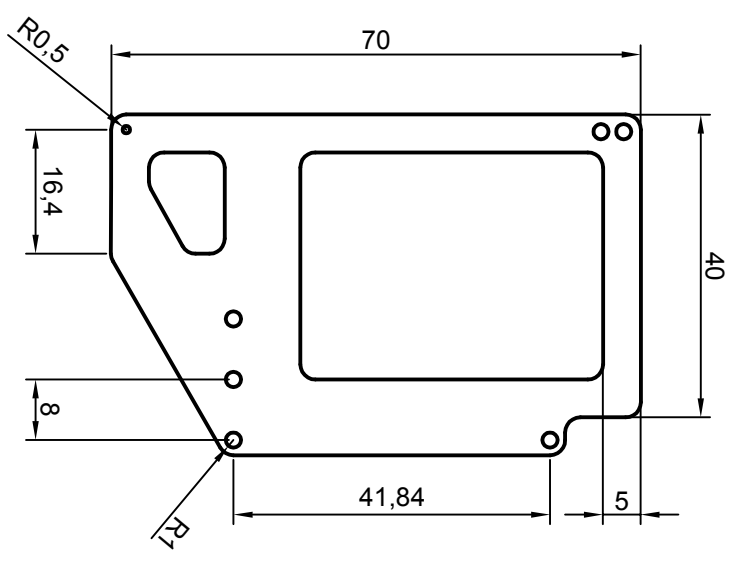
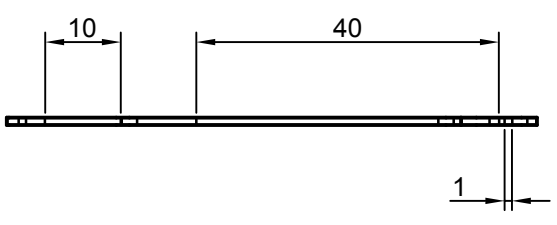
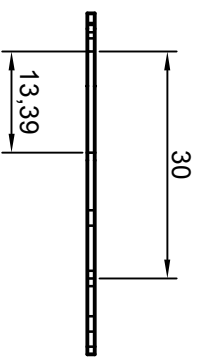
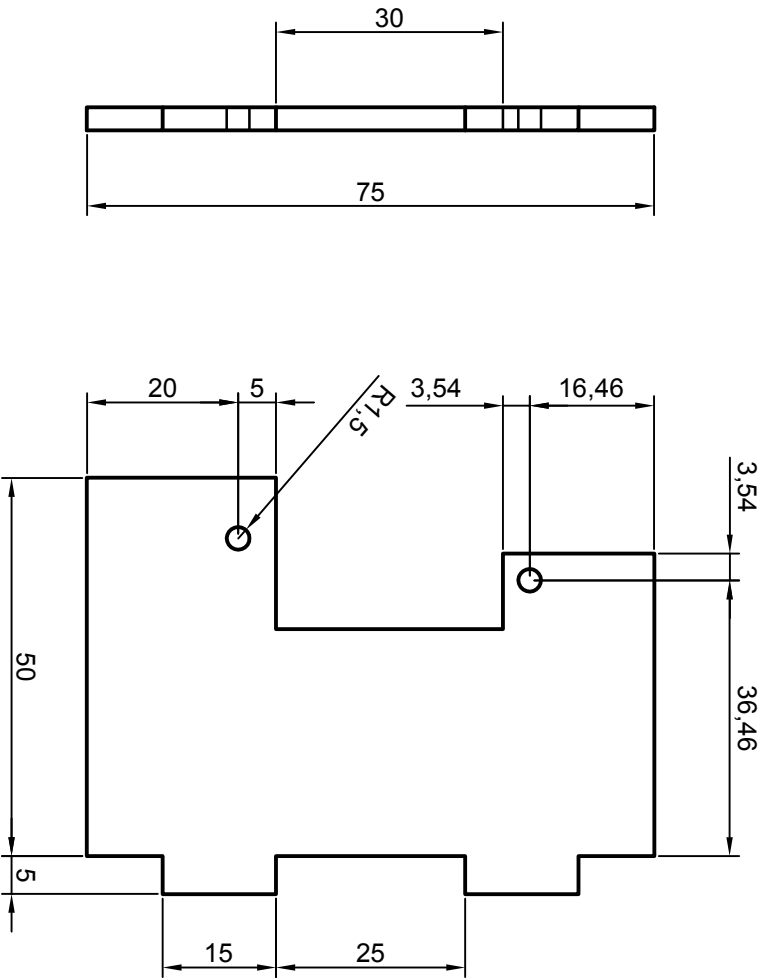
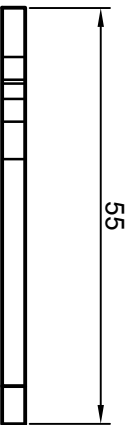


Pieza: Base de la estructura
David Sarmiento Pérez

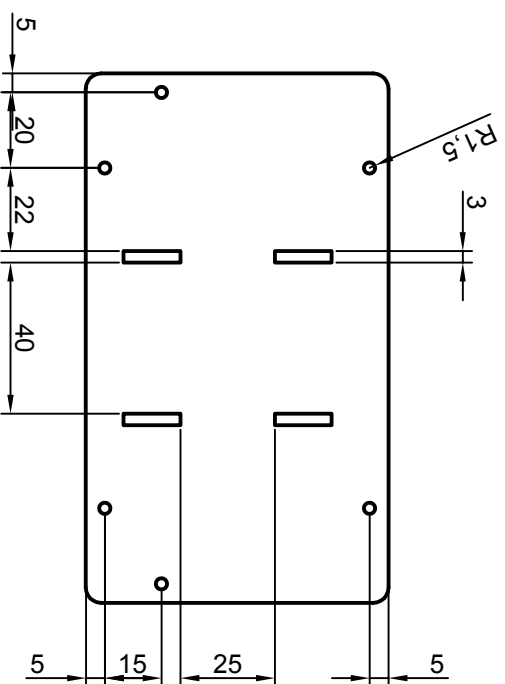
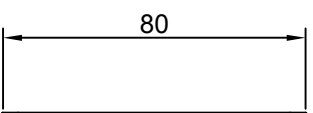
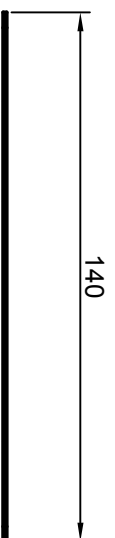
Proyecto: Diseño, montaje y programación de un vehículo autónomo portado por UAV para monitorización ambiental



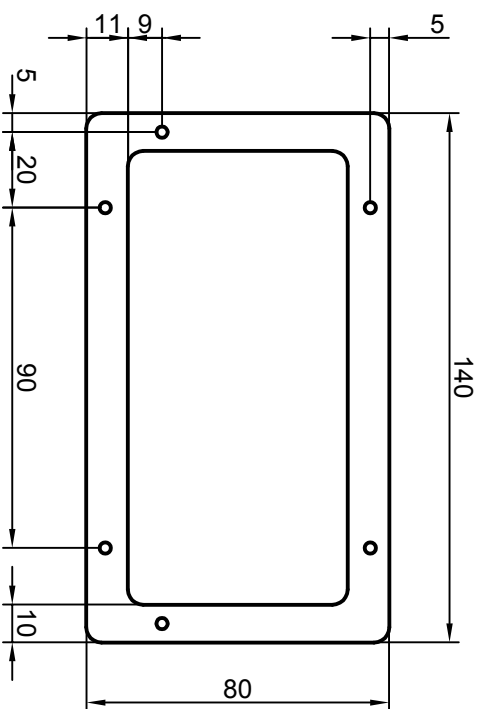
Pieza: Frontal de la estructura 1de 4 Proyecto: Diseño, montaje y programación de un vehículo autónomo
David Sarmiento Pérez portado por UAV para monitorización ambiental



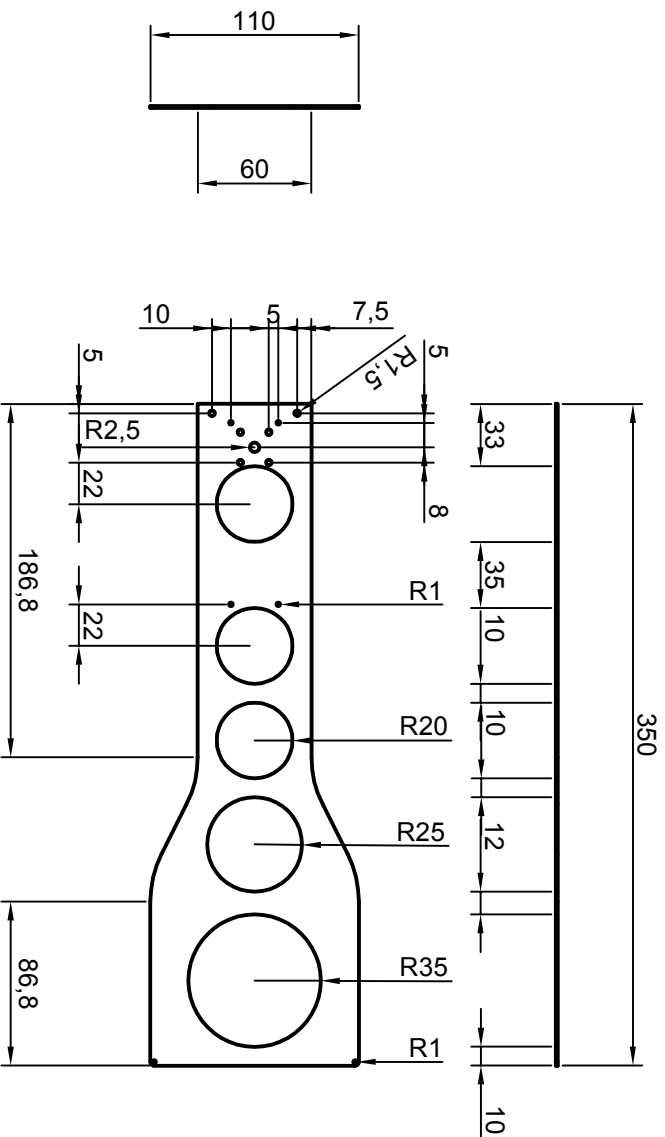
Pieza: Frontal de la estructura 2 de 4 Proyecto: Diseño, montaje y programación de un vehículo autónomo portado por UAV para monitorización ambiental
David Sarmiento Pérez



**Pieza: Frontal de la estructura 3 de 4 Proyecto: Diseño, montaje y programación de un vehículo autónomo
portado por UAV para monitorización ambiental**
David Sarmiento Pérez



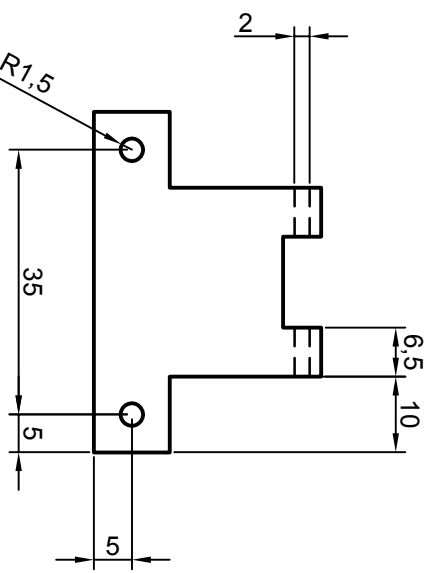
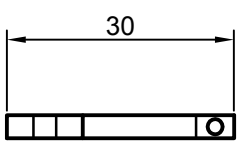
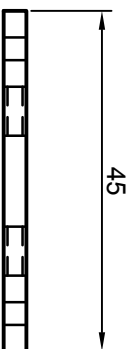
**Pieza: Frontal de la estructura 4 de 4 Proyecto: Diseño, montaje y programación de un vehículo autónomo
David Sarmiento Pérez portado por UAV para monitorización ambiental**



Pieza: Techo de la estructura

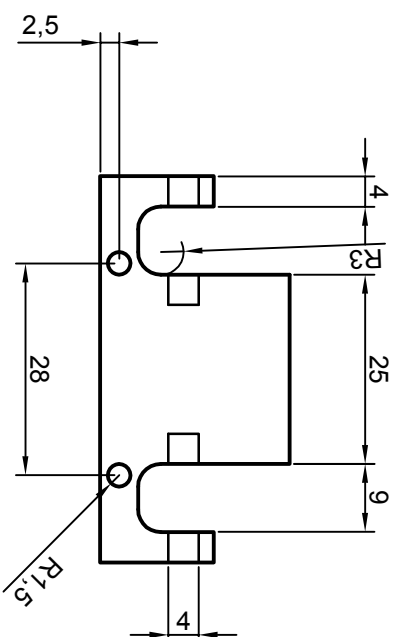
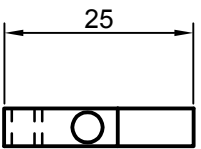
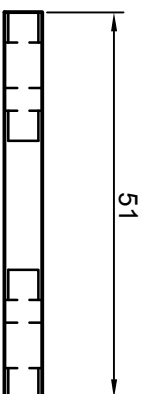
Proyecto: Diseño, montaje y programación de un vehículo autónomo portado por UAV para monitorización ambiental

David Sarmiento Pérez



Pieza: Unión delantera
David Sarmiento Pérez

Proyecto: Diseño, montaje y programación de un vehículo autónomo portado por UAV para monitorización ambiental



Proyecto: Diseño, montaje y programación de un vehículo autónomo portado por UAV para monitorización ambiental

Pieza: Unión trasera

David Sarmiento Pérez

Trabajo Fin de Grado
Grado en Tecnologías Industriales

Diseño, Montaje y Programación de un Vehículo
Autónomo Portado por UAV para Monitorización
Ambiental

Autor: David Sarmiento Pérez

Tutor: José Ramiro Martínez de Dios

Dep. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado
Grado en Tecnologías Industriales

Diseño, Montaje y Programación de un Vehículo Autónomo Portado por UAV para Monitorización Ambiental

Autor:

David Sarmiento Pérez

Tutor:

José Ramiro Martínez de Dios

Profesor titular

Dep. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Trabajo Fin de Grado: Diseño, Montaje y Programación de un Vehículo Autónomo Portado por UAV para Monitorización Ambiental

Autor: David Sarmiento Pérez

Tutor: José Ramiro Martínez de Dios

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigas

Agradecimientos

Me gustaría agradecer la ayuda prestada para la realización de este proyecto a Víctor por dejar que lo distrajera y enseñarme a manejar en el laboratorio, a Santos por aportarme toda la información que he podido necesitar con la mayor amabilidad y en conjunto a todos los miembros del laboratorio que hicieron de mis días allí una magnífica experiencia.

Y a Ramiro por su orientación, consejos, verdades y sobre todo por valorar mi trabajo.

Resumen

En este trabajo se abarca el desarrollo de un vehículo autónomo, cuya fabricación se ha realizado mayoritariamente en el taller de la escuela de ingenieros de Sevilla, para el reconocimiento de áreas de interés en las que se despliega una red de sensores. El vehículo actuará en cooperación con un helicóptero autónomo que servirá para la recogida y despliegue. Para esto deberá cumplir requisitos tanto mecánicos como de equipación electrónica.

Este vehículo responde a una configuración Ackerman cuyo modelo cinemático puede ser aproximado al de la bicicleta para el desarrollo de funciones de odometría y control. Un sensor de iguales características a los de la red montado sobre el mismo permitirá la estimación de la posición a través de medidas RSSI.

Abstract

This essay approaches the development of an autonomous vehicle, which have been manufactured almost entirely at the engineering school of Seville, for exploring areas where a sensors network is spread. The vehicle will cooperate with an also autonomous helicopter that will deploy and pick it up. For all this mechanical and electronic equipment requirements will have to be met.

