

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS APLICADAS A
ROBÓTICA COLABORATIVA**

**Santiago Elvira Díaz
Septiembre 2009**

REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS APLICADAS A ROBÓTICA COLABORATIVA

AUTOR: Santiago Elvira Díaz
TUTOR: Ángel de Castro Martín

HCTLAB
Dpto. de Ingeniería Informática
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Septiembre de 2009

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar mis más sincero agradecimiento a todos los integrantes del grupo de investigación HCTLAB, por su ayuda prestada durante todo el desarrollo del proyecto, en particular a Ángel de Castro, Guillermo González de Rivera y Alberto Sánchez, por haber sido capaces de soportarme durante todo un año y sin los cuales este proyecto no podría haberse realizado satisfactoriamente.

Por otro lado, quisiera agradecer a mi familia y amigos el apoyo recibido durante toda mi reducida existencia y por creer, aunque sólo fuese un poco, en todos mis disparatados proyectos.

RESUMEN

En este proyecto se detallan los procedimientos utilizados para implementar en un robot un sistema de navegación diseñado para entornos '*indoor*', de bajo coste y donde el robot realiza todas las operaciones necesarias de localización, orientación y navegación.

Para el sistema de localización se optó por utilizar ultrasonidos, implementando un sistema basado en la distribución de balizas en determinados puntos de la habitación, las cuales emiten de forma secuencial una señal de radiofrecuencia, utilizada para indicar el instante de inicio de emisión de ultrasonidos, y una señal de ultrasonidos, la cual se utiliza para medir el tiempo de vuelo de la señal a las diferentes balizas. Esto posibilita calcular la distancia a las diferentes balizas para posteriormente buscar el punto en el espacio que satisface dichas distancias, mediante intersección de circunferencias cuyos centros son las posiciones de las balizas y sus radios son las distancias calculadas a las mismas.

El sistema de orientación se ha implementado utilizando una brújula electrónica, utilizando para ello dos magnetorresistencias orientadas de forma perpendicular entre sí, obteniendo así la intensidad de campo magnético terrestre en ambos ejes. Los valores obtenidos son normalizados para después calcular la arcotangente entre ambos, calculando así los grados de desviación respecto al norte magnético.

Por último, el algoritmo de navegación implementado se basa en avanzar alternativamente por los ejes de ordenadas, reduciendo en cada iteración la diferencia en dicho eje entre la posición del robot y la posición destino.

ABSTRACT

In this project, a low cost, indoor navigation system mounted in a robot has been implemented. The robot does all the necessary operations for the localization, orientation and navigation.

For the localization system, ultrasonic devices have been used. A set of beacons is distributed in fixed points of the space. These beacons send sequentially a radiofrequency signal, used to indicate the beginning of emission of the ultrasonic signal. They also send an ultrasonic signal, used to measure the time of flight of the signal from the beacons to the robot. With these times of flight, the robot calculates the distance to the beacons. Then, it calculates the point that fulfills the measured distances, using the intersection of circumferences whose centers are the positions of the beacons and their radiuses are the measured distances.

The orientation system has been implemented using an electronic compass. This electronic compass has been built with two magnetoresistances perpendicularly oriented. With these resistances, the Earth's magnetic intensity field in both axes is calculated. After normalizing these measurements, the arctangent function is used to obtain the degrees of deviation with respect to the magnetic north.

The navigation system consists in advancing alternatively in both axes, reducing in each iteration the distance between the robot and the objective in that axis.

PALABRAS CLAVE

ESPAÑOL

Robot, localización, ultrasonidos, brújula electrónica, orientación, navegación.

INGLES

Robot, localization, ultrasonic, electronic compass, orientation, navigation.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. OBJETIVOS	9
2. ARQUITECTURAS UTILIZADAS	11
3. FASES DEL DISEÑO	12
4. SISTEMA DE LOCALIZACIÓN	13
4.2. ALGORITMOS DE POSICIONAMIENTO	14
4.2.1. <i>Introducción</i>	14
4.2.2. <i>Basados en ángulos (Triangulation):</i>	14
4.2.3. <i>Basados en distancias (Trilateration):</i>	15
4.3. ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS BASADOS EN DISTANCIAS	16
4.3.1. <i>Basados en diferencia de distancias (DTOA)</i>	17
4.3.2. <i>Basados en distancias absolutas (TOA)</i>	19
4.3.2.1. TOA 2 Dimensiones.....	20
4.3.2.2. TOA 3 Dimensiones.....	21
4.3.2.3. Consideraciones	21
4.4. ESTADO DEL ARTE.....	22
4.4.1. <i>THE BAT SYSTEM</i>	22
4.4.2. <i>The Cricket Location-Support System</i>	22
4.4.3. <i>3-D Indoor Positioning Method using a Single Compact Base Station</i>	23
4.4.4. <i>IS-900</i>	23
4.4.5. <i>RF-FREE ULTRASONIC POSITIONING</i>	23
4.5. SOLUCIÓN ESCOGIDA	24
4.5.1. <i>Ventajas de implementar este sistema</i>	24
4.5.2. <i>Comparación con otros sistemas ya existentes</i>	25
4.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN	26
4.6.1. <i>Dispositivos de ultrasonidos</i>	26
4.6.2. <i>Implementación Hardware</i>	28
4.6.2.1. Módulo Emisor de Localización	28
4.6.2.2. Módulo Receptor de Localización.....	31
4.6.3. <i>Implementación Software</i>	56
4.6.3.1. Fase de diseño 1: Algoritmo Localización	57
4.6.3.2. Fase de diseño 2: Algoritmo Localización	61
4.6.3.3. Fase de diseño 3: Algoritmo Localización Final	67
4.7. SISTEMA DE RADIOFRECUENCIA	70
4.7.1. <i>Introducción</i>	70
4.7.2. <i>Módulo Emisor</i>	72
4.7.3. <i>Módulo Receptor</i>	74
4.7.3.1. Implementación FPGA.....	74
4.7.3.2. Implementación en la GP-Bot.....	75
4.8. RESULTADOS POSICIONAMIENTO	76
5. SISTEMA DE ORIENTACIÓN	79
5.1. INTRODUCCIÓN	79
5.2. SISTEMAS DE ORIENTACIÓN	79
5.2.1. <i>Sistemas de Orientación mediante el uso de brújulas</i>	81
5.3. SENSORES MAGNÉTICOS	82
5.4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ORIENTACIÓN	85
5.4.1. <i>Implementación Hardware</i>	85
5.4.2. <i>Implementación software</i>	87
5.5. RESULTADOS OBTENIDOS DEL SISTEMA ORIENTACIÓN	88
6. SISTEMA DE NAVEGACIÓN	91
6.1. INTRODUCCIÓN	91
6.2. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN	92
6.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN.....	93
6.3.1. <i>Servidor</i>	93
6.3.2. <i>Algoritmo de Navegación</i>	94

