



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA VEHÍCULOS AGRÍCOLAS AUTÓNOMOS

NAVIGATION SYSTEM FOR SELF-DRIVEN FARMING VEHICLES

Autor

Joaquín Pérez Sancho

Director

Jesús Ponce de León Vázquez

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia
2018



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

**SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA
VEHÍCULOS AGRÍCOLAS AUTÓNOMOS**

**NAVIGATION SYSTEM FOR
SELF-DRIVEN FARMING VEHICLES**

[424.18.58]

Autor: Joaquín Pérez Sancho

Director: Jesús Ponce de León Vázquez

Fecha: 28/11/2018

INDICE DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
1.1. PALABRAS CLAVE	1
2. ABSTRACT:	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. ESTADO DEL ARTE:	5
4.1. POSICIONAMIENTO GLOBAL:	5
4.1.1. Posicionamiento GNSS:	5
4.1.2. Posicionamiento GPS L1+L2:	8
4.1.3. Posicionamiento Diferencial:	9
4.1.3.1. Sistema RTK:	10
4.1.4. Navegación por software:	11
4.2. POSICIONAMIENTO LOCAL:	14
4.2.1. WLAN/Wifi:	14
4.2.2. RFID:	15
4.2.3. GSM:	15
4.2.4. UWB:	16
5. DESARROLLO:	18
5.1. MARCO TEORICO:	18
5.1.1. Métodos de cálculo de posición:	18
5.1.1.1. Triangulación:	18
5.1.1.2. Trilateración:	19
5.1.1.3. TWR (Two-Way Ranging):	22
5.1.2. Corrección de posición:	23
5.1.2.1. Comparación de posiciones:	23
5.1.2.2. Calculo de trayectoria:	24
5.1.3. Comparativa de tecnologías:	26
5.2. ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA:	30
5.2.1. Módulos UWB:	38
5.2.2. Raspberry Pi:	41
5.2.3. Conexionado:	44
5.2.4. Presupuesto:	45

INDICES

5.3.	APLICACIÓN:	46
5.3.1.	Arquitectura del sistema:	47
5.3.1.1.	Diagrama de alto nivel:	47
5.3.1.2.	Red de localización:	49
5.3.1.3.	Diagramas de flujo:	53
5.3.2.	Entorno de programación:	54
5.3.3.	Programa:	59
5.3.3.1.	Programa de guardado de trazada:	60
5.3.3.2.	Programa de lectura de trazada y navegación:	61
5.3.4.	Pruebas:	63
6.	CONCLUSIONES	67
7.	BIBLIOGRAFÍA	68

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1:	Satélites alrededor del mundo	6
Ilustración 2:	Diferentes orbitas entre sistemas de posicionamiento	8
Ilustración 3:	Posicionamiento diferencial local y global.	10
Ilustración 4:	Entorno grafico John Deere	12
Ilustración 5:	Entorno grafico Teejet	13
Ilustración 6:	Banda estrecha, ancha y ultra-ancha	17
Ilustración 7:	Triangulación	18
Ilustración 8:	Trilateración en 2 dimensiones	19
Ilustración 9:	Trilateración en 3 dimensiones	21
Ilustración 10:	TWR	23
Ilustración 11:	Vectorizado de trayectorias	25
Ilustración 12:	Comparativa LPS coste/precisión	26
Ilustración 13:	Grafica comparativa	28
Ilustración 14:	Grafica comparativa	29

Ilustración 15: Plantación Albaricoqueros	30
Ilustración 16: Ejemplo de tractor frutero New Holland.....	31
Ilustración 17:Ejemplo de tractor frutero New Holland.....	31
Ilustración 18: Ejemplo de tractor frutero John Deere serie 5G.....	32
Ilustración 19: Ejemplo de hilera en plantación de Albaricoqueros.....	33
Ilustración 20:Apero con Inter-cepas mecánico	34
Ilustración 21: Apero con Inter-cepas hidráulico	35
Ilustración 22: Trituradora con un inter-cepas.....	35
Ilustración 23: Trituradora con dos inter-cepas.....	36
Ilustración 24: Segadora dos inter-cepas trabajando.....	36
Ilustración 25: DW1000 y DWM1000.....	39
Ilustración 26: DWM1001	39
Ilustración 27: DWM1001-DEV	40
Ilustración 28: DWM1001-DEV descripción.....	40
Ilustración 29: Arquitectura Raspberry Pi.....	43
Ilustración 30: Conector MMP-0275	44
Ilustración 31: Conexionado con conector.....	45
Ilustración 32: Diagrama DWM1001-DEV	47
Ilustración 33:Diagrama DWM1001.....	48
Ilustración 34: Diagrama RASPBERRY PI.....	49
Ilustración 35: DWM1001-DEV Antenna Radiaton Pattern Planes	50
Ilustración 36: Configuración de la red	51
Ilustración 37: Red UWB del proyecto	52
Ilustración 38: Diagramas de flujo trazador y navegador respectivamente	53
Ilustración 39: Atajos de teclado más utilizados Nano editor	55
Ilustración 40: Funciones y comandos Nano editor.....	57

INDICE DE FORMULAS

1. 1	20
1. 2	21
1. 3	21
1. 4	22
1. 5	22
1. 6	23
1. 7	24
1. 8	25
1. 9	25



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparativa de tecnologías LPS.....	27
Tabla 2: Características Raspberry Pi	42
Tabla 3: Conexión Raspi-DWM.....	44
Tabla 4: Presupuesto	45
Tabla 5: Presupuesto adicional	46
Tabla 6: Antenna Radiation Patterns	50

1. RESUMEN

Este proyecto trata sobre un sistema de navegación aplicado al sector agrícola. Su implementación en vehículos o robots agrícolas puede convertirlos en dispositivos de navegación semiautónoma o autónoma integral.

El principio básico de funcionamiento consiste, en una primera etapa, en guardar una ruta personalizada y adaptada a cada parcela en la que el dispositivo va a funcionar. Estas rutas se denominan "tracks" o "trazadas". Una vez se tengan estas rutas adquiridas, es posible controlar el sistema del vehículo. Utilizando la trazada correspondiente a la parcela en la que se esté trabajando y comparando su posición en tiempo real. El sistema decidirá mediante su programación cual será su rumbo y dirección a tomar, para seguir de forma precisa la trazada además de hacerlo a una velocidad óptima para el trabajo que se realiza en ese momento.

Este sistema de navegación está enfocado a un tipo de cultivo en particular. En concreto a todo aquel que posea una plantación de árboles. Ya sean frutales de hueso, frutos secos, plantaciones para madera, etc. Esta parte del sector actualmente no está provista de sistemas de navegación, por su gran dificultad al tener las parcelas repletas de obstáculos, los árboles.

1.1. PALABRAS CLAVE

Navegación, Tracking, Agrícola, Automatización, Tag, Anchor.

2. ABSTRACT:

This work is a study about a navigation system applied to the agricultural sector. Its implementation in vehicles or robots can make them semiautonomous or integral autonomous navigation devices.

The basic principle of operation consists, in a first stage, in saving a personalized route, adapted to each parcel in which the device is going to work. These routes are called "tracks". Once these are routes acquired, it is possible to control the vehicle system using the traced route into the working parcel, while the system compares the vehicle position in real time with the corresponding track. The system will decide the corrections in course and direction of the vehicle, as well as the best way to perform the route, in addition to an optimal speed for the work that is carried out at that moment.

This navigation system is focused on a particular type of crop, concretely to each one that has a tree plantation, whether they are stone fruits, nuts, wood plantations, etc. This branch of the sector is not currently provided with navigation systems, due to the great difficulty in the positioning of the parcel's elements, the trees.

3. INTRODUCCIÓN

Dentro de los sectores productivos que posee nuestra economía actual, concretamente el sector primario, es el más difícil de industrializar debido a que existen un sinnúmero de variables difíciles de predecir. Ya que trata directamente con la naturaleza. En sí, de una forma objetiva se pueden deducir variables climatológicas, orográficas, de flora, fauna, etc.

Se trata por lo tanto de explotaciones, la mayor parte de ellas, al descubierto. En las que se está expuesto a sufrir cambios inesperados en distintos procesos de la producción y se debe cambiar el modo de operación según varíen estas condiciones.

Dentro de este sector productivo y concretamente el sector agrícola, del cual se define su producción en obtener materias primas de origen vegetal a través del cultivo. La explotación de estos cultivos ha tenido grandes avances a través de la historia pero aun así la mayoría, siguen siendo trabajos pesados, duros y algunos hasta rudimentarios. Además en comparación con otros sectores, como por ejemplo el industrial, queda muy atrasado en cuanto estudio, innovación, desarrollo, inversión y aplicación de nuevas tecnologías para poder hacer este sector más competitivo, productivo, rentable y atractivo en cuanto a tipos de trabajos a desempeñar.

En lo expuesto en el párrafo anterior nace la iniciativa del autor de este trabajo, el cual tiene experiencia en los dos sectores mencionados anteriormente. El agrícola por parte de la empresa familiar en la que ha trabajado y en la industrial por parte de haber trabajado en algunas empresas, además de conocer de buena mano cual es el gran desarrollo tecnológico aplicado a este sector gracias a sus estudios y prácticas en empresas, cursados durante su formación académica.

En referente al caso particular a este proyecto, se elige enfrentarse a un estudio de un posible sistema de navegación para un tipo de cultivo en concreto basado en plantaciones de árboles.

Encaminándose hacia la demanda y consumo del mercado actual agrícola, se observa que la dirección a tomar en cuanto a método o tipo de cultivo es el cultivo ecológico. Esto implica que se deben hacer más operaciones en una producción ecológica que en una de método convencional. Al eludir el uso de productos químicos, la mayoría de procesos se deben de hacer de forma mecánica o con productos

INDICES

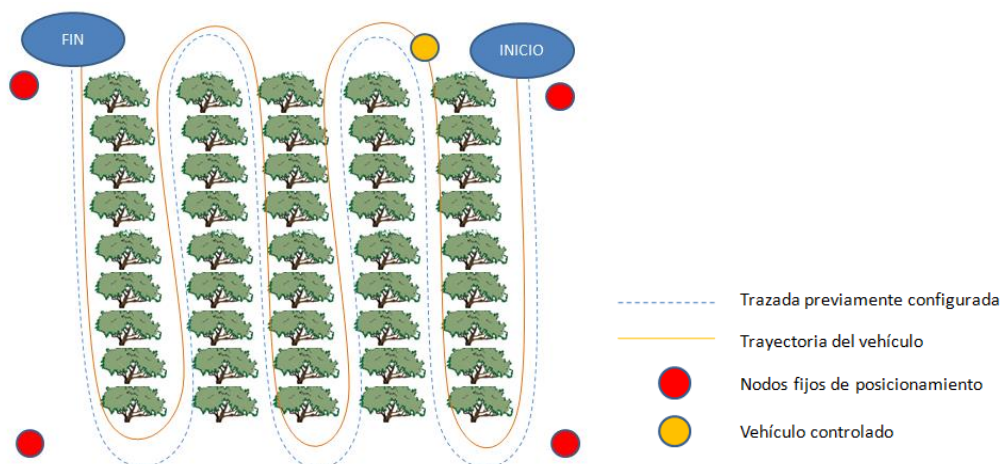
naturales los cuales no son tan agresivos como los químicos y se deben de aplicar estos procesos en periodos más cortos de tiempo.

Todo esto implica en gastos, competitividad, mano de obra entre muchos otros factores que hacen que el margen de beneficio sea bastante pequeño y se tenga que tener unos precios más elevados respecto a otros métodos de cultivo.

En cuanto a procesos se refiere: labrar , triturar la poda, segar malas hiervas, recolectar, abonar, pulverizar, etc. En todos estos procesos se ven implicados vehículos agrícolas para poder llevarlos a cabo y además algunos de estos procesos se realizan un gran número de veces por parcela y temporada productiva.

La posible automatización o robotización de estos procesos podrían generar mayores beneficios en el sector, además de permitir al productor realizar otros procesos mientras los automatizados se ejecutan y así tener más tiempo, algo bastante importante, ya que muchas veces se trata de productos perecederos.

Por estas razones se procede al estudio de este caso en este proyecto, el cual se hablara inicialmente de la tecnología aplicada existente en estos momentos, de las posibles tecnologías que podrían cumplir su papel en este menester y la elección de una de ellas. Finalmente se deberán de tener unas conclusiones sobre la navegación autónoma en plantaciones de árboles, teniendo en cuenta aspectos económicos y funcionales, además de tener en cuenta la perspectiva de los productores agrícolas a los cuales va encaminado este producto.



4. ESTADO DEL ARTE:

En este apartado se procede a detallar cual es la tecnología actual aplicada al sector de la navegación y posicionamiento agrícola.

4.1. POSICIONAMIENTO GLOBAL:

En este subcapítulo se tratan las actuales tecnologías que se emplean en los sistemas de posicionamiento y navegación. Estos sistemas se basan en redes de posicionamiento globales, que permiten conocer la posición deseada en la mayor parte del mundo. De ahí el nombre del subcapítulo.

4.1.1. *Posicionamiento GNSS:*

GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite). Es un sistema de posicionamiento basado en constelaciones de satélites girando en órbita alrededor del planeta tierra. Estos satélites miden el tiempo de forma muy precisa mediante unos osciladores de alta precisión, con estabilizadores de máxima precisión capaces de dar medidas del tiempo del orden de 10^{-12} , y de 10^{-14} en los de última generación. Estos datos de tiempo, siendo la unidad el segundo atómico internacional, son enviados al planeta tierra mediante ondas electro-magnéticas que son emitidas en la banda L.

Con la información que contienen estas señales, sabiendo la posición en la que se encuentran los satélites y el cálculo de la diferencia entre el tiempo en que ha sido enviada la señal y recibida. Se calcula la posición del usuario mediante triangulación matemática. Siendo necesarios al menos la información de 3 satélites para poder calcular la posición deseada.

El sistema de posicionamiento en si consta de 3 sectores:

- Sector Espacial: Este sector contiene la constelación de satélites antes nombrada.
- Sector Control: Este sector se basa en estaciones terrestres situadas en puntos estratégicos del planeta, los cuales se encargan de el seguimiento

INDICES

continuo de los satélites, calculando su posición, transmitiendo datos y controlando diariamente los satélites de la constelación.

- Sector Usuario: Este segmento del sistema varía según la aplicación que se esté trabajando. Está formado por todos los equipos utilizados para la recepción de las señales emitidas por los satélites, así como por el software necesario para la comunicación del receptor con el ordenador, y el post-procesado de la información para la obtención de resultados.

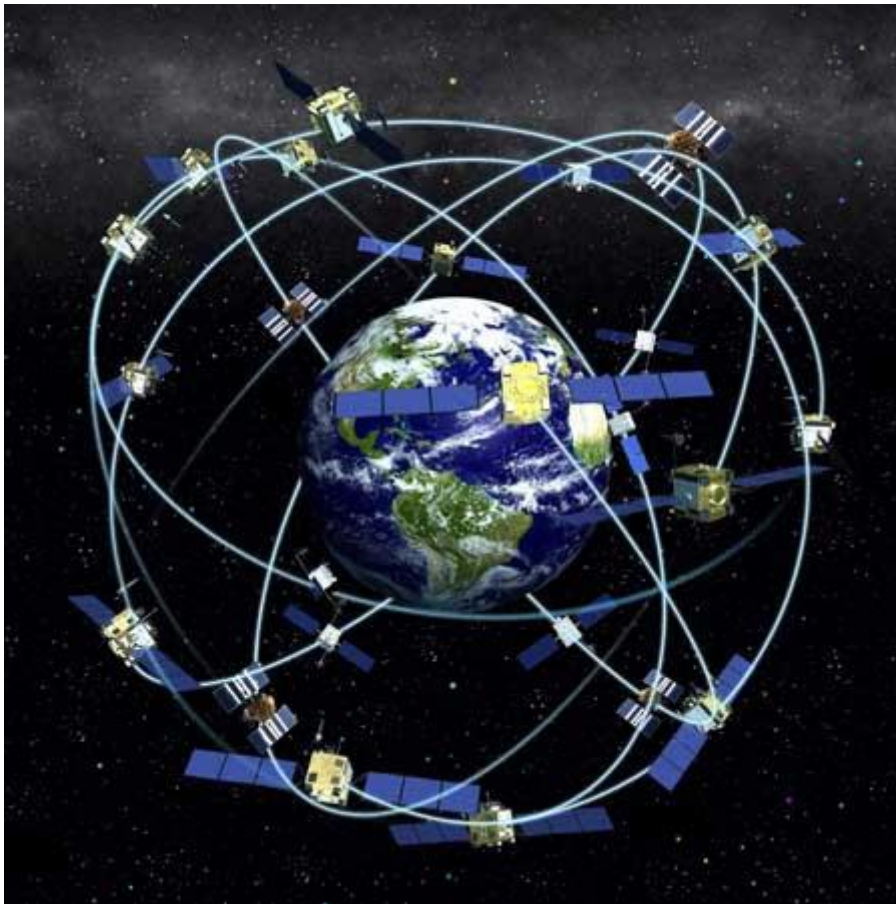


Ilustración 1: Satélites alrededor del mundo

<https://www.aristasur.com/contenido/como-funciona-el-sistema-de-posicionamiento-gps>

Existen varias constelaciones diferentes en el espacio desarrolladas por diferentes países, o comunidades como por ejemplo:

- GPS: (Global Positioning System) Este fue desarrollado por los Estados Unidos de América en un principio para uso militar y mas tarde se adapto al uso civil. Se sirve de 24 a 32 satélites. Para el cálculo posicional utiliza

trilateración (método matemático para determinar las posiciones relativas de objetos usando la geometría de triángulos).