This vehicle has an Ackerman configuration which cinematic model can be approached by that of a bicycle in order to develop odometry and path control functions. A sensor with the same specifications as those spread is mounted on the vehicle allowing for the estimation of its position through RSSI measurements.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1. Introducción	1
1.1. <i>Objetivos</i>	1
1.2. <i>Antecedentes</i>	1
1.3. <i>Estructura del Documento</i>	2
2. Diseño del Sistema	3
2.1. <i>Introducción</i>	3
2.2. <i>Requisitos Generales</i>	3
2.3. <i>Requisitos Hardware</i>	4
2.3.1. Estructura mecánica	4
2.3.2. Placa de control de bajo nivel	6
2.3.3. Red WSN y Nodo de comunicaciones móvil	6
2.3.4. Control/Funciones de alto nivel	7
2.3.5. Motor	8
2.3.6. Servo de dirección	8
2.4. <i>Requisitos software</i>	8
2.4.1. Control de bajo nivel	9
2.4.2. Funciones de alto nivel	9
2.5. <i>Conclusiones</i>	10
3. Desarrollo Hardware	11
3.1. <i>Introducción</i>	11
3.2. <i>Descripción General</i>	11
3.3. <i>Desarrollo mecánico</i>	12
3.3.1. Estructura Añadida	13
3.3.2. Motores	18
3.4. <i>Electrónica del vehículo</i>	20
3.4.1. Placa de control de bajo nivel	20
3.4.2. Nodo sensor	24
3.5. <i>Teléfono inteligente</i>	25
3.6. <i>Comunicaciones intravehículo</i>	26
3.7. <i>Conclusiones</i>	26
4. Desarrollo Software	27
4.1. <i>Introducción</i>	27
4.2. <i>Modelo</i>	27
4.2.1. Modelo de la bicicleta	27
4.3. <i>Odometría y posicionamiento</i>	29
4.3.1. Odometría	30
4.3.2. Localización por RSSI	31
4.4. <i>Seguimiento de trayectorias</i>	34
4.4.1. Seguimiento mediante persecución pura	35
4.4.2. Función desarrollada	36
4.5. <i>Conclusiones</i>	37

5. Experimentos y resultados	39
5.1. <i>Introducción</i>	39
5.2. <i>Plataforma Hardware</i>	39
5.2.1. Descripción del experimento	39
5.2.2. Resultados del experimento	40
5.3. <i>Funciones Software</i>	41
5.3.1. Localización mediante RSSI	41
5.3.2. Seguimiento de trayectorias	44
6. Conclusiones y trabajo futuro	47
6.1. <i>Conclusiones</i>	47
6.2. <i>Líneas de trabajo futuro</i>	47
Bibliografía	49

Índice de Tablas

Tabla 5.1-Resultados RSSI básica

43

Índice de Figuras

Figura 2.1-Configuración Ackerman	5
Figura 2.2-Eschema del sistema	10
Figura 3.1-Slickrock de Vattera	12
Figura 3.2-Estructura básica del Slickrock	13
Figura 3.3-Base de la estructura	14
Figura 3.4-Unión delantera	15
Figura 3.5-Unión trasera	15
Figura 3.6-Techo	16
Figura 3.7-Frontal	17
Figura 3.8-Frontal montado	18
Figura 3.9-Servomotor HSR-5980	19
Figura 3.11-Flujo de información en la placa de bajo nivel	21
Figura 3.12-Módem Bluetooth	21
Figura 3.13-Receptor radio	22
Figura 3.14-Placa de control de bajo nivel	23
Figura 3.15-Nodo sensor TelosB	24
Figura 3.16-Samsung Galaxy SII	25
Figura 4.1-Modelo de la bicicleta	28
Figura 4.2- Relación ángulo de la rueda/longitud del eje	28
Figura 4.3-Pseudocódigo Odometría	31
Figura 4.4-Emisión de antenas omnidireccionales	32
Figura 4.5-Pseudocódigo RSSI	34
Figura 4.6-Eschema de control en dirección y velocidad	35
Figura 4.7-Seguimiento de caminos mediante persecución pura	36
Figura 4.8 -Obtención de la posición objetivo	¡Erro
r! Marcador no definido.	
Figura 4.9-Obtención geométrica de $\Delta\theta$	37
Figura 5.1-Recogida del vehículo por el helicóptero	40
Figura 5.2-Vuelo del helicóptero portando al vehículo	41
Figura 5.3-Posiciones de los nodos y el robot	42
Figura 5.4-Relacion entre p y el error medio en la posición	42
Figura 5.5-Seguimiento de la coordenada Y	43
Figura 5.6-Error en la posición	44
Figura 5.7-Seguimiento de trayectorias 1	45
Figura 5.8-Seguimiento de trayectorias 2	45

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo es el diseño y desarrollo de un robot móvil autónomo. Este robot deberá inspeccionar una zona de acceso limitado en el Parque Natural de Doñana. En esta zona, el robot será desplegado, cumplirá una misión y será posteriormente recogido mediante un helicóptero de forma autónoma. El robot deberá comunicarse con el helicóptero y con una estación de tierra. La comunicación con el helicóptero permitirá una cooperación autónoma. La estación de tierra recibirá telemetría de tipo posicional, cinemático, ambiental y visual.

La estación de tierra podrá agregar puntos de ruta al robot si es necesario. Además, el robot deberá llevar incorporado un nodo sensor inalámbrico capaz de conectarse (enviando y recibiendo información) a otros nodos que estarán distribuidos en el entorno creando una red, a estos nodos se los denomina de tecnología WSN (siglas en inglés de *Wireless sensor network*).

1.2. Antecedentes

Este trabajo está dentro del marco del proyecto PLANET perteneciente al 7º Programa Marco europeo. El principal objetivo de este proyecto es el diseño, desarrollo y validación de una plataforma integrada para el desarrollo, operación y mantenimiento de sistemas complejos de Objetos Cooperativos, incluyendo Redes Inalámbricas de Sensores, y objetos móviles. La plataforma será validada en dos escenarios: Reserva Biológica de Doñana, con un alto valor ecológico y un sensible impacto ante la polución, y un aeródromo altamente automatizado.

La principal tarea del robot deberá ser encontrar su localización para poder ser recuperado y recogido por el helicóptero. Los errores de un sensor GPS de tamaño y peso acorde a las restricciones del robot son excesivos así que utilizaremos nodos sensores desplegados en el terreno.

La comunicación entre estos nodos corresponde a una WSN, que será utilizada también en otro grupo de trabajo del proyecto y que se basa en la recolección de datos tomados por los nodos sensores.

1.3. Estructura del Documento

Esta memoria se divide en cinco capítulos, en primer lugar se abordan los requisitos que debe satisfacer el robot definiendo las características del sistema. En los capítulos 3.Desarrollo Hardware y 4.Desarrollo Software se describe el desarrollo del robot atendiendo a estos requisitos dedicando un capítulo a los aspectos hardware y otro a los aspectos software.

En los últimos capítulos 5.Experimentos y Resultados y 6.Conclusiones y trabajo futuro se exponen los resultados de los experimentos realizados con el robot y las conclusiones alcanzadas al término del proyecto.

2. DISEÑO DEL SISTEMA

2.1. Introducción

En este capítulo se abordan los requisitos del robot, tanto hardware como software, tratándolos en un primer apartado de forma general y conjunta para detallar después los requisitos específicos de cada parte. Se expondrán las soluciones aportadas para satisfacer dichos requisitos, desarrollando su elaboración en los capítulos 3.Desarrollo hardware y 4.Desarrollo software.

2.2. Requisitos Generales

Para el diseño del robot móvil tendremos una serie de restricciones impuestas por el proyecto debido a diversas causas:

- El peso deberá ser reducido, ya que el helicóptero no puede levantar más de 1,5 kg, por potencia y estabilidad.
- La red utilizada para la comunicación deberá operar a la frecuencia de 5 GHz para no interferir con el control del helicóptero.
- La localización debe ser precisa. La localización que se envía al helicóptero no debe tener un error de más de dos metros. El helicóptero volará hasta la posición enviada y buscará al robot en un radio de dos metros desde esa posición. La localización por GPS cuando este no es diferencial tiene un error de 5 a 10 metros por lo que se deberá utilizar una WSN para la localización.
- Deberá considerar moverse por terrenos accidentados y ser suficientemente robusto para ser desplegado desde un helicóptero.

- El robot móvil deberá llevar un código bidimensional a una cierta distancia del centro de gravedad. El helicóptero reconocerá este código por medio de procesamiento de imágenes en tiempo real desde el aire. Una vez reconocido, esta información delatará la posición y orientación del centro de gravedad del robot para recogerlo.

2.3. Requisitos Hardware

De los requisitos mencionados los siguientes se refieren a aspectos hardware:

- La robustez mecánica.
- La capacidad para recorrer terrenos accidentados.
- Peso reducido.
- Es necesario un dispositivo Wifi capaz de conectarse a una frecuencia de 5GHz.
- Nodo de tecnología WSN para el posicionamiento y transmisión de datos del entorno.
- Todos los elementos del robot deben estar contrapesados, estableciendo un centro de masas en una posición accesible al helicóptero que permita un vuelo estable.

2.3.1. Estructura mecánica

Constituye el cuerpo del robot, sobre esta recae la función de desplazarse por el terreno y soportar la recogida y despliegue desde el helicóptero. Para ello se empleará:

- Vehículo radio-control: Se utilizarán de un coche de uso recreativo los elementos básicos como ruedas, transmisión, amortiguación y parte del chasis. El modelo elegido deberá por tanto estar destinado a su uso por terrenos similares a los del proyecto.

Estos vehículos poseen una configuración Ackerman que se basa en cuatro ruedas colocadas en dos ejes, siendo las dos traseras motrices, paralelas y con orientación fija; y las delanteras directrices (motrices o no) y casi paralelas. La figura 2.1 representa dicha configuración.

Esto permite realizar un modelo cinemático del vehículo con tan sólo tres parámetros: Distancia entre ejes, velocidad de giro de las ruedas y ángulo de giro (definido según la dirección principal del coche).

El ángulo de giro del vehículo, ϕ en la figura 2.1, no se obtiene de forma trivial sino a partir del centro giro del vehículo (punto exterior al vehículo respecto al que este describe circunferencias concéntricas). Este punto se encuentra en el cruce de las velocidades angulares de las ruedas directrices, cuyos ángulos relativos de giro respecto a la dirección principal del vehículo difieren ligeramente, y la prolongación del eje trasero. La ecuación que relaciona ambos ángulos permitiendo el cálculo del centro de giros (P1 en la figura 2.1) es la denominada ecuación de Ackerman (ecuación 2-1).

$$\cot \theta_1 - \cot \theta_2 = b \div l \quad (2-1)$$

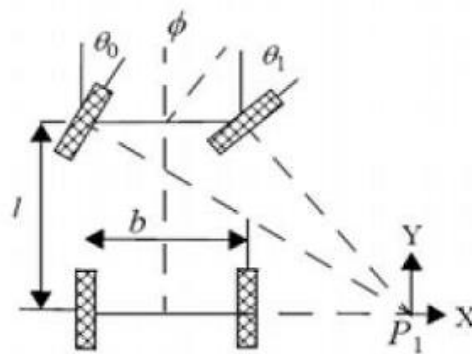


Figura 2.1-Configuración Ackerman

El ángulo de giro se define entonces como el formado por el eje trasero con la recta que une el centro de giro con el punto medio entre las ruedas directrices.

- Estructura añadida: Sobre el vehículo base será necesario añadir una estructura que aloje el resto de elementos así como ofrezca un punto de enganche al helicóptero. Al tener que cumplir

la especificación de peso el material de la misma habrá de ser ligero pero también ofrecer suficiente resistencia para el despliegue. Otra de sus funciones será la de proteger el circuito de agentes externos como ramas, guijarros, tierra o agua muy presentes en el entorno de Doñana. Todos los elementos incorporados deberán colocarse de manera que mantengan el peso equilibrado.

La estructura se realizará principalmente en fibra de carbono con uniones de aluminio pues son materiales con una excelente relación entre peso y resistencia.

2.3.2. Placa de control de bajo nivel

Deberá contar con un microcontrolador encargado de las funciones básicas del robot, un receptor/emisor USB para la comunicación con el control de alto nivel, un regulador de tensión para el ajuste de la velocidad del motor, un zumbador que permita implementar una alarma en caso de que la batería tenga un bajo nivel de carga y un receptor de radiofrecuencia.

2.3.3. Red WSN y Nodo de comunicaciones móvil

El robot se moverá dentro de una red de sensores desplegados en el entorno que permiten la recogida de información del mismo así como poder triangular la posición del vehículo, por ello es necesario que este cuente con un nodo que le permita comunicarse con la red. Este nodo se conectará al control de alto nivel recibiendo y transmitiendo dicha información.

Una red WSN se caracteriza por estar formada por un grupo de nodos con capacidades sensoriales y de comunicación inalámbrica para formar redes sin una infraestructura fija. Destaca su sencillez de despliegue, al ofrecer servicios de encadenamiento entre nodos sin visión directa, así como registrar datos referentes a los sensores locales de cada nodo.

Algunas de las áreas de aplicación son salud, militar y seguridad. Por ejemplo una red de sensores puede ser usada para detectar agentes químicos en el aire o agua. Los nodos pueden ayudar a identificar el tipo, concentración, y localización de los contaminantes. En esencia una red de sensores provee una gran cantidad de información del ambiente. Algunos de sus rasgos principales son:

- Escalabilidad: el número de nodos puede ser de altos órdenes de magnitud.

- Los nodos pueden ser densamente desplegados.
- Gestión eficiente de energía, permitiendo una alta autonomía operativa.
- Topología dinámica: en el despliegue de una red de sensores, la topología es siempre variable y esto permite adaptarse al terreno con bastante facilidad.
- Variabilidad del canal: el canal radio es un canal muy inestable lo que puede producir errores o pérdidas en los datos.
- No se utiliza infraestructura de red: La red no tiene la necesidad de una infraestructura para poder operar, ya que sus nodos pueden funcionar como emisores o receptores. Sin embargo, hay que destacar la figura de un nodo recolector, que es el nodo que recolecta la información y por el cual se recoge toda la información generada, normalmente en un tiempo discreto. Esta información es adquirida por un ordenador conectado a este nodo para su posterior análisis.

2.3.4. Control/Funciones de alto nivel

El control de alto nivel requiere, a nivel de hardware, contar con un dispositivo capaz de:

- conectarse a una red Wifi de 5GHz.
- Operar como USB host para conectarse al nodo sensor.
- Capturar imágenes.
- Realizar numerosos cálculos.
- Incluir giróscopos y acelerómetros a partir de los que poder emplear odometría.

- No debe ocupar ni pesar en exceso.

Todas estas características pueden encontrarse en los teléfonos inteligentes disponibles en el mercado.

2.3.5. Motor

Deberá admitir una alimentación desde una batería de dos celdas, por lo tanto será de corriente continua, y ser capaz de desarrollar un par elevado que permita mover el robot.

El motor de serie de los vehículos radio-control de bajo peso como los que buscamos desarrolla un par bajo por lo que será sustituido por un nuevo motor con más potencia.

2.3.6. Servo de dirección

Para poder dirigir el robot es necesario poder especificar la dirección de las ruedas directrices, para ello instalaremos un servomotor de dirección. Este es un segundo motor eléctrico con un controlador incorporado capaz recibir un valor para el ángulo de salida y fijarlo (siempre que este se encuentre dentro de un cierto rango).

2.4. Requisitos software

El software del robot ha de cumplir con las tareas de vigilancia y exploración del entorno de Doñana. Para ello es preciso que sea capaz de trazar y seguir rutas además de tomar información del medio y transmitirla a la estación de tierra para su procesamiento. Estas tareas implican la necesidad de establecer comunicaciones internas y externas, controlar el vehículo tanto para el cálculo de trayectorias (alto nivel) como para fijar y mantener una velocidad y orientación instantáneas (bajo nivel), leer el estado de las baterías (la del móvil y la del vehículo) y gestionar la toma y almacenamiento de imágenes.

2.4.1. Control de bajo nivel

La placa de control será la encargada de gestionar las funciones básicas del robot, controlando la velocidad de las ruedas y su orientación para lo que deberá comunicarse con el controlador de alto nivel del que recibirá dichos parámetros, así como con el servomotor de dirección y el motor de avance para imponerlos. Una vez Impuestos será necesario que lea velocidad y orientación alcanzadas y las devuelva al control de alto nivel. Esta comunicación se realizará por bluetooth.

También deberá leer el estado de la batería, produciendo un aviso cuando su nivel de carga sea reducido.

Por último, recibirá a través de un receptor de radio órdenes de movimiento provenientes de un mando de radio-control, éstas tendrán una prioridad mayor a las enviadas por el control del robot ya que están pensadas para la recuperación del robot en caso de fallo del software.

2.4.2. Funciones de alto nivel

Estas funciones están destinadas a ser ejecutadas por un teléfono móvil cuyas aplicaciones se escriben en lenguaje Java.

Han de abarcar la vigilancia de un mapa conocido recorriéndolo de la forma más eficiente posible y la capacidad de moverse desde su posición actual hasta otra posición recibida desde la estación de tierra siguiendo de la forma más precisa posible el camino o trayectoria marcados.

Se hace necesario por tanto el cálculo de la posición del robot que se realizará mediante la combinación de odometría (integrando orientación y velocidad en el tiempo transcurrido) y estimación de la distancia a los nodos de la red (cuyas posiciones son conocidas) a partir de la intensidad de la señal recibida de cada uno de ellos. Para acceder a esta información habrá que configurar el USB del teléfono al que se conecta el nodo sensor.

La recogida de información se llevará a cabo principalmente mediante la toma de imágenes para lo que se empleará la cámara del móvil.

Las comunicaciones externas se establecen con la estación de tierra a través y el helicóptero mediante Wifi.

2.5. Conclusiones

Vistos los requisitos y funciones que ha de satisfacer el robot podemos establecer las características del sistema a desarrollar. Una estructura móvil alojará todos los elementos, estos consistirán en un teléfono inteligente que recabará la información del entorno y planificará el movimiento, una placa de circuito impreso se encargará del bajo nivel controlando motores y batería, por último se añadirán dispositivos para las comunicaciones intra e inter-vehículo.

El esquema del sistema será por tanto el de la figura 2.2.