6.4.	RESULTADOS DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN.....	95
7.	CONCLUSIONES	96
8.	LÍNEAS FUTURAS.....	97
9.	BIBLIOGRAFÍA	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1:	GP-BOT	11
ILUSTRACIÓN 2:	FPGA - RECEPTOR.....	11
ILUSTRACIÓN 3:	FPGA - EMISOR	11
ILUSTRACIÓN 4:	LOCALIZACIÓN EN ALTA MAR	14
ILUSTRACIÓN 5:	MÉTODO TOA	15
ILUSTRACIÓN 6:	MÉTODO DTOA.....	15
ILUSTRACIÓN 7:	LOCALIZACIÓN MEDIANTE MÉTODO DTOA – 2D.....	17
ILUSTRACIÓN 8:	HIPÉRBOLA	18
ILUSTRACIÓN 9:	LOCALIZACIÓN MEDIANTE MÉTODO TOA.....	19
ILUSTRACIÓN 10:	LOCALIZACIÓN MEDIANTE MÉTODO TOA 2 BALIZAS	20
ILUSTRACIÓN 11:	MÓDULO DE EMISIÓN DE LA BALIZA	30
ILUSTRACIÓN 12:	CIRCUITO RECEPTOR.....	33
ILUSTRACIÓN 13:	GANANCIA 1ª ETAPA: 10. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	35
ILUSTRACIÓN 14:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	35
ILUSTRACIÓN 15:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 33.....	36
ILUSTRACIÓN 16:	GANANCIA 1ª ETAPA: 100. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	36
ILUSTRACIÓN 17:	GANANCIA 1ª ETAPA: 100. GANANCIA 2ª ETAPA: 33.....	36
ILUSTRACIÓN 18:	GANANCIA 1ª ETAPA: 10. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	37
ILUSTRACIÓN 19:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	37
ILUSTRACIÓN 20:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 33 (RUIDO).....	38
ILUSTRACIÓN 21:	GANANCIA 1ª ETAPA: 100. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	38
ILUSTRACIÓN 22:	GANANCIA 1ª ETAPA: 100. GANANCIA 2ª ETAPA: 33(RUIDO).....	38
ILUSTRACIÓN 23:	GANANCIA 1ª ETAPA: 10. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	39
ILUSTRACIÓN 24:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	39
ILUSTRACIÓN 25:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 33(RUIDO).....	40
ILUSTRACIÓN 26:	GANANCIA 1ª ETAPA: 100. GANANCIA 2ª ETAPA: 10 (RUIDO).....	40
ILUSTRACIÓN 27:	GANANCIA 1ª ETAPA: 100. GANANCIA 2ª ETAPA: 33(RUIDO).....	40
ILUSTRACIÓN 28:	GANANCIA 1ª ETAPA: 10. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	41
ILUSTRACIÓN 29:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	42
ILUSTRACIÓN 30:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 33 (RUIDO).....	42
ILUSTRACIÓN 31:	GANANCIA 1ª ETAPA: 100. GANANCIA 2ª ETAPA: 10 (RUIDO).....	42
ILUSTRACIÓN 32:	GANANCIA 1ª ETAPA: 10. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	43
ILUSTRACIÓN 33:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	43
ILUSTRACIÓN 34:	GANANCIA 1ª ETAPA: 33. GANANCIA 2ª ETAPA: 33.....	44
ILUSTRACIÓN 35:	GANANCIA 1ª ETAPA: 100. GANANCIA 2ª ETAPA: 10.....	44
ILUSTRACIÓN 36:	GANANCIA 1ª ETAPA: 100. GANANCIA 2ª ETAPA: 33(RUIDO).....	44
ILUSTRACIÓN 37:	ESQUEMÁTICO MÓDULO RECEPTOR (INA2331)	46
ILUSTRACIÓN 38:	SEÑAL RECIBIDA CON LM324	47
ILUSTRACIÓN 39:	SEÑAL RECIBIDA GANANCIA 505.....	47
ILUSTRACIÓN 40:	SEÑAL RECIBIDA GANANCIA 1105.....	48
ILUSTRACIÓN 41:	SEÑAL RECIBIDA GANANCIA 1955.....	48
ILUSTRACIÓN 42:	SEÑAL RECIBIDA GANANCIA 3405.....	48
ILUSTRACIÓN 43:	SEÑAL RECIBIDA GANANCIA 5005.....	49
ILUSTRACIÓN 44:	SEÑAL RECIBIDA 1ª ETAPA.....	49
ILUSTRACIÓN 45:	SEÑAL RECIBIDA 2ª ETAPA.....	49
ILUSTRACIÓN 46:	SEÑAL TRAS ETAPA DE AMPLIFICACIÓN (G = 1105).....	50
ILUSTRACIÓN 47:	SEÑAL TRAS ETAPA DE COMPARACIÓN (G = 1105)	51
ILUSTRACIÓN 48:	SEÑAL TRAS ETAPA DE AMPLIFICACIÓN (G = 1955).....	51
ILUSTRACIÓN 49:	SEÑAL TRAS ETAPA DE COMPARACIÓN (G = 1955)	51
ILUSTRACIÓN 50:	SEÑAL TRAS ETAPA DE AMPLIFICACIÓN (G = 3405).....	52

ILUSTRACIÓN 51: SEÑAL TRAS ETAPA DE COMPARACIÓN (G = 3405)	52
ILUSTRACIÓN 52: GRÁFICA DE GANANCIA DEL CIRCUITO OPERACIONAL	53
ILUSTRACIÓN 53: GANANCIA A 40 DB	54
ILUSTRACIÓN 54: ESQUEMA DE REALIMENTACIÓN	54
ILUSTRACIÓN 55GANANCIA-FASE AMPLIFICADOR NO COMPENSADO	55
ILUSTRACIÓN 56: DISTANCIA (MM) - PULSOS GP-BOT	58
ILUSTRACIÓN 57: MAQUINA DE ESTADOS FPGA	62
ILUSTRACIÓN 58: CURVA DE CALIBRACIÓN DISTANCIA-PULSOS	65
ILUSTRACIÓN 59: CALIBRACIÓN US GP-BOT FASE 3	69
ILUSTRACIÓN 60: ATENUACIÓN RADIOFRECUENCIA (WWW.OGTM.ORG.MX/~MICROON/INICIO.HTML)	71
ILUSTRACIÓN 61: CODIFICACIÓN MANCHESTER (IMAGEN DE TEXTOSCIENTÍFICOS.COM)	72
ILUSTRACIÓN 62: MAQUINA ESTADOS EMISOR RF	73
ILUSTRACIÓN 63: MAQUINA ESTADOS RECEPTOR FPGA	74
ILUSTRACIÓN 64: ERRORES RELATIVOS CÁLCULO DE DISTANCIAS	76
ILUSTRACIÓN 65: RESULTADOS POSICIONAMIENTO 2D	77
ILUSTRACIÓN 66: HISTOGRAMA DE ERRORES ABSOLUTOS DE LOCALIZACIÓN	77
ILUSTRACIÓN 67: EFECTO ERRORES DISTANCIAS	78
ILUSTRACIÓN 68: EFECTO ERRORES DISTANCIAS	78
ILUSTRACIÓN 69: ORIENTACIÓN POR POSICIONES RELATIVAS	80
ILUSTRACIÓN 70: ORIENTACIÓN POR REFERENCIAS VISUALES	80
ILUSTRACIÓN 71: ORIENTACIÓN POR RADIOFRECUENCIA	80
ILUSTRACIÓN 72: ORIENTACIÓN MEDIANTE BRÚJULA ELECTRÓNICA	80
ILUSTRACIÓN 73: DECLINACIÓN MAGNÉTICA	81
ILUSTRACIÓN 74: MEDIDA SENSORES MAGNÉTICOS	82
ILUSTRACIÓN 75: EFECTO HALL. IMAGEN OBTENIDA DE HTTP://PERSONALES.UPV.ES/JQUILES/PRFFI/MAGNETISMO/AYUDA/HLPHALL.HTM	83
ILUSTRACIÓN 76: CALIBRACIÓN MAGNETORRESISTORES	84
ILUSTRACIÓN 77: ESQUEMÁTICO KMZ52	86
ILUSTRACIÓN 78: HISTOGRAMA ERRORES BRÚJULA ELECTRÓNICA	90
ILUSTRACIÓN 79: NAVEGACIÓN DIRECTA	95
ILUSTRACIÓN 80: NAVEGACIÓN EJES	95

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: ESPECIFICACIONES DE LOS MÓDULOS DE ULTRASONIDOS	27
TABLA 2: LA POTENCIA ESTA MEDIDA EN DBM.	27
TABLA 3: COMPARACIÓN RESULTADOS OBTENIDOS	50
TABLA 4: DISTANCIAS MEDIANTE US - GP-BOT	58
TABLA 5: MEDIDAS DE US 1 DIMENSIÓN	65
TABLA 6: CALIBRACIÓN US GP-BOT FASE 3	68
TABLA 7: RESULTADOS SISTEMA ORIENTACIÓN	89

1. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es el de otorgar a un robot la capacidad de navegar por sí mismo, es decir, sin la ayuda de un servidor externo por un entorno sin obstáculos. Para ello, es necesario que el robot sea capaz de conocer su posición, su orientación y debe disponer de un algoritmo de navegación que sea capaz interpretar estos datos y, en base a ellos, desplazar al robot desde la posición inicial hasta la posición destino.