- GLONASS: (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) Desarrollado por la Unión Soviética y consta de 24 satélites en activo de un total de 31 en su posesión.
- GALILEO: Desarrollado por la Unión Europea y fue destinado desde un principio para el uso civil, en comparación con los anteriormente citados. Aun está en proceso de desarrollo pero se prevé que tendrá una constelación de 30 satélites de los cuales 3 serán de reserva.
- BEIDOU: "Beidou" es el nombre chino para la constelación de la Osa Mayor. Es un sistema desarrollado por la República China, el cual es experimental y consta solo de 4 satélites.
- COMPASS: También llamado "Beidou-2", es el proyecto pendiente de la República China, la cual planea desarrollar un sistema global de navegación por satélite formado por 35 satélites.
- QZSS: (Sistema por Satélite Quasi-Zenith) Desarrollado por el gobierno Japonés. Este consta de 3 satélites situados en órbita elíptica la cual coincide con su país. Estos satélites combinados junto con el sistema GPS mejoran la precisión de este, llegando a ser de centímetros. Esta provisto que sea compatible en un futuro con el sistema GALILEO.

Cada uno de estos sistemas tienen sus particularidades que les hacen tener unos pros y unos contras diferentes entre unos y otros. En este caso no se va a profundizar en las características de cada uno de ellos, ya que, en el sector de navegación agrícola actual, el posicionamiento no se basa solo en el uso de un sistema u otro. Si no que se ha optado por utilizar módulos receptores GNSS. Esto quiere decir que no son específicos solo de un sistema de posicionamiento, si no que estos pueden recibir simultáneamente información de distintos satélites pertenecientes estos a distintas constelaciones o desarrolladores. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de algunas diferencias a que simple vista podemos observar. Tanto en distancias o orbitas utilizadas.

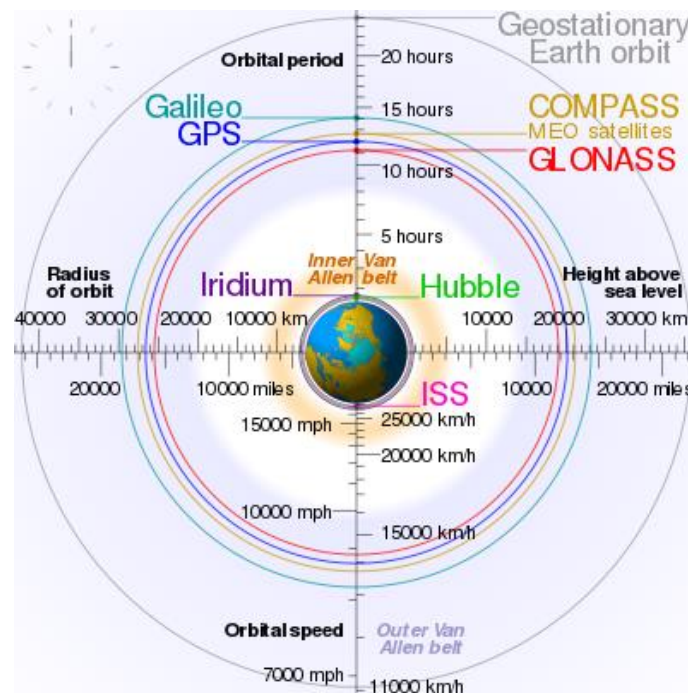


Ilustración 2: Diferentes orbitas entre sistemas de posicionamiento

https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation

El uso de este tipo de receptores, implica que las posibilidades de tener una buena cobertura de los satélites al estar trabajando con esta tecnología sea mayor. Además de que sabiendo que la gran parte de empresas que desarrollan estos productos son grandes multinacionales, estas se aseguran así de poder vender su producto para todo el mundo, ya que, aunque se pueden utilizar la mayoría de los sistemas de posicionamiento en cualquier parte del mundo, cada desarrollador configura sus constelaciones para favorecer más su país o comunidad. Como por ejemplo Japón con su sistema QZSS, el cual hace girar de forma elíptica sus satélites solo sobre su país.

4.1.2. Posicionamiento GPS L1+L2:

Dentro de los sistemas globales de navegación por satélite, en concreto el sistema global de posicionamiento perteneciente a los americanos, GPS. Como bien se ha visto anteriormente, las señales emitidas se propagan por medio de la banda L del espectro electromagnético, que son las que reciben los receptores. Este sistema en concreto emite información sobre dos movimientos ondulatorios que actúan como portadoras de códigos. La primera señal se le denomina L1 y la segunda señal L2. El

poder utilizar las 2 frecuencias permite determinar por comparación la diferencia de retardos y aumentar así la precisión.

En el uso civil (Smartphone, GPS del coche, etc.) solo se usa la señal L1 y se consiguen precisiones de entre los 3 y los 10 metros. El uso en conjunto de la señal L1 y L2 proporciona ya unas precisiones métricas.

Sobre la señal L1 se suelen modular los códigos C/A (Coarse/Aquisition) y el P (precise), además del mensaje correspondiente. En la señal L2 se modula también el mensaje de navegación además de los códigos P y L2C.

En cuanto al mensaje, este consta de 1500bits, correspondientes a 30 segundos. Está dividido en 5 celdas. En cada celda encontramos información relativa a:

- Celda 1: Parámetros del desfase del reloj y modelo del retardo ionosférico y troposférico.
- Celda 2-3: Efemérides de los satélites.
- Celda 4: Aplicaciones militares.
- Celda 5: Almanaque.

El único problema son los permisos, ya que esta segunda señal, la L2, se destina normalmente a usos militares. Además aunque se tengan los permisos, ya que algunas empresas pueden obtenerlos. Los receptores son bastante caros y sin tener en cuenta que también se deben de pagar los permisos para hacerse una idea del gasto que supone esta tecnología.

4.1.3. Posicionamiento Diferencial:

Los errores del sistema GNSS limitan la precisión obtenida en tiempo real de la aplicaciones en campo. Los métodos GNSS diferencial, permiten mejorar tanto la precisión como la integridad y fiabilidad de nuestros resultados.

Este método se basa en proporcionar a los receptores correcciones de posición en tiempo real, generalmente mediante ondas de radiofrecuencia. Estas correcciones son calculadas por estaciones de referencia terrestres mediante algoritmos. De estas estaciones base, se sabe la posición que ocupan en la tierra exacta. Comparando esta con la que está recibiendo de los satélites, calcula cual es el error de ese momento y lo envía a los receptores GNSS para poder hacer la corrección pertinente en ese mismo instante. Se llega a tener precisión de centímetros con este método.

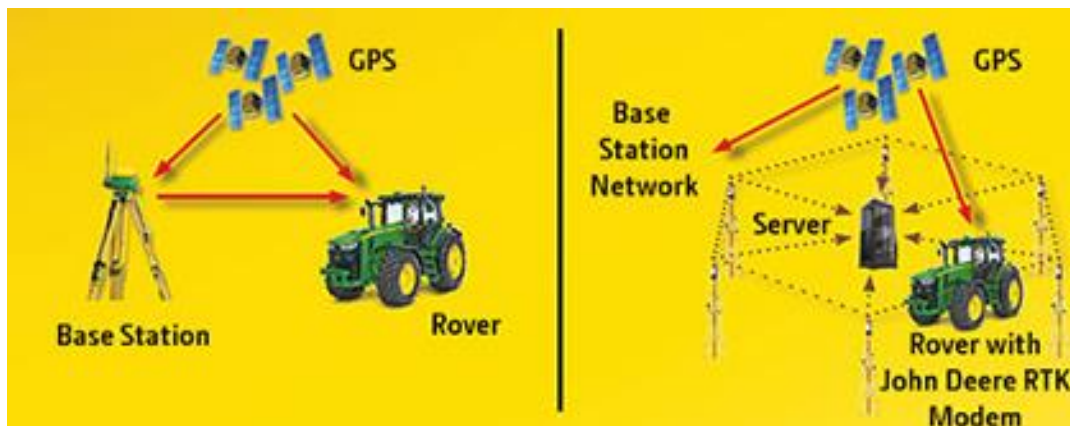


Ilustración 3: Posicionamiento diferencial local y global.

<https://antoniobravoagro.concesionario-jd.es/John-Deere/Agricultura/Soluciones-de-gestion-agronomica-AMS/Guiado-y-Automatizacion>

Se podría decir que existen dos métodos para llevar a cabo este servicio. Se puede inicialmente instalar las estaciones de referencia de forma local para realizar las correcciones en las fincas donde se contrata este servicio. Por otra parte se puede enviar los datos de corrección mediante servidores que amplían el radio de envío de estos datos y así cubrir mas distancia de servicio. Como inconveniente al realizar el envío de datos por servidores se tiene un gasto mas añadido al tener que contratar una tarifa de datos para poder recibirlos.

4.1.3.1. Sistema RTK:

(Real Time Kinematic) Se trata de una navegación cinética satelital en tiempo real. Basada en el posicionamiento diferencial, es la última tecnología que se está aplicando por empresas dedicadas a la topografía y a la navegación de precisión.

Se basa en el uso de medidas de fase de navegadores con señales GNSS, donde una sola estación de referencia proporciona correcciones en tiempo real, obteniendo una exactitud sub-métrica. La precisión de la medición resultante es generalmente una función de la capacidad electrónica del receptor para comparar exactamente las dos señales, la de corrección y la del satélite. En general los receptores tradicionales pueden comparar señales con un margen de un 1% de error.

Las multinacionales que ofrecen este servicio, como por ejemplo John Deere, al ser una empresa que debe de satisfacer en este servicio a muchas empresas agrícolas. Lo que se practica es la instalación estratégica de estaciones de referencia por distintos lugares del planeta y enviarlas a través de servidores, de los cuales sus

equipos reciben las señales de corrección y así ofrecer una mayor cobertura del servicio. De esta multinacional en su información oficial podemos observar, por ejemplo que ofrece cobertura para más del 80% del territorio nacional español. Coincidiendo este en las comunidades autónomas que más clientes tienen contratados estos servicios.

El dato anteriormente citado no es mera casualidad y es que si, en España hay mas comunidades predispuestas al uso de sistemas de navegación agrícola que otras. Pero el motivo de esto, no es más que el del tipo de terreno y cultivo que predomina en cada comunidad autónoma. Siendo así más favorable el cultivo de cereales y leguminosas en grandes extensiones como en las comunidades de Castilla la Mancha, Castilla y León, Extremadura, etc. Esto se debe a que este tipo de cultivo no representa un problema alguno, tanto en obstáculos al laborar el terreno. Como en distorsión de la señal GNSS a causa del cultivo como puede ocurrir en cultivos compuestos por plantaciones de árboles.

4.1.4. Navegación por software:

A toda la tecnología anteriormente citada, se le debe sumar la aplicación de un software grafico, para poder tener una comunicación entre el usuario del servicio y el sistema de navegación. Aquí entra una parte fundamental del equipo, ya que, hasta este punto solo hemos definido el hardware y software necesario para saber en que posición esta el vehículo que se esté trabajando en el campo. Pero esto para el laboreo agrícola no supone ningún avance. Si no que se debe, sabiendo en todo momento la posición del vehículo, realizar trabajos tanto en líneas rectas, como curvas perfectas, amoldándose a las fincas que se esté trabajando, evitando solapes para el ahorro de combustible, abono, o semillas a la hora de sembrar, etc. Poder gestionar los giros entre pasada y pasada de laboreo. Se ofrece la posibilidad de guardar los trabajos realizados en cada parcela para así poder usar los datos de una temporada productiva a otra. A parte se distribuyen programas que pueden favorecer al agricultor a la hora de redactar el libro de campo. Sabiendo en todo momento cuantas aplicaciones se hacen y de que productos durante la temporada. Y así un sinfín de posibilidades y extras que las compañías ofrecen y solventan con equipos, con la programación y algoritmos necesarios para poder llevar a cabo todas estas acciones. Además de incorporación de pantallas para tener el mayor número posible de datos a la vista por el usuario.

INDICES

Se muestra unos ejemplos en las siguientes imágenes de cuál es el entorno de trabajo de algunas compañías como son John Deere y Teejet respectivamente:



Ilustración 4:Entorno grafico John Deere

<https://agricolanoroeste.com/John-Deere/Agricultura/Soluciones-de-gestion-agronomica-AMS/Receptores-y-Monitores/Monitor-GreenStar-3-2630>



Ilustración 5:Entorno grafico Teejet

http://www.teejet.com/precision_farming/guidance.aspx

En los anexos se muestran algunas de las ofertas actuales que las compañías tienen en el mercado, de este modo se puede hacer una idea de la tecnología actual real que existe en el mercado. Y como ninguna compañía da solución a la navegación por cultivos formados por arboles.

Todas se centran en sistema de posicionamiento global junto con RTK los cuales no tienen cobertura en toda la península. Tanto por la cobertura la cual está restringida por la orografía como por los contratos de estaciones de corrección de RTK. Ya que en estos momentos por una parte las diferentes marcas comparten la mayoría de estas estaciones. Pero en otras estaciones lo que sucede es que pertenecen exclusivamente a una sola empresa o a un grupo reducido de ellas para poder avanzar una sobre otras en el mercado y así poder dominar territorios que otros no pueden.

Al ser una tecnología relativamente nueva no existe una red nacional de estaciones donde se pueda cubrir todo el territorio español y sea además posible ser utilizado por cualquier empresa de que tenga este producto. Por el contrario cada empresa opta por tener su red con sus ventajas e inconvenientes tanto en posición de estas estaciones, cobertura, y precisión de los equipos.

INDICES

De cara al consumidor esto es un gran problema, ya que no solo debe de elegir su equipamiento de localización y navegación por las características y distintas funciones que le ofrece. Además de por el precio (suelen ser equipos muy caros de orden a los 10000 euros.). Si no que también están limitados en la zona donde van a trabajar en estos equipos ya que no todos cubren todo el territorio nacional como antes he mencionado.

Pasando a un enfoque no tan nacional, si no global la situación es peor ya que hay equipos que no cubren países enteros y ciertos territorios.

4.2. POSICIONAMIENTO LOCAL:

LPS (Local Positioning System). En este sub-capítulo se muestran las distintas tecnologías existentes utilizadas para el posicionamiento y la navegación. Que actúan de una forma local, esto significa que son sistemas diseñados para aplicaciones en concreto. Fuera de los rangos establecidos a controlar no se tendrá posibilidad de posicionamiento. No son globales.

Normalmente este tipo de tecnología se usa para monitorizar trabajadores, objetos, paquetes, maquinaria, etc. En tiempo real RTLS (Real Time Location System). Este tipo de tecnología junto con aplicaciones tipo software hacen ganar a la empresa tanto en tiempo, recursos, trazabilidad y ahorro entre otros aspectos. Pudiendo gestionar y supervisar todos los trabajos realizados en la empresa en cada momento.

Teniendo en cuenta lo citado en el párrafo anterior, seguidamente se va a hablar de las tecnologías que podrían ser validas para una aplicación de posicionamiento y navegación agrícola, ya que existen un sinnúmero de tecnologías usadas para estas aplicaciones. Por lo tanto se centrará el asunto de este subcapítulo en las más validas del sector.

4.2.1. *WLAN/Wifi:*

WLAN (Wireless Local Area Networks) Puede ser para estimar una localización de un móvil u objeto que esté conectado a su red. Su rango de acción está entre los 50 y 100 metros. Según en qué infraestructura este instalado el sistema.

El posicionamiento en este tipo de sistemas está basado en RSSI(Received Signal Strength Indicators). Esto significa que el dispositivo que recibe las señales Wifi

es capaz de medir la atenuación de potencia de la señal según se aleja del emisor. y por lo tanto calcular la distancia mediante algoritmos a la que esta de los emisores. Para seguidamente triangular y obtener su posición.

Tiene una precisión de metros en el cálculo de su posición. Esta la calcula en valor absoluto. Tiene en contra tiene que le afectan mucho los obstáculos metálicos, generando interferencias.

4.2.2. *RFID:*

RFID(Radio Frequency IDentification). Este sistema consiste en un receptor dotado de antena, el cual interroga los emisores cercanos. Ya sean pasivos o activos. Este receptor recibe los datos de identificación mediante ondas de radio.

Hay dos tipos de emisores. Los pasivos, se caracterizan por aprovechar la energía generada por las ondas de radio frecuencia de los receptores, para dar su información. Por otra parte, los activos, emiten directamente su información gracias a que estos sí que están alimentados.

El principio básico de posicionamiento con este sistema, se basa en que según detecte el receptor unos emisores en concreto sabrá su posición aproximada de donde está ya que la posición de los emisores suele ser conocida.

Este sistema trabaja en una precisión entre decímetros y metros, dependiendo de los emisores que tenga la instalación y la calidad de estos. El cálculo de la posición viene dada en valor absoluto y el rango de trabajo está entre 1 y 50 metros.