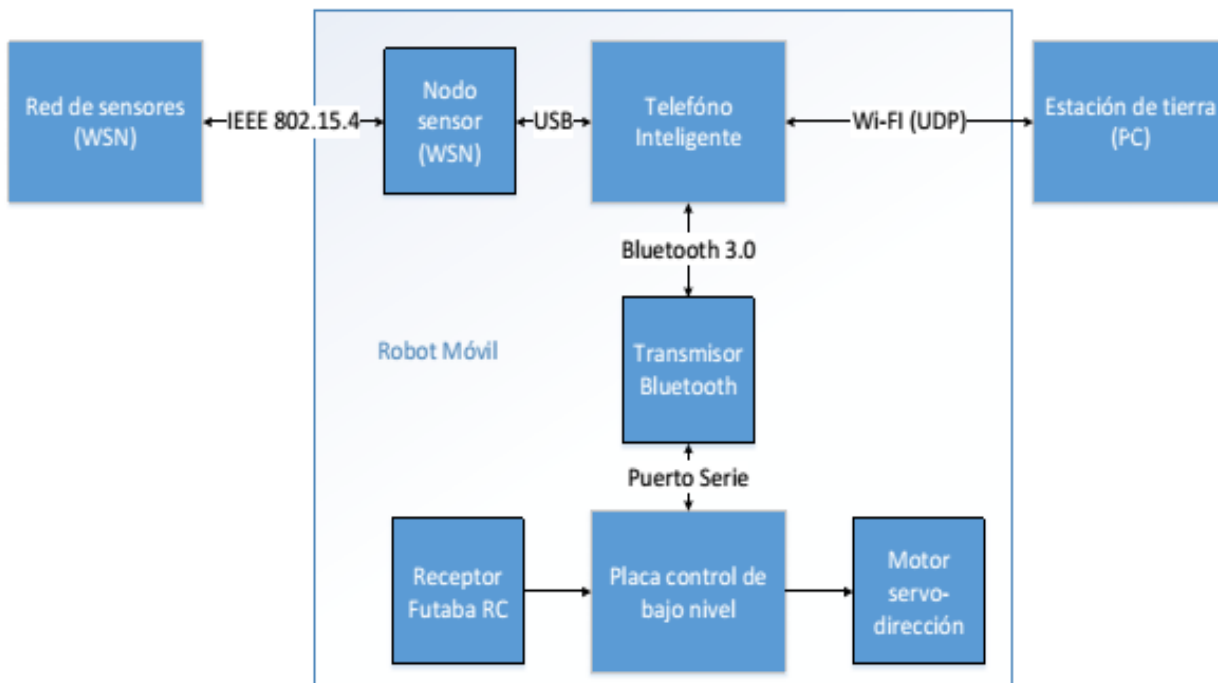


Figura 2.2-Esquema del sistema

3. DESARROLLO HARDWARE

3.1. Introducción

Tratadas ya las características que debe cumplir el robot, se describen en este capítulo las soluciones específicas alcanzadas para los elementos hardware del sistema.

Durante la descripción de las diferentes piezas se hará referencia a la parte delantera de las mismas como aquella más cercana al frontal del coche donde se encuentra el teléfono móvil, en sentido positivo según el eje del vehículo.

En el capítulo 4 se desarrollan las soluciones software.

3.2. Descripción General

Para llevar a cabo el sistema descrito en el capítulo anterior se ha partido de un vehículo radio-control modelo Slickrock 1/18th Rock Crawler (VTR01003) de Vaterra, la elección de este modelo se justifica en el apartado 3.3.1. Sobre este se ha montado mediante pasadores de aluminio una estructura en fibra de carbono de 1mm de espesor sobre cuya pieza superior se encuentran un tornillo de 5mm de diámetro que servirá para enroscar el enganche al helicóptero centrado en el centro de masas, que se sitúa a la mitad de distancia entre ruedas y ligeramente atrasado respecto al eje delantero, y el código gráfico que se fija en la parte más atrasada de la estructura. Seis piezas componen el frontal del robot que aloja el terminal del teléfono, un Samsung Galaxy SII, las uniones están realizadas en aluminio y han sido mecanizadas en el taller de la escuela.

Se han instalado un nuevo motor y servo de dirección, la alimentación original consistía en seis pilas AA y se ha sustituido por una batería recargable de dos celdas.

La placa de control de bajo nivel incluye un microcontrolador PIC, regulador de tensión, módem bluetooth y receptores de radiofrecuencia.

El robot incorpora un nodo sensor que forma parte de la red WSN.

3.3. Desarrollo mecánico

Como ya se ha mencionado el montaje parte del Slickrock de Vaterra, este ha sido elegido por estar concebido específicamente para un uso en terrenos de difícil acceso que incluyen elevadas pendientes, arena y zonas con agua. Las características que le permiten cumplir con esta función son:

- Amplio giro de las ruedas directrices (30 grados).
- Robustez física aportada por ser el eje de la transmisión y los refuerzos de aluminio.
- Ruedas grandes en proporción a su tamaño y aptas para todo terreno.
- Amortiguadores de aceite.
- Consta de una carcasa de plástico que aloja el engrane entre motor y transmisión protegiéndolos del entorno.

El vehículo original es el que puede verse en la figura 3.1.



Figura 3.1-Slickrock de Vaterra

De este vehículo radio-control se han eliminado casi todos los elementos ornamentales, ambos motores, receptor de radiofrecuencia y regulador de tensión. Dejando así espacio para el montaje del resto de la estructura y la inclusión de la nueva electrónica, pero manteniendo las piezas laterales del chasis que sirven de soporte para la estructura añadida. Se muestra en la figura 3.2 el

vehículo desprovisto de estos componentes y con el nuevo regulador y motor conectados.

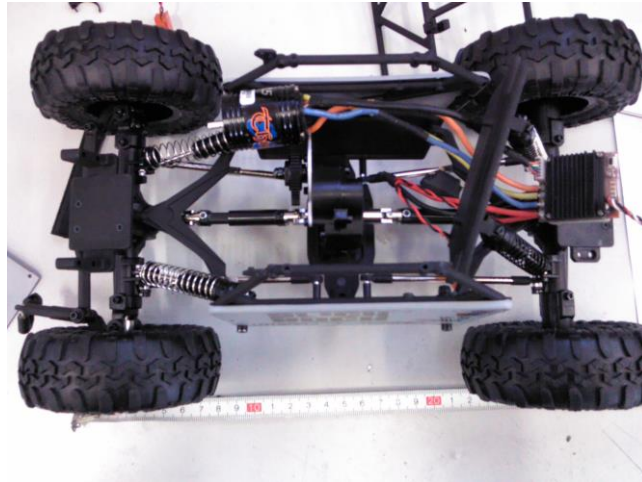


Figura 3.2-Estructura básica del Slickrock

3.3.1. Estructura Añadida

Para completar la estructura del robot se han diseñado, fabricado, y montado sobre el Slickrock una serie de piezas que permiten cumplir los requisitos hardware descritos en el capítulo 2. De entre estos se puede apreciar que la limitación de peso es especialmente relevante en la solución escogida, abogando en todo momento por materiales ligeros y piezas de la menor masa posible que se traduce en una máxima reducción de superficie en el diseño. Las piezas que componen esta estructura y sus características se listan a continuación.

- Base: esta pieza sirve de puente entre vehículo original y estructura añadida. Es un rectángulo de fibra de carbono con las esquinas rebajadas que encaja de forma ajustada entre las piezas laterales del chasis del crawler.

Cumple una doble función, la ya mencionada y además aísla sin necesidad de más elementos la electrónica de posibles impactos y salpicaduras ya que la placa de bajo nivel se colocará encima. Su vista superior aparece en la figura 3.3.

Los orificios que se aprecian en la figura 3.3 sirven para fijar la placa de control de bajo nivel. No aparecen en esta vista los orificios para los separadores, esto se debe a que no se incluyeron en el diseño sino que se practicaron en el momento del montaje.

Al tratarse de una pieza de geometría sencilla se realizó en el laboratorio a partir de una plancha

de fibra de carbono empleando una segueta de arco provista de un pelo de un calibre reducido. La inhalación de la viruta desprendida durante el corte es peligrosa por lo que se usó una mascarilla provista de un filtro.

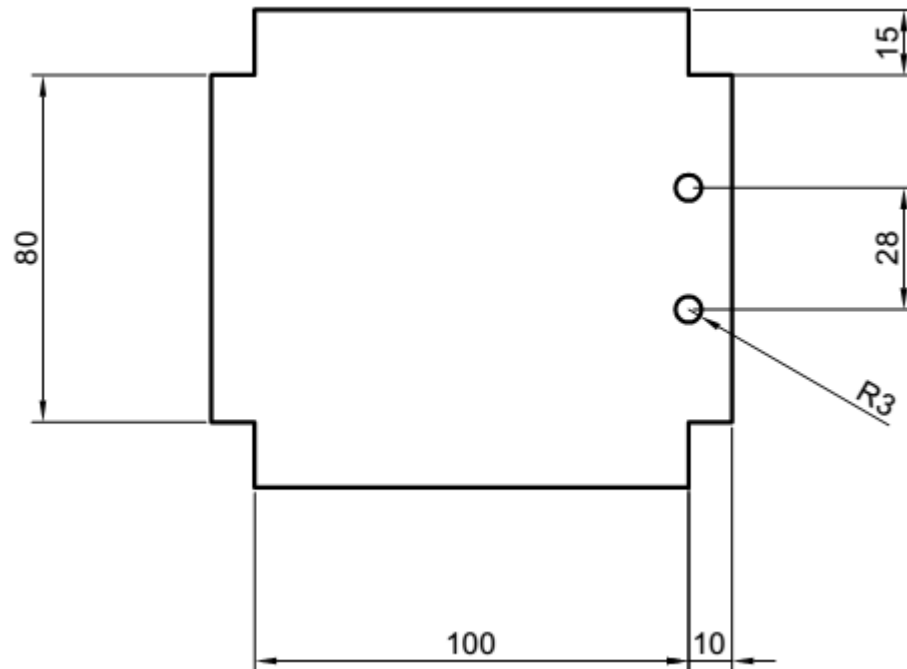


Figura 3.3-Base de la estructura

- Uniones de aluminio: bajo la base y en contacto directo se sitúan una en el frente y otra en la parte posterior dos piezas mecanizadas en aluminio diseñadas para servir de unión entre diferentes partes, las figuras 3.4 y 3.5 muestran sus vistas superiores respectivamente. Ambas tienen practicados orificios pasantes en su cara superior donde se fijarán los pasadores mediante tornillos. En sus laterales otros orificios pasantes de menor diámetro sirven para unir los amortiguadores al cuerpo del robot.

La pieza posterior además sirve para sujetar dos varillas de plástico que sustentan la pieza superior de la estructura, en adelante techo, por su extremo posterior ya que su longitud es considerablemente mayor que la del cuerpo del vehículo y flexiona ante el peso del código gráfico.

Ambas piezas se han mecanizado en el taller a partir de un lingote de aluminio, se ha utilizado para ello una sierra eléctrica para obtener tomos del espesor adecuado (5 y 3 mm) y una fresadora para dar forma a las piezas. El resultado final si bien cumple con sus funciones tiene un acabado que dista del diseño, esto se debe a la dificultad en el empleo de estas herramientas

y la inexperiencia en el uso de las mismas.

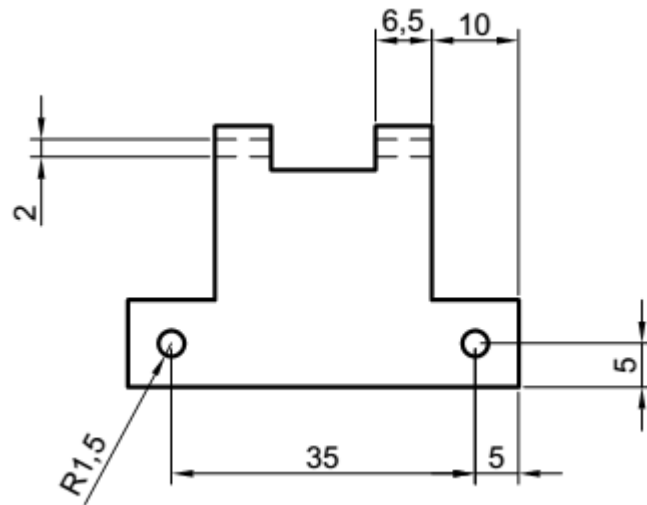


Figura 3.4-Unión delantera

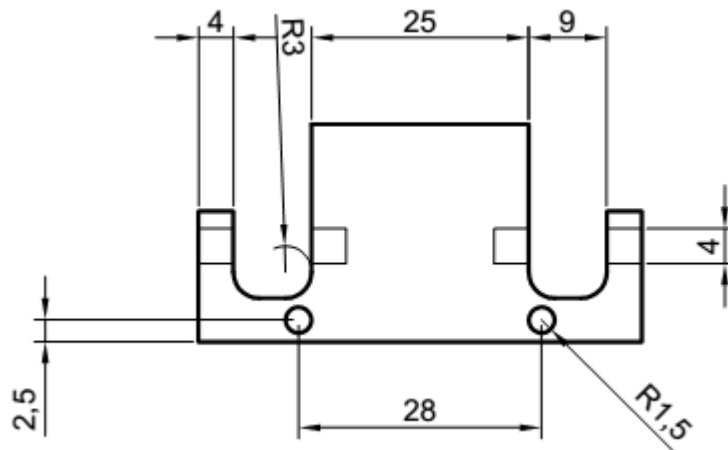


Figura 3.5-Unión trasera

- Techo: se apoya sobre cuatro pasadores asentados en las piezas descritas antes. Se trata de una pieza de fibra de carbono de 1mm de espesor que como puede observarse en la figura 3.6 mide 35 cm de largo con un ancho inicial de 6cm que aumenta en su parte posterior pasando a medir 11 cm, es esta parte la que debe sostener el código gráfico.

En su parte anterior tiene practicados cuatro agujeros simétricos entorno a otro mayor, estos servirán para atornillar un cubo de aluminio que a su vez mantiene fijo el tornillo en el que se enrosca el enganche para el helicóptero que pasa a través del quinto orificio centrado respecto

a los anteriores.

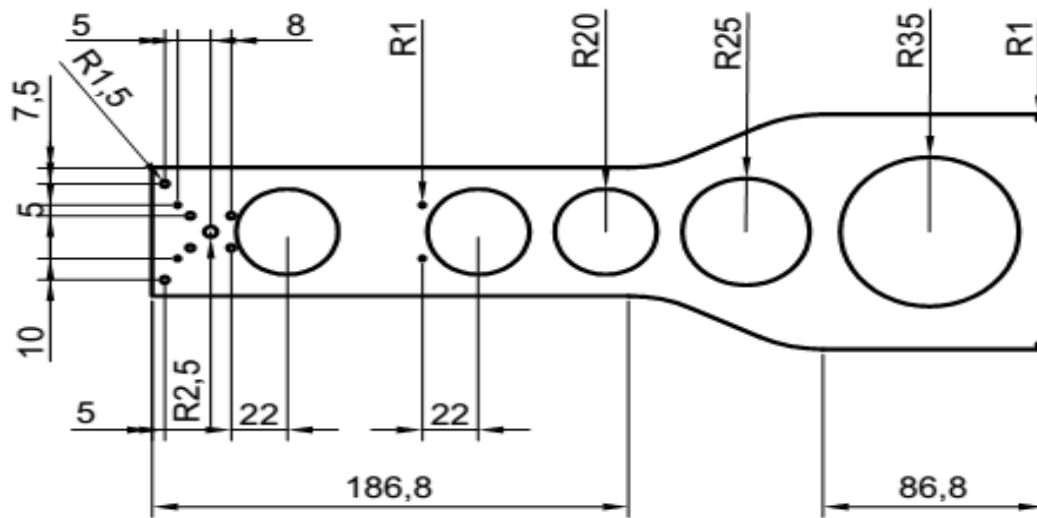


Figura 3.6-Techo

Esta pieza se ha fabricado por encargo.

- Frontal: la estructura delantera del vehículo no tiene otra función que la de mantener el teléfono móvil en la posición más adelantada del robot y perpendicular al plano de tierra. Consta de seis piezas cuyas vistas superiores se representan en la figura 3.7. Los tipos de pieza que se muestran en la figura 3.7.a) y b) se repiten, existiendo dos piezas de cada uno de ellos.

Las dos piezas del tipo a) se fijan al resto de la estructura mediante los orificios practicados en su lado recto, uniéndose en su parte superior al techo y en la inferior a la unión delantera de la base, quedando las dos piezas paralelas entre sí. Las dos piezas del tipo b) se unen a las anteriores en los orificios que se muestran en su vista, disponiéndose dos separadores de aluminio transversalmente que alojan los tornillos y aportan solidez a la estructura.

Las piezas c) y d) forman el alojamiento del teléfono y se unen entre sí mediante seis pasadores atornillados en los orificios dispuestos en sus bordes. El acoplamiento con el resto de la estructura se realiza a través de las ranuras realizadas para encajar sin juego con los salientes de la pieza anterior.

Se observa como la última la pieza consiste en un marco que mantiene el teléfono sujeto pero permite el acceso a su pantalla y la toma de imágenes mediante la cámara frontal.

La fabricación de estas piezas se encargó, sin embargo un error en el pedido resultó en la

necesidad de fabricar en el laboratorio la pieza intermedia que se realizó finalmente mediante impresión en tres dimensiones en un material plástico. El resultado final es el de la imagen que se muestra en la figura 3.8.