Junto con este objetivo principal, se perseguía que el sistema final fuera de bajo coste, que los nodos del sistema fueran autónomos y que el sistema fuese *'indoor'* (funcionara dentro de edificios).

Para satisfacer todos los objetivos antes planteados, se optó por un sistema de localización basado en ultrasonidos, debido a su bajo coste, su alta precisión y su posibilidad de usarse en entornos *'indoor'*. El sistema de orientación se implementó utilizando una brújula electrónica, por su reducido coste económico y su sencilla implementación software. Por último, el algoritmo de navegación implementado se basa en avanzar por los ejes de ordenadas, reduciendo en cada interacción la diferencia en dicho eje entre la posición del robot y la posición destino.

El proyecto se desarrolló en dos arquitecturas: la GP-Bot, un sistema de bajo coste basado en un microcontrolador, y en FPGA, un sistema de gran potencia utilizado para obtener medidas fiables sobre la precisión del sistema de localización.

La siguiente memoria se divide, principalmente, en tres grandes capítulos:

- El sistema de localización: Se comenta brevemente el estado del arte de los sistemas de localización existentes hasta la fecha, junto con nuestro modelo propuesto y el proceso seguido para su implementación. Al final del capítulo se adjuntan los resultados obtenidos tras la implementación del sistema. Este sistema es el que más trabajo ha requerido, lo cual se refleja en su extensión en esta memoria.
- El sistema de orientación: Se hace una breve exposición del estado del arte de los sistemas de orientación, seguido de una explicación del sistema de orientación elegido, su implementación y los resultados obtenidos tras su implementación.
- El sistema completo: Análisis de cómo se han integrado los diferentes módulos de localización y orientación en el sistema final, así como un análisis de los resultados obtenidos.

Cabe destacar que parte de los resultados de este proyecto fin de carrera, en concreto los referentes al sistema de localización por ultrasonidos, han sido publicados. Se trata del artículo "Low Cost Indoor Ultrasonic Positioning Implemented in FPGA", publicados en el congreso internacional 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON).

2. ARQUITECTURAS UTILIZADAS

Para la realización del proyecto se han utilizado 2 tipos diferentes de arquitecturas:

- Basadas en un microcontrolador: En este caso se ha utilizado la [GP-Bot](#) (Ilustración 1) [GlezdeRivera2002], sistema desarrollado por la Universidad Autónoma de Madrid. Costa del microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola junto con un conjunto de periféricos, condensadores, driver de motores, motores, reguladores de tensión,..., necesarios para su correcto funcionamiento. Los principales motivos que llevaron a utilizar esta arquitectura fueron su disponibilidad y los conocimientos existentes sobre su uso (dicha arquitectura ha sido utilizada durante los últimos años en las prácticas de la asignatura de Robótica impartida en la misma escuela).



Ilustración 1: GP-Bot

- Basadas en FPGA (Ilustración 2 e Ilustración 3): Tras un análisis de una primera versión de nuestro sistema de localización se observó que debido a las limitaciones computacionales de la GP-Bot, la resolución final quedaba restringida. Con el fin de estudiar las máximas prestaciones del sistema de localización se implementó el sistema en un nuevo tipo de arquitectura basada en FPGA, debido a que disponen de una mayor capacidad de cómputo. El sistema encargado de transmisión de las balizas también se implementó en esta arquitectura, ya que permitía una mayor flexibilidad a la hora del desarrollo de la misma.

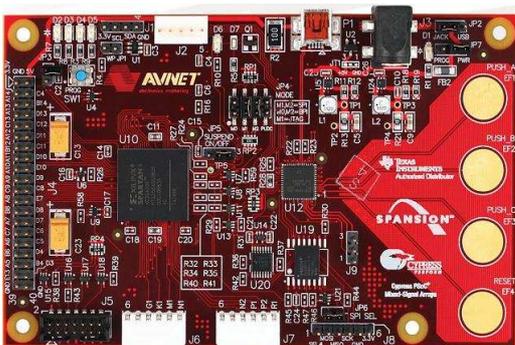


Ilustración 2: FPGA - Receptor

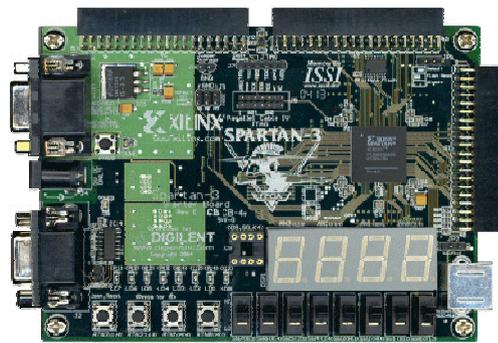


Ilustración 3: FPGA - Emisor

3. FASES DEL DISEÑO

La evolución que se ha seguido a la hora de la implementación fue la siguiente:

- FASE 1: Inicialmente, para comprobar si la capacidad limitada de la GP-Bot era suficiente para operar con el algoritmo, se implementó una primera versión del protocolo de localización en la GP-Bot. En dicha versión, se utilizaba una única GP-Bot como módulo emisor y receptor de ultrasonidos, por lo que se prescindió del módulo de radiofrecuencia para indicar el comienzo de la señal. Dicho algoritmo se describe en el apartado “4.6.3.1 Fase de diseño 1: Algoritmo Localización”. Sin embargo, se llegó a un punto en que la resolución ofrecida por el sistema de localización estaba limitada por las propias prestaciones de la GP-Bot, lo cual obligó a utilizar un sistema que ofreciese mayores prestaciones, una arquitectura basada en FPGAs.
- FASE 2: Haciendo uso de la tecnología basada en FPGA, se implementó en ésta el mismo algoritmo básico que en la GP-Bot. Tras comprobar su correcto funcionamiento, se procedió a incluir el sistema de radiofrecuencia en el conjunto, lo cual permitió separar el nodo emisor, encargado de emitir la señal de ultrasonidos y radiofrecuencia, del nodo receptor, encargado de recibir las señales, calcular el tiempo de vuelo de la señal de ultrasonidos y triangular su posición. En esta fase se tuvo especial interés en medir las prestaciones ofrecidas por el sistema de triangulación, las cuales se pueden consultar en el apartado “4.8 Resultados Posicionamiento”.
- FASE 3: Una vez terminado el anterior proceso, se volvió a la GP-Bot y se implementó el sistema de radiofrecuencia, para obtener un sistema final de menor coste económico. Con el fin de ser capaces de orientar al robot, se añadió un nuevo módulo hardware, un sensor del campo magnético terrestre de dos ejes cuya información se puede consultar en el capítulo “5. Sistema de orientación”. Esto permitió otorgar al robot la capacidad de navegación, ya que este era capaz de localizarse y orientarse, cumpliendo así con los objetivos planteados inicialmente.

