavía más con la presencia de obstáculos. Sin embargo, un robot basado en los diseños diferencial o sincronizado puede, al girar sobre sí mismo, desacoplar efectivamente su posición de su orientación.

Para una información más detallada referente a los robots móviles se recomienda la lectura del libro “*Robótica: manipuladores y robots móviles*” (Aníbal Ollero).

## 1.2. ROMEO-4R

Hasta ahora se ha visto una introducción a los robots, adentrándose especialmente en el grupo de los robots móviles, para posteriormente explicar una de sus vertientes, los vehículos con ruedas. Por último, dentro de este grupo, se han visto las distintas configuraciones que existen, de las cuales, la más interesante para este Proyecto Fin de Carrera es la configuración Ackerman. Llegados a este punto, se puede introducir al ROMEO-4R, un vehículo convencional de cuatro ruedas desarrollado por el *Grupo de Robótica Visión y Control del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla*, siendo inicialmente un coche concebido para transportar personas y que tiene una estructura muy parecida a los coches de los campos de golf. Una vez adquirido por el departamento, se le ha añadido la mecánica y electrónica necesaria para que pueda ser utilizado como plataforma de investigación en navegación autónoma para exteriores, haciendo uso para ello de los sensores y actuadores de los que dispone.



Figura 1.2-1: Vista frontal y lateral del ROMEO-4R

### 1.2.1. Sistema mecánico

La estructura mecánica del ROMEO-4R se basa en un vehículo de cuatro ruedas convencional, similar a los usados en los campos de golf, con una masa total de 700 Kg aproximadamente.

Al tratarse de una configuración tipo Ackerman, posee la característica de que su rueda delantera interior gira un ángulo ligeramente superior a la exterior para disminuir el deslizamiento.

El sistema de tracción, constituido por un motor de corriente continua que permite alcanzar velocidades relativamente altas, se encarga del movimiento de las dos ruedas motrices situadas en el eje trasero. El sistema de dirección está formado por las dos ruedas directrices que se encuentran en el eje delantero, utilizándose otro motor de corriente continua.

La conducción del vehículo se puede desarrollar en modo manual o automático, pudiendo elegir el método a través del cuadro de mandos situado en la parte delantera del vehículo (ver el Apéndice B).

Las dimensiones del ROMEO-4R, a excepción de la altura que es de 1.78 metros, vienen representadas en la siguiente figura:

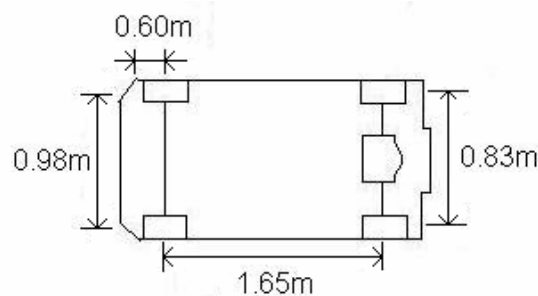


Figura 1.2.1-1: Dimensiones del ROMEO-4R

Conviene indicar también, que las cuatro ruedas tienen un radio de 0.229 metros, además de contar cada una con un sistema de suspensión independiente, lo que le permite pasar por encima de ciertos obstáculos sin mayor problema.

### 1.2.2. Sistemas de alimentación

El ROMEO-4R dispone de circuitos eléctricos independientes tanto para el sistema de potencia (tracción y dirección) como para el sistema de control (controladores y dispositivos montados en el vehículo), que se encuentran alimentados por baterías (para la carga de las mismas ver el Apéndice B).

Para el sistema de potencia, el vehículo cuenta con 6 baterías de 6 V conectadas en serie (36 V), que alimentan a los motores de tracción y dirección. Estas baterías se encuentran en el interior de los asientos.

Para el sistema de control, se dispone de 2 baterías de 12V puestas en serie, que proporcionan un total de 24 V de forma independiente, que es la alimentación que requiere este sistema. Estas baterías se encuentran en la parte trasera del vehículo, debajo de las CPU.

### **1.2.3. Actuadores**

---

Este vehículo cuenta con dos motores de corriente continua, que tienen las siguientes características:

1. Motor de tracción: es de 36 V y 2 C.V. de potencia, y proporciona velocidades relativamente altas.
2. Motor de dirección: es de 24 V y 80 W de potencia, y se encuentra acoplado a la caña de dirección.

A su vez, cada motor dispone de un servoamplificador que se utiliza para dirigir sus movimientos.