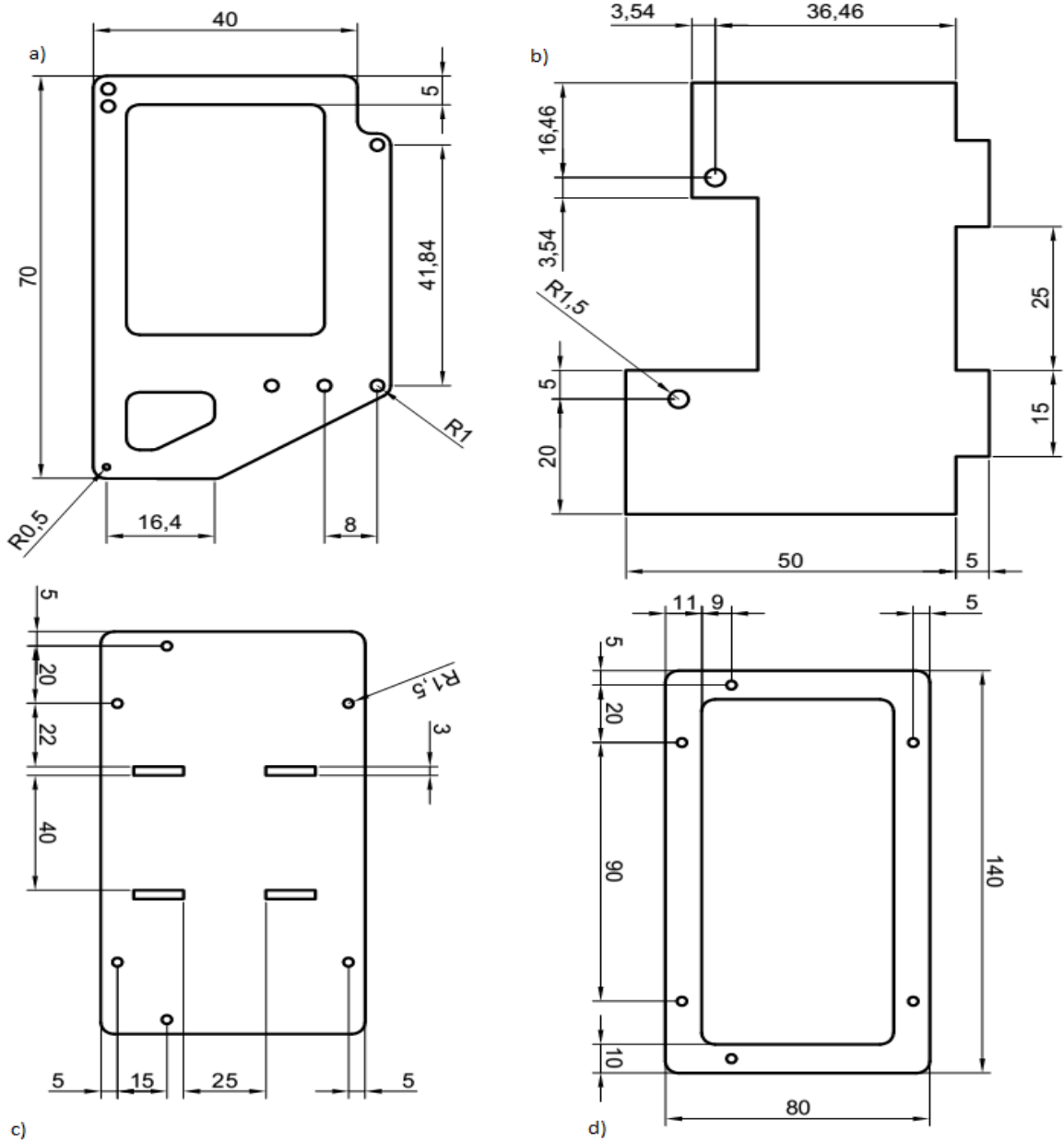


Figura 3.7–Frontal

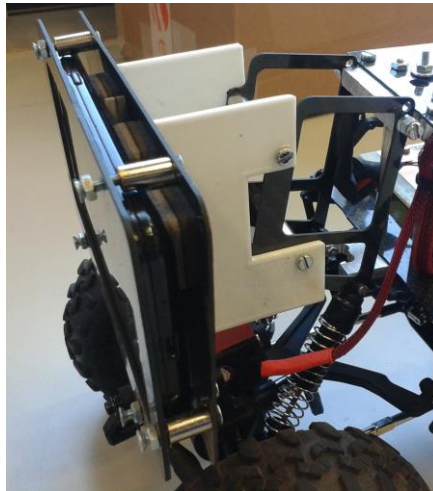


Figura 3.8-Frontal montado

3.3.2. Motores

Como se ha mencionado anteriormente los motores originales no eran aptos para el robot, su principal falta es el insuficiente par que desarrollan sumado a una precisión insuficiente del servo de dirección. Por ello se han sustituido estos motores por otros nuevos que cumplen con los requisitos del proyecto.

- Servo de dirección: Servo direccional HSR-5980 de control digital de respuesta rápida, es un motor sin núcleo y utiliza engranajes de acero, la figura 3.9 corresponde a este servomotor.

Se ha elegido este motor por su elevado par, esto es necesario para fijar la dirección de las ruedas pues estas no solo soportan el peso del robot si no que su giro puede verse dificultado por el terreno por lo que para el giro de estas han de superarse fuerzas relevantes y en un tiempo lo menor posible para que el error introducido en el control sea reducido. Otra de sus características principales es su elevada precisión, su durabilidad, aportada por sus engranajes de acero reforzados por cojinetes de bolas que evitarán una ruptura en caso de verse sometido a fuerzas elevadas y su tamaño y pesos reducidos. Las especificaciones son las siguientes:

- Par: 30 Kg/cm a 7.2V o 24Kg/cm a 6V
- Velocidad: 0,17s/60° a 6 V, 0,14s/60° a 7.2V.
- Dimensiones: 40 x 20 x 37 mm.
- Peso: 68 g.



Figura 3.9-Servomotor HSR-5980

El servomotor se coloca por encima del eje delantero del vehículo conectando mediante un pequeño tornillo su eje al mecanismo de dirección que permite la transmisión del giro.

- Motor: *Mongoose crawler micro brushless system*, se trata de un sistema compuesto por un motor de corriente continua sin escobillas y un regulador de tensión que permite un control preciso del mismo. Está especialmente diseñado para el montaje de vehículos tipo crawler de escala 1/10 como el robot por lo que resulta un opción óptima.

Tiene un par muy elevado que se mantiene también a velocidades bajas donde otros podrían perder fuerza, su capacidad para cambiar la velocidad rápidamente incluso en el arranque permite obtener una respuesta rápida a las órdenes de control. En cuanto a la capacidad para controlar el motor, el sistema permite la lectura directa de velocidad sin necesidad de sensores adicionales, además el regulador de tensión admite órdenes en velocidad y como característica adicional permite conocer el estado de la batería. En la figura 3.10 aparecen motor y regulador cuyas especificaciones son:

- Alimentación de 4.8 a 10.8 V
- Tamaño: 29x24.3mm (regulador) 26Dx37.7Lmm(motor)
- Peso: 93.7 gramos
- 4400RPM/V



Figura 3.10-Motor y regulador de tensión

Con este motor instalado el robot es capaz de desarrollar una velocidad lineal de 5m/s

3.4. Electrónica del vehículo

Sobre la estructura que permite el movimiento del robot debe incorporarse una electrónica que permita su control y programación. Esta se compone de la placa de bajo nivel que abarca comunicaciones y control, nodo sensor de tecnología WSN y teléfono móvil, aunque a este último se dedica una sección aparte.

3.4.1. Placa de control de bajo nivel

El acceso inmediato a las funciones que permiten el movimiento del robot se realiza a través de la placa de control de bajo nivel. Esta debe cumplir con los requisitos mencionados en el capítulo 2, para ello cuenta con un microcontrolador PIC que tiene implementado un control proporcional integrador, este constituye el centro de la placa y es el encargado de gestionar el flujo de información desde el móvil a los actuadores y de estos al móvil.

Al mismo tiempo monitoriza el estado de la batería e incluye un receptor de radio que permite recibir órdenes de movimiento desde un mando radio-control en caso de fallo.

El diagrama de este flujo de información es el que se representa en la figura 3.11.

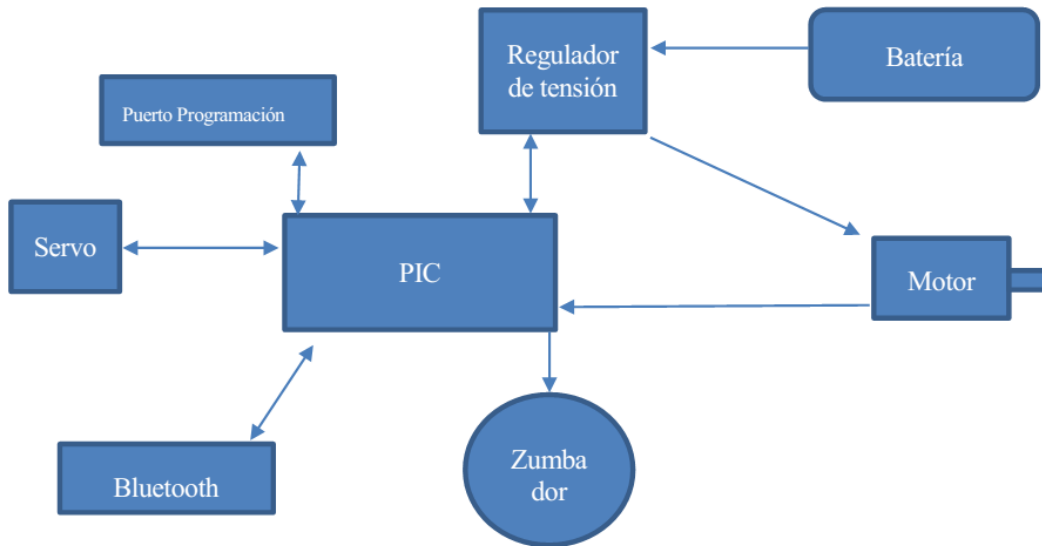


Figura 3.11-Flujo de información en la placa de bajo nivel

Los componentes de la placa, así como su función son los que siguen:

- Bluetooth, modelo BlueSMIRF WRL-10268, para la comunicación entre el teléfono inteligente y la placa de control. Esta comunicación consiste en un mensaje formado por la velocidad y el ángulo de giro de las ruedas y un código de seguridad para la comprobación. La figura 3.12 muestra el dispositivo.



Figura 3.12-Módem Bluetooth

Se ha elegido este modelo por permitir el envío de mensajes largos siendo su rango de 2400 a 115200 bytes por segundo y emitir una señal intensa que permite una transmisión fiable tanto en distancia como en integridad del mensaje, siendo esta última la característica que nos interesa ya que la distancia no es un aspecto relevante al estar emisor y receptor en el vehículo. También es de destacar su bajo consumo.

Especificaciones:

- Consumos de corriente en transmisión 65mA, recepción: 35mA.
 - Entradas/salidas con lógica de 3.3V o 5V (también RS-232).
 - Comunicación segura, encriptación de 128 bits.
 - Tamaño: 15mm x 43mm.
-
- Una alarma de tensión baja para la batería y una batería tipo LIPO de dos celdas (7,4V).

 - Receptor Futaba R6106 HFC sistema FASST 2.4 GHz de 6 canales y especialmente indicado para modelos con fuselaje de carbono como el del robot. Este modelo aparece en la figura 3.13.

En el caso de pérdida de señal de Bluetooth, como medida de seguridad, el receptor sirve para recibir órdenes de control desde un mando de radio control para su recuperación.

- Canales: 6
- Tensión: 3,3 - 8,5 V
- Dimensiones: 22 x 39 x 12 mm.
- Peso: 7 g.



Figura 3.13-Receptor radio

- Microprocesador PIC que constituye el centro de la placa de control, tal y como se apreciaba en la figura 3.14 gestiona la información proveniente de los diferentes elementos, permitiendo el control. Está programado para recibir dos posibles entradas (Bluetooth y radio control), el microprocesador da prioridad al radio control si se reciben ambas.

Envía la orden de control al servo del robot devolviendo al teléfono inteligente la velocidad, ángulo de giro y batería reales a través del transmisor bluetooth, al que se conecta por su puerto serie.

Este recibe la orden de control ya sea del teléfono a través del puerto serie del bluetooth o del receptor de radio, que tiene prioridad sobre el primero, y envía al servo de dirección el ángulo deseado y al regulador de tensión la velocidad a fijar. De ambos motores recibe la lectura de posición y velocidad y la devuelve al teléfono móvil para que este realice los cálculos necesarios para el control de alto nivel. Recibe también del regulador información sobre el estado de la batería, activando el zumbador en caso de que la carga se esté agotando.

Definidos todos los elementos de la placa ya solo queda elaborarla, esta se realizó sobre una placa para circuitos impresos de fibra de vidrio de doble cara y fotosensible. Comenzando con la impresión del circuito diseñado en un papel de acetato, este se coloca sobre las caras de la placa una vez retirado el material que las protege de la luz y se introduce el conjunto en una máquina provista de tubos fluorescentes que someten la placa a luz ultravioleta quedando el circuito dibujado sobre la placa. Después se ataca la placa con un baño ácido que provoca el desprendimiento de la capa de cobre en aquellas zonas que no constituyen las pistas del circuito lo que da como resultado el circuito impreso en cobre. Obtenido el circuito se procede a perforar la placa con una broca de 1mm de diámetro lo que permitirá alojar los componentes del circuito y conectar las dos caras de la placa. El último paso es soldar uno a uno los componentes mediante un soldador y estaño fino, el resultado final es el que se muestra en la figura 3.

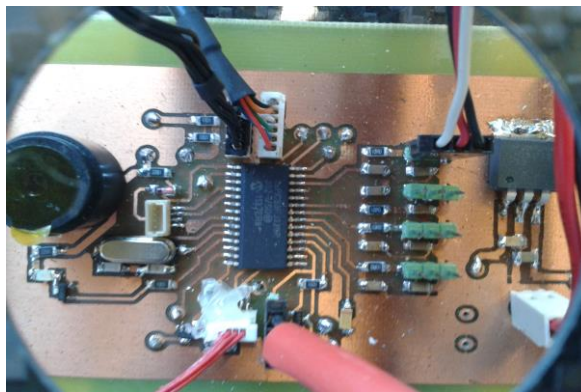


Figura 3.14-Placa de control de bajo nivel

3.4.2. Nodo sensor

Un nodo sensor, es un dispositivo en una red de sensores inalámbrica que es capaz de realizar algún tipo de procesamiento, recopilación de información sensorial y comunicación con otros nodos conectados en la red. En este proyecto definiremos nodos estáticos y nodo móvil. Los nodos estáticos estarán desplegados formando una malla en un área. El nodo móvil irá incorporado en el robot y conectado al teléfono a través del puerto USB 2.0. Este nodo será utilizado en la recepción de mensajes de la red para la localización como se explicará en el capítulo 4.

Descripción del nodo utilizado: Los nodos utilizados son los llamados Telos B que aparece en la figura 3.15. Un Telos B es un módulo inalámbrico de muy baja potencia y consumo para ser usado en redes de sensores, monitorizando aplicaciones.

Características de este modelo Telos Revision B:

- Interoperabilidad con otras unidades con el estándar IEEE 802.15.4.
- Microcontrolador de 8MHz MSP430 (10k RAM, 48K Flash).
- Rango de la antena integrada: 50m en interiores, 100m en exteriores.
- Sensores integrados de humedad, temperatura y luminosidad.
- Consumo ultra bajo.
- Rápida activación desde el estado de hibernación.
- Programación y recolección de datos a través del USB.
- Implementación de comunicación y redes malladas a través del soporte de TinyOS.



Figura 3.15-Nodo sensor TelosB

3.5. Teléfono inteligente

El control de alto nivel del vehículo lo realiza un teléfono inteligente Samsung Galaxy SII como el de la figura 3.16, este ha sido elegido para solucionar las restricciones de comunicación y localización. La restricción de comunicación no nos permite utilizar el estándar Wifi de 2,4 GHz por la posible interferencia en el control del helicóptero, así que utilizara su capacidad de conectarse a una red de 5GHz de frecuencia. Para la restricción de localización no es posible encontrar la posición del robot con el error máximo que se nos propone con el sensor GPS.

Será necesario que el teléfono inteligente posea USB Host para conectar al nodo móvil de comunicación que permite emplear la red de sensores para una localización más precisa. Las principales características por las que se ha elegido este teléfono inteligente son:

- Plataforma de desarrollo Android basad a en Java.
- Tamaño y peso: 125,3 x 66,1 x 8,49 mm y 117 g
- Bluetooth 3.0
- Wifi de dos frecuencias 5 y 2,4 GHz
- USB Host
- A-GPS
- Giróscopos y acelerómetros incorporados



Figura 3.16-Samsung Galaxy SII

3.6. Comunicaciones intravehículo

Como se ha visto en los anteriores apartados el robot consta de diferentes sistemas de procesamiento de información. El nodo sensor que se comunica con la red WSN, la placa de control de bajo nivel que controla la actuación de los motores y la recepción de órdenes por radio-control y el teléfono inteligente que se encarga de las funciones de alto nivel.

Se hace por lo tanto necesaria la comunicación entre estos elementos para el correcto funcionamiento del robot, este esquema de comunicaciones se introdujo ya en las conclusiones del capítulo 2 quedando ilustrado en el esquema de la figura 2.2.

El teléfono utiliza el bluetooth para mandar las órdenes a la placa de control de manera inalámbrica, que devolverá por la misma vía un mensaje compuesto por ángulo de giro, velocidad y estado de la batería reales, la placa se conecta al modem bluetooth por su puerto serie. A su vez se conecta al nodo sensor a través del puerto USB 2.0.

3.7. Conclusiones

El Resultado es un vehículo de 44cm de largo 17cm de ancho y 20cm de altura (desde la rueda al tornillo para el enganche del helicóptero) con capacidad para desplazarse por terrenos accidentados y presencia de agua a una velocidad máxima de 5 m/s con un ángulo de orientación que va desde -15° a 15° . Siendo desplegado en el terreno por un helicóptero desde una altura de 2m.

Está provisto de la electrónica necesaria para implementar un control de alto nivel que permita al robot funcionar de manera autónoma y comunicarse con otros dispositivos a través de Wifi y radio.

Consta de una cámara frontal así como un nodo sensor para la comunicación con una red WSN que permitirán recabar información del medio y es capaz de enviar esta información a una estación de tierra para su tratamiento.