4. SISTEMA DE LOCALIZACIÓN

4.1. *Introducción*

Uno de los principales objetivos del proyecto es el de otorgar a cada uno de los nodos de nuestro sistema la capacidad de saber su posición exacta en un determinado entorno sin necesidad de un agente externo que les esté transmitiendo dicha posición en cada momento. Además se ha impuesto como requisitos del proyecto un bajo coste de implementación, que cada uno de los nodos sea autónomo y que el sistema sea apropiado para funcionar dentro de edificios. Con el fin de alcanzar el objetivo al mismo tiempo que cumplimos los requisitos, se han utilizado métodos de localización basados en ultrasonidos, debido a su bajo coste y a su relación precisión/coste-computacional, la cual es muy elevada. Su reducido coste viene determinado por el reducido coste de los transductores de ultrasonidos (cuyo precio es menor a 2 euros) y los dispositivos necesarios para su implementación en módulos:

- Transmisores: driver de voltaje y circuitos sencillos de lógica (menos de 5 euros por módulo).
- Receptores: resistencias, condensadores y amplificadores operacionales (menos de 5 euros por módulo).

Así, el coste total de cada módulo no alcanza los 10 euros.

Su alta relación precisión / coste-computacionales es debida, principalmente, a la precisión que obtenemos al calcular el tiempo de vuelo de la onda de ultrasonido (TOF - "Time Of Flight"), tiempo que transcurre desde que el emisor comienza a emitir la onda hasta que el receptor la recibe (distancia que separa al emisor del receptor dividido entre la velocidad de propagación de la onda).

$$TOF = \frac{\textit{distancia}}{\textit{velocidad de propagación}}$$

Esta precisión es mucho más elevada utilizando ultrasonidos en vez de radiofrecuencia debido a la diferencia de velocidad de propagación existente entre ambas ondas (340 m/s para ultrasonidos y $3 \cdot 10^8$ m/s para radiofrecuencia).

Ejemplo:

Si dispusiésemos de un receptor que fuese capaz de muestrear a 1 MHz lograríamos una precisión teórica por muestra de:

- $340/10^6 = 0,34$ mm/muestra, utilizando ultrasonidos
- $3 \cdot 10^8/10^6 = 300$ m/muestra, utilizando radiofrecuencia

Como se puede apreciar, la precisión obtenida mediante radiofrecuencia es unas 880.000 veces peor en comparación con la precisión lograda utilizando ultrasonidos.

4.2. Algoritmos de posicionamiento

4.2.1. Introducción

Hay diferentes algoritmos de localización bien conocidos y basados en principios geométricos [Bensky2007, Mannings2008]. La mayoría de los métodos empleados basan su funcionamiento en uno de estos dos principios:

4.2.2. Basados en ángulos (*Triangulation*):

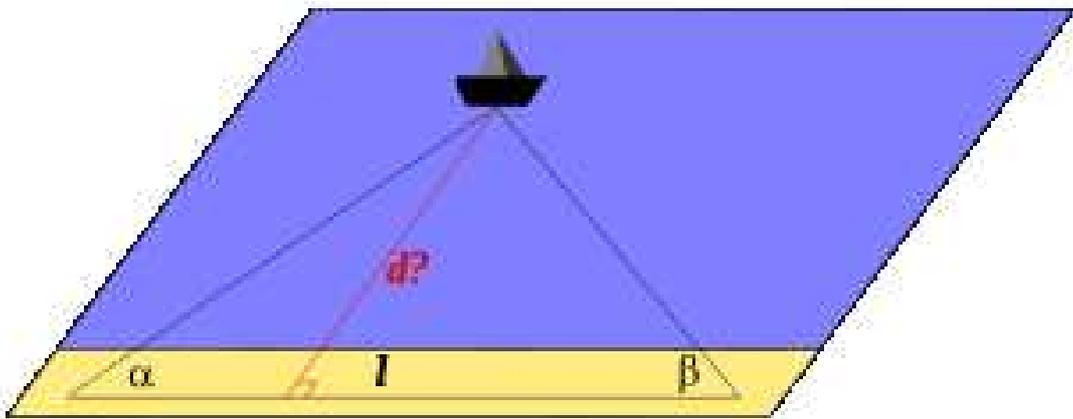


Ilustración 4: Localización en alta mar

Estos métodos basan la localización del nodo móvil en la capacidad del receptor de conocer los ángulos de recepción de las señales de localización y en el conocimiento de la posición de los emisores. Los principales inconvenientes de este método son la forma de calcular, de manera precisa, el ángulo con el que el emisor está enviando su señal, ya que se requieren sistemas de antenas direccionales muy precisas, y la aplicación posterior de algoritmos de localización basados en fórmulas trigonométricas, lo que hace que el coste computacional sea bastante elevado. Todo esto repercute de manera muy negativa en el coste final de cada uno de los nodos. Un ejemplo práctico de la implementación de este método es su utilización para la localización de los barcos en alta mar (Ilustración 4).

$$d = l / \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right)$$

4.2.3. Basados en distancias (Trilateration):

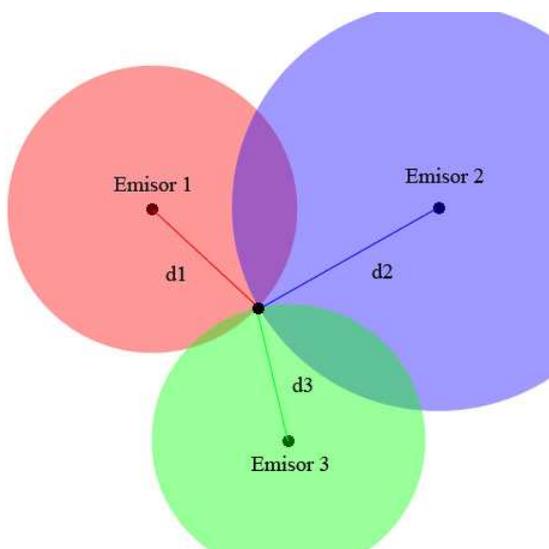


Ilustración 5: Método TOA

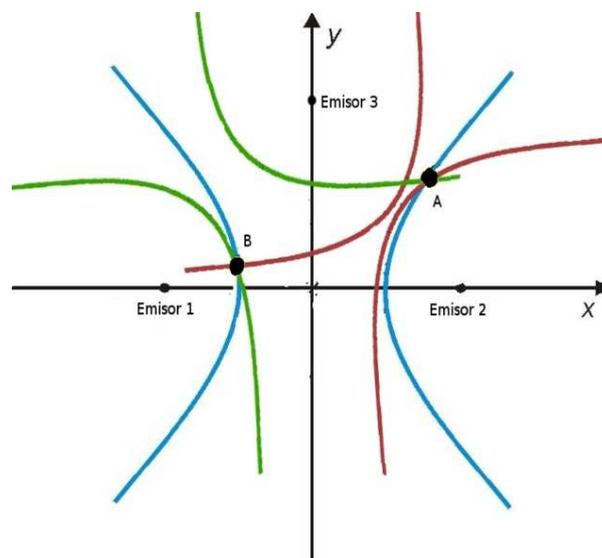


Ilustración 6: Método DTOA

Estos algoritmos basan su funcionamiento en la capacidad del nodo para conocer el tiempo de vuelo existente entre los diferentes emisores y el propio receptor junto con el conocimiento del receptor de la posición exacta de los distintos emisores. Los valores de los tiempos de vuelo pueden ser absolutos (TOA - “*Time Of Arrival*” - Ilustración 5) o relativos entre las ondas enviadas por los diferentes emisores (DTOA - “*Difference Time Of Arrival*” - Ilustración 6).

Una vez que el receptor conoce la distancia, o la diferencia de distancias, a los diferentes emisores es capaz de conocer su posición intentando encontrar aquel punto del espacio en el cual los se satisfacen las medidas capturadas. La búsqueda del mismo se realiza en función del método utilizado, siendo mediante intersección de esferas si se conocen las distancias absolutas (TOA), o mediante intersección de hiperboloides en el caso de diferencias relativas (DTOA). Algunos ejemplos prácticos de tecnologías que se basan en estos principios son:

- **Basados en diferencia de distancias:** DeccaNavigatorSystem, OMEGA NavigationSystem, GEE, LORAN-C, A-FLT...
- **Basados en distancias absolutas:** GPS, Galileo,...