4.2.3. *GSM:*

GSM(Global System for Mobile communications). A partir de este sistema de comunicaciones se basa el método empleado para el cálculo de la posición de un terminal móvil. Algunas compañías telefónicas ofrecen el servicio de localización de terminales con una cierta precisión.

Existen varios métodos utilizados en este sistema. Uno de ellos es el llamado célula de origen, en el que se incluyen ID de célula e ID de célula mejorada. Se pueden obtener precisiones entre 200m y 4km según sean zonas urbanas o sub urbanas.

INDICES

Otro método es el E-OTD (Enhanced-Observed Timed Difference), basado en la diferencia de tiempo observada entre el envío de la señal y la recepción. Se consigue una precisión entre 50m y 200m.

4.2.4. UWB:

UWB(Ultra-Wide-Band) Este término se usa según la FCC(Federal Communications Commission), para denominar cualquier tecnología de radio que usa un ancho de banda mayor de 500Mhz o del 25% de la frecuencia central. Esta tecnología de nueva generación es capaz de utilizar un bajo consumo de energía. Sus aplicaciones recientes son en el monitoreo de sensores, localización de precisión y aplicaciones de seguimiento (tracking).

El funcionamiento de esta tecnología se basa en el envío de impulsos de energía en banda base sin portadora con una duración extremadamente corta, mucho menor que el intervalo de un bit. Por otro lado, los niveles de potencia radiada en los chip UWB son muy bajos, del nivel de mW. La densidad espectral de dicha energía es muy pequeña inferior a los 100nW/MHz, lo que evita las interferencias con otras señales que estén utilizando dicha porción del espectro.

Las comunicaciones UWB son muy seguras, puesto que es necesario conocer la secuencia de transmisión de los bits de información para poder escuchar las transmisiones. Además por la relación señal/ruido siendo tan baja las transmisiones se son fácilmente confundidas con ruido ambiente o ruido de fondo.

Las nuevas tecnologías en circuitos CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) permiten obtener impulsos muy estrechos y velocidades de transmisión muy elevadas a costes muy bajos, dado que la potencia transmitida es también muy baja. El precio de este circuito integrado será así mismo más competitivo cuando se fabrique en serie. Otra ventaja de emplear circuitos CMOS es que los dispositivos en los que se integran no sufren alteraciones significativas en su tamaño, forma y peso.

Un aspecto negativo de UWB es el alcance, ya que si se aumenta éste ha de ser a costa de disminuir la velocidad de transmisión, debido a las limitaciones de potencia. El alcance se ve además afectado por la presencia de obstáculos que tiendan a reflejar las señales, aunque también es cierto que la capacidad de UWB para atravesar estructuras u objetos es mucho mayor que la de otras tecnologías inalámbricas.

Las compañías con más experiencia en comunicaciones UWB son: Decawave, Aether Wire & Location, ANRO Engineering, Fantasma Networks, Lawrence Livermore Labs, Multispectral Solutions, Time Domain Corporation y XtremeSpectrum.

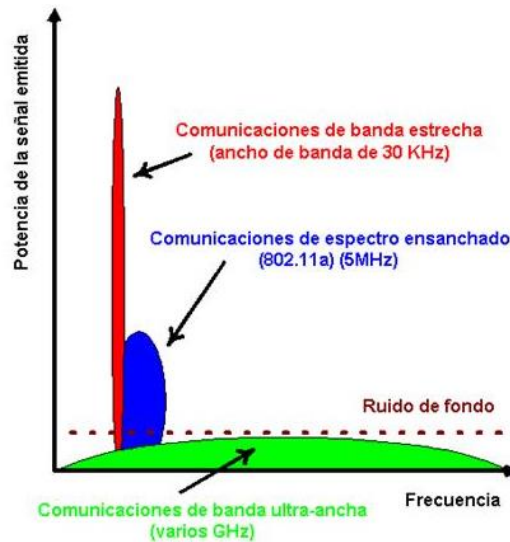


Ilustración 6: Banda estrecha, ancha y ultra-ancha

<https://www.ramonmillan.com/tutoriales/uwb.php>

Con esta tecnología de comunicación se consigue un sistema de posicionamiento, configurando al menos 3 nodos de comunicación como balizas o anclajes y incorporando un cuarto al objeto o lugar al que averiguar la posición. Se obtiene esta mediante trilateración utilizando un método basado en TDoA (Time Difference of Arrival) el cual se denomina TWR (Two Way-Ranging).

5. DESARROLLO:

5.1. MARCO TEORICO:

En este capítulo se tratan los conceptos teóricos necesarios para entender la tecnología a tratar en este proyecto.

5.1.1. Métodos de cálculo de posición:

5.1.1.1. Triangulación:

Se denomina triangulación al cálculo matemático de puntos, medidas o áreas a partir del uso de la trigonometría de los triángulos.

Para el cálculo de una posición de un objeto, se debe de conocer la posición de al menos dos puntos de referencia, como mínimo una distancia entre el punto de referencia y el objeto. Y el valor de los ángulos que forman los puntos de referencia con el objeto.

Existen varios caminos para calcular los diferentes parámetros básicos que se deseen y todos basados en la trigonometría.

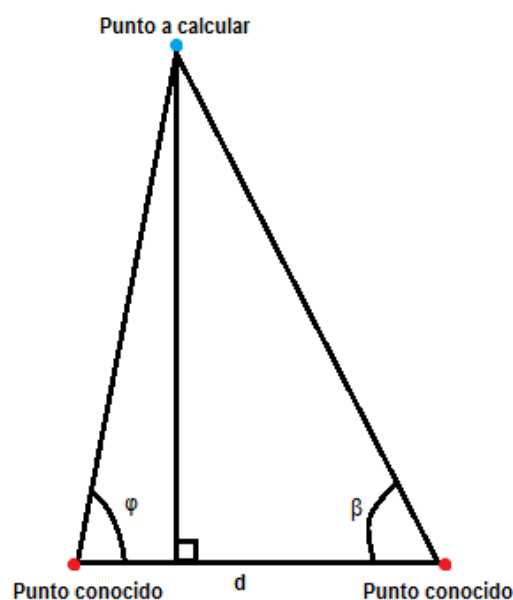


Ilustración 7: Triangulación

5.1.1.2. Trilateración:

La trilateración es un método matemático que emplea geometría de triángulos para determinar las posiciones relativas de objetos.

Para llevar a cabo su cálculo se necesita saber la posición de al menos 3 puntos de referencia y las distancias entre cada punto de referencia y el punto a calcular.

Usando un plano bidimensional como el representado en la ilustración 6, el punto B representa el punto a averiguar con la ayuda de los puntos conocidos P1, P2, P3. Conociendo el radio r_1 se reduce la posición del punto a conocer a una circunferencia. Al conocer también r_2 reducimos la posible solución a dos puntos, A y B. Finalmente al conocer la distancia r_3 , se obtendrá la posición exacta del punto B.

Para el cálculo se debe usar la formula general de la circunferencia, siendo las posiciones de los puntos de referencia los centros de las 3 circunferencias a trabajar. Y la distancia entre puntos de referencia y el punto a conocer, el radio de cada circunferencia respectivamente. Una vez planteadas las 3 ecuaciones se tiene un sistema de 3 ecuaciones y 2 incógnitas, las cuales serán las pertenecientes a las coordenadas del punto a averiguar.

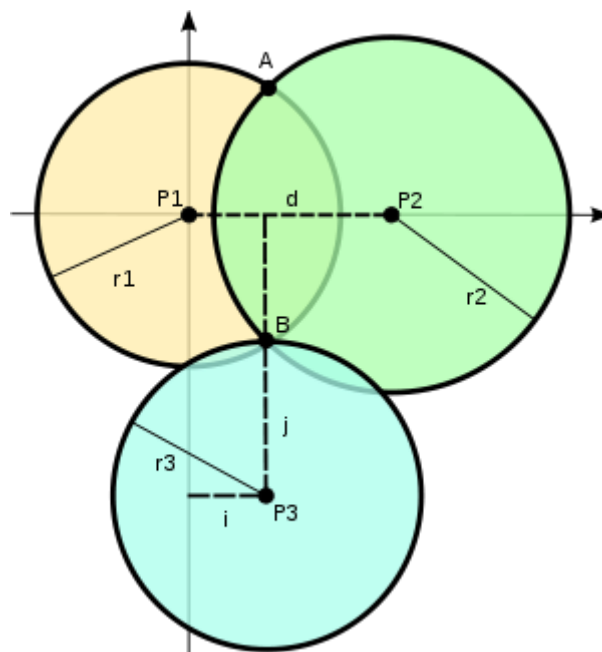


Ilustración 8: Trilateración en 2 dimensiones

<https://es.wikipedia.org/wiki/Trilateraci%C3%B3n#/media/File:Trilateration.svg>

INDICES

- Ejemplo:

Sabiendo las coordenadas de los 3 puntos de referencia, P1, P2, P3 respectivamente y la distancias (r1, r2, r3) entre el punto a calcular y los puntos de referencia. Se puede calcular la posición del punto a saber de la siguiente forma.

$$P1 = (5,5); r1 = \sqrt{10}$$

$$P2 = (2,2); r2 = 2$$

$$P3 = (9,0); r3 = 29$$

Con la ecuación genérica de la circunferencia se plantean las 3 ecuaciones a operar:

$$r^2 = (x - h)^2 + (y - k)^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} 10 = (x - 5)^2 + (y - 5)^2 \\ 4 = (x - 2)^2 + (y - 2)^2 \\ 841 = (x - 9)^2 + (y - 0)^2 \end{array} \right.$$

1. 1

Se obtiene un sistema de 3 ecuaciones y 2 incógnitas:

Resolviendo este sistema se obtiene la posición exacta del punto que se desea.

$$P = (4,2)$$

Esta resolución se puede trasladar también al plano tridimensional para poder tener en cuenta también la altura de las posiciones. En este caso se utiliza esferas en analogía al cálculo para el plano bidimensional que se utilizan circunferencias. Para el uso de este método se deben cumplir unas restricciones a la hora de realizar las mediciones y colocar los puntos de referencia. Todos los puntos de referencia deben estar en el plano z=0, es decir, a la misma altura. Uno de los puntos de referencia debe de estar en las coordenadas de origen (0,0) y otro de los puntos debe de estar en el eje x. Es posible, sin embargo, trasladar cualquier conjunto de tres puntos para cumplir con estos límites, encontrar el punto solución, y luego invertir la traslación para encontrar el punto solución en el sistema de coordenadas original. Este método

está basado en el cálculo de la derivación de las formulas de las esferas e igualándolas a 0.

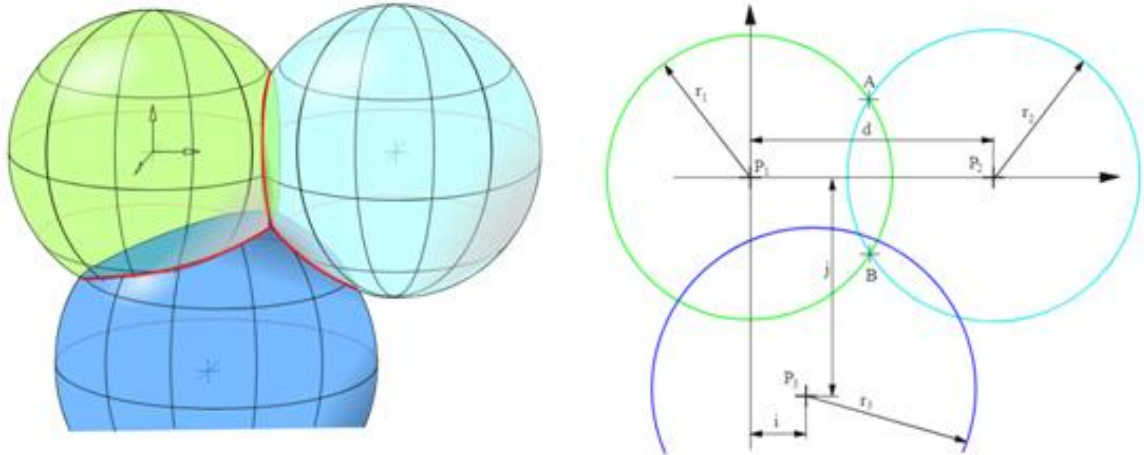


Ilustración 9: Trilateración en 3 dimensiones

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Trilateraci%C3%B3n.svg>

Se empieza con las ecuaciones de las 3 esferas:

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

$$r_2^2 = (x - d)^2 + y^2 + z^2$$

$$r_3^2 = (x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2$$

1. 2

Siendo:

r_1, r_2, r_3 : Distancias entre el punto a calcular y los de referencia.

d, j, i : las distancias entre los puntos de referencia.

Seguidamente restando la segunda ecuación a la primera y se resuelve para x :

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}$$

1. 3

Se sustituye la expresión anterior en la formula de la primera esfera y se obtiene la intersección de las dos primeras esferas:

$$y^2 + z^2 = r_1^2 - \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}$$

Igualando esta fórmula a la formula de la tercera esfera, tenemos:

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + x^2 + (x - i)^2 + j^2}{2j} = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x$$

1.4

Una vez obtenidas las coordenadas "x" e "y", del punto solución. se puede simplemente despejar "z" de la ecuación de la primera esfera:

$$z = \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2}$$

1.5

5.1.1.3. TWR (Two-Way Ranging):

Two-Way Ranging o traducido del inglés rango bidireccional es un método que se utiliza para averiguar la distancia que existe entre dos nodos que se comunican de forma bidireccional mediante tecnología de radio.

Este método determina el tiempo de vuelo de la señal de radio y luego averigua la distancia entre los dos nodos multiplicando este tiempo por la velocidad de la luz. Para medir la distancia se deben intercambiar tres mensajes. Un nodo inicializa el TWR enviando un mensaje de encuesta a la dirección conocida del otro nodo referido a TSP (Hora de envío de encuesta). El nodo receptor de esta encuesta registra el tiempo de recepción de la encuesta (TRP) y responde con el mensaje de respuesta en el momento TSR. EL nodo inicial al recibir el mensaje de respuesta registra el tiempo TRR y compone el mensaje final, donde se incluyen su identidad, TSP, TRR,TSF. Según la recepción de tiempo del mensaje final TRF y la información proporcionada por este mensaje , el segundo nodo puede determinar el tiempo de vuelo de la señal.

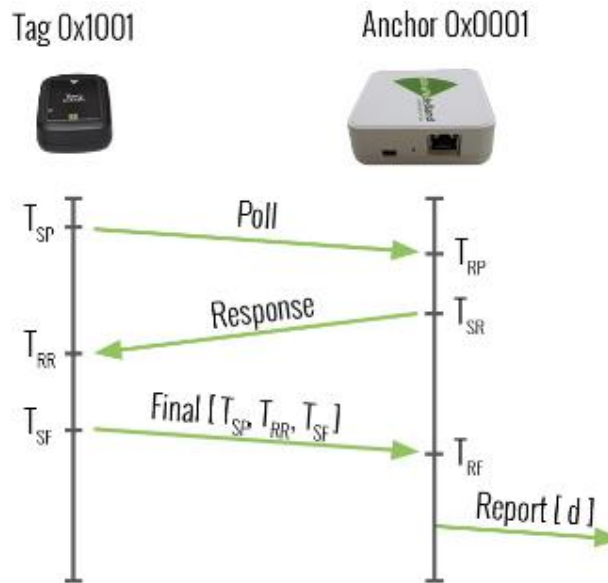


Ilustración 10: TWR

$$\text{Distancia} = \text{ToF} * \text{Velocidad de la luz}$$

$$\text{ToF} = \frac{[(T_{RR} - T_{SP}) - (T_{SR} - T_{RP}) + (T_{RF} - T_{SR}) - (T_{SF} - T_{RR})]}{4}$$

1. 6

5.1.2. Corrección de posición:

Tanto en la navegación semiautónoma como autónoma, siempre existe un instante de tiempo en el que el vehículo está fuera de la trayectoria o posición deseada. En estos casos se debe poder comparar la posición de ese instante del vehículo con la deseada y seguidamente trazar un rumbo con una trayectoria sentido y dirección óptimos para hacer regresar al vehículo a la posición correcta de trabajo.

5.1.2.1. Comparación de posiciones:

Sabiendo la trayectoria teórica que debe llevar el vehículo, se puede comparar la posición que este tiene con esta trayectoria.

Esto se puede realizar gracias a que una trayectoria siempre será una función cuadrática si se observa en segmentos más pequeños de esta. Por lo tanto se puede realizar una interpolación cuadrática entre los puntos que forman la trayectoria y donde debe estar en el momento del cálculo y medición el vehículo.

INDICES

Se necesitan al menos 3 puntos exactos del segmento, para así poder averiguar cuál es la función particular de este. A partir de estos 3 puntos, se sustituyen los valores de sus coordenadas en la ecuación general de la función cuadrática.

$$y = ax^2 + bx + c$$

1.7

Se obtiene así un sistema de 3 incógnitas y 3 ecuaciones o más. Resolviendo este sistema se obtienen los valores característicos de la función de ese segmento (a, b, c). Quedando una coordenada de posición en función de otra $y=f(x)$.

Una vez se tiene la ecuación característica del segmento de trayectoria a tratar, se puede comparar la posición real que tiene el vehículo con la teórica. Esta teórica se calcularía sustituyendo en la función anteriormente citada, uno de los dos valores que componen las coordenadas de la posición del vehículo real. Si el resultado de esta función es igual al otro valor coordenadas de la posición del vehículo no utilizada, este está en una posición correcta. De lo contrario estaría en una posición incorrecta.