### **1.2.4. Sensores**

---

El ROMEO-4R tiene instalados varios sensores que permiten la adquisición de la información necesaria para el control del mismo:

1. **Codificadores ópticos incrementales (*encoders*):** convierten un desplazamiento rotacional en una señal digital, de forma que la medida del mismo se realiza contando las interrupciones de un haz de luz. Existen dos instalados en el vehículo, uno en el sistema de tracción que permite determinar el desplazamiento del vehículo y hacer una estimación de la velocidad del mismo, y otro en el sistema de dirección, que permite medir el giro de las ruedas.
2. **Giróscopo:** se trata de un interferómetro de fibra óptica de un solo eje, adecuado para sistemas de navegación terrestre, proporcionando medidas de la velocidad angular de giro. La integración de las mismas en el tiempo permite obtener el giro del vehículo, y a partir de éste, la orientación del mismo sobre el plano del suelo.
3. **GPS (*Global Positioning System*):** permite obtener una estimación de la posición del vehículo basada en estaciones de transmisión. De esta forma se evita el problema de acumulación de errores al realizar dicha estimación mediante los codificadores ópticos. Indicar también que el vehículo está preparado para utilizar GPS en modo diferencial (DGPS) que proporciona una mayor precisión de las medidas obtenidas.

4. **Sonares:** son sensores de ultrasonidos que se basan en el principio del tiempo de vuelo, emitiendo pulsos de sonido y determinando el tiempo hasta que se detecta una vez que ha sido reflejado por el objeto. Se encargan de la detección de obstáculos próximos al vehículo. En el ROMEO-4R existen diez sonares instalados en su parte frontal y en los laterales, aunque está preparado para admitir dos más.
5. **Láser 2D:** se trata de un escáner láser bidimensional capaz de generar un mapa en 2D del entorno, el cual permite realizar la detección de obstáculos con una mayor precisión y alcance que los sonares. Se encuentra situado en la parte delantera del vehículo.
6. **Cámaras:** el vehículo cuenta con dos cámaras monocromáticas, situadas en su techo, que permiten una visión estéreo artificial. Una de ellas es orientable mediante un sistema *pan&tilt*, el cual se controla electrónicamente, y la otra con uno manual.
7. **Sensor del ángulo del remolque:** se trata de un potenciómetro que se mueve con la posición del remolque (en caso de que lo lleve), de forma que cuando varía la posición de éste, también lo hace la del potenciómetro, calculándose a partir de ahí su ángulo de giro.

Para realizar el cálculo del estado del vehículo (posición, orientación, velocidad, etc.), se tomará la información de los sensores que estén disponibles para, posteriormente, decidir que dispositivo aporta los datos más válidos para cada campo.

### **1.2.5. Controladores**

---

El ROMEO-4R dispone de varios controladores, situados en la parte trasera del vehículo. Dos de estos controladores (*romeo-4a* y *romeo-4b*) están implementados en dos ordenadores de tipo industrial, mientras que el otro es un controlador empotrado cuyo elemento principal es un DSP (*Procesador Digital de Señal*). A su vez, existe un monitor situado en frente del asiento del copiloto, que permite la visualización de los algoritmos que se ejecuten.

Los dos PC's se encuentran conectados a un router *Wi-Fi* que permite conectarse a ellos a través de una red inalámbrica. Estos dos controladores se detallan a continuación:

1. ***romeo-4a*:** se encarga de todo lo referente al sistema de visión del vehículo, para lo cual realiza la captura, digitalización y posterior tratamiento de las imágenes procedentes de las cámaras instaladas en el mismo. Para ello cuenta con una placa instalada en el PC con tres DSP's conectados en paralelo que permiten el tratamiento de las imágenes en tiempo real. Este controlador no puede realizar por si mismo acciones de control, pero si puede indicarle las mismas, o simplemente pasarle información, al otro controlador (*romeo-4b*), al que se encuentra conectado mediante una red *Ethernet*.

2. **romeo-4b**: se encarga de la lectura de todos los sensores, exceptuando las cámaras (de lo que se encarga el *romeo-4a*), y a partir de ellas, realiza las acciones de control necesarias sobre el vehículo. Para ello, dispone de una tarjeta de control de motores (de tracción y de dirección) y una tarjeta de adquisición de datos que actualmente permite la lectura/escritura en los sonares y la lectura del sensor de ángulo de giro del remolque.

Para una información más detallada del ROMEO-4R y del controlador basado en PC's, ver el Proyecto Fin de Carrera de Rafael Martín de Agar Tirado "*Control automático de un vehículo autónomo bajo el sistema operativo GNU/Linux. Implementación de drivers y software de control*".

Por otra parte, el controlador empotrado permite implementar algoritmos de control para el ROMEO-4R, realizando la lectura de todos los sensores, excepto las cámaras y el láser (que requiere una gran capacidad de cálculo), con la ventaja, con respecto a los controladores implementados en PC's, de un menor peso, tamaño, consumo y coste. Además, se puede comunicar con cualquier PC mediante un protocolo de comunicaciones a través del puerto serie RS-232.