De entre los métodos explicados anteriormente, en este proyecto se optó por el método basado en distancias en vez de ángulos debido a que, como ya se ha indicado anteriormente, repercute en un menor coste computacional para el robot y supone un coste económico inferior. Además, el uso de ultrasonidos no permite conocer el ángulo al cual nos encontramos del emisor.

Nota: A partir de este momento, y como es difícil en español encontrar una traducción exacta de la palabra “trilateration”, siempre que aparezca la palabra triangulación se refiere a “trilateration” a no ser que se especifique lo contrario.

4.3. Análisis de los métodos basados en distancias

Para la implementación de los algoritmos que se detallan a continuación cabe mencionar que no es necesario que todos los emisores emitan a la vez. En radiofrecuencia no existe problema alguno con la emisión simultánea, ya que cada señal de localización puede transmitir información del emisor en la misma onda introduciendo algún tipo de modulación en la señal y las señales no colisionan entre sí, ya que cada emisor puede transmitir en un determinado rango de frecuencias o utilizar una codificación de canal que evite la pérdida de información. Sin embargo, mediante ultrasonidos no nos es posible hacerlo debido a que no hemos implementado ningún método para poder modificar la onda de ultrasonidos, ni en amplitud, frecuencia, fase,.... Para poder transmitir información, simplemente transmitimos, o no, un tren de pulsos. Por tanto, si se emiten varias ondas simultáneas, el receptor no sabe distinguir a quién pertenece cada una. Además estas ondas podrían colisionar entre sí, ya que todas comparten el mismo espectro de frecuencias y no estamos utilizando ningún tipo de modulación de canal, por lo que perderíamos calidad en nuestra señal recibida.

Este problema se puede solucionar con la emisión secuencial de las señales. Este mecanismo consiste en que los emisores sigan un orden preestablecido y emitan a intervalos constantes de tiempo, todo ello conocido por el receptor. Así el receptor sabe qué señal está recibiendo en cada momento, sin necesidad de decodificar la información transmitida por la señal, y además puede calcular la diferencia en el tiempo de vuelo restando a la diferencia obtenida, el tiempo de intervalo entre los diferentes emisores.

Los métodos que se describen a continuación pueden implementarse en el sentido en que están mostrados o en sentido inverso, es decir, cada robot, nodo móvil, es el encargado de emitir la señal de localización y los nodos fijos son los encargados de capturar la señal, calculando el tiempo de vuelo, enviar la medida a una unidad externa que calcula la posición de cada nodo, la cual se lo comunica posteriormente al propio robot. Las ventajas de este método son que conseguimos eliminar el coste computacional del proceso de localización del robot reduciendo el coste de cada nodo. Por otra parte, si implementamos el sistema en sentido opuesto, tal y como se ha hecho, los nodos móviles reciben la señal de los fijos y triangulan su propia posición, no necesitando desarrollar un sistema centralizado encargado de recopilar y tratar la información de los nodos del sistema. Además, al ser cada nodo móvil independiente no se limita el número total de nodos admisibles en el sistema y se dispone de un nivel de seguridad y confidencialidad mayor debido a que durante todo momento la información se almacena en el propio nodo, por lo que está menos expuesta a ser capturada por agentes externos al sistema. Por último, nuestro sistema es más robusto, ya que un fallo en cualquier nodo móvil no afecta al comportamiento del resto de nodos del sistema.

4.3.1. Basados en diferencia de distancias (DTOA)

Estos métodos basan la triangulación en las distancias a los emisores obtenidas de forma relativa (diferencia entre unas señales y otras), lo cual repercute en que no es necesario conocer el origen de tiempos de las señales de localización para implementar el algoritmo, lo que en el caso de ultrasonidos significa poder prescindir del sistema de radiofrecuencia. Esto es posible porque las ondas de los diferentes emisores llegan al receptor con una diferencia de tiempo en función de las distancias del receptor respecto a los emisores de las mismas. Así, el receptor, tras identificar los emisores que generaron las señales, sólo tiene que medir el tiempo transcurrido entre la llegada de cada una de las diferentes señales y calcular los puntos que cumplen la diferencia de tiempo obtenida. De este modo se genera por cada diferencia de tiempos tomada una hipérbola si estamos en 2 dimensiones o un hiperboloide si estamos en 3 dimensiones. La posición final se basa en el cálculo de la intersección de todas las hipérbolas o hiperboloides (Ilustración 7).

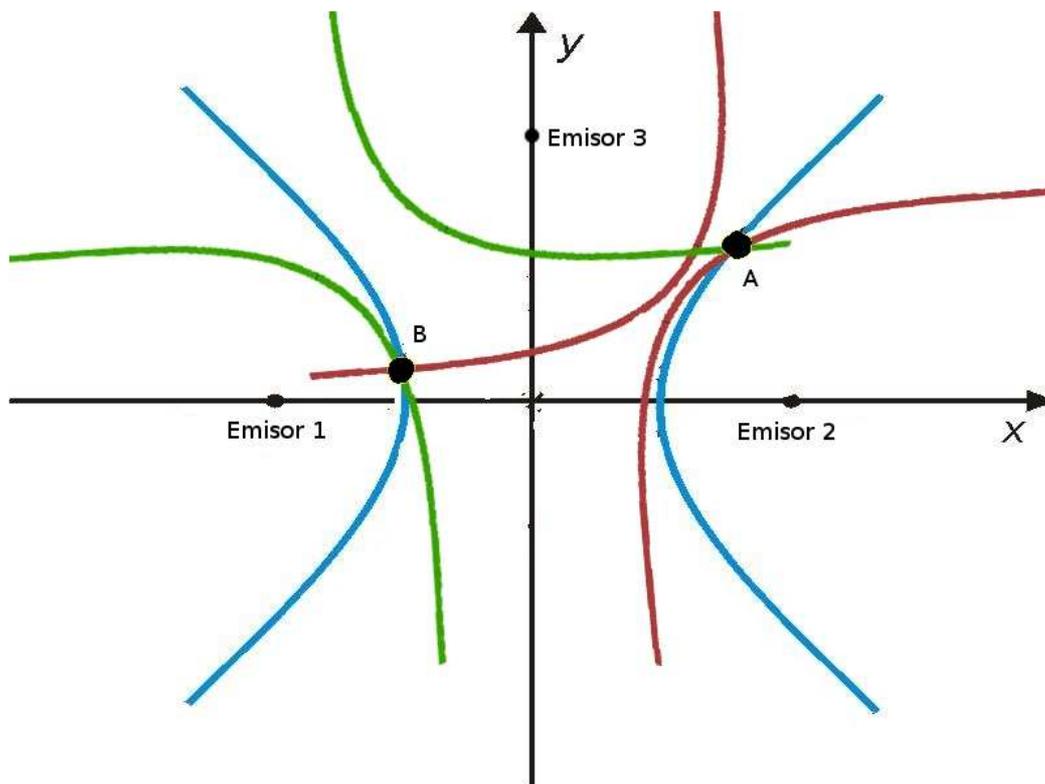


Ilustración 7: Localización mediante método DTOA – 2D

Así, si todos los emisores emiten la señal al mismo tiempo, el receptor captará primero la señal procedente del emisor que tenga más próximo (iniciando un contador para calcular la diferencia al resto de señales). Posteriormente, con una pequeña diferencia de tiempo, la señal del segundo emisor más cercano alcanzará al receptor (capturando el valor del contador, permitiéndole calcular la hipérbola azul) y así sucesivamente (obteniendo las diferencias de tiempo a los diferentes emisores, posibilitándole calcular las hipérbolas roja y verde) hasta que reciba la señal de todos los emisores implicados. Tras todo esto, el robot debería hallar el punto de intersección de todas las hipérbolas generadas para conocer su posición.