5.1.2.2. Calculo de trayectoria:

Una vez conocida si es correcta o no la posición en la que se sitúa el vehículo. Se deberá de calcular la trayectoria que debe ejecutar el vehículo con su modulo, dirección, sentido y ángulo de giro. En el caso de estar en una posición correcta se deberá calcular la trayectoria para pasar al siguiente punto de esta, realizando así una correcta aplicación del trabajo. De lo contrario si es incorrecta, se deberá calcular la trayectoria para volver a la posición correcta que debe tener el vehículo y a partir de ahí volver a comparar y empezar el proceso de nuevo.

Para el cálculo del vector se necesitan saber las coordenadas de posición exacta del vehículo, y las coordenadas del siguiente punto donde debe de viajar este. Se toma como referencia para realizar estos cálculos el norte como la dirección y sentido que posee el vehículo en ese momento.

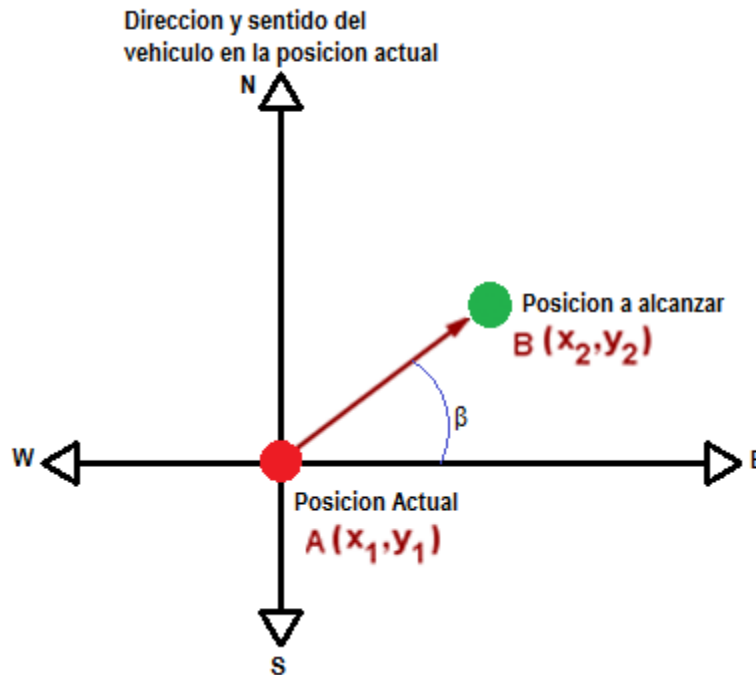


Ilustración 11: Vectorizado de trayectorias

Conociendo las coordenadas de los dos puntos se puede calcular los siguientes parámetros:

- Modulo: Longitud del vector. Distancia a recorrer por el vehículo.

$$|M| = \sqrt{(x^2 + y^2)}$$

1. 8

- Dirección: Pueden ser Norte, Sur, Este y Oeste. (N, S, E, W). Se calculara con el valor (positivo o negativo) de las componentes del vector
- Sentido: Sera siempre de la posición actual a la posición a alcanzar.
- Angulo de giro: Este ángulo es el que deberá rectificar el vehículo respecto de la dirección que lleva. Se calcula de la siguiente forma:

$$\tan \beta = \frac{y}{x} \quad \leftrightarrow \quad \beta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$$

1. 9

5.1.3. Comparativa de tecnologías:

En este capítulo se observan unas tablas en las que se pueden intuir de forma grafica las características de cada tecnología y la comparación con otras para así poder tener una idea de cual se amolda mejor a este proyecto.

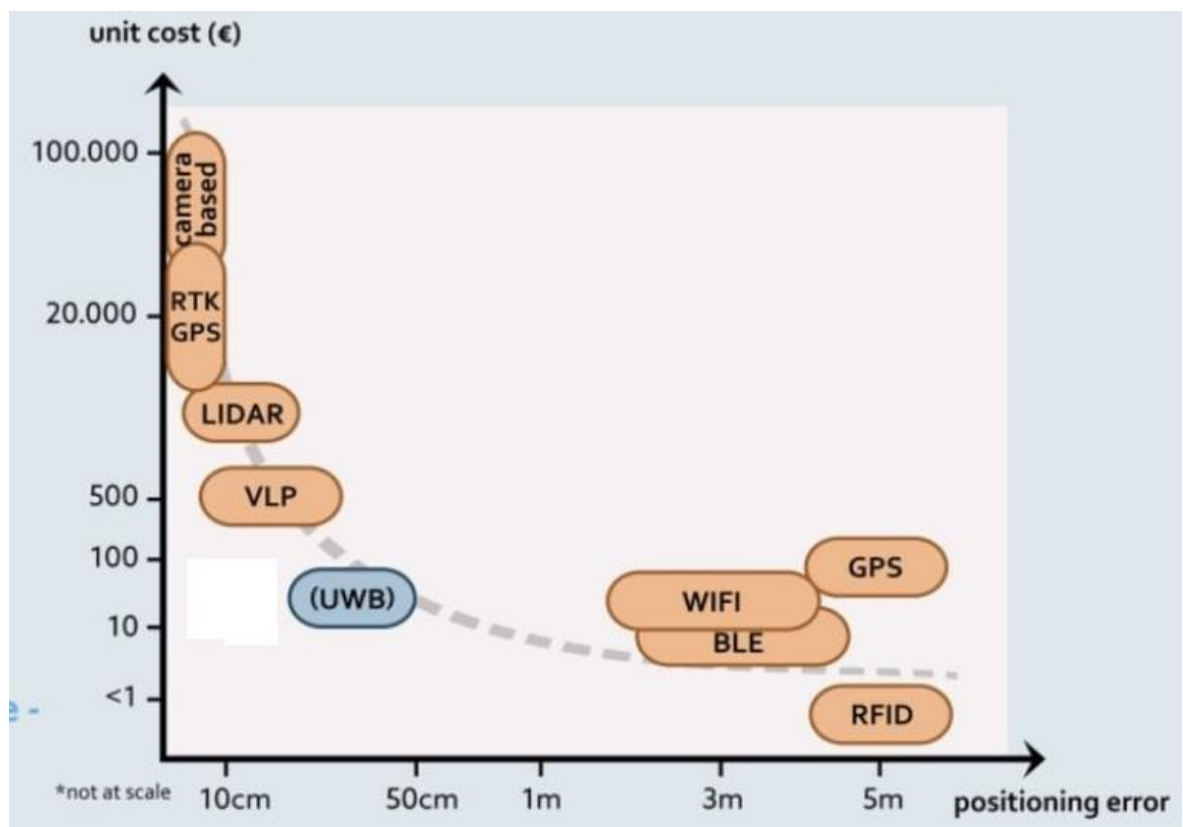


Ilustración 12: Comparativa LPS coste/precisión

<http://www.car.upm-csic.es/lopsi/static/publicaciones/docencia/Apuntes%20RF-LPS.pdf>

Technology	Identification	Accuracy	Presence Detection	Positioning type	Power Consumption	Range [m]	Disadvantages
Ultra Wideband	✓	cm - dm	✓	Absolute	Low	1 - 50	Signals can be blocked by large metallic objects
Wi-Fi	✓	m	✓	Absolute	High	1 - 50	Use of ISM band - interference
Bluetooth	✓	m	✓	Absolute	Low	1 - 20	Use of ISM band - interference, low range
RFID	✓	dm - m	✓	Absolute	Low	1 - 50	Low range and small coverage, unsecure communication
Camera	✗	mm - dm	✓	Absolute	High	1 - 10	Requires big computing power, requires

Tabla 1: Comparativa de tecnologías LPS

<https://www.sewio.net/technology/rtls-technology-comparison/>

INDICES

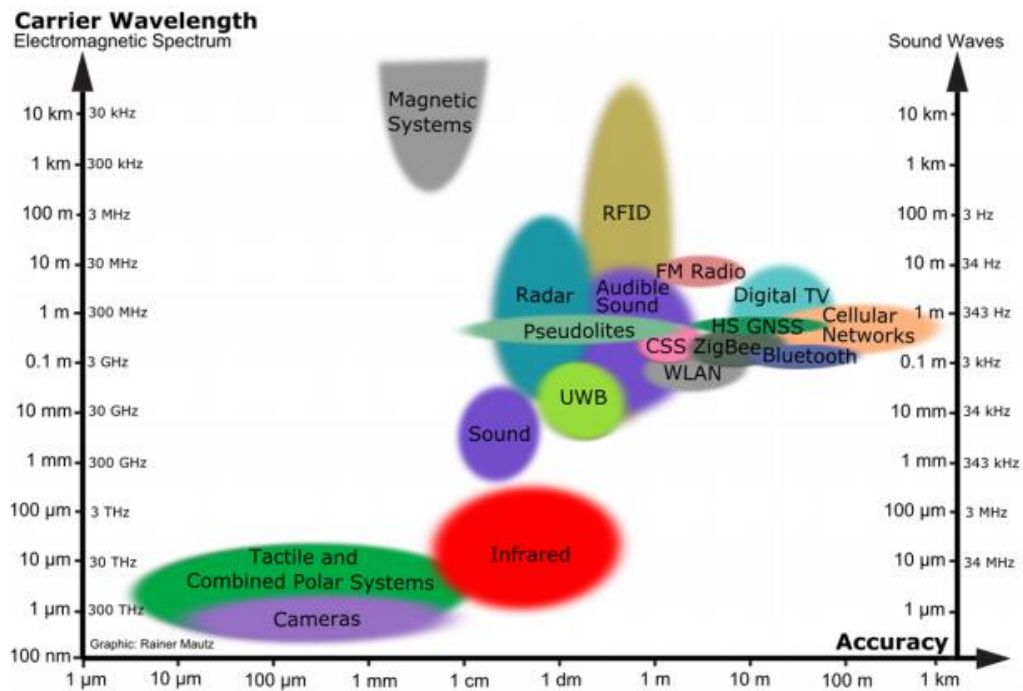


Ilustración 13: Grafica comparativa

<https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/54888/eth-5659-01.pdf>

En la Ilustración 13: Grafica comparativa se puede comparar distintas tecnologías según la precisión a la hora de su uso en posicionamiento, la longitud de onda de la portadora y el radio de operación máximo de trabajo.

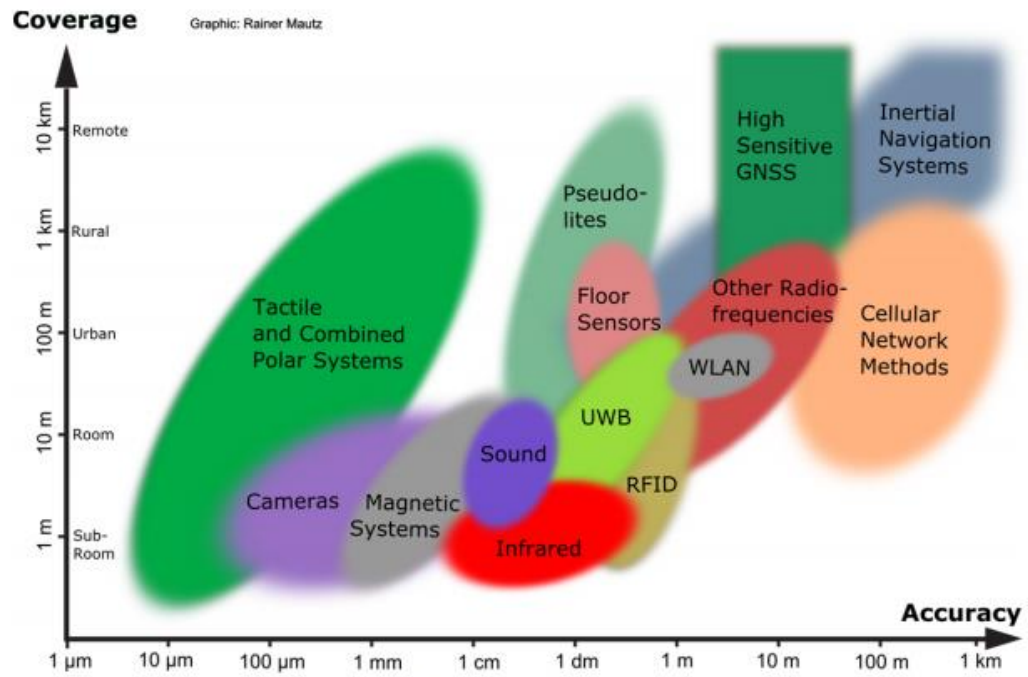


Figure 1.1 Overview of indoor technologies in dependence on accuracy and coverage

Ilustración 14: Grafica comparativa

<https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/54888/eth-5659-01.pdf>

En la Ilustración 14: Grafica comparativa se observa la comparación entre cobertura de trabajo y la precisión.

5.2. ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA:

A la hora de decidir que tecnología usar en este caso se deben de tener en cuenta dos características fundamentalmente. El entorno donde se va a operar y la precisión mínima requerida para tal operación. En este caso este proyecto va enfocado a la navegación agrícola en plantaciones de árboles tipo frutales de hueso, madera, etc.



Ilustración 15: Plantación Albaricoqueros

Estas plantaciones se caracterizan por tener un marco de plantación bastante estrecho para aprovechar las áreas a plantar, ya que al tener mayor producción por hectárea mayores beneficios. Este principio hace que los vehículos que laborean estas explotaciones deban tener unas características especiales. No tienen cabina, llevan instaladas unas ruedas más bajas y montan unos motores lo suficientemente potentes para poder arrastrar las herramientas necesarias en el laboreo, normalmente a partir de 75cv pero siempre se intenta reducir al máximo el tamaño sobre todo en altura.



Ilustración 16: Ejemplo de tractor frutero New Holland

<https://www.innovagri.es/empresas/nueva-serie-de-tractores-fruteros-new-holland-td4f.html>



Ilustración 17: Ejemplo de tractor frutero New Holland

<http://profesionaleshoy.es/jardinaria/2018/02/22/new-holland-presenta-en-fima-la-nueva-serie-de-tractores-t4fb-frutero-bajo/13678>



Ilustración 18: Ejemplo de tractor frutero John Deere serie 5G

<https://www.deere.es/es/tractores/peque%C3%B1o/serie-5g-fase-iii-b-especiales/>

En las ilustraciones anteriores se puede observar que en estos vehículos siempre se intenta disminuir su altura para poder pasar por las plantaciones sin tener que bajar la potencia de los motores por ello demasiado.

En la Ilustración 17: Ejemplo de tractor frutero New Holland se puede observar un tipo de plantación que tiene también las características citadas anteriormente. Se trata de una plantación de uva en formato parral horizontal. En ella tiene que pasar el vehículo íntegramente por debajo, contando que sobre él también va montado el conductor de este.

Todo esto es factor clave para estos cultivos, ya que en la mayoría a la edad adulta de las plantaciones, estos deben pasar por debajo de los árboles. Debido al tamaño de estos árboles, se llegan a tocar unas hileras con otras, dejando cada calle de la hilera como si de un túnel se tratase.



Ilustración 19: Ejemplo de hilera en plantación de Albaricoqueros

A parte de conocer en que campos se va a desarrollar la maquinaria, se debe de saber la precisión mínima que se debe de tener en un sistema de navegación como anteriormente se cita en el inicio del apartado. Para que pueda ser operativo sin tener ningún percance a la hora de trabajar con este.

En este caso la precisión mínima que se necesita no debe ser en ningún caso superior a un metro. Para razonar esta precisión se debe de conocer las herramientas que se usan a la hora de laborar.

En la última generación de aperos, trituradoras, pulverizadores, etc. Se lleva empleando desde hace años un sistema automatizado, ya sea de accionamiento mecánico o hidráulico. Este sistema consta en que las partes laterales de los aperos que trabajan más cerca de las plantas son plegables o en algunos casos retractiles. Junto con esto, se dispone el apero de la automatización necesaria para que en el caso de detectar que se acerca demasiado al tronco de la planta este se contrae. Con este sistema se evita que se pueda dañar las plantas o romper el apero a la hora de

INDICES

trabajar. A estos sistemas se les suele denominar inter-cepas o inter-líneas de forma informal entre los usuarios del gremio.

No existen especificaciones técnicas de estos sistemas, ya que se producen en talleres de maquinaria en los cuales se tiene en cuenta el tipo de cultivo que tiene el cliente y el marco de plantación. Pero por experiencia propia del autor de haber trabajado con estos sistemas, es seguro que si el rumbo del vehículo se desplaza de su trayectoria correcta un metro o más esta asegurado que o se arranca la planta o se rompe el apero. Y esto es en el caso de solo llevar un inter-cepas en un solo lado y trabajar cada banco de la hilera a dos pasadas. En el caso de llevar un inter-cepas a cada lado del apero y trabajar a una hilera por pasada, la trayectoria no se puede desviar de la correcta un máximo de entre unos 50cm-75cm según el apero que se lleve y el marco de plantación.