En caso de fallo consta de un receptor de radiofrecuencia para la recuperación del vehículo mediante un radio-control.

4 DESARROLLO SOFTWARE

4.1 Introducción

Este capítulo aborda el trabajo realizado en los aspectos de localización y seguimiento de trayectorias del robot, presentando la teoría en la que estos se basan para después exponer su aplicación al proyecto.

4.2. Modelo

Como ya se refleja en el capítulo 2 la configuración mecánica del robot responde a la configuración Ackerman, válida para la mayoría de vehículos con cuatro ruedas en dos ejes paralelos.

Sin embargo el empleo de esta en funciones de control automático es una tarea muy compleja ya que no existen en general expresiones cinemáticas inversas de la configuración Ackerman que permitan establecer un buen modelo matemático, debido a que cada rueda posee una velocidad lineal ligeramente diferente y describe un arco de diferente radio. La dificultad y coste computacional que esto implica hace que la estrategia de control más apropiada sea optar por un modelo más simple como el de la bicicleta en el que sólo existe una rueda directriz y un eje. En (Ollero, 2001) [1] puede encontrarse una justificación más extensa al respecto.

Aunque esto introduce errores, la experiencia demuestra que es posible obtener un buen control del vehículo, especialmente para los de reducido tamaño como el robot en los que la separación entre ruedas es escasa y el error introducido al considerar una sola rueda situada en el eje longitudinal del vehículo no supone un gran problema y trabajando a velocidades bajas con ángulos de giro limitados.

4.2.1. Modelo de la bicicleta

Se trata de un modelo con dos ruedas situadas sobre el mismo eje en el que la rueda delantera es directriz y la trasera fija como puede verse en la figura 4.1. Las variables de control suelen ser dos,

el ángulo de direccionamiento (ángulo formado entre el eje y el plano de la rueda) y la velocidad de giro de las ruedas (directamente relacionada con la de avance a través del radio de las ruedas).

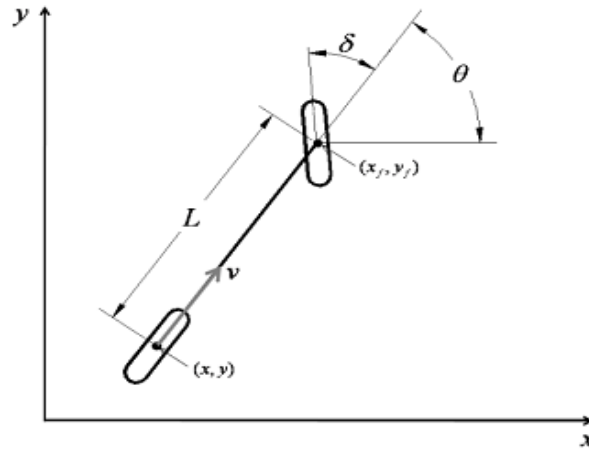


Figura 4.1-Modelo de la bicicleta

Las ecuaciones que lo gobiernan varían según el punto del robot que decidamos seguir, en (Shin y Singh, 1990) [2] se recomienda que este sea el centro de la rueda trasera por las siguientes razones:

- El ángulo de giro necesario se relaciona geoméricamente con la curva a seguir independientemente de la velocidad como se ilustra en la figura 4.2 Y la velocidad lineal de la rueda trasera se relaciona directamente con la angular a través de su radio.
- El mínimo radio de giro corresponde con el máximo ángulo de direccionamiento.

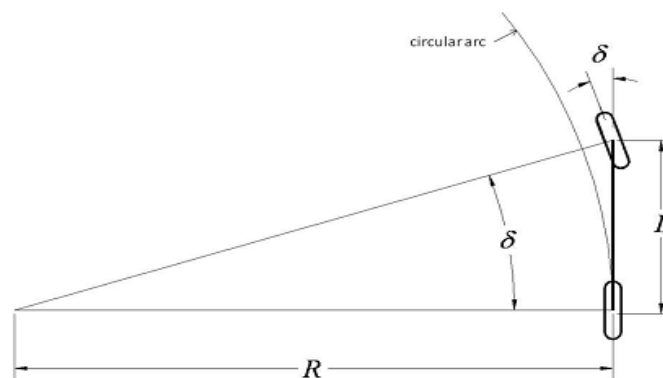


Figura 4.2- Relación ángulo de la rueda/longitud del eje

- La rueda delantera sigue la tangente al camino, haciendo esta posición óptima para el emplazamiento de sensores (especialmente cámaras).

Como inconveniente cabe destacar que se requiere que la curvatura del camino sea continua para poder seguirla sin errores dada una velocidad no nula.

Supuesto entonces el centro de guiado en el centro de la rueda trasera estas ecuaciones resultan:

$$\begin{aligned} X' &= -V \operatorname{sen}\theta \\ Y' &= V \operatorname{cos}\theta \\ \theta' &= V\gamma \end{aligned} \quad (4.1)$$

Dónde γ es la curvatura y se relaciona con el ángulo de direccionamiento según la expresión:

$$\gamma = (\operatorname{tag}\delta) / L \quad (4.2)$$

Y se define como la inversa del radio de giro que a su vez se refiere al radio de la circunferencia que durante un intervalo de control reducido recorre el punto de guiado del robot entre dos puntos del camino.

La velocidad lineal se obtiene como:

$$V = w * r \quad (4.3)$$

Siendo w la velocidad de giro de la rueda y r su radio.

4.3. Odometría y posicionamiento

La posición del robot va a estimarse por dos procedimientos, la integración temporal de las ecuaciones 4.1 y la localización a través de los nodos de la red WSN mediante la potencia de señal recibida, *received signal strength index* (RSSI) en inglés.

4.3.1. Odometría

A través de la orientación de las ruedas directrices marcada por el servomotor y la velocidad de giro que establece el motor durante el intervalo de control se pueden calcular de forma directa los incrementos en la posición según las ecuaciones 4.1 y conociendo la posición anterior se determina la actual. La precisión de este método dependerá de la correcta lectura de los parámetros así como del deslizamiento entre las ruedas y el terreno y de que los actuadores sean capaces de mantener durante el intervalo de control los valores de velocidad y ángulo ya que las lecturas no serán continuas sino discretas.

Se ha de tener en cuenta que la posición deberá ser calculada durante el desplazamiento y que los cambios en el ángulo de direccionamiento no serán inmediatos por lo que deberá considerarse la dinámica del actuador que si se trata como un sistema de primer orden resulta en un retardo en la consecución de la orientación requerida, añadiéndose a las ecuaciones anteriores la que sigue:

$$\gamma' = -\frac{\gamma_0}{\tau} + \frac{K}{\tau} * \gamma_f \quad (4.4)$$

Por lo que durante un tiempo τ al comienzo del intervalo de control la curvatura del vehículo deberá calcularse según la ecuación 4.4 pudiéndose considerar constante a partir de este tiempo y hasta el final del intervalo.

Las integrales que se han resolver para la estimación de la posición son:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + \int_t^{t+T} -V \sin \theta \\ Y &= Y_0 + \int_t^{t+T} V \cos \theta \\ \theta &= \theta_0 + \int_t^{t+T} -V * \gamma \\ \gamma &= \gamma_0 + \int_t^{t+\tau} \left(-\frac{\gamma_0}{\tau} + \frac{K}{\tau} * \gamma_f \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Como el procesador del móvil trabaja con instantes finitos de tiempo y teniendo en cuenta lo expuesto sobre el retraso en la actuación, el proceso de cálculo se basa en obtener τ /(precisión del reloj) veces el valor de la curvatura, con esta el cambio en la orientación y finalmente los incrementos en las coordenadas X e Y. El incremento restante corresponde a una curvatura constante y puede calcularse multiplicando las ecuaciones 4.1 por (T- τ).

El proceso descrito, suponiendo conocida la posición y curvatura anteriores, queda reflejado en el pseudocódigo de la figura 4.3.

```
Hacer  $\tau$ /precisión-reloj veces
    Curvatura=curvatura+  $(-\frac{\gamma_0}{\tau} + \frac{K}{\tau} * \gamma_f) * \text{precisión-reloj}$ ;
    Orientación= orientación + V * curvatura * precisión-reloj;
    X= X - V * sen(orientación) * precisión-reloj;
    Y= Y + V * cos(orientación) * precisión-reloj;
Fin

Orientación= orientación + V * curvatura * (T- $\tau$ );
X= X - V * sen(orientación) * (T- $\tau$ );
Y= Y + V * cos(orientación) * (T- $\tau$ );
```

Figura 4.3-Pseudocódigo Odometría

4.3.2. Localización por RSSI

Estos métodos se basan en obtener de cada uno de los nodos de la red una medida de la potencia de la señal que recibe el nodo móvil, permitiendo estimar la posición del robot a partir de esta información y las posiciones de los nodos fijos.

4.3.2.1 Descripción del método

La localización por potencia de señal recibida se basa en la relación entre este parámetro de la señal y la distancia entre emisor y receptor. La primera se obtiene de forma inmediata ya que es un dato que forma parte del paquete de información enviado por los nodos TelosB empleados en nuestra red WSN, la distancia por otra parte será calculada en función del modelo de propagación de la onda de radio, [3].

Los nodos de la red emplean, como se menciona en el capítulo 3, el sistema operativo TinyOs, especialmente desarrollado para funciones de comunicación (empleando el estándar de comunicación IEEE 802.15.4.) en redes distribuidas de bajo coste en las que prima el bajo consumo (por ello está basado en la ejecución por eventos permaneciendo los nodos inactivos la mayor parte del tiempo). Estas funciones incluyen aquellas que permiten conocer el valor de la RSSI asociado a la señal, este se obtiene a partir de los últimos ocho bits del paquete recibido y consiste en una medida en decibelios, con referencia a 1mW, cuyo valor va desde 0 a -100 dB e indica la atenuación en la intensidad de la onda durante su trayecto hasta el receptor.

La relación entre esta atenuación y la distancia no es tan sencilla y contiene numerosas fuentes de error, desde difracciones y reflexiones debidas al terreno y los obstáculos a interferencias de otras ondas.

Idealmente una onda de radio se propaga por igual en todas direcciones describiendo una esfera con centro el emisor, y la atenuación podría relacionarse cuadráticamente con la distancia, sin embargo los dispositivos reales de aplicación a nuestro problema poseen antenas denominadas omnidireccionales que emiten describiendo un toroide como se indica en (, figura 4.4, por lo que la aproximación cuadrática sólo es válida en planos de altura similar al del emisor. Esto complicaría el empleo de algoritmos basados en triangulación o trilateración.

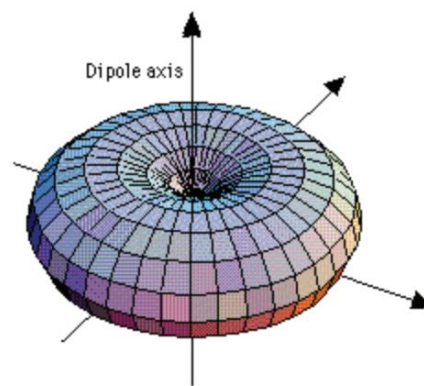


Figura 4.4-Emisión de antenas omnidireccionales

El modelo empleado con anterioridad, (Castañé, 2014) [4], (Torres, 2012) [5], en las aplicaciones desarrolladas por el Grupo de Robótica, Visión y Control de la Universidad de Sevilla es el de la ecuación 4.6 en la que D es la distancia al emisor y A y B son parámetros del sistema calculadas en una etapa previa de entrenamiento.

$$\text{RSSI} = -A \cdot \log(D) + B \quad (4.6)$$

La posición del robot se calculará a partir de las distancias obtenidas a cada nodo como un promedio de las posiciones de estos según la ecuación 4.7.

$$L = \frac{\sum_{j=1}^n (w_j L_j)}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (4.7)$$

En la que L_j es la posición del nodo j y w_j son los pesos de cada nodo que dependen de la distancia en la forma expresada en la ecuación 4.8 en la que p es un factor que modifica la importancia de la distancia, así un valor elevado de p provoca que los nodos más cercanos influyan en mayor medida en la posición.

$$w_j = \frac{1}{(D_j)^p} \quad (4.8)$$

Se trata de un método que presenta como ya se ha mencionado las ventajas de requerir una infraestructura reducida y una potencia de cálculo moderada sin embargo resulta muy difícil librarse de los errores intrínsecos dada la complejidad de su modelado.

4.3.2.2 Aplicación al proyecto

La aplicación de esta técnica al proyecto comienza al mandar el robot a todos los nodos un mensaje solicitando que estos envíen su RSSI, obtenidas estas se aplica la ecuación 4.6 para todos los mensajes válidos recibidos generando un vector de distancias a los nodos.

Se considerarán válidos aquellos mensajes recibidos cuya RSSI se encuentre por encima de los 80dB negativos, esto se debe a que por debajo de este valor la señal es muy débil y suele contener un error elevado.

Después se calculan las coordenadas (x,y) del robot según la ecuación 4.7 aplicándola por separado a ambas mediante un bucle que recorre el vector distancias antes calculado. Si no existieran medidas válidas se indica mediante el valor NaN (*not a number*) para permitir actuar en consecuencia. Estos pasos se traducen en el pseudocódigo de la figura 4.5

Esta sería la aplicación más básica para la localización, sin embargo al ser la probabilidad de error elevada conviene calcular la posición para más de un instante y comparar los valores obtenidos descartando aquellos que difieran significativamente de los demás, esto tiene el inconveniente de un mayor tiempo de cálculo y consumo.

```

Para todos los nodos
  Si RSSI distinto de 0 y menor que -80
    Contador medidas validas+1
    D(nodo)= exp((Medidas(j,k)-B) ./A)
    w=1/(D(l,k)^p)
    Numeradorx=numeradorx+w*Xnodo
    Numeradory=numeradory+w*Ynodo
    Denominador=denominador+w
  Fin
Si contador medidas validas>0
  Xrobot=numeradorx/denominador
  Yrobot=numeradory/denominador
Fin
En caso contrario
  Posicion=NAN
fin
Fin

```

Figura 4.5-Pseudocódigo RSSI

4.4. Seguimiento de trayectorias

Un aspecto fundamental en aplicaciones de robótica móvil es desarrollar funciones que permiten el guiado autónomo del vehículo, reduciendo el nivel de intervención humana.

Para esto existen diversas técnicas para diferentes escenarios, para este caso se supondrá que la trayectoria a seguir ha sido generada con anterioridad ya sea por otras aplicaciones en función de la posición final a alcanzar y el mapa del entorno o bien dada por un operador en función de varios puntos del entorno por los que se desea pasar.

El problema a resolver es por tanto el de calcular la acción que deben desarrollar los actuadores (velocidad y ángulo de giro) para llevar el robot desde una posición (x, y,) inicial a otra final siendo la diferencia entre esta y punto objetivo del mapa nula, además se debe buscar un comportamiento estable y una actuación mínima.

El esquema de control es el de la figura 4.6 empleado en (Ollero, 2001) [1], contiene dos bucles que para un vehículo Ackerman están fuertemente acoplados, uno en velocidad y otro en dirección en los que θ y γ representan la orientación y la curvatura respectivamente y V es la velocidad lineal, el subíndice r indica actuación deseada. En un primer momento a partir de la posición actual se

calculan las variables de control necesarias y se pide a los actuadores que las ejecuten, al no ser estos ni el entorno ideales entran en juego las dinámicas del vehículo y la posición final difiere de la deseada siendo necesario volver al primer punto.

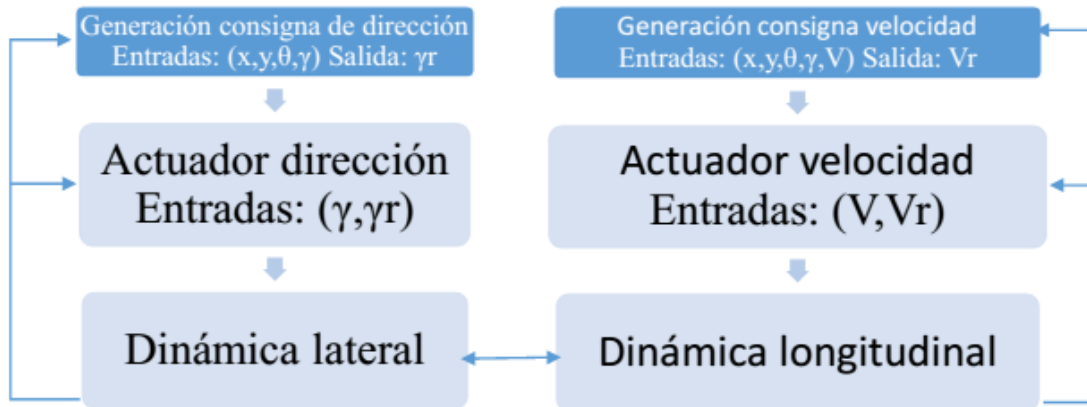


Figura 4.6-Esquema de control en dirección y velocidad

4.4.1. Seguimiento mediante persecución pura

El método empleado en este proyecto es el de persecución pura, al que es común referirse en inglés como *pure pursuit*, en el que se considera que durante el intervalo de control el vehículo se desplaza describiendo un arco de circunferencia (la curvatura se mantiene constante) con centro en el centro de giros (ecuación 2.1) que conecta la posición actual con la objetivo que se encuentra sobre el camino como puede verse en la figura 4.7.