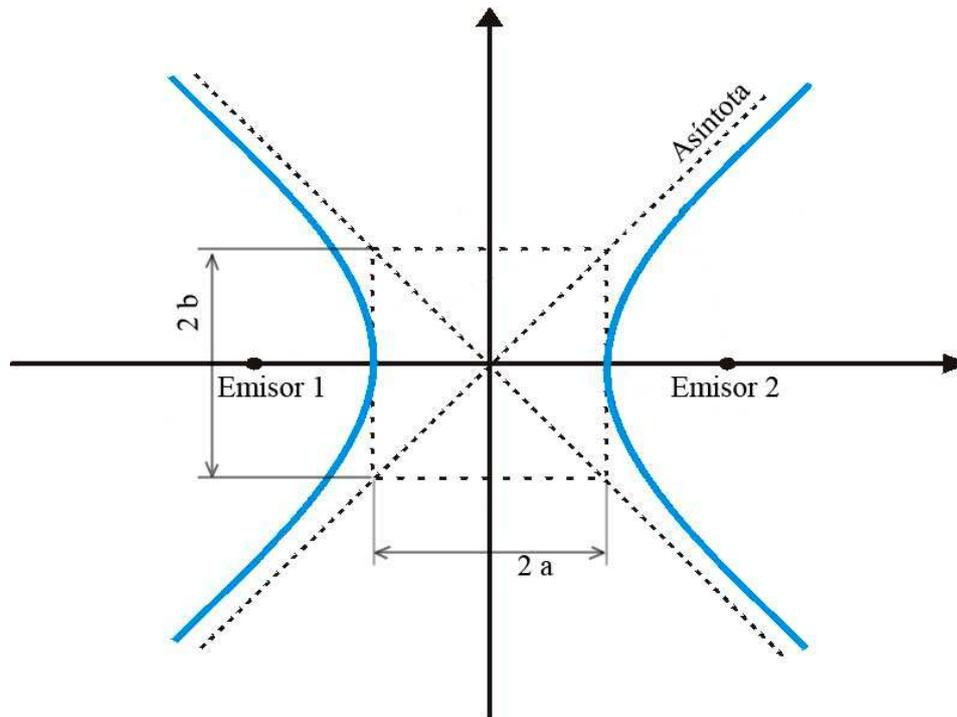


Ilustración 8: Hipérbola

Las ecuaciones de cada hipérbola generada son:

$$\frac{(x - h)^2}{a^2} - \frac{(y - k)^2}{b^2} = 1$$

Donde el centro de la hipérbola, punto intermedio entre los emisores, está en el punto (h, k).

$$a^2 = (\text{diferencia de tiempos medida} / 2)^2$$

$$b^2 = (\text{distancia entre emisores} / 2)^2 - a^2$$

Cabe destacar que como el receptor conoce qué onda llegó antes, es capaz de descartar una de las ramas de la hipérbola de cada medida tomada, eliminando la ambigüedad existente. Como se puede apreciar en la imagen, si nos encontramos en 2 dimensiones, basta con tres emisores para conocer la posición del robot, mientras que si estuviésemos en 3 dimensiones sería necesario un cuarto emisor para resolver el sistema.

4.3.2. Basados en distancias absolutas (TOA)

Este método basa la triangulación en obtener las distancias absolutas a cada emisor y calcular la posición del receptor basándose en estos datos.

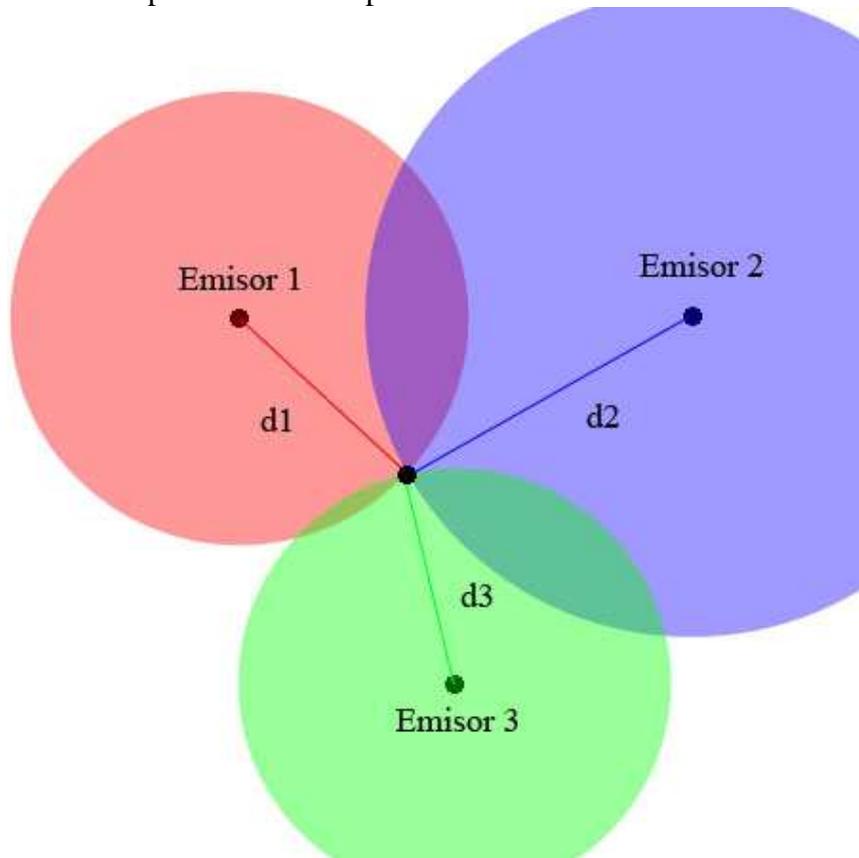


Ilustración 9: Localización mediante método TOA

La localización de un punto utilizando este método consiste en que el receptor debe conocer el instante preciso en que el emisor comienza a emitir la señal, permitiéndole conocer el tiempo de vuelo exacto entre el emisor y el receptor. El cálculo de la distancia a cada emisor consiste en, una vez conocido el tiempo de vuelo entre el emisor y el nodo, multiplicar dicho valor por la velocidad de propagación de la onda.

Si suponemos que la onda se propaga omnidireccionalmente (en todas las direcciones por igual), los puntos que cumplen que se encuentran a la distancia medida son los correspondientes a una esfera centrada en el emisor si estamos triangulando en 3 dimensiones, o una circunferencia si estamos en 2 dimensiones (Ilustración 9). Para calcular el punto en donde se encuentra el nodo, solo hay que hallar el punto que satisface que las diferentes distancias a los emisores concuerdan (intersección de las esferas/circunferencias generadas).

Nota: si se quiere que el origen de coordenadas esté en otro punto o los ejes tengan otra orientación, sólo habría que hacer una traducción de coordenadas tras el cálculo con el sistema de coordenadas inicial.

Para conocer la posición en la que nos encontramos, debemos aplicar las siguientes fórmulas:

4.3.2.1. TOA 2 Dimensiones

Si consideramos que uno de los emisores está en las coordenadas (0,0), el segundo emisor está en las coordenadas (a, 0) y el tercer emisor está en las coordenadas (c, b), entonces, la posición en la que nos encontramos es:

$$x = \frac{d1^2 - d2^2 + a^2}{2a} \quad y = \frac{c^2 + b^2 + d1^2 - d3^2}{2b} - \frac{c \cdot x}{b}$$

Donde d1, d2 y d3 son las distancias a los emisores 1, 2 y 3 respectivamente.