Ilustración 20:Apero con Inter-cepas mecánico

<http://talleresmetalicosgil.com/reja-loca/>



Ilustración 21: Apero con Inter-cepas hidráulico

<https://tiendatractoresburgos.com/2012/11/13/intercepas-serie-c-sanchez-beato/>



Ilustración 22: Trituradora con un inter-cepas

INDICES

<https://id-david.com/productos/arbo/>



Ilustración 23: Trituradora con dos inter-cepas

<http://sermagasa.blogspot.com/2013/08/trituradoras-de-hierba-y-restos-de-poda.html>



Ilustración 24: Segadora dos inter-cepas trabajando

<http://www.interempresas.net/Agricola/Articulos/42694-Talleres-Corbins-incorpora-a-su-gama-de-productos-la-prestigiosa-marca-Fischer.html>

Teniendo en cuenta todo lo citado anteriormente. El entorno de trabajo y la precisión necesaria para el correcto empleo de las herramientas. Se pasa a continuación al razonamiento de que tecnología puede cumplir con las exigencias.

Empezando por el posicionamiento global, solo podrían ser aceptables los sistemas que incorporan además de posicionamiento por satélite un control del error de forma diferencial. Como puede ser por ejemplo un sistema de posicionamiento GNSS con el sistema diferencial RTK.

De los sistemas globales este sería el único que podría cumplir el requisito de la precisión. Ya que con este se consiguen precisiones de centímetros. En cambio sin la corrección diferencial su precisión es de metros, por lo tanto descartable para este caso.

Por otro lado, como inconveniente en este sistema se encuentra que depende de las señales que llegan desde los satélites. Esto hace que la labor de posicionamiento se dificulte al tratarse muchas veces en que el vehículo no tiene vista directa al cielo, debido a que lo oculta el cultivo. Este pierde precisión como se muestra en (Quintana, s. f.) en el posicionamiento y además se deben de aplicar mas métodos de posicionamiento o navegación para complementar estos fallos a causa de una mala cobertura (Milanés et al., 2008).

Por este motivo esta tecnología no es la más apropiada para el campo que se está tratando.

Por otro lado, enfocándose en la tecnología de posicionamiento local. Desde un punto inicial se descartan varias tecnologías por falta de precisión y cobertura de trabajo. Refiriéndose al posicionamiento mediante W-LAN/Wifi y RF-ID.

Por otra parte para el posicionamiento mediante GSM se debe contratar el servicio mediante contratación telefónica, que conlleva unos gastos adicionales a los de la instalación. Además por la precisión también queda fuera de las opciones a usar esta tecnología.

Por último el posicionamiento mediante UWB ofrece una precisión de 10cm incluso si el objeto a posicionar se mueve a 5m/s. En cuanto a alcance puede llegar a ser de hasta 290m según los fabricantes de módulos y microchips de esta tecnología.

INDICES

Por lo tanto el posicionamiento mediante UWB puede ser válido para el objetivo de este trabajo. Como inconveniente puede decirse que se tendrían que poner tantas balizas como sean necesarias para cubrir las distancias que pueden llegar a medir las fincas donde se va a trabajar. Teniendo en cuenta que el alcance podría llegar a ser teóricamente de 150 metros en el peor de los casos. Saldría que se deberían de instalar mínimo 4 balizas cada 9 hectáreas de forma estimada. Lo que implicaría un gasto estimado de 15€ por hectárea solo del material necesario para realizar la correcta localización del vehículo autónomo.

5.2.1. Módulos UWB:

Esta tecnología es relativamente nueva y posee una estandarización ECMA-368, que coincide con el ISO/IEC 26907 y emplea OFDM multibanda (MB-OFDM).

Existen muy pocos productores de microchips de radiofrecuencia UWB. Uno de ellos y el que mejores precios tiene y está al alcance de cualquier usuario tanto particular como profesional a nivel comercial es la casa Decawave. Esta firma multinacional posee un microchip al que denomina DW1000 el cual es un transceptor inalámbrico basado en técnicas de banda ultra ancha (UWB). Según la firma este chip permite desarrollar soluciones de RTLS (Real Time Location Sistem) rentables con una ubicación precisa tanto en zonas interiores como en exteriores con unas precisiones de hasta 10 cm. Basado en IEEE802.15.4-2011 la cual es una norma técnica que define el funcionamiento de las redes inalámbricas personales (LP WPAN) El microchip DW1000 también apunta a las aplicaciones de internet de la cosas, gracias a la capacidad de comunicación de hasta 6.8Mbps.

Este microchip se proporciona junto con una antena, denominándose el conjunto DWM1000, conectada a la propia PCB que proporciona un rango de comunicaciones de hasta 300 m. El modulo está preparado para realizar las conexiones necesarias sobre este para qué el usuario pueda realizar su propio diseño y aplicación. Este modulo esta en el mercado sobre unos 23,28 € cada unidad.

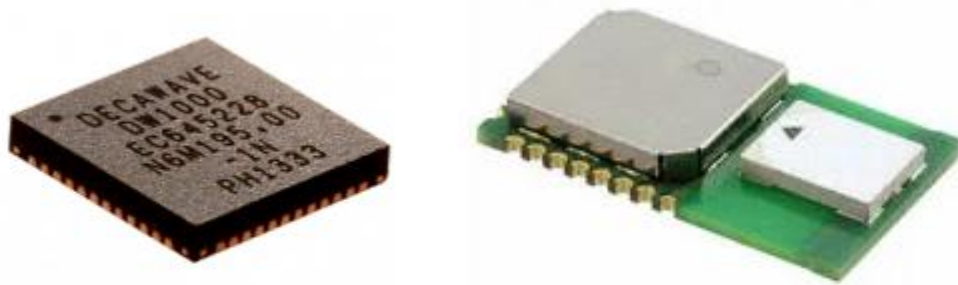


Ilustración 25: DW1000 y DWM1000.

Basados en este mismo microchip, posee módulos más desarrollados para facilitar al usuario su aplicación en diferentes aplicaciones y utilizando los recursos proporcionados por la casa, pensados siempre para la localización y la navegación. De tal forma que se tiene el módulo DWM1001. Este combina todas las prestaciones del DWM1000 con un MCU nRF52832 de Nordic Semiconductor y un acelerómetro de 3 ejes. Cada módulo o nodo puede configurarse como nodo móvil (tag) o como nodo fijo (anchor) dentro del sistema RTLS y , además puede actuar como dispositivo de puerta de enlace de red para comunicarse y enviar datos mediante redes locales o mediante internet. Este producto está en el mercado por unos 20,59 € por cada unidad.

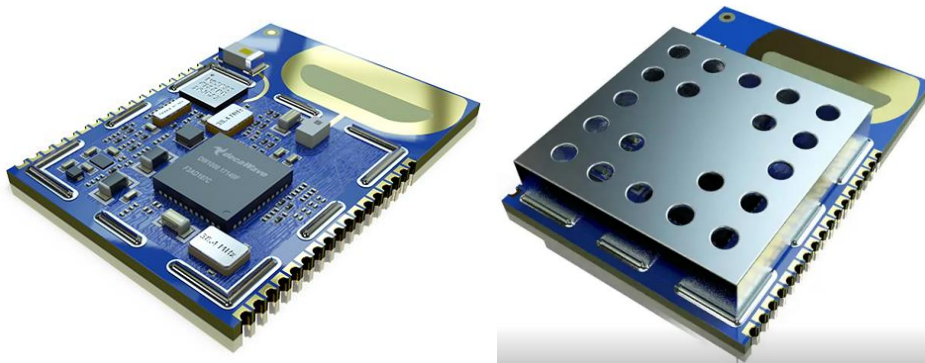


Ilustración 26: DWM1001

De la misma forma que el anterior módulo existe otro aun más desarrollado basado en este. Incluye conector para la batería y circuito de carga, leds de estado, botones de reset, conexión diseñada especialmente para la Raspberry Pi y conector USB. Además, la placa viene con J-Link OB que agrega funciones de depuración de

INDICES

software y puerto virtual COM. Este modulo, DWM1001-DEV enfocado como placa de desarrollo, está en el mercado en un precio unitario de 34,10 €.



Ilustración 27: DWM1001-DEV

Siendo este modulo el más completo, y fácil de implementar en un diseño gracias a su compatibilidad con tantos tipos de comunicación y depurado, además de la posible conexión de la Raspberry Pi mediante el puerto SPI.

En el caso particular del proyecto se va a elegir el modulo DWM1001-DEV por tener más posibilidades a la hora de desarrollar la aplicación que se requiere. Los documentos tanto Datasheets, esquemáticos de la placa, y guía de aplicaciones se adjuntan al final de el documento.

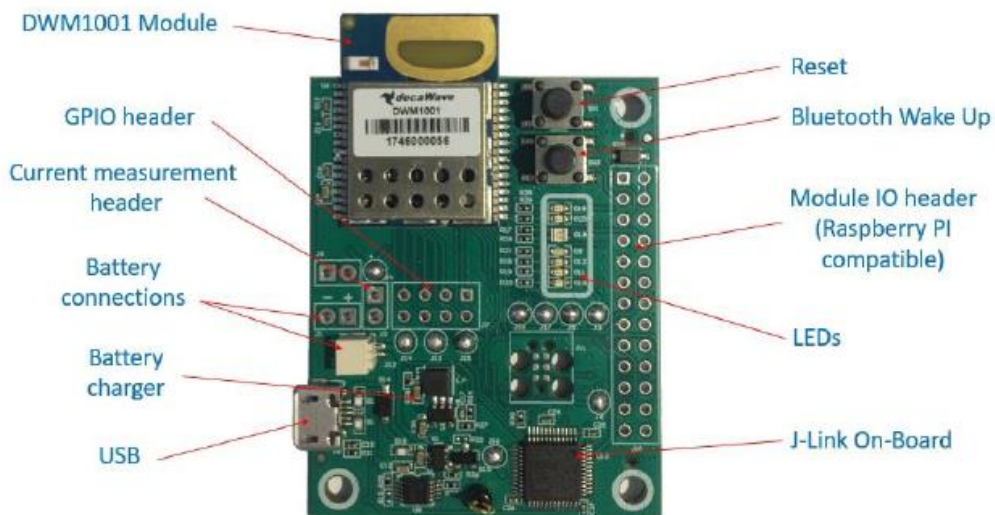


Ilustración 28: DWM1001-DEV descripción

5.2.2. *Raspberry Pi:*

Es un ordenador de placa única reducida o ordenador de placa simple (SBC) de bajo coste desarrollado en el reino unido por la fundación Raspberry Pi. Es un producto de uso libre por la parte del hardware y de código abierto en su software. Siendo su sistema operativo oficial una versión adaptada de Debian, denominada Raspbian. Aunque permite usar un sinfín de sistema operativos.

Esta plataforma está basada en Linux, por lo que se debe de conocer el entorno de navegación, comandos, compiladores editores de texto, etc. Ya que el proyecto necesita de una programación en c para poder comunicarse la Raspberry con el modulo DWM1001-DEV y además contener los pertinentes algoritmos para que sea posible la navegación del vehículo por la parcela.

Ofrece procesador Broadcom, memoria RAM, una GPU, puertos USB, HDMI, Ethernet, 40 pines GPIO y un conector para una cámara. La memoria se proporciona mediante una tarjeta micro SD.

En el caso particular del proyecto se utiliza una Raspberry Pi 3 modelo B+, la cual tiene las siguientes características técnicas:

INDICES

RASPBERRY PI 3 MODEL B+	
PROCESADOR	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC
FRECUENCIA DE RELOJ	1,4 GHz
GPU	VideoCore IV 400 MHz
MEMORIA	1GB LPDDR2 SDRAM
CONECTIVIDAD INALÁMBRICA	2.4GHz / 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac Bluetooth 4.2, BLE
CONECTIVIDAD DE RED	Gigabit Ethernet over USB 2.0 (300 Mbps de máximo teórico)
PUERTOS	GPIO 40 pines HDMI 4 x USB 2.0 CSI (cámara Raspberry Pi) DSI (pantalla táctil) Toma auriculares / vídeo compuesto Micro SD Micro USB (alimentación) Power-over-Ethernet (PoE)
FECHA DE LANZAMIENTO	14/3/2018
PRECIO	<u>39,75 euros</u>

Tabla 2: Características Raspberry Pi

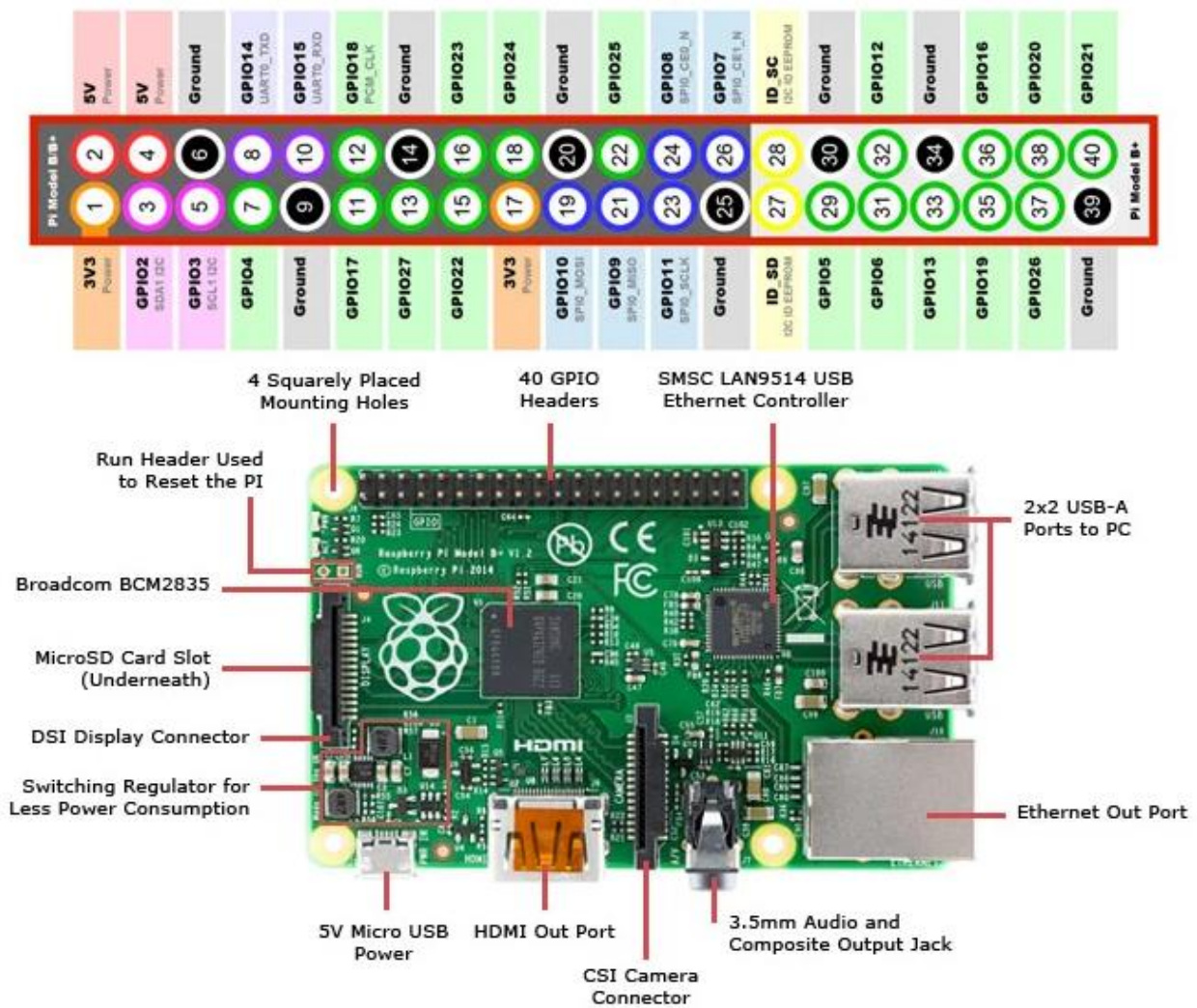


Ilustración 29: Arquitectura Raspberry Pi

5.2.3. Conexionado:

Module Development Board RPi connector		Module Pin Number (and Name) from DWM1001 Module Data Sheet
Pin Number	Schematic Net Name	
3	SDA_RPI	Pin 23 (GPIO_15)
5	SCL_RPI	Pin 25 (GPIO_8)
9	GND	GND
15	GPIO_RPI	Pin 19 (READY)
19	SPI1_MOSI	Pin 27 (SPIS_MOSI)
21	SPI1_MISO	Pin 26 (SPIS_MISO)
23	SPI1_CLK	Pin 25 (GPIO_8)
25	GND	GND
2	VRPI	Provides input power to Module Development Board. (Not connected directly to module)
4	VRPI	
6	GND	GND
8	TXD	Pin 18 (UART_RX)
10	RXD_RPI/RXD	Pin 20 (UART_TX)
12	RESET	Pin 33 (RESETn)
14	GND	GND
20	GND	GND
24	CS_RPI	Pin29 (SPIS_CSn)

Tabla 3: Conexión Raspi-DWM



Ilustración 30: Conector MMP-0275

El conexionado del modulo con la Raspberry Pi es muy simple, ya que el modulo DWM1001-DEV está preparado para un conexionado rápido. Solo se necesita soldar en

el módulo un conector MMP-0275 (nombre comercial). Y seguidamente se puede conectar el módulo directamente sobre la Raspberry Pi.