El radio r necesario para alcanzar la posición objetivo se determina geoméricamente según la expresión:

$$r = \frac{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{2\Delta x} \quad (4.9)$$

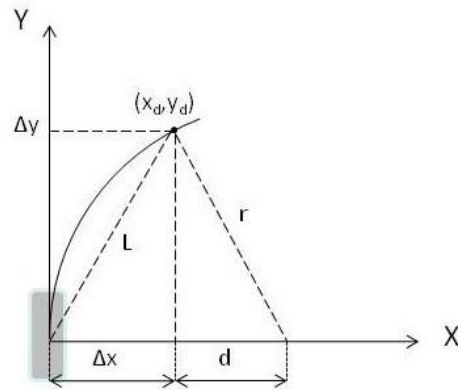


Figura 4.7-Seguimiento de caminos mediante persecución pura

Como se refleja al comienzo del capítulo el radio es la inversa de la curvatura la cual a su vez se relaciona con el ángulo de direccionamiento según la ecuación 4.2 por lo que este resulta:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{-2\Delta x}{L^2} * l \right) \quad (4.10)$$

Aquí L es la distancia al objetivo y l la longitud del vehículo, el signo negativo que aparece en la expresión indica el sentido de giro.

Se ha decidido emplear este método por su sencillez de aplicación y porque es posible conseguir muy buenos resultados si se consideran adecuadamente sus parámetros y se incluyen las dinámicas de los actuadores.

4.4.2. Función desarrollada

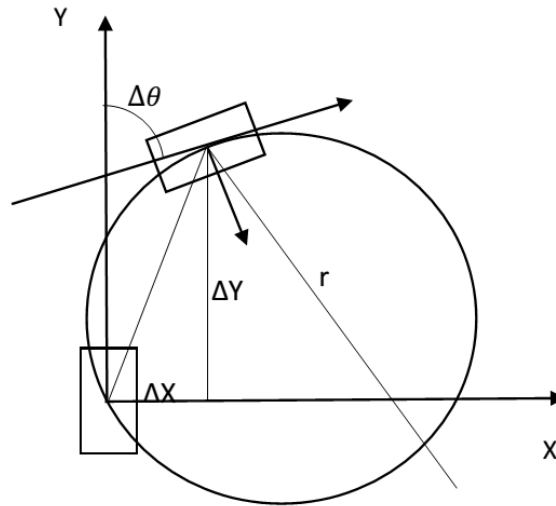


Figura 4.8-Obtención geométrica de $\Delta\theta$

4.5. Conclusiones

La configuración Ackerman se ha aproximado a la de la bicicleta lo que permite disponer de un modelo, ecuaciones 4.1, que pese a introducir leves errores posibilita implementar técnicas de odometría (integración del modelo con las medidas de los actuadores) y el desarrollo de una función de seguimiento de trayectorias, persecución pura, basada en métodos geométricos.

Para la localización se aplicará además el método basado en medidas RSSI posible gracias a la red de sensores TelosB distribuidos en el entorno, este método se basa en el modelo dado por la ecuación 4.6 del decaimiento en la potencia de la señal de radio emitida por estos nodos en función de la distancia.

5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los experimentos realizados al sistema, tanto a la plataforma hardware como a sus funciones software. El robot fue puesto a prueba en el parque natural de Doñana, entorno para el que está diseñado, en el momento de este experimento todos los aspectos hardware estaban desarrollados sin embargo las funciones software no han alcanzado su aplicación práctica por lo que sus pruebas se limitan al entorno de programación.

5.2. Plataforma Hardware

5.2.1. Descripción del experimento

Para el experimento se llevó el robot al parque natural de Doñana, en este entorno se sometió al vehículo a condiciones reales de funcionamiento. Durante la prueba el robot fue desplegado desde una altura aproximada de dos metros por un helicóptero autónomo en la zona elegida por el centro tecnológico DLR para el vuelo de este, desplazándose por dicha zona cuyo terreno tal y como estaba previsto era de firme irregular con presencia de vegetación a ras de suelo y guijarros, tras lo que fue recogido nuevamente por el helicóptero.

La figura 5.1 corresponde a la captura del vehículo por parte del helicóptero, en esta se puede apreciar como el helicóptero emplea su cámara frontal para identificar el código gráfico del vehículo y según la información contenida en este orienta su cono para coincidir con el centro de masas por donde lo elevará.



Figura 5.1-Recogida del vehículo por el helicóptero

5.2.2. Resultados del experimento

El comportamiento mecánico de la plataforma hardware resultó adecuado para el desempeño de sus tareas, esto queda reflejado en:

- Vuelo estable del helicóptero: por lo que quedan satisfechos los requisitos de peso máximo y centro de masas situado sobre el enganche. La figura 5.2 corresponde al vuelo del helicóptero.
- Recorrido sobre el terreno libre de trabas: las ruedas y el amortiguamiento han sido capaces de adaptarse al terreno y el motor ha aportado el par suficiente para el desplazamiento así como el servomotor para el giro de las ruedas.
- Correcto flujo de información: los elementos encargados de la comunicación han permitido el envío de órdenes desde la estación de tierra así como la recepción de los datos para la localización, las conexiones (cables y soldaduras) no se han visto comprometidas por el entorno por lo que los aspectos hardware del control han quedado cubiertos.



Figura 5.2-Vuelo del helicóptero portando al vehículo

5.3. Funciones Software

5.3.1. Localización mediante RSSI

Para la puesta a prueba y ajuste de los parámetros de esta función se ha recurrido a los datos obtenidos durante un experimento previo realizado en por el Grupo de Robótica, Visión y Control de la Universidad de Sevilla sobre el modelo anterior del vehículo.

Dicho experimento se realizó en los terrenos del Parque del Alamillo en Sevilla cuyo firme es de características similares al de Doñana, se desplegaron veintiún nodos separados dos metros entre sí siguiendo un esquema rectangular que cubría 48 metros cuadrados. Una vez desplegados se llevó el robot a posiciones fijas en las que se midieron las RSSI de los nodos, realizando mediciones en 827 instantes. En la figura 5.3 Se representan los nodos y la trayectoria seguida.

Un primer problema aparece al saturar el nodo móvil siendo incapaz de registrar todos los mensajes recibidos perdiendo por lo tanto información.

Con las mediciones mencionadas se han calculado las posiciones estimadas para todos los instantes comparándolas con las posiciones reales del robot.

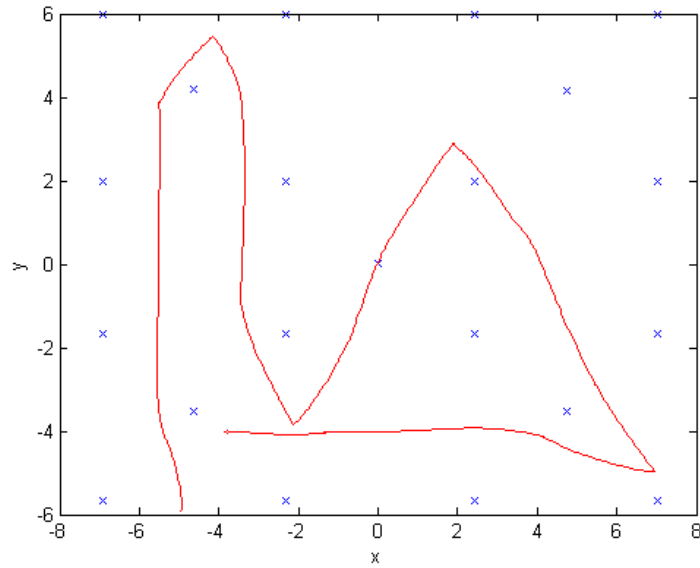


Figura 5.3-Posiciones de los nodos y el robot

En una primera fase de calibración los resultados se han usado para obtener el valor óptimo del parámetro 'p' que otorga mayor o menor relevancia a la distancia entre los nodos fijos y el móvil en el cálculo de la posición, la relación entre este valor y el error medio puede verse en la gráfica de la figura 5.4.

Así se ha llegado al valor de 2.25 para el que el error medio es de 1.252. Si bien este es un error considerable para aplicaciones de seguimiento de trayectorias donde deberá combinarse este método con la odometría y aplicarse filtros estadísticos, cumple los requisitos de localización para ser usado en la coordinación entre vehículo y helicóptero donde la restricción en la precisión es de dos metros.

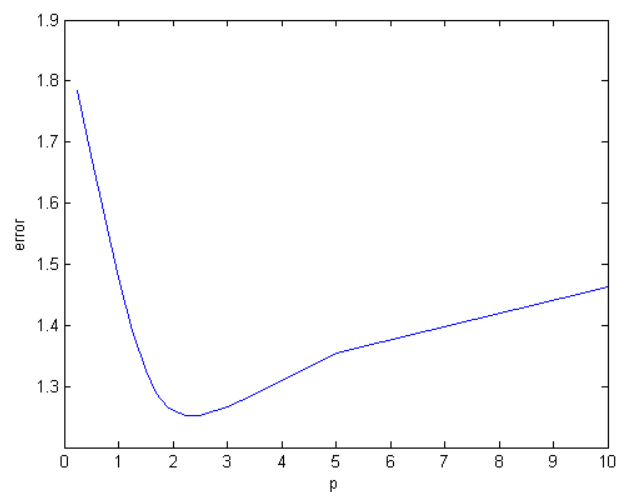


Figura 5.4-Relacion entre p y el error medio en la posición

Los errores máximo y mínimo son por otra parte 5.6 y 0.01 metros respectivamente, existiendo en total 148 (17%) instantes en los que o bien el error supera los dos metros o el cálculo de la posición resulta inviable debido a la inexistencia de medidas válidas (sumadas las causas de saturación y desestimación de medidas con una atenuación mayor de 80 dB).

La tabla 5.1 resume estos resultados mientras la figura 5.5 muestra la evolución de la coordenada Y del robot junto a la coordenada estimada y la figura 5.6 refleja la evolución del error.

Error medio	Error máx.	Error min.	Res. Inválido	Valor de 'p'
1.252	5.6	0.01	17%	2.25

Tabla 5.1-Resultados en la localización

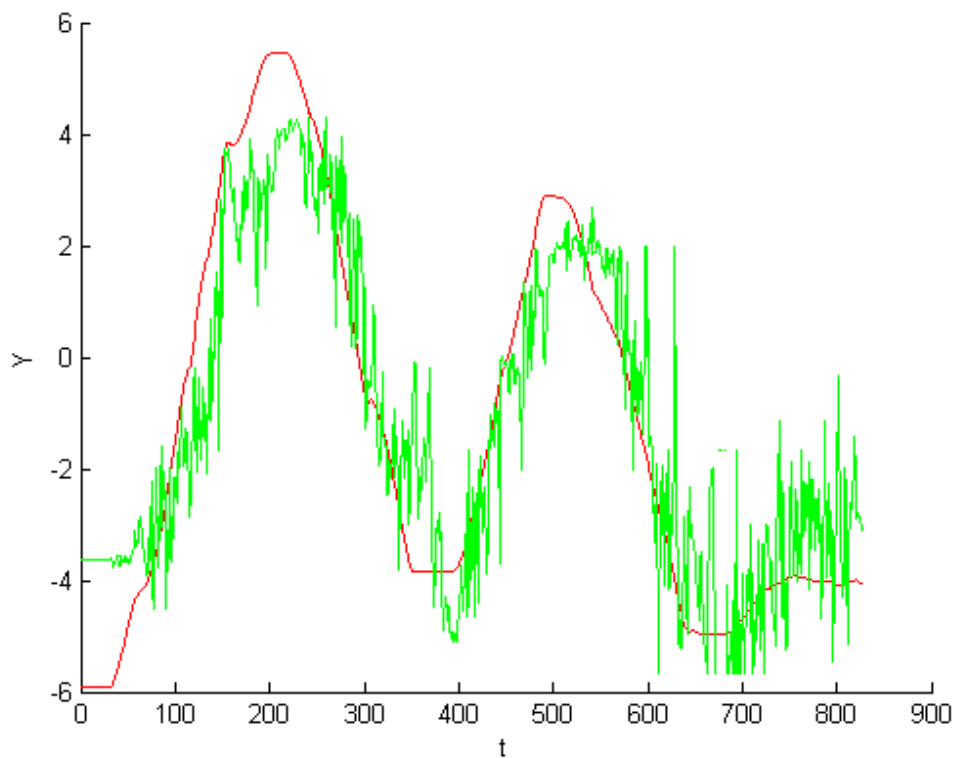


Figura 5.5-Seguimiento de la coordenada Y

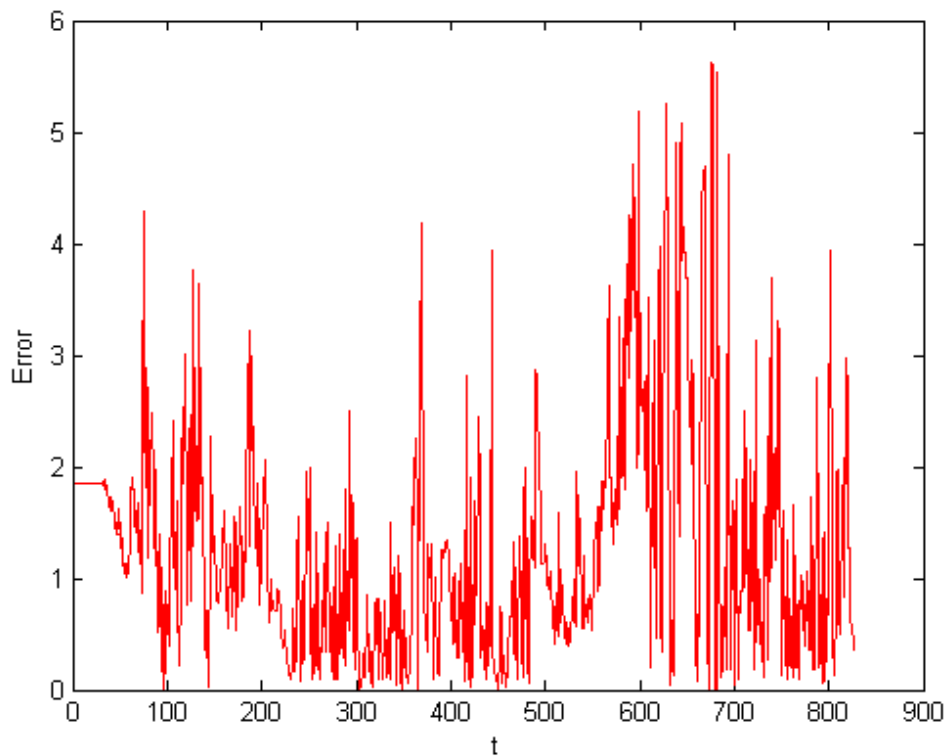


Figura 5.6-Error en la posición

5.3.2. Seguimiento de trayectorias

Esta función se ha puesto a prueba para dos trayectorias, una la del apartado anterior y otra una curva generada en Matlab que contiene dos bucles, para las que debe calcular la actuación necesaria para seguirlas.

Al tratarse de una función en Matlab la actualización de la posición se ha realizado en base al modelo presentado en el capítulo 4, particularizado para el vehículo que nos atañe. Los cálculos realizados son idénticos a los que se usarían en odometría si las lecturas sobre el ángulo y velocidad de giro fueran ideales.

Se ha supuesto un retraso en la actuación sobre el ángulo de direccionamiento igual a la menor velocidad especificada por el fabricante para el servomotor de dirección y un retraso nulo en el cambio de la velocidad de giro.

Bajo estas premisas el resultado obtenido es el de las figuras 5.7 y 5.8 en las que se puede observar (en rojo el camino a seguir y en verde la trayectoria del robot) que la función consigue adaptarse a las trayectorias, las imágenes de la derecha corresponden a un aumento sobre las de la izquierda, en la figura 5.7 este aumento muestra como en los tramos con un cambio significativo en la

curvatura la trayectoria del robot se separa ligeramente del camino debido principalmente a que este no puede describir cambios tan pronunciados.

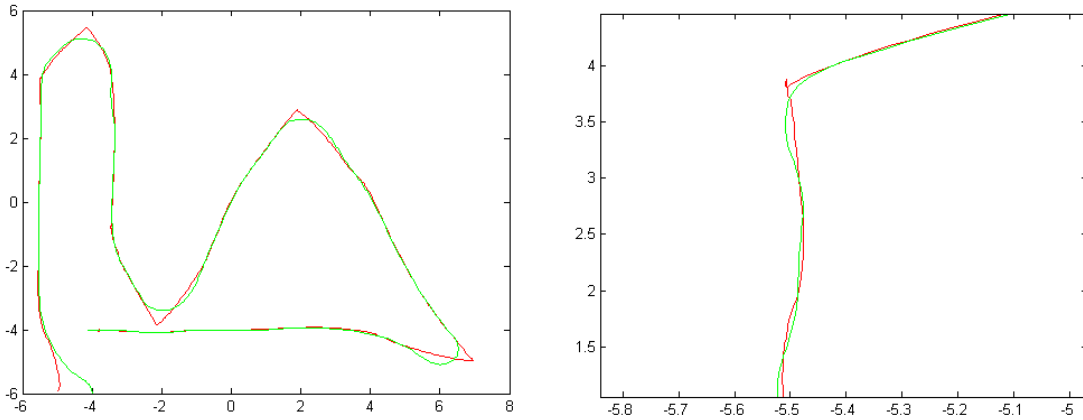


Figura 5.7-Seguimiento de trayectorias I

En la figura 5.8 el aumento corresponde al tramo en el que el robot alcanza al camino, al hacerlo con una orientación que difiere notablemente de la de este (necesaria por otra parte ya que para alcanzarlo ha descrito un arco de gran radio) la actuación es elevada y produce un transitorio con oscilaciones que se van reduciendo hasta alcanzar una orientación estable.