Cabe mencionar que se pueden reducir a 2 el número mínimo de emisores necesarios para la localización si colocamos estos en una pared (Ilustración 10). Esto es posible ya que las ondas de ultrasonidos sufren una gran atenuación al propagarse a través de los obstáculos, por lo que la señal “desaparece” tras ellos. Así, de los dos posibles puntos que obtendríamos con dos emisores uno lo podríamos descartar al estar tras la pared. Las ecuaciones necesarias para localizarnos en este caso son:

$$x = \frac{d1^2 - d2^2 + a^2}{2a} \quad y = \sqrt{d1^2 - x^2}$$

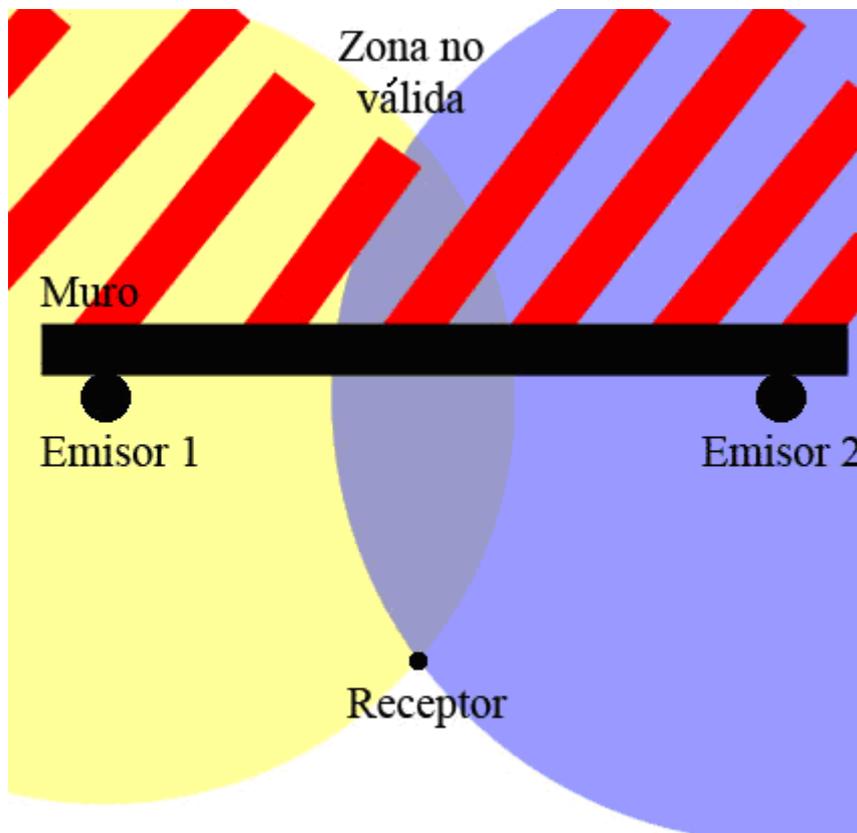


Ilustración 10: Localización mediante método TOA 2 balizas

4.3.2.2. TOA 3 Dimensiones

Si consideramos que todos los emisores están a la misma altura, donde el primer emisor está en las coordenadas (0, 0, 0), el segundo emisor está en las coordenadas (a, 0, 0) y el tercer emisor está en las coordenadas (c, b, 0), entonces, la posición en la que nos encontramos es:

$$x = \frac{d1^2 - d2^2 + a^2}{2a} \quad y = \frac{c^2 + b^2 - d3^2}{2b} - \frac{c \cdot x}{b} \quad z = \sqrt{d1^2 - x^2 - y^2}$$

Nota: estas ecuaciones nos dan dos puntos válidos (uno en +z y otro en -z), pero como sabemos que los emisores están en el techo, como pasaba en el caso de localización con dos balizas, el único punto válido es el que se encuentra en -z (es decir, por debajo de las balizas).

4.3.2.3. Consideraciones

El principal problema del método TOA es el de conocer el instante preciso en que el emisor comenzó a emitir la señal de localización. Para poder resolver este problema existen varias alternativas:

- Si el emisor y receptor tienen sus relojes sincronizados, el emisor puede transmitir, junto a la señal, la información sobre el instante de emisión, teniendo el receptor sólo que restar el tiempo en que recibió la señal al tiempo indicado en la información recibida (base del sistema de localización vía GPS).
- Otra opción es enviar una señal que indique el inicio de la transmisión junto con otra señal de localización, por ejemplo, una señal de radiofrecuencia junto con una señal de ultrasonidos. La velocidad de propagación de la señal indicativa debe ser mucho mayor que la velocidad de propagación de la señal de localización para que el tiempo de vuelo de la primera señal se pueda despreciar (por ejemplo: radiofrecuencia frente a ultrasonidos). De este modo, cuando el receptor detecte la onda indicativa, activaría un contador el cual se detendrá al detectar la llegada de la señal de localización, obteniendo el tiempo de vuelo de la señal de localización.

4.4. Estado del arte

A día de hoy, ya existen diferentes publicaciones que tratan el tema de localización por ultrasonidos. Por mencionar algunos sistemas implementados de los cuales tenemos constancia podemos nombrar:

4.4.1. THE BAT SYSTEM

[Ward1997] Este método ha sido desarrollado por Andy Ward, Alan Jones y Andy Hopper. Se basa en la localización según el modelo TOA dentro de una red de nodos fijos instalados en el techo que actúan como receptores, los cuales se encargan de calcular el tiempo de vuelo de la señal emitida por los nodos móviles y enviar dicha información a una unidad central. El nodo central se implementa en un PC (lo cual le permite realizar cálculos complejos) y se comunica por un protocolo serie con los nodos fijos y por radiofrecuencia con los nodos móviles. Cumple las funciones de coordinador, encargándose de gestionar qué nodo móvil debe emitir la señal, enviándole el *'trigger'* (señal con el identificador del nodo que debe comenzar a emitir el tren de pulsos de ultrasonidos) mientras que por el protocolo serie indica a las balizas que inicialicen los contadores. Tras dejar pasar cierto tiempo, hace *'polling'* (pregunta a las balizas si han recibido la señal y el tiempo transcurrido desde el *'trigger'* hasta que recibieron la señal de ultrasonidos), triangula la posición del nodo móvil y envía dicha posición al nodo móvil.

4.4.2. The Cricket Location-Support System

[Priyantha2000] Este método ha sido desarrollado por Nissanka B. Priyantha, AnitChakraborty y HariBalakrishnan. Se basa en la localización según el modelo TOA, pero, a diferencia con el método "THE BAT SYSTEM", los nodos móviles son los encargados de actuar como nodos receptores y la red de nodos fijos son los encargados de emitir las diferentes señales de ultrasonidos. Cabe mencionar, que sigue existiendo un nodo central, al cual se pueden conectar los nodos móviles y el cual se encarga de triangular la posición. Los nodos sólo envían las medidas de las distancia a cada baliza por un puerto RS232. El nodo central tiene implementado un sistema de mapas con la posición exacta de las balizas, lo cual unido a las distancias calculadas a cada una de ellas por el nodo móvil, le permite implementar algoritmos de localización, permitiendo triangular la posición del nodo móvil.

El sistema está pensado para proveer privacidad a los diferentes nodos del sistema. Cada baliza emite el trigger por radiofrecuencia junto con la información de la habitación en la que se encuentra la baliza y su ID. Las balizas no están coordinadas entre sí, por lo que pueden existir colisiones. En caso de producirse colisiones, las balizas implicadas esperan un tiempo aleatorio antes de volver a emitir su señal.

El nivel de lógica de los nodos receptores es bastante reducido, implementado sólo un mecanismo para conocer la baliza más próxima al nodo (conociendo así en qué habitación se encuentra el nodo).

4.4.3. 3-D Indoor Positioning Method using a Single Compact Base Station

[Dijk2004] Este sistema ha sido desarrollado por Dijk, E.O. van Berkel, C.H. Aarts, R.M. van Loenen, E.J. Su principal novedad frente a los sistemas anteriormente descritos es la posición de los nodos emisores. Estos, en vez de encontrarse distribuidos por la habitación, se encuentran concentrados en una única baliza (con tres emisores). Esto repercute negativamente en la precisión del sistema, pero facilita la instalación del mismo, la generación de las coordenadas (permite establecer el origen de coordenadas en la propia baliza) y tiene un coste menor por estación emisora. Como en los casos anteriores, el cálculo de la posición se realizaba fuera de los nodos receptores, en un PC.