Ilustración 31: Conexionado con conector

5.2.4. Presupuesto:

En el proyecto se utilizan 5 módulos DWM1001-DEV y una Raspberry Pi, por lo que el presupuesto es el siguiente:

Dispositivo	Precio unitario	Unidades	Precio total
DWM1001-DEV	34.10€	5	170.5€
Raspberry PI	39.75€	1	39.75€
ConectorMMP-0275	2.25€	1	2.25€
Precio total:			212.50€

Tabla 4: Presupuesto

Dados los valores descritos anteriormente, se debe de tener en cuenta que para realizar una instalación completa se debe de reacondicionar el sistema. Dotando a los

INDICES

nodos de una protección segura y normalizada frente a los agentes externos. Además de instalar baterías a los nodos fijos para su funcionamiento inalámbrico dentro de la finca.

También el nodo móvil debe de estar protegido con su respectiva carcasa. Este no necesitara de batería puesto que se debe de conectar al sistema de alimentación del vehículo en el que vaya implantado mediante la Raspberry Pi.

A continuación se da un presupuesto a modo de ejemplo del material extra que se debería de incorporar por cada nodo para poder lanzar al mercado el sistema de navegación.

Dispositivo	Precio unitario
Caja de ABS Fibox AB 121609, IP67, No, 160 x 120 x 90mm	24.73€
Batería recargable litio (Li-Ion) 5V 4800mAh USB YSN05480	26.50€
Precio total:	51.23€

Tabla 5: Presupuesto adicional

Por lo tanto, si se quiere realizar la instalación de este sistema aplicado a un solo vehículo, se tienen unos gastos fijos del nodo móvil junto con los 4 fijos que se necesitan imprescindiblemente de 417.42€. Y aparte, según como sea de grande la parcela. Se tienen unos gastos variables según la superficie a cubrir de 105.35€ por hectárea aproximadamente.

5.3. APLICACIÓN:

En este apartado se van a dar explicación a todos los puntos necesarios que se deben de realizar para poder realizar de forma practica una aplicación de este proyecto.

5.3.1. Arquitectura del sistema:

Las partes fundamentales para probar el proyecto constan de los módulos de UWB junto con el sistema de control, del cual se encarga la Raspberry pi.

A continuación se muestran los diagramas de alto nivel de los distintos componentes que se usan. Se debe de tener en cuenta que estos solo representan el sistema de navegación del vehículo.

Para obtener un sistema completo se le deberían de añadir el sistema de control de los actuadores, los actuadores (avance/retroceso, giro, movimiento del apero que lleve el vehículo, control de profundidad, sistema de seguridad, etc.), además de incorporar un sistema HMI (human Machine Interface) para un control intuitivo del sistema para el operario. Pero este proyecto se centra en el diseño de un sistema de navegación, que a partir de este se puede incluir en conjunto el sistema anteriormente citado que compondría el vehículo sumando además los componentes mecánicos que lo conformarían.

5.3.1.1. Diagrama de alto nivel:

- DWM1001-DEV:

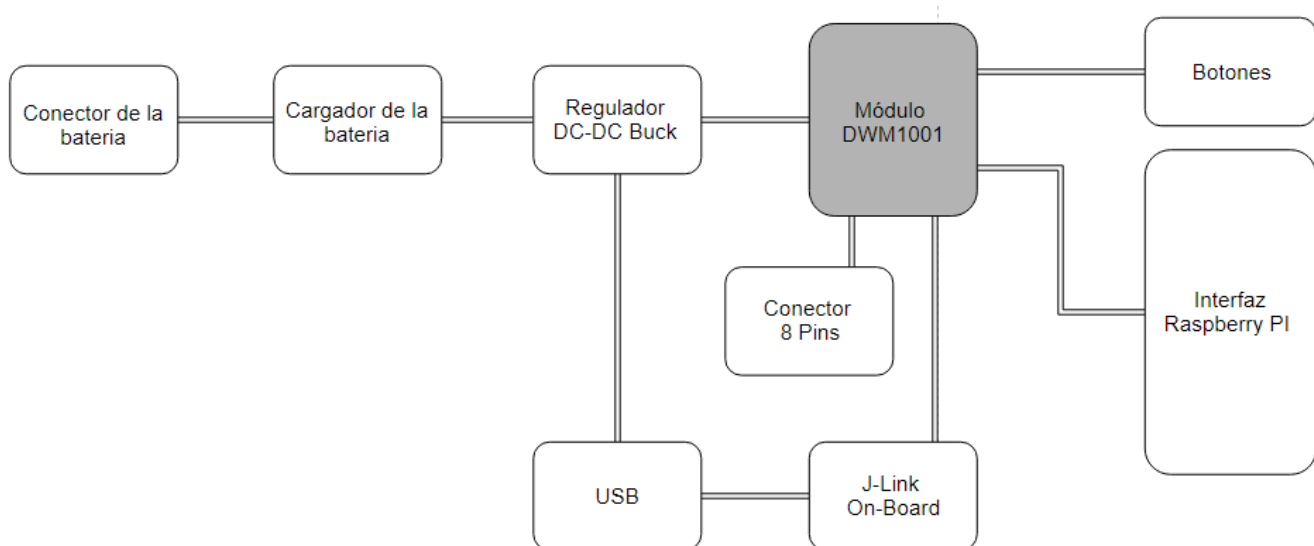


Ilustración 32: Diagrama DWM1001-DEV

INDICES

- DWM1001:

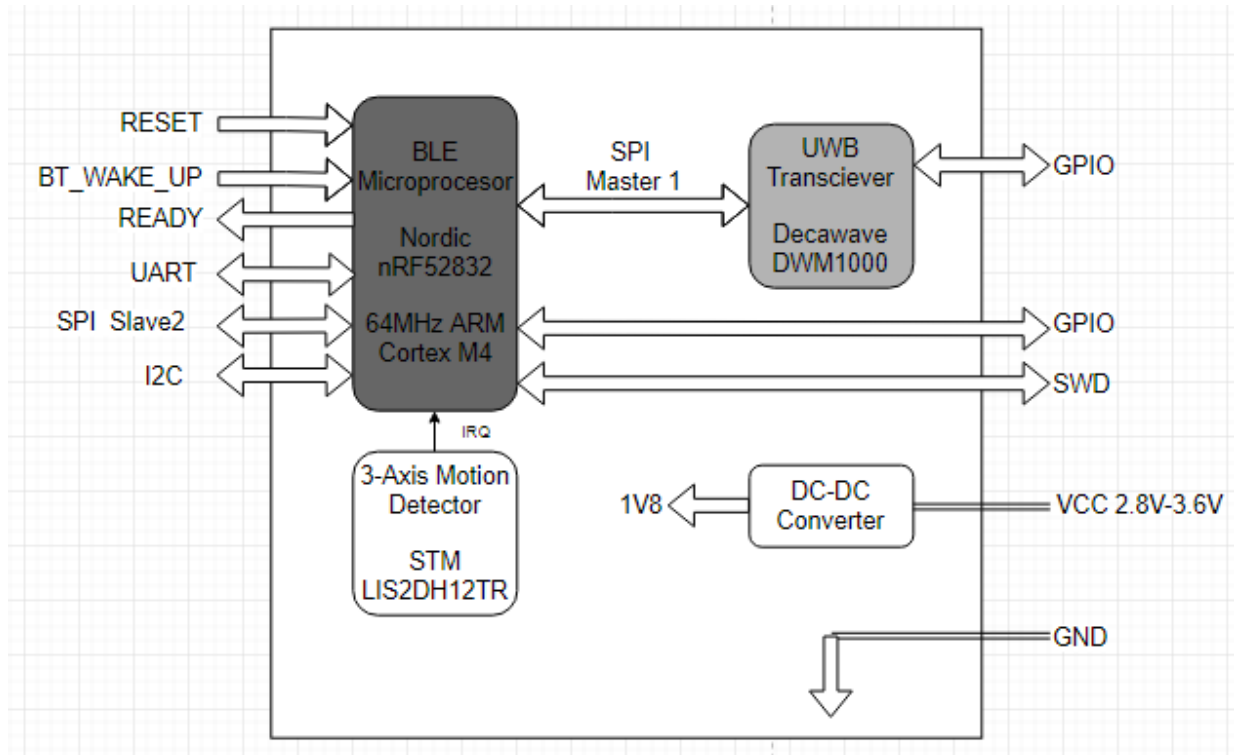


Ilustración 33: Diagrama DWM1001

- RASPBERRY PI:

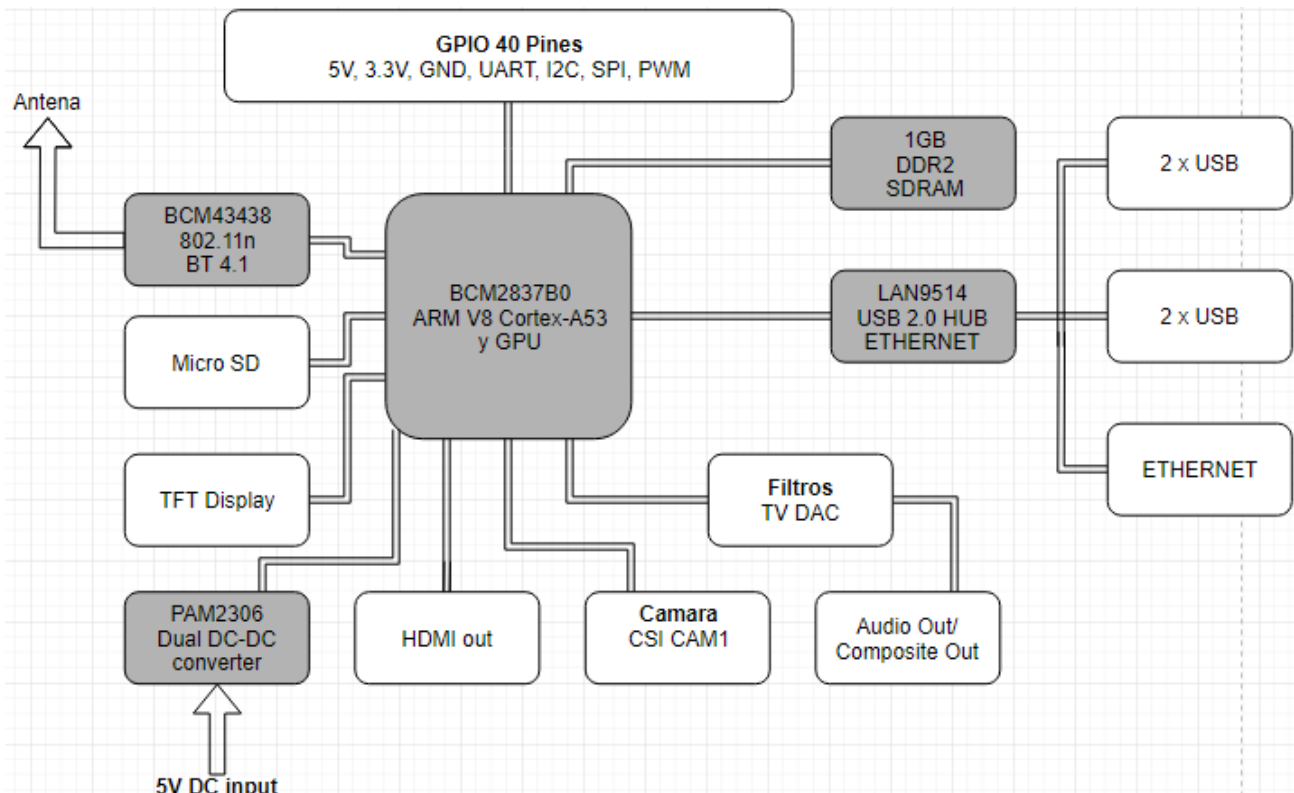


Ilustración 34: Diagrama RASPBERRY PI

5.3.1.2. Red de localización:

La red de localización se compone mínimo de 4 nodos o balizas (Anchors en inglés) que permanecen instaladas en la finca que se desea trabajar de forma estática. Estas siempre se van a colocar en el mismo punto y el mismo orden cada vez que se va a trabajar la finca o incluso se podría dejar instaladas con la cierta seguridad requerida permanentemente en la finca.

Una quinta baliza será la que se instalara a bordo del vehículo en que se opera (tag). Esto ofrece la posibilidad de centrar todo el control sobre el vehículo al poder incluir el control de navegación (Raspberry pi) también a bordo. Este punto ofrece al diseño varias ventajas, al ser más fácil si se opta por en el montaje insertar un sistema HMI obtener una comunicación más simple al disponer de varios métodos de comunicación.

En cuanto a la orientación de las balizas tanto fijas como móviles se debe de intentar en la medida de lo posible que permanezcan en vertical. Ya que según el

INDICES

datasheet del producto se garantiza que la comunicación es más próspera tanto en calidad como en alcance.

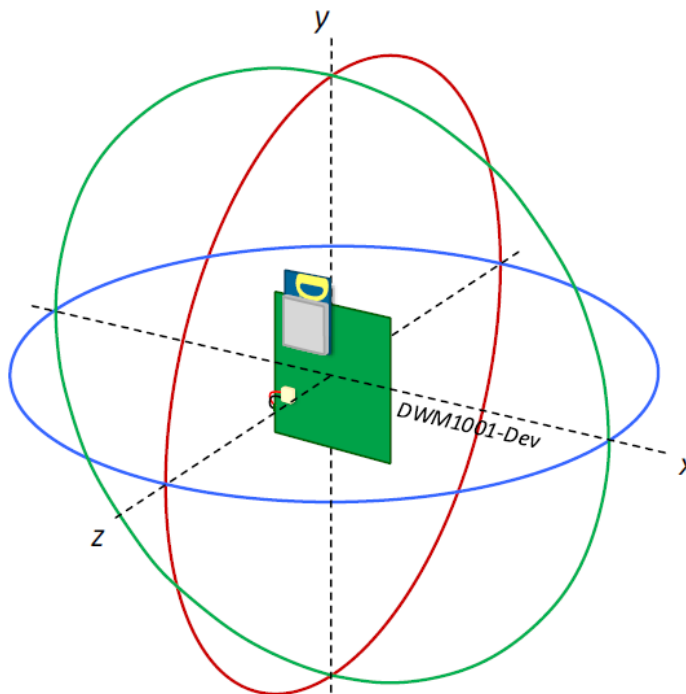


Ilustración 35: DWM1001-DEV Antenna Radiation Pattern Planes

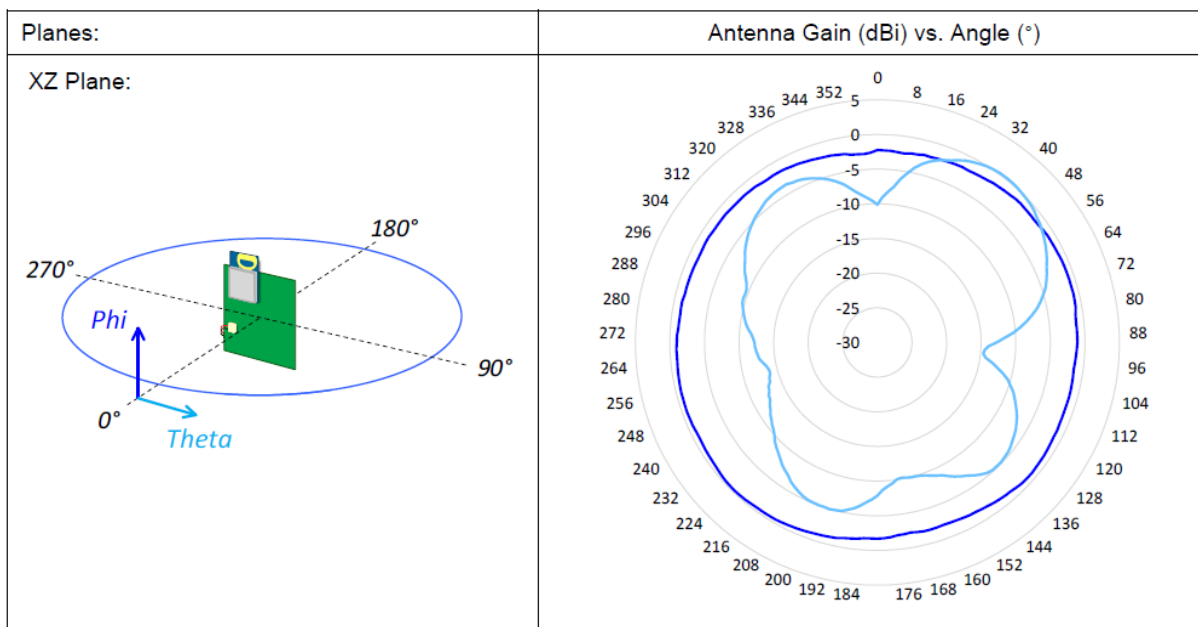


Tabla 6: Antenna Radiation Patterns

En cuanto al tipo de distribución de las balizas en este caso al ser un ejemplo práctico al que solo se usa de prueba y existir 4 simplemente se colocaran en forma rectangular. Una de ellas se debe configurar como iniciador, la cual se le asigna la posición (0,0). A partir de estas las siguientes balizas se les configura la posición que ocupan en el plano. Teniendo dos opciones, que las balizas se auto-configuren a partir del método TWR, o configurando manualmente la posición que ocupa cada baliza. Una vez configurada la red ya se puede empezar a calcular de forma instantánea la posición del nodo móvil.