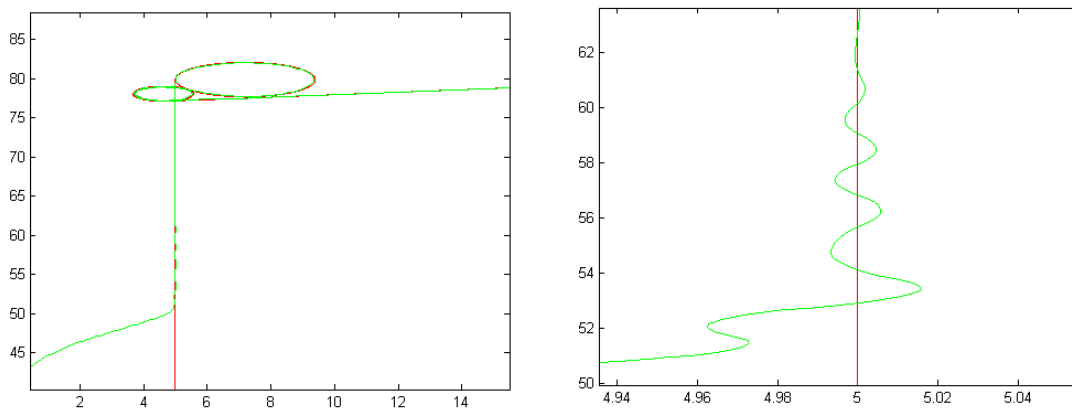


Figura 5.8-Seguimiento de trayectorias II

Estos resultados muestran una buena respuesta de la función a nivel teórico sugiriendo que su código es apto para ser importado a funciones de aplicación práctica.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1. Conclusiones

Al término de este proyecto se ha desarrollado una plataforma móvil con la capacidad de ser usado en tareas cooperativas de reconocimiento de entornos con un terreno abrupto, transmitiendo información obtenida mediante la cámara incorporada y el acceso a una red de sensores distribuidos sobre el mismo a un centro de monitorización.

Este vehículo, que aparece ya terminado en la figura 6.1, ha demostrado tener la robustez necesaria para su despliegue desde una altura de dos metros manteniendo al mismo tiempo un peso reducido gracias al empleo en su fabricación de materiales como la fibra de carbono, plásticos y aluminio ligero.

Se puede concluir que la adaptación de vehículos radiocontrol destinados a actividades recreativas mediante la adición del equipamiento electrónico descrito en este trabajo resulta una forma efectiva de obtener pequeños robots para las tareas mencionadas.

Es de destacar el empleo de un teléfono móvil como procesador de alto nivel lo que permite el desarrollo de aplicaciones para estos terminales capaces de convertir un dispositivo al que a día de hoy la inmensa mayoría de la población tiene acceso en una potente herramienta de automatización, convirtiendo la plataforma mencionada en un robot.

Respecto a estas funciones se ha aplicado la teoría existente sobre localización y control de vehículos móviles, haciendo uso de los modelos cinemáticos que presenta para generar un código Matlab que produce buenos resultados en el entorno de programación sugiriendo que es propicio para su puesta en práctica en aplicaciones reales.

6.2. Líneas de trabajo futuro

Durante el desarrollo del proyecto y tras la evaluación de los resultados han aparecido posibles líneas de trabajo que continúan profundizando y/o mejorando los aspectos aquí expuestos.

- Desarrollo de aplicaciones Java: esto es continuación directa de lo alcanzado con este proyecto, permitiendo un auténtico aprovechamiento del potencial del vehículo.
- Filtrado de mensajes: La saturación en la lectura de mensajes provoca la pérdida de información que podría mejorar los resultados de la localización, esto podría llevarse a cabo programando el nodo sensor incorporado en el vehículo para realizar la discriminación de medidas que ahora realiza la aplicación software, descartando aquellos mensajes con una atenuación superior a los 90dB.
- Mejora de la localización: resultaría de gran interés aplicar técnicas estadísticas para generar mejores resultados como el filtro de partículas o el de Kalman.



Figura 6.1-Resultado final del robot

BIBLIOGRAFÍA

Textos Referenciados

- [1] A. Ollero, Robótica, manipuladores y robots móviles, Sevilla: marcombo, 2001.
- [2] S. y. Singh, «Path generation for robot vehicles using composite clothoid metods,» pp. 1-6, 1990.
- [3] J. Rugeles y D. León, «Técnicas de localización de nodos inalámbricos mediante redes de sensores,» grupo de GISSIC , Universidad militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- [4] S. Castañé, «Desarrollo de robot autónomo para recogida y despliegue con helicoptero,» 2014.
- [5] A. E. Torres Gonzalez, «localización y generación de mapas simultáneos (slam) basado en rango mediante medidas RSSI,» 2012.

Otros textos consultados

J. M. Snider, «Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking,» Robotic Institute, Carnegie Mellon UNiversity, Pittsburgh, Pennsylvania, 2009.

R. C. Coulter, «Implementation of the Pure Pursuit Tracking Algorithm,» The Robotics Institute, Carnegie Mellon UNiversity, Pittsburgh, Pennsylvania, 1992.

Trabajo Fin de Grado
Grado en Tecnologías Industriales

Diseño, Montaje y Programación de un Vehículo Autónomo Portado por UAV para Monitorización Ambiental

Autor: David Sarmiento Pérez

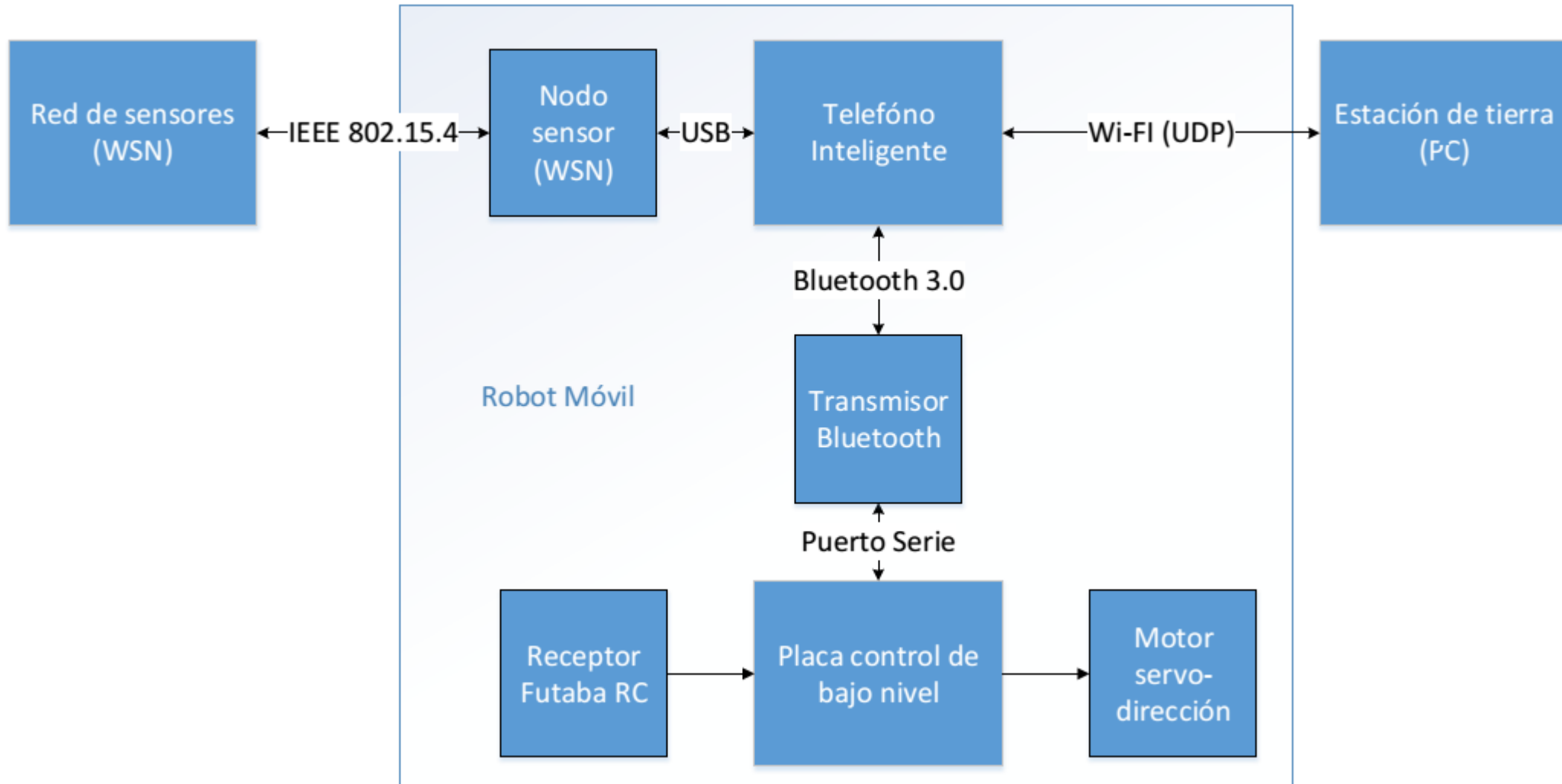
Tutor: José Ramiro Martínez de Dios

Dep. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



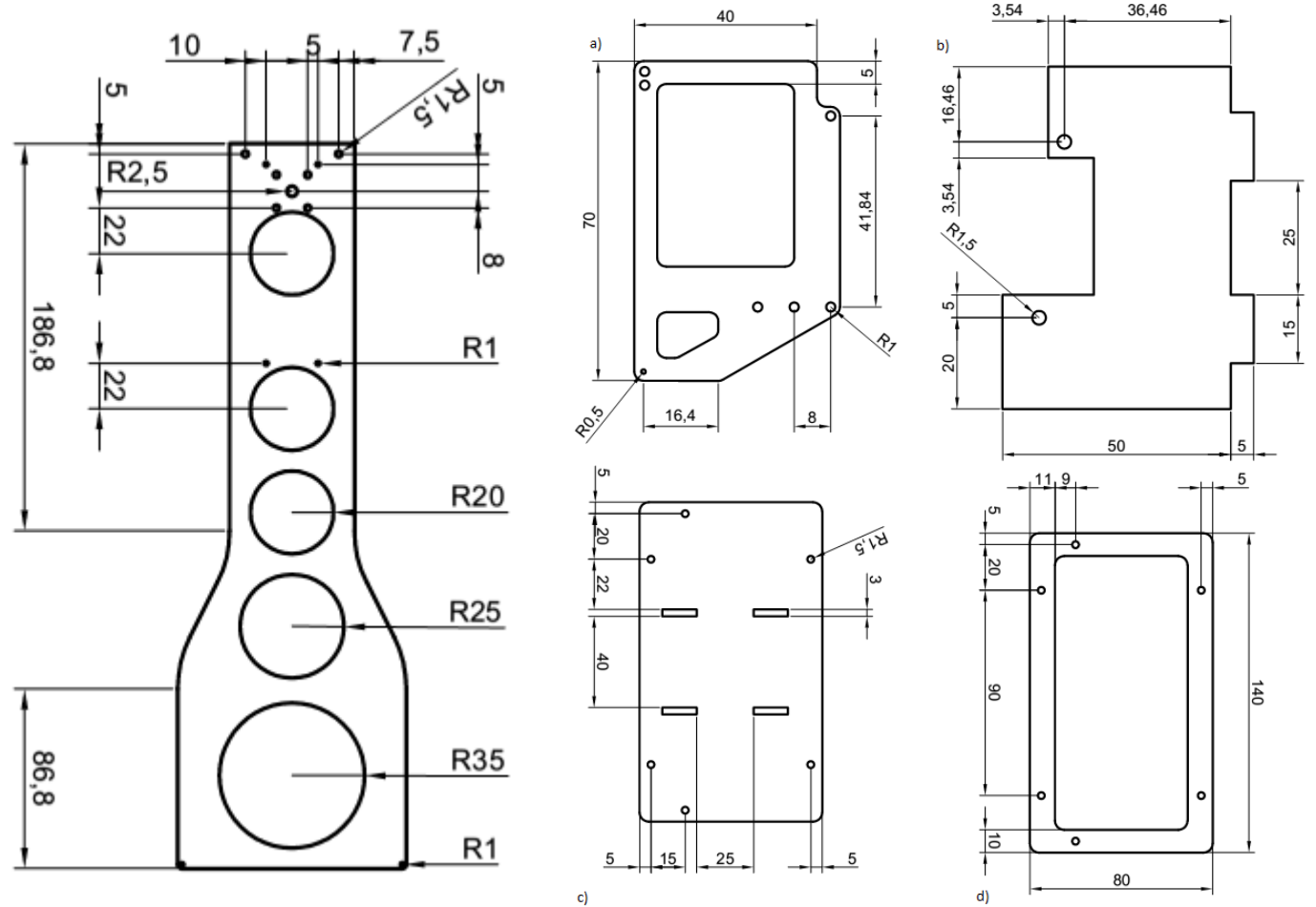
Diseño del Sistema



Desarrollo Hardware: mecánica

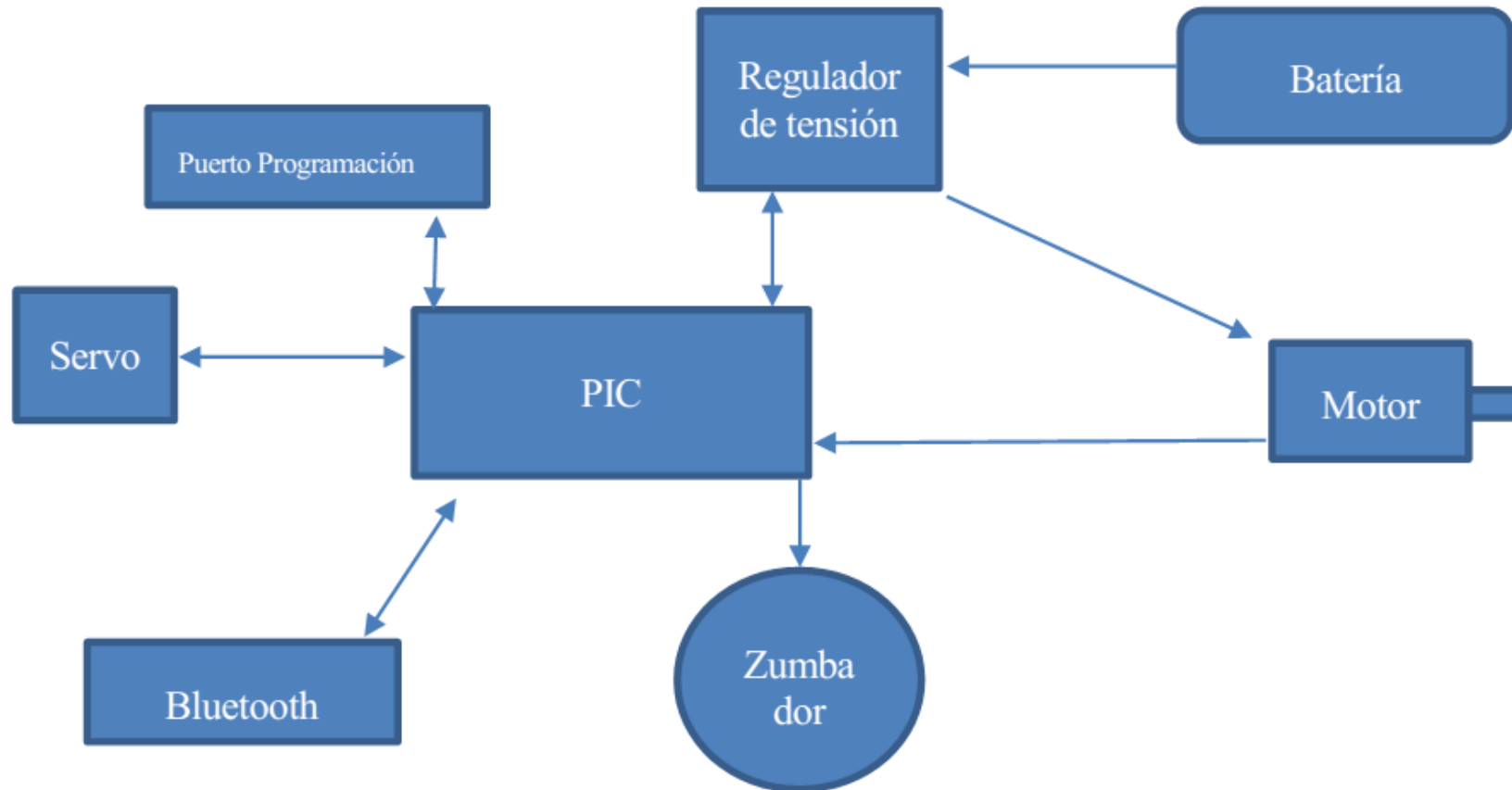


Vehículo Original

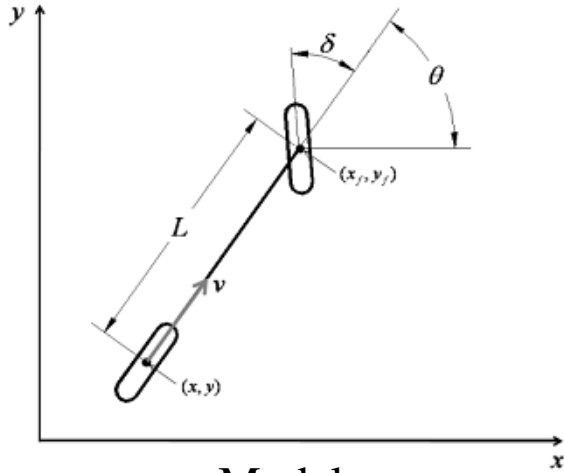


Estructura Añadida

Desarrollo Hardware: electrónica



Desarrollo Software



Modelo

$$\begin{aligned}
 X' &= -V \sin \theta \\
 Y' &= V \cos \theta \\
 \theta' &= V \gamma \\
 \gamma &= (\tan \delta) / L \\
 V &= w * r
 \end{aligned}$$