Para una información más detallada sobre el controlador empotrado, ver los Proyectos Fin de Carrera de Víctor Manuel Blanco González "*Controlador empotrado para vehículo autónomo ROMEO-4R*" y de José Víctor Acevedo Sánchez "*Implementación del controlador basado en DSP del vehículo autónomo ROMEO-4R*".

### **1.3. Objetivos del proyecto**

---

En este Proyecto Fin de Carrera se trabajará con el software del ROMEO-4R, más concretamente, en el desarrollo de la nueva arquitectura software que se desea implantar en el mismo. Los dos objetivos principales que se han buscado en este Proyecto Fin de Carrera son los siguientes:

- **Diseño e implementación software de la *Robot Implementation Layer* (RIL) en el ROMEO-4R**, formada por:
  - ✓ *Hardware Abstraction Module*
  - ✓ *Romeo Status Module*
  - ✓ *Path Follower Module*
  - ✓ *Trajectory Generation Module*
- **Diseño e implementación software del simulador del *Hardware Abstraction Module* (HAM) en el ROMEO-4R.**



Para ello, se aprovechará parte del código existente en la antigua arquitectura del ROMEO-4R, adaptándolo a la nueva arquitectura software para múltiples robots heterogéneos, tras realizar una limpieza y depuración del mismo. No obstante, la mayor parte del Proyecto Fin de Carrera se destinará a la generación de código nuevo, específico de esta arquitectura.

De esta forma, se generará el software necesario para la capa RIL, la cual estará formada, a grandes rasgos, por los siguientes módulos:

- Módulo para los sensores y actuadores (*Hardware Abstraction Module*).
- Módulo para control del estado del ROMEO-4R (*Romeo Status Module*).
- Módulo para seguimiento de caminos (*Path Follower Module*).
- Módulo para generación de trayectorias (*Trajectory Generation Module*).

Se realizará a su vez un simulador del hardware (*Hardware Abstraction Module Simulator*) donde se pueda probar el funcionamiento del vehículo con una dinámica lo más parecida a la realidad, y se dejará preparado todo el código para que en un futuro se pueda agregar fácilmente los algoritmos necesarios para la simulación del láser y de los sonares.

## **1.4. Estructura del proyecto**

---

El Proyecto Fin de Carrera se encuentra dividido en cinco capítulos y dos apéndices. Excepto este primer capítulo y el dedicado a las conclusiones y futuros desarrollos, los restantes se inician con una introducción, que expone una breve descripción del contenido, y finalizan con unas conclusiones, que destacan los aspectos más relevantes de cada capítulo. La organización responde a la resolución progresiva de la arquitectura software de un sistema para múltiples robots heterogéneos, pasando desde una visión generalizada de las capas superiores hasta la visión detallada de los módulos de la capa inferior, y su contenido se describe en los siguientes párrafos del presente apartado.

El Capítulo 2, titulado “*Arquitectura General del Sistema*”, introduce los conceptos fundamentales que definen la arquitectura bajo la cual se regirán los robots móviles. Así, en primer lugar se presentan los elementos que conforman la estructura general del sistema, para, con posterioridad, definir detalladamente cada uno de ellos por separado. Los conceptos de entidades y comunicaciones, así como las tres partes en las que se puede dividir esta arquitectura: *Control Center*, *Time Server* y la arquitectura de los robots (donde se incluyen sus capas e interfaces), son los aspectos introducidos en este capítulo y que se desarrollarán a lo largo del Proyecto Fin de Carrera.

El Capítulo 3, con título “*La Robot Implementation Layer (RIL)*”, desarrolla la capa de la arquitectura que es el objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera. Para ello, realiza una descripción sistemática y detallada de todos los módulos que componen esta capa: *Hardware Abstraction Module*, *Romeo Status Module*, *Path Follower Module* y *Trajectory Generation Module*, indicando para cada uno el sistema de comunicaciones interno y externo, y los hilos de procesamiento que lo conforman.

El Capítulo 4, bajo epígrafe “*Modelo del ROMEO-4R y Simulador del HAM*”, describe el modelo cinemático y dinámico del vehículo, indicando las ecuaciones que lo conforman, las cuales son implementadas posteriormente en el simulador del *Hardware Abstraction Module*, permitiendo probar el software que se diseñe en el vehículo con una dinámica muy próxima a la realidad.

El Capítulo 5, “*Conclusiones y Desarrollos Futuros*”, destaca los aspectos y contribuciones más relevantes del Proyecto Fin de Carrera, a la vez que propone las futuras líneas de investigación derivadas del trabajo realizado.

Por último el *Apéndice A* realiza una descripción de la arquitectura antigua existente en el ROMEO-4R, así como el código asociado al esqueleto del programa principal *main*, y el *Apéndice B* muestra la información correspondiente al cuadro de mandos y la carga de baterías en el ROMEO-4R.