En la siguiente imagen se representa con una "I" la baliza iniciadora de posición (0,0), las siguientes balizas representadas como una "A" se configuran a partir de esta.

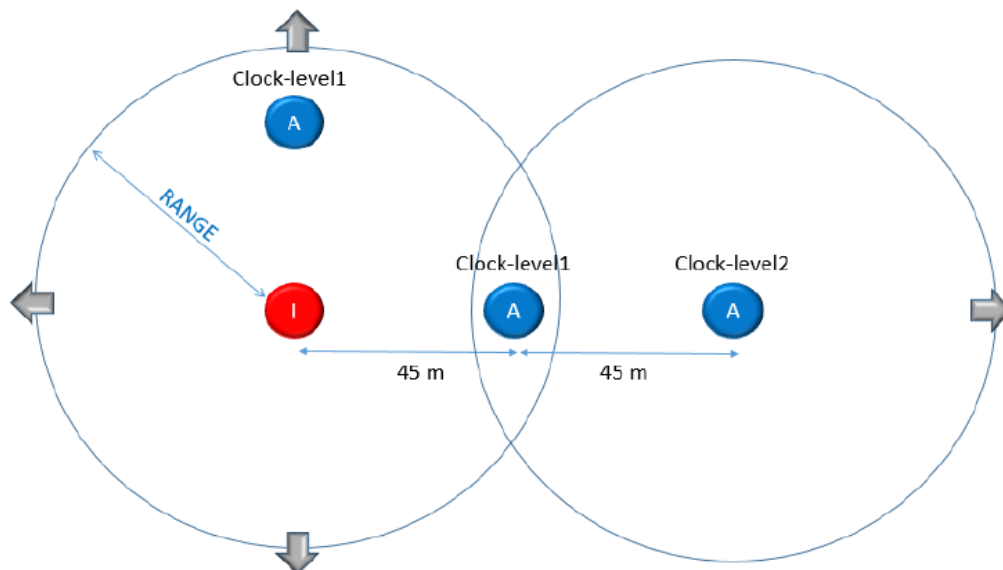
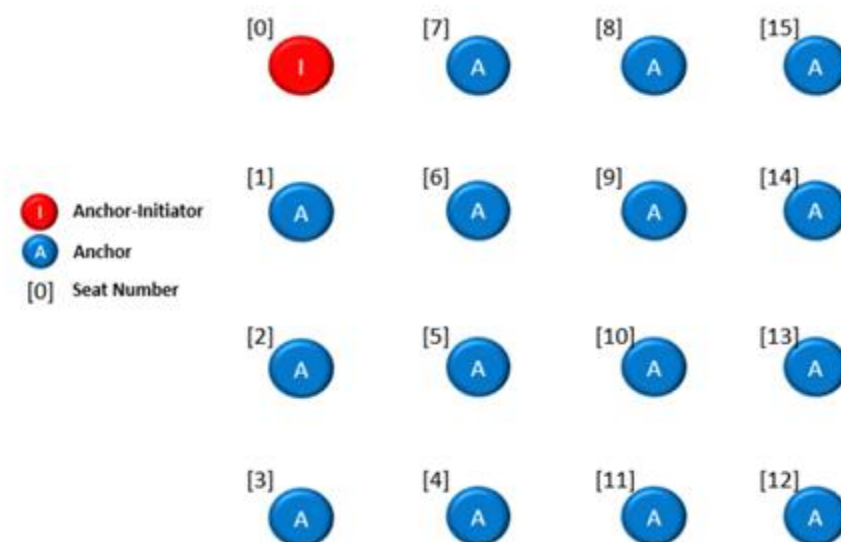


Ilustración 36: Configuración de la red

A partir de esta arquitectura y en un futuro en vistas a poder cubrir parcelas más grandes o incluso fincas enteras, se pueden crear redes de hasta 16 nodos fijos. Este caso estaría pensado para utilizar los módulos en sus funciones óptimas, es decir sin variar la velocidad óptima de transmisión. Quedando una distancia entre balizas fijas de unos 45 metros y realizando de forma simple el cálculo para una red como la citada anteriormente se podría cubrir una extensión de 3.24 hectáreas aproximadamente . En zonas a cubrir superiores a estas medidas se deben de crear nuevas redes de UWB con nuevos iniciadores y unirlos estas mediante comunicaciones en puertas de enlace tanto en redes locales como en internet. Variando la velocidad de transmisión se

INDICES

puede llegar a instalar las balizas hasta a 300 metros entre ellas, cubriendo así una superficie de 144 hectáreas en un mismo número de elementos que en el caso citado anteriormente.



Concluyendo la red que se va a probar en este proyecto se va a distribuir de la manera que se muestra en la imagen a continuación. Siendo los nodos denominados con una "A" (Anchors) los nodos fijos, con la "I" (Initiator) el nodo fijo iniciador y con la "T" (Tag) el nodo móvil que irá a bordo del vehículo.

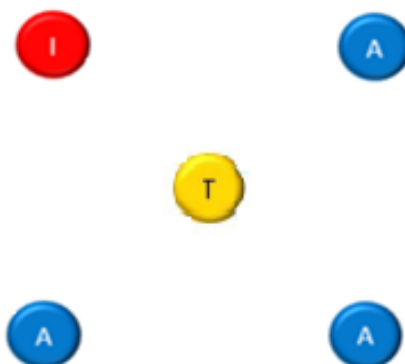


Ilustración 37: Red UWB del proyecto

5.3.1.3. Diagramas de flujo:

A continuación se muestran los diagramas de flujo tanto del programa de guardado de la trazada como del programa encargado de realizar la navegación por la zona de trabajo comparando con la trazada.

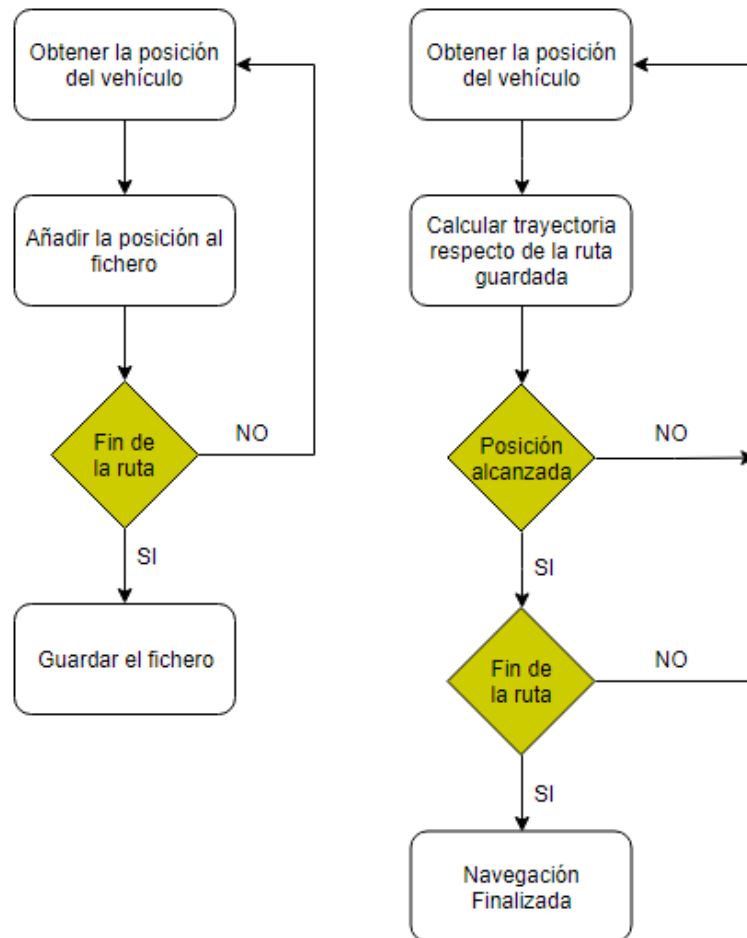


Ilustración 38: Diagramas de flujo trazador y navegador respectivamente

5.3.2. *Entorno de programación:*

El modulo DWM1001-DEV permite la conexión a la Raspberry Pi mediante el puerto SPI, por lo que se puede realizar el programa directamente en la Raspberry para realizar el control de la navegación del vehículo. Del cual se tendrá en todo momento la posición en tiempo real de este gracias al modulo.

En cuanto al lenguaje y entorno se elige realizar los programas necesarios en c, los cuales se ejecutaran en el terminal de la Raspberry. Se elige hacerlo de este modo por ser la forma más simple a la hora de programar y entender el lenguaje, ya que el lenguaje en c es universal.

Este programa debe poder guardar las posiciones en memoria, llamadas tracks o trazadas, por los requerimientos del proyecto. Para resolver este hito de guardar datos de forma permanente en forma de entrada y salida, («Ficheros C/C++ - Generalidades», s. f.)se tiene la opción de guardar estos datos en ficheros.

Muchos sistemas distinguen entre dos tipos de ficheros tipo binario (.bin) y tipo texto (.txt). («Curso de C++ - Trabajar con ficheros», s. f.) En otros sistemas no existe distinción, todos son binarios en esencia, ya que los ficheros de texto son ficheros binarios con un rango limitado para los valores que se pueden almacenar.

En general para almacenar información que pueda o deba ser manipulada por el editor de texto se usaran ficheros tipo texto. En cambio, para almacenar información para valores que no estén limitados se utilizaran ficheros tipo binario, como por ejemplo imágenes.

Por lo tanto en este proyecto, el cual se deben guardar las posiciones o coordenadas por donde debe pasar el vehículo en la parcela a trabajar y poderlas visualizar por si en algún caso se debe de modificar alguna en concreto o visualizar cualquier parámetro. Se elige en este proyecto utilizar ficheros tipo texto, tanto como por comodidad como para poder visualizar los valores simplemente abriendo el fichero con el editor de texto, si tener que ejecutar un programa secundario.

Las funciones que se utilizan en los ficheros son las siguientes:

- `fopen(directorio, modo)`: Esta instrucción abre el fichero y indica el modo en que se va a usar. Los tipos de modos son los siguientes:
 - r**: Modo solo lectura
 - r+**: Modo lectura y escritura. El fichero debe de existir.

w: Modo escritura, crea un fichero nuevo o sobrescribe el existente.

w+: Lectura y escritura, crea fichero o lo sobrescribe.

a: Añadir, escritura, añade datos al final del fichero, crea el fichero si no existe.

a+: Añadir, lectura y escritura, el cursor se sitúa al final del fichero. Si el fichero no existe lo crea.

- `fclose(variable)`: Esta instrucción cierra el fichero mediante la variable que apunta a este. Es necesario cerrarlo correctamente en cada uso de este para que guarde los valores que se le han escrito en él.
- `fputs(contenido, variable)`: Esta función escribe en el fichero que apunta la variable el contenido especificado.
- `fgets(variable, tamaño, variable)`: Esta función lee el fichero que apunta la variable, un tamaño concreto de caracteres y lo guarda en un array de caracteres. Este debe de ser del mismo tamaño o superior al tamaño leído del fichero elegido.

Para la realización de los programas necesarios se opta por utilizar el editor de texto proporcionado por el sistema operativo Raspbian Nano editor. («Tutorial del Editor de Texto Nano», s. f.). A continuación se muestran los atajos de teclado más utilizados.

<code>^X</code>	Salir del editor
<code>^C</code>	Mostrar la posición actual (línea/columna)
<code>^O</code>	Guardar
<code>^W</code>	Buscar texto
<code>^\</code>	Buscar y reemplazar
<code>^/</code>	Ir a línea, columna
<code>^K</code>	Cortar la línea actual
<code>^U</code>	Pegar en la línea actual
<code>^ALT+K</code>	Cortar múltiples líneas
<code>^Y</code>	Subir
<code>^V</code>	Bajar

Ilustración 39: Atajos de teclado más utilizados Nano editor

Este editor de texto tiene bastantes funciones y ventajas a parte de su comodidad de utilización por ser bastante simple. En este crearemos los documentos sobre los cuales se programará el control de la navegación del vehículo.

INDICES

```

Terminal
GNU nano 2.2.6 File: archivo.txt

Main nano help text

The nano editor is designed to emulate the functionality and ease-of-use of
the UW Pico text editor. There are four main sections of the editor. The top
line shows the program version, the current filename being edited, and whether
or not the file has been modified. Next is the main editor window showing the
file being edited. The status line is the third line from the bottom and
shows important messages. The bottom two lines show the most commonly used
shortcuts in the editor.

The notation for shortcuts is as follows: Control-key sequences are notated
with a caret (^) symbol and can be entered either by using the Control (Ctrl)
key or pressing the Escape (Esc) key twice. Escape-key sequences are notated
with the Meta (M-) symbol and can be entered using either the Esc, Alt, or
Meta key depending on your keyboard setup. Also, pressing Esc twice and then
typing a three-digit decimal number from 000 to 255 will enter the character
with the corresponding value. The following keystrokes are available in the
main editor window. Alternative keys are shown in parentheses:

^G      (F1)      Display this help text
^X      (F2)      Close the current file buffer / Exit from nano
^O      (F3)      Write the current file to disk
^J      (F4)      Justify the current paragraph

^R      (F5)      Insert another file into the current one
^W      (F6)      Search for a string or a regular expression
^Y      (F7)      Go to previous screen
^V      (F8)      Go to next screen

^K      (F9)      Cut the current line and store it in the cutbuffer
^U      (F10)     Uncut from the cutbuffer into the current line
^C      (F11)     Display the position of the cursor
^T      (F12)     Invoke the spell checker, if available

M-^    (M-^)     Go to the first line of the file
M-/_   (M-?)     Go to the last line of the file

^_     (F13)     (M-G)    Go to line and column number
^_     (F14)     (M-R)    Replace a string or a regular expression
^^     (F15)     (M-A)    Mark text at the cursor position
M-W    (F16)     Repeat last search

M-^    (M-6)     Copy the current line and store it in the cutbuffer
M-}    Indent the current line
M-{    Unindent the current line
^F     Go forward one character
^B     Go back one character
^Space Go forward one word
M-Space Go back one word
^P     Go to previous line
^N     Go to next line

^A     Go to beginning of current line
^E     Go to end of current line
M-(    (M-9)     Go to beginning of paragraph; then of previous paragraph
M-)    (M-0)     Go just beyond end of paragraph; then of next paragraph
M-]    Go to the matching bracket
M--    (M-_)     Scroll up one line without scrolling the cursor
M-+    (M-=)     Scroll down one line without scrolling the cursor

^Y     Prev Page      ^P     Prev Line      ^X     Exit
^V     Next Page      ^N     Next Line

```

Ilustración 40: Funciones y comandos Nano editor

Por otra parte, junto con el modulo UWB la casa Decawave proporciona algún ejemplo de código fuente para que sea más fácil la configuración de los módulos y la comunicación de estos tanto entre ellos como con el control que en este caso es la Raspberry además de ejemplos de programas de configuración de nodos, etc.

Proporciona un par de documentos que son esenciales para el inicio de la programación del proyecto. Uno es el Makefile el cual es un documento vinculado al programa general, que indica al programa como debe compilarse, directorios y librerías que debe de cargar, que puertos se usan, etc.

A este documento se le debe de configurar con el editor Nano para el modulo que se comunique mediante el puerto SPI, ya que dentro del mismo documento se puede configurar para varios tipos de comunicación. Además se deberá añadir una extensión "-lm" dentro del apartado "CFLAGS" para que en un futuro el programa pueda cargar la librería "math.h" para poder hacer operaciones en este. Algo muy importante a la hora de realizar los algoritmos de navegación.

Documento Makefile:

```
#####  
#####  
# Configurations  
#####  
# TARGET  
# 0: Raspberry-Pi  
# 1: else  
TARGET = 0 // Indica que se usa la Raspberry Pi  
#####  
# INTERFACE_NUMBER  
# 0: USE_UART  
# 1: USE_SPI  
# 2: USE_SPI_DRDY  
INTERFACE_NUMBER = 1 // La comunicación se hace por el puerto SPI  
#####  
# PRINT_LVL  
# for HAL_Print  
# 0: none  
# 1: fprintf (log.txt)  
# 2: printf (terminal)
```

INDICES

```
# 3: printf + fprintf
PRINT_LVL = 3          // Las distintas respuestas que realiza el modulo vía comunicación
                       //(posicionamiento, errores, etc. ) las muestra por pantalla
                       //las guarda en un fichero llamado log.txt
(terminal) y
```

```
PROGRAM = tag_cfg
SOURCES = tag_cfg.c
```

```
PROJ_DIR += ../..
```

```
CFLAGS += -Wall -lm // Instrucciones para poder cargar ciertas librerías a usar
```

```
include $(PROJ_DIR)/include/dwm1001.mak
```

```
#####
```

También se proporciona dos ejemplos de comunicación con el modulo vía SPI y configuración como Tag (nodo móvil de a bordo) o como Anchor (nodo fijo). Proporcionando un programa que configura el modulo y muestra por el terminal si le sucede algún error tanto de software como de hardware.

Sobre este código de configuración del modulo se puede empezar a trabajar en el programa, añadiendo el código necesario para que el sistema realice las funciones necesarias y requeridas del proyecto. Agregando los algoritmos de corrección de posición, rumbo, trayectoria, guardado de rutas, etc.

5.3.3. Programa:

En este proyecto existen dos hitos a desarrollar en cuanto a programación se refiere.