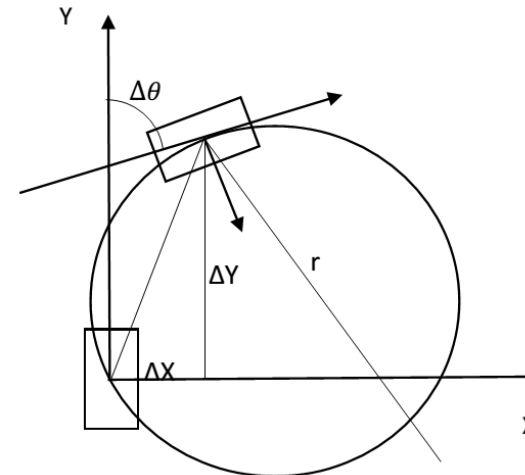
$$\begin{aligned}
 X &= X_0 + \int_t^{t+T} -V \sin \theta \\
 Y &= Y_0 + \int_t^{t+T} V \cos \theta \\
 \theta &= \theta_0 + \int_t^{t+T} -V * \gamma \\
 \gamma &= \gamma_0 + \int_t^{t+\tau} \left(-\frac{\gamma_0}{\tau} + \frac{K}{\tau} * \gamma_f \right)
 \end{aligned}$$

Odometría

$$RSSI = -A * \log(D) + B$$

$$L = \frac{\sum_{j=1}^n (w_j L_j)}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad w_j = \frac{1}{(D_j)^p}$$

Localización



$$T = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{\Delta Y}{r}\right)}{V * \tan\left(\frac{\delta}{l}\right)}$$

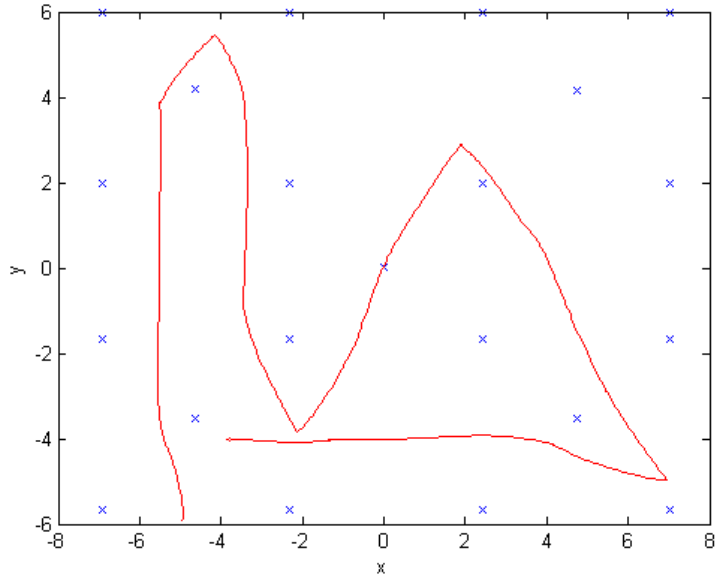
$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{-2\Delta x * l}{L^2}\right)$$

Seguimiento de Trayectorias

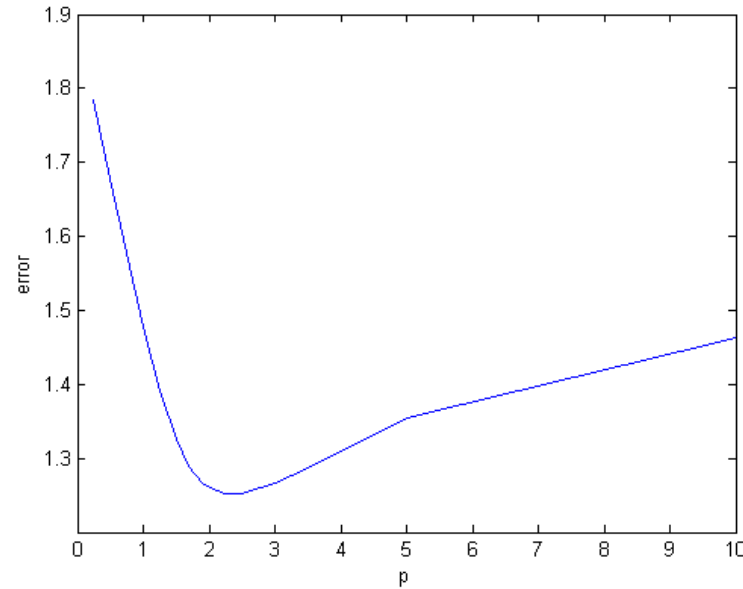
Experimentos y Resultados: Plataforma Hardware



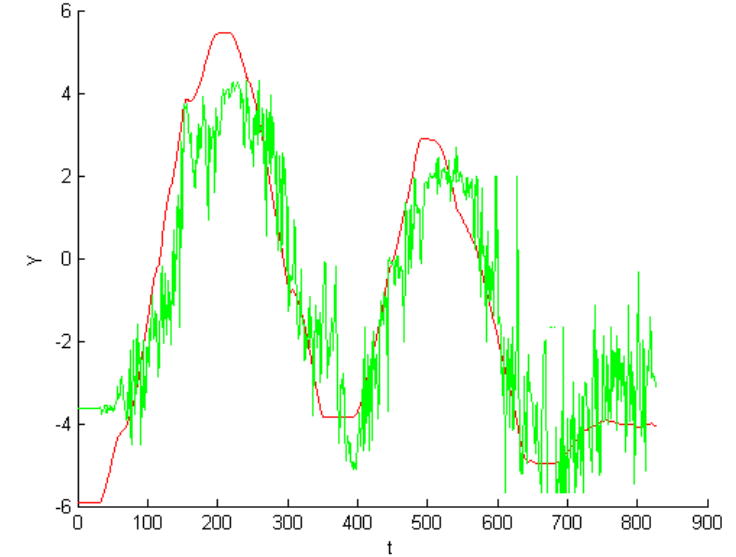
Experimentos y Resultados: Localización



Red Nodos y Trayectoria Real



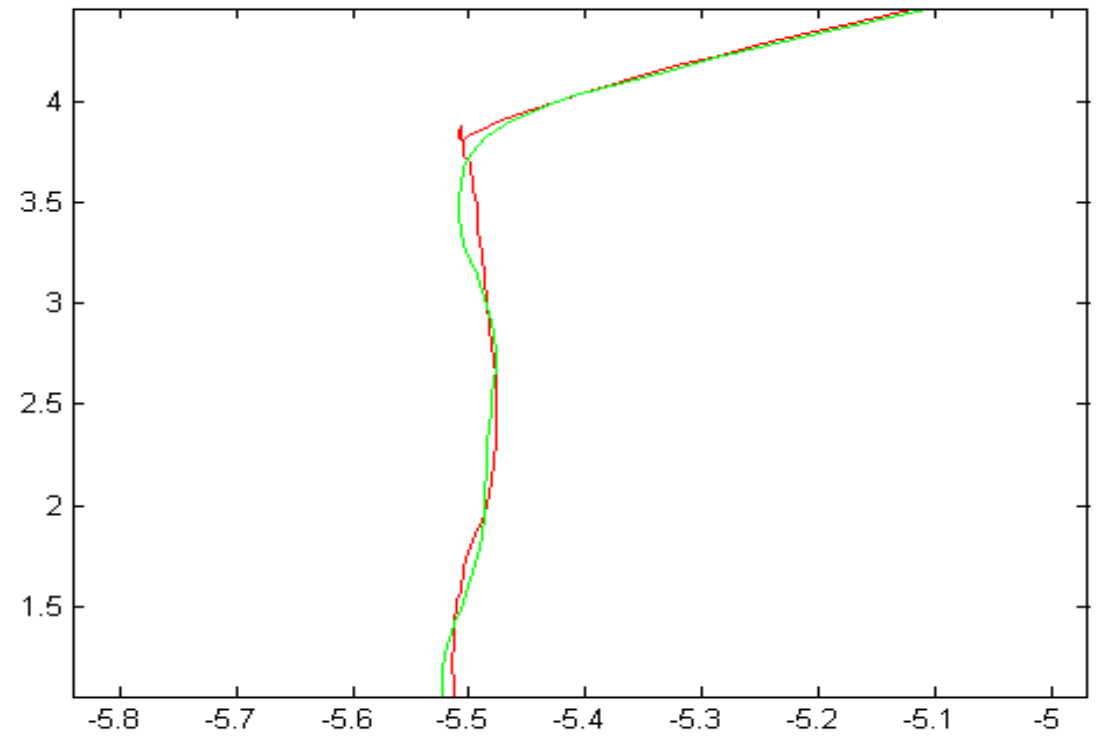
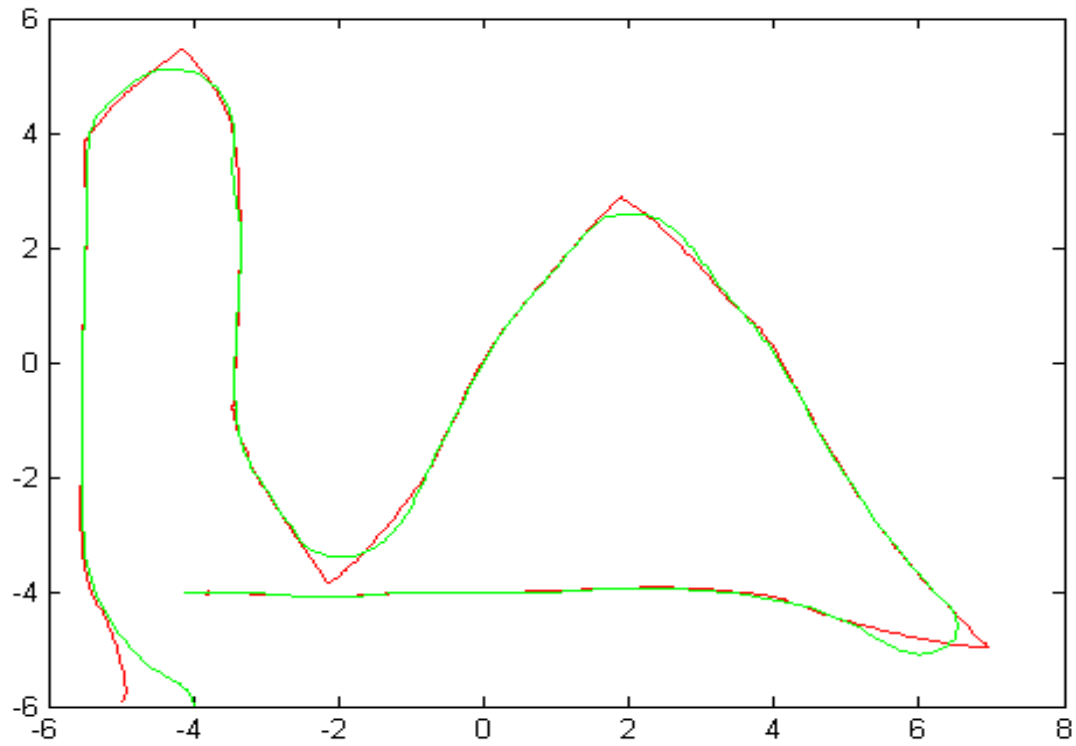
Rel. Error-índice de Pesos



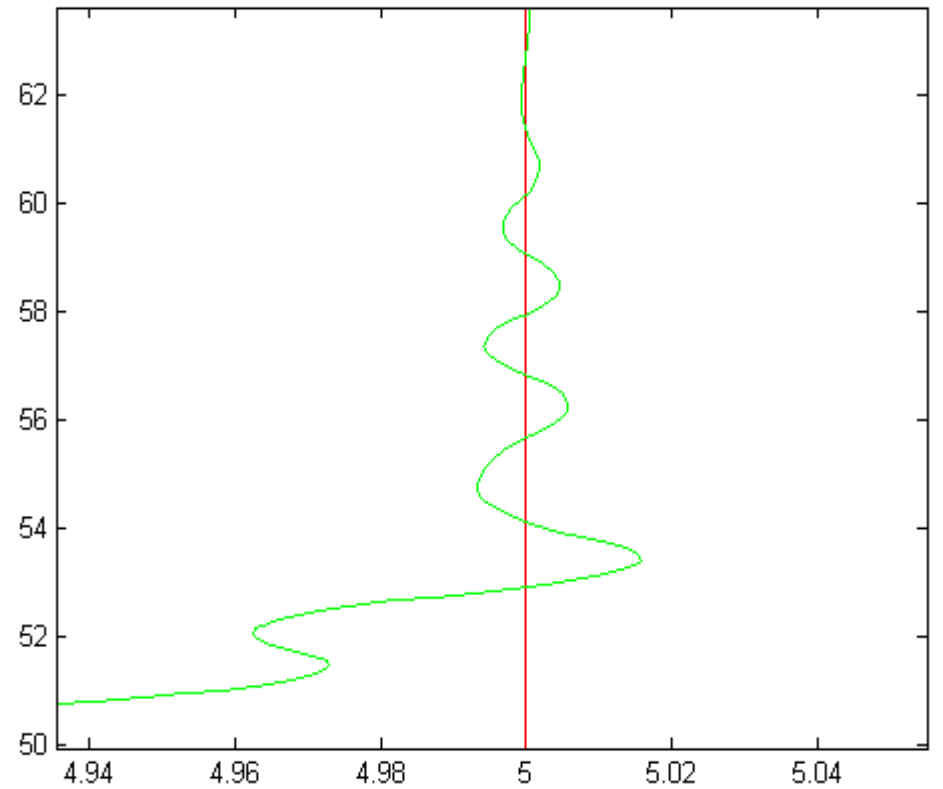
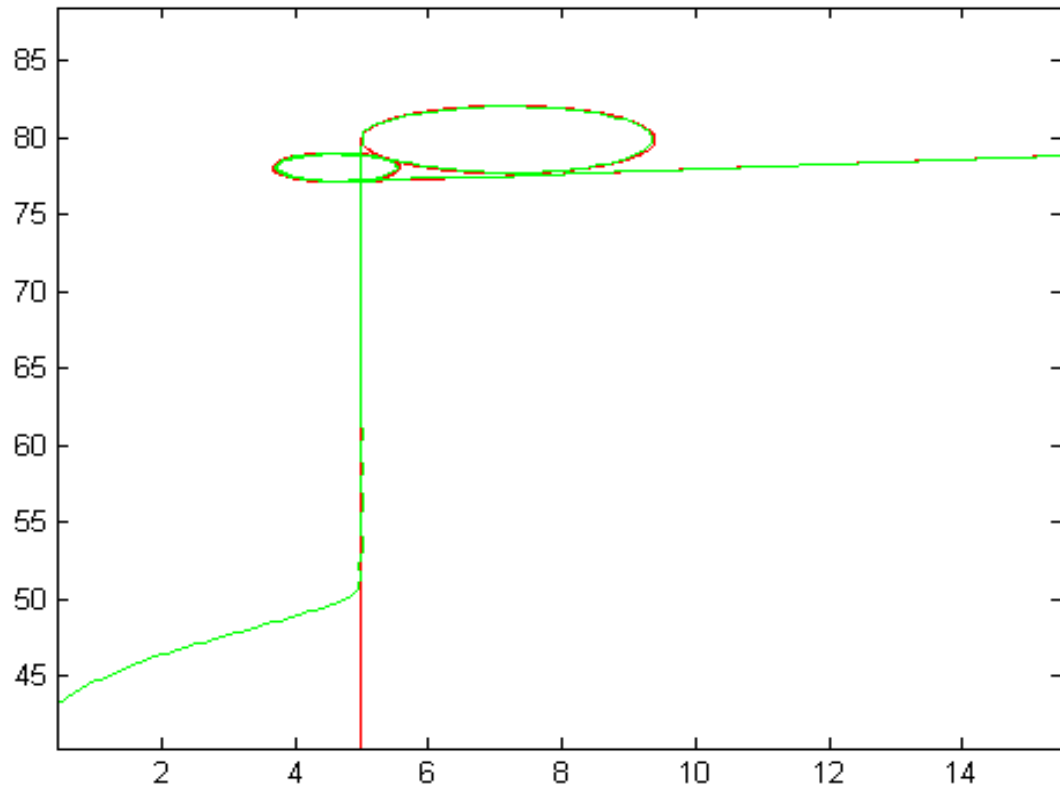
Seguimiento Coordenada Y

Error medio	Error máx.	Error min.	Res. Inválido	Valor de 'p'
1.252	5.6	0.01	17%	2.25

Experimentos y Resultados: Seguimiento de trayectorias I



Experimentos y Resultados: Seguimiento de trayectorias II



Conclusiones

- ▶ La adaptación de vehículos radio control resulta efectiva en la obtención de robots autónomos.
- ▶ La fibra de carbono y aluminios ofrecen una excelente relación peso/resistencia.
- ▶ El empleo de un terminal móvil como procesador aporta gran versatilidad.
- ▶ La electrónica incorporada permite la efectiva monitorización del entorno y cooperación con otros elementos.