En primer lugar se debe de poder guardar una ruta la cual será la que después el vehículo autónomo debe de seguir. Estando la red de localización debidamente instalada y configurada. Esta ruta se puede realizar, o bien simplemente pasando por donde debe de ser trazada la ruta con el equipo de grabado de trazada, o por otra parte se puede realizar esta operación con el propio vehículo en modo manual con el nodo de navegación instalado y así saber a ciencia cierta que cuando el vehículo siga la ruta de forma autónoma, no va tener ningún percance con ningún obstáculo asegurándose de que seguro que pasa por todas las zonas requeridas sin ningún peligro.

Como segunda meta a alcanzar, se debe de realizar un programa que sea capaz de leer la trazada guardada anteriormente y comparando su posición real en el momento en el que se encuentra decidirá qué dirección y sentido debe tomar en cada momento.

Según se ha ido desarrollando el proyecto se ha trabajado a la hora de realizar los programas desde los dos puntos de vista citados anteriormente. Una vez se ha solucionado por separado cada uno de los dos hitos a desarrollar dentro del proyecto se puede razonar que lo mejor para un futuro usuario sería que el dispositivo funcionase con un solo programa y desde este se pudiera realizar cualquiera de las dos acciones que plantea el problema. Es decir, que una vez ejecutado el programa sea capaz el usuario de poder elegir, entre poder guardar una trazada o poner el sistema de navegación que sigue la trazada guardada.

Por lo tanto enfocándose a la comodidad del usuario la correcta implementación es la fusión de estos dos programas en uno solo y que cuando empieza el ciclo de trabajo le pregunte cual de las dos acciones desea ejecutar. Este punto se resuelve en el programa situado en el apartado de los anexos 1.1. El cual es el programa oficial que cargara el sistema de navegación.

Dicho programa consta de la unión de las dos partes a realizar. Pero para una diferenciación entre los dos a la hora de explicar su funcionamiento y instrucciones

INDICES

más relevantes se pasa a continuación a explicarlos de forma separada para una mejor comprensión.

5.3.3.1. Programa de guardado de trazada:

El programa de guardado de trazada se encuentra en el apartado 1.2 de los anexos del proyecto.

Entre las librerías que se usan está incluida una específica para poder usar el modulo de posicionamiento llamada "dwm_api.h". Además también se utiliza otra librería específica para que las indicaciones de que se muestran por pantalla también se guarden en un fichero llamado log.txt para así revisar si en algún momento es necesario cualquier fallo sucedido tanto en la comunicación con el modulo como su configuración.

La parte de código que se sitúa entre la declaración de las variables necesarias para el programa y la instrucción " HAL_Print("\nConfiguration succeeded.\n\n");", son instrucciones necesarias para poder configurar el modulo de posicionamiento. Estas están proporcionadas por el fabricante de este y explicadas en la sección de los anexos en el apartado anexo 2.

Seguidamente el programa entra en un bucle condicionado por una variable, la cual simula el estado de lo que podría ser un interruptor conectado mediante hardware. Es decir que mientras esté conectado el interruptor el programa irá añadiendo posiciones al fichero.

Para obtener la posición del dispositivo se emplea la instrucción "dwm_loc_get(&loc)" a partir de la cual se obtienen varias variables de esta función de las cuales interesan el valor de la coordenada "x" y el de la coordenada "y". Estos valores se obtienen de la instrucción "loc.p_pos->x" y "loc.p_pos->y".

En este código se guardan las coordenadas en el fichero de guardado de trazada en tipo carácter (char). Esto es así porque si luego se quiere abrir dicho fichero para que en cualquier editor de texto se pueda observar la trazada, corregirla o cualquier arreglo. Los datos deben estar guardados en tipo Char para poder visualizarlo en cualquier editor de texto.

Por lo tanto el valor de las coordenadas debe de cambiarse de tipo de variable para poder guardarlas en el fichero. Esto se realiza con la función "sprintf(variable 1, valor, variable 2); "

Esta función pasa el valor tipo float de la variable 2 a la variable 1 que será de tipo cadena de caracteres o array (String). Guardara en dicha variable el valor que le pongamos. Esta función está basada en un printf normal, solo que en vez de escribirnos por la pantalla lo guarda en un string.

También dentro del fichero las dos coordenadas "x" e "y" se separan de una coma. Esto a parte de añadirle una mejor visualización de estas en el fichero. Ayuda al programa de navegación a poder leer las tramas de las posiciones. Ya que la coordenada "x" será la lectura hasta la coma y la coordenada "y" será desde la coma hasta que acabe el string. A este método se le suele denominar procesamiento de strings mediante Tokens, que mas adelante en el siguiente apartado se explica la función de los Tokens funcionamiento y características.

Para el guardado de los valores en el fichero se utiliza la función explicada anteriormente en el apartado de entorno de programación. Se abre el fichero en modo escritura y se le añaden los valores requeridos mediante la instrucción "fputs".

Una vez el usuario desea dejar de grabar la trazada lo indicara por teclado dejando a cero la variable que condiciona el bucle de grabado de trazada, por lo que seguidamente el programa cerrara correctamente el fichero. Ya que de no ser asi no se guarda ningún dato. Y cerrara la aplicación.

5.3.3.2. Programa de lectura de trazada y navegación:

El código de esta aplicación se encuentra en el apartado de anexos 1.3.

Comparte el mismo tipo de librerías que el código anterior, solo que se añade otra específica "math.h" para poder realizar ciertas operaciones matemáticas como raíces cuadradas, potencias, etc.

En diferencia del programa anterior tanto el configurado del modulo "void setup()", como la comunicación de la posición que posee "void position()". Se realizan en funciones situadas fuera del programa principal. Esto se realiza con la intención de dejar el programa al desarrollador más claro y simplificado, además de la ventaja de que esta opción deja llamar a dichas funciones las veces que sean necesarias sin tener que realizar bucles u otros métodos.

INDICES

Dentro del programa principal se tratan las funciones, ya mencionadas, para la apertura del fichero pero esta vez en modo lectura. Además la forma de leer el contenido se realiza mediante la instrucción "fgets".

Para la realización del programa este entra inicialmente en un bucle condicionado, el cual no se rompe mientras queden posiciones que leer en el fichero que guarda la trazada. A partir de este momento se muestra por el terminal la posición a alcanzar por el vehículo. Seguidamente mediante la función token se consigue leer coordenada a coordenada de la trama que proporciona la instrucción "fgets".

Es decir, un token es un indicador. Que en este caso es la coma que en el programa anterior se ha añadido entre la coordenada "x" e "y". Por lo tanto el valor de la "x" en la trama será el que exista desde que empieza hasta la coma y la de la "y" será desde la coma hasta el in de línea que en este caso se indica con "NULL".

Una vez se tienen las posiciones, estas vienen en tipo char por lo que para poder hacer operaciones con ellas se deben de pasar a float. de esto se encarga la instrucción "atof()" encargada de esta función en el código.

Al tener las variables de las coordenadas en el tipo de dato correcto se puede empezar a calcular lo necesario para la navegación.

El programa entra ahora en otro bucle, condicionado por una variable inicializada al empezar el programa y que representa el modulo del vector que debe de seguir el vehículo. Es decir la distancia que existe entre el vehículo y la posición a la que se quiere alcanzar.

Esta variable se puede modificar para que el vehículo tenga una mayor o menor posición y pueda por ejemplo calcular la trayectoria a la siguiente posición estando ya cerca de la anterior o estando justamente sobre ella. Este parámetro deberá ir a gusto de la precisión deseada y dependiendo en que parcelas se opera, además sería una de las variables que debería poder ser modificada por el sistema SCADA o HMI si se instalara para que el usuario pueda modificarlo a su gusto.

Dentro de este bucle se calcula el vector que debe de seguir el vehículo mediante resta de vectores y se indica el valor de este mediante el terminal. Seguidamente se calcula el modulo de este vector, para averiguar el recorrido que debe hacer como de grande es hasta la posición deseada.

Para averiguar el valor de giro que debe de realizar para ir hacia una correcta dirección se calcula el ángulo mediante trigonometría.

Por último para averiguar la dirección del recorrido a trazar, se compara el valor de las componentes del vector calculado anteriormente.

Una vez se cumple la condición de que el modulo es inferior al valor mínimo deseado se sale del bucle secundario y se reinicializa el valor del modulo para que en el caso que queden mas posiciones a alcanzar vuelva a repetir el proceso, de lo contrario saldrá del bucle principal, cerrara el fichero y seguidamente cerrara el programa.

5.3.4. Pruebas:

Al ejecutar el programa de guardado de la trazada se observa inicialmente por pantalla el configurado del modulo al que está conectado la Raspberry. Si este configurado es correcto y satisfactorio se observa en todo momento la posición del nodo que se está trazando o "trackeando". A continuación se muestra un ejemplo de ejecución de este programa:

```
Comparing set vs. get: dev0.
```

```
Configuration succeeded.
```

```
Wait 1000 ms...
```

```
dwm_loc_get(&loc):
```

```
[1165,2598,808,0]
```

```
Wait 1000 ms...
```

```
dwm_loc_get(&loc):
```

```
[1165,2598,808,0]
```

```
Wait 1000 ms...
```

```
dwm_loc_get(&loc):
```

INDICES

[1206,2552,742,100]

Wait 1000 ms...

dwm_loc_get(&loc):

[1206,2552,742,100]

Wait 1000 ms...

dwm_loc_get(&loc):

[1407,2135,906,100]

Una vez se da el comando de que se ha finalizado la trazada, el programa se cierra y en el mismo directorio donde se encuentra el programa se ha creado un documento de tipo texto (.txt) llamado track.txt. Este documento contiene las coordenadas gravadas de la trazada. Estas coordenadas se pueden guardar de dos formas, cada intervalo de tiempo, el cual se puede variar. O cada vez que se lo indique el usuario mediante instrucciones o pulsando un botón. Esto último se debe de hacer una vez se realiza el montaje completo, ya que está preparado para que este extra se pueda instalar en el proyecto.

A continuación se muestra un ejemplo de 10 coordenadas guardadas en el fichero track.txt.

1165.000000,2598.000000

1165.000000,2598.000000

1206.000000,2552.000000

1206.000000,2552.000000

1407.000000,2135.000000

1407.000000,2135.000000

1407.000000,2135.000000

1407.000000,2135.000000

1407.000000,2135.000000



1407.000000,2135.000000

Estas coordenadas están recogidas directamente del módulo en una prueba en que los nodos estaban colocados en forma de cuadrado, de 5 metros de lado. Y el nodo móvil no se estaba moviendo demasiado por ello la repetición de bastaste coordenadas.

En esta prueba se observa que la precisión depende de la elección de dos intervalos de tiempo. En primer lugar el intervalo de tiempo dictado por el programa, el cual manda al modulo averiguar en qué posición esta y los transfiere dichos valores a las variables destinadas a ello para realizar el guardado de estas. En segundo lugar variara la precisión según la velocidad de transmisión de la red.

Puesto que si coincide que los intervalos en los que se recogen las coordenadas son demasiado grandes, el vehículo o el dispositivo que se encarga de guardar estos datos puede estar en movimiento y en una posición distinta a la ultima que ha sido guardada y por lo tanto perder trozos de la trazada que pueden llegar a ser importantes en la trayectoria.

Además también dependerá la velocidad de movimiento que lleve el dispositivo que guarda las trazadas a la hora de hacerlo.

Por lo tanto se deberá de configurar estos tiempos según lo rápido que quiera grabarse la trazada dentro de la parcela y la calidad que deba tener. Ya que no es lo mismo perder unas coordenadas en una recta que en una curva.

En referencia al programa de navegación se observa por la pantalla del terminal la posición a la que quiere ir, la que ocupa en el momento, el vector a seguir, su modulo dirección y ángulo a corregir de la trayectoria.

Un ejemplo de lo que muestra por el terminal aparece a continuación.

```
Comparing set vs. get: dev0.
```

```
Configuration succeeded.
```

```
Wait 1000 ms...
```

```
La posición de la trazada es: 1165.000000,2598.000000
```

INDICES

La posición del vehículo es: 1064.2000,2356.3000

El vector a seguir es: 100.800000,241.700000

La distancia a recorrer: 261.876936

La orientación es de: 67.36 grados en dirección: NE

Mediante estas pruebas se observa que las sentencias que muestra por el terminal estarían en la situación donde deberían ir las instrucciones pertinentes para comunicarse en un modulo de control de actuadores para que el vehículo se movilice de un punto a otro. Aunque en este caso el sistema se mueve de forma manual emulando lo que sería el vehículo.

6. CONCLUSIONES

Como conclusiones sobre este proyecto, se obtiene que es posible realizar una red de localización local para la navegación de vehículos agrícolas. En concreto este ofrece un sistema de navegación con una precisión del orden de centímetros.

En cuanto al método de navegación se evidencia que es una buena forma de dar solución a un nicho del mercado que no está desarrollado y que además el tipo de tecnología que se usa permite implantarla de una forma bastante económica en comparación a otras tecnologías de navegación. Que además de ser más caras no cumplen los requisitos necesarios para el tipo de cultivos al que va enfocado el equipo.

En vistas al futuro de este proyecto, se podría decir que basándose en la idea que ha dado lugar a este y con empresas que dispongan del capital para invertir en investigación y desarrollo se podrían desarrollar sistemas de navegación de buena calidad. Ya no solo para el sector agrícola, si no para cualquier sector. Ya que desde un punto de vista a nivel usuario del sistema, es como enseñar al vehículo por donde debe de pasar este y en qué sentido y dirección. Y esto es algo bastante positivo, ya que no requiere de tener que programar el vehículo o autómatas, ni aportar más elementos a la infraestructura como vías, trazadas de pintura, filo-guiado, etc. Simplemente configurando una red local de localización en la zona donde se va a trabajar.

Por último, como posible mejora del sistema se podrían utilizar antenas para los receptores de ultra banda ancha de mejor calidad. Ganando así en calidad de señal, alcance y precisión del sistema.

7. BIBLIOGRAFÍA

Curso de C++ - Trabajar con ficheros. (s. f.). Recuperado 22 de noviembre de 2018, de <http://c.conclase.net/curso/index.php?cap=039#inicio>

DWM1000 Decawave Limited | RF/IF y RFID | DigiKey. (s. f.). Recuperado 20 de junio de 2018, de <https://www.digikey.es/product-detail/es/decawave-limited/DWM1000/1479-1002-1-ND/4805335>

DWM1001 Decawave Limited | RF/IF y RFID | DigiKey. (s. f.). Recuperado 20 de junio de 2018, de <https://www.digikey.es/product-detail/es/decawave-limited/DWM1001/1479-1004-1-ND/7394535>

DWM1001-DEV Decawave Limited | RF/IF y RFID | DigiKey. (s. f.). Recuperado 20 de junio de 2018, de <https://www.digikey.es/product-detail/es/decawave-limited/DWM1001-DEV/1479-1005-ND/7394533>

Ficheros C/C++ - Generalidades. (s. f.). Recuperado 22 de noviembre de 2018, de <http://c.conclase.net/ficheros/>

Milanés, V., Naranjo, J. E., González, C., Alonso, J., García, R., & de Pedro, T. (2008). Sistema de Posicionamiento para Vehículos Autónomos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 5(4), 36-41. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(08\)70175-4](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(08)70175-4)

Quintana, M. (s. f.). Análisis de precisión y eficiencia de receptores GPS bajo cobertura arbórea, 186.

Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf. (s. f.). Recuperado de <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>



simekmilan. (s. f.). Two Way Ranging. Recuperado 19 de noviembre de 2018, de

<https://www.sewio.net/uwb-technology/two-way-ranging/>

Symmetrical double-sided two-way ranging. (2018). En *Wikipedia*. Recuperado de

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Symmetrical_double-sided_two-way_ranging&oldid=824796692

The Pi4J Project – Pin Numbering - Raspberry Pi 3B+. (s. f.). Recuperado 12 de julio

de 2018, de <http://pi4j.com/pins/model-3b-plus-rev1.html>

Tutorial del Editor de Texto Nano. (s. f.). Recuperado 22 de noviembre de 2018, de

<https://www.nanotutoriales.com/tutorial-del-editor-de-texto-nano>

Ultrawideband. (2017). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado de

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrawideband&oldid=104360360>

Relación de documentos

(X) Memoria	83	páginas
(_) Anexos	224	páginas

La Almunia, a 28 de 11 de 2018

Firmado: Joaquín Pérez Sancho

Etiquetas para
CD/DVD



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

Nº TFG:
[424.18.58]

Director:
Jesús Ponce de
León Vázquez

Fdo:

Título TFG:

**SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA VEHÍCULOS
AGRÍCOLAS AUTÓNOMOS**

Autor:

Joaquín Pérez Sancho

28/11/2018



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

Nº TFG:
[424.18.58]

Director:
Jesús Ponce de
León Vázquez

Fdo:

Título TFG:

**SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA VEHÍCULOS
AGRÍCOLAS AUTÓNOMOS**

Autor:

Joaquín Pérez Sancho

28/11/2018



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA VEHÍCULOS AGRÍCOLAS AUTÓNOMOS

NAVIGATION SYSTEM FOR SELF-DRIVEN FARMING VEHICLES

[424.18.58]

Autor: Joaquín Pérez Sancho
Director: Jesús Ponce de León Vázquez
Fecha: 28/11/2018