Cabe destacar, que la emisión de la señal de ultrasonidos es simultánea para los tres emisores, utilizando un código CDMA para lograr diferenciar la señal de cada uno de los emisores.

4.4.4. IS-900

[Isense] Este sistema es un modelo comercial desarrollado por la compañía Intersense. Utiliza una tecnología híbrida para conseguir una localización precisa, combinando la localización mediante ultrasonidos con un sistema de acelerómetros. El sistema despliega una red de emisores de ultrasonidos en el techo de la habitación y utiliza la localización del nodo aplicando el modelo TOA. Para minimizar error se ayuda de un filtro Kalman y la información obtenida de los acelerómetros.

Cabe destacar que tanto los nodos como la red de emisores están conectados a un nodo central, el cual se encarga de coordinar los nodos emisores y calcular la posición de los nodos. Además, cabe resaltar que el coste del conjunto es de 9.950 dólares si el sistema es cableado y de 36.600 dólares si es inalámbrico.

4.4.5. RF-FREE ULTRASONIC POSITIONING

[McCarthy2003] Este sistema ha sido desarrollado por McCarthy, M.R. Muller, H.L. Su principal característica es que prescinde del sistema de radiofrecuencia para conocer el tiempo exacto de emisión de la onda de ultrasonidos. En su lugar, las balizas emiten en un orden secuencial, dejando entre cada emisión un tiempo de guarda. Utilizando la ecuación de la esfera, nos permite formular una ecuación con cinco variables aleatorias (las tres coordenadas, el instante de emisión de la señal de ultrasonidos y el periodo de emisión entre las balizas). Para poder despejar estas incógnitas se utiliza un filtro Kalman para linealizar la ecuación antes de calcular la posición del receptor.

Cabe destacar que todos los cálculos necesarios para calcular la posición del receptor se realizan en un PC de baja potencia.

4.5. Solución escogida

De entre las opciones mostradas anteriormente para la realización de este proyecto se optó por una basada en triangulación por distancias absolutas, donde un conjunto de balizas distribuidas se encargan de emitir la señal, utilizando un módulo de radiofrecuencia para indicar el inicio de transmisión de la onda de localización, el ID y un módulo de ultrasonidos como generador de la señal utilizada para el cálculo del tiempo de vuelo de la señal, y donde cada nodo se encarga de realizar las operaciones necesarias para conocer su localización exacta. El sistema va alternando la emisión de las balizas cada medio segundo.

Este método es factible ya que el sonido viaja unas 880.000 veces más lento que una señal de radiofrecuencia, requisito indispensable para poder utilizarlo, pudiendo despreciar el error inherente generado por este método.

Ejemplo:

Si el nodo receptor esta a 2 metros del emisor, la onda de ultrasonidos llegará en 5,88 ms., mientras que la señal de radiofrecuencia lo hará en 6,6 ns., por lo que el error que cometemos al tomar el valor de la diferencia entre la llegada de una señal y otra es del 0,00001 %.

4.5.1. Ventajas de implementar este sistema

La elección de esta solución, y no la basada en localización mediante ángulos, es debido a que este método es el único que se puede implementar mediante ultrasonidos (con ultrasonidos no es posible detectar ángulos), además de ser más barato, tanto económica como computacionalmente, y sencillo de implementar.

El motivo principal de utilizar este método frente al basado en diferencias de distancias relativas entre los emisores, es que el coste computacional es mucho menor debido a que es más sencillo trabajar con esferas que con hiperboloides. Además, como el robot va a disponer de un módulo de radiofrecuencia para poder comunicarse con el resto de nodos, dicho sistema puede utilizarse para recibir el inicio de la emisión de ultrasonidos, por lo que su implementación no supone un cambio drástico en el diseño hardware ni en los costes finales del conjunto. No obstante, se es consciente del incremento de coste en los emisores, los cuales deberán incluir un módulo de radiofrecuencia junto con el de ultrasonidos. Sin embargo, como en nuestro sistema se espera que el número de nodos supere al número de emisores, el gasto está justificado.

El hecho de definir los nodos móviles como los nodos receptores del sistema y realizar los algoritmos de localización en cada uno de ellos, es facilitar la escalabilidad del sistema ya que no fijamos el número máximo de nodos por limitaciones técnicas de un nodo central.

Las principales ventajas de utilizar este método frente al basado en la sincronía de todos los relojes del sistema son:

- La ausencia de necesidad de sincronización de los relojes de los emisores y receptores.
- La posibilidad de no necesitar modular nuestra señal de ultrasonidos para transmitir información junto con la onda generada para la localización, ya que se dispone del módulo de radiofrecuencia que enviaría la información del emisor al receptor.

Por último, los motivos para hacer el sistema distribuido y no centralizado son:

- Conserva privacidad de cada robot.
- Facilita la escalabilidad del sistema.
- Protege el sistema frente a fallos (el fallo de un nodo es menos crítico que un posible fallo en el sistema central).

4.5.2. Comparación con otros sistemas ya existentes

La principal diferencia de nuestro sistema respecto a todos los analizados en el apartado “4.4 Estado del arte” es que se prescindir de un nodo central encargado de realizar todos los cálculos para la localización del nodo, ya que este se realiza de manera interna en cada nodo del sistema.

Contrastando nuestro sistema con el “THE BAT SYSTEM”, se puede observar que los nodos móviles se encargan de recibir la señal de ultrasonidos. Esto tiene el inconveniente de que si el nodo está en movimiento, la posición en que recibe cada una de las señales de ultrasonidos de las diferentes balizas es diferente, lo cual introduce un error en el resultado del algoritmo de localización. Sin embargo, logramos un sistema mucho más escalable.

En comparación con el sistema “3-D Indoor Positioning Method using a Single Compact Base Station” nuestro sistema es mucho más preciso si los nodos están parados durante el proceso de localización a costa de necesitar de un protocolo de emisión entre las balizas. En contra, al no tener implementado en nuestro sistema un algoritmo que permita la emisión simultánea de las balizas, se introduce un error si el nodo está en movimiento, ya que las distancias capturadas se referencian a posiciones diferentes debidas al propio movimiento del robot.

Comparando nuestro sistema con el sistema “RF-FREE ULTRASONIC POSITIONING” se tiene un sistema con mayor complejidad en los módulos emisores y receptores, ya que se necesita un sistema adicional de radiofrecuencia, pero que obtiene a cambio una menor necesidad de capacidad computacional para implementar el algoritmo de localización.

Por último, nuestro sistema contrasta frente al sistema “IS-900” en el coste del mismo y en la funcionalidad que se le desea dar, ya que el sistema IS-900 tiene como objetivo la localización precisa (proporciona una precisión de 2 mm) de determinados puntos en un entorno acotado (crear sistema de realidad virtual, simuladores,...) mientras que nuestro sistema tiene como objetivo el conocimiento de los nodos de su posición en un área sin determinar de antemano. Así, pese a que con nuestro sistema se obtiene una peor resolución, se consigue un sistema mucho más escalable y, al mismo tiempo, se logra reducir drásticamente el coste del conjunto.

4.6. Implementación del sistema de localización

Una vez escogido el método de localización que se iba a utilizar en nuestro sistema, se procedió a su implementación. Debido a diferentes problemas que se encontraron a lo largo del desarrollo del proyecto, se decidió utilizar diferentes arquitecturas, de las cuales se habla más detenidamente en el capítulo “2 Arquitecturas Utilizadas”. Los motivos por los cuales se utilizaron diferentes arquitecturas se pueden encontrar en el capítulo “3 Fases del diseño”.

A la hora de plantearse el problema, se optó por dividirlo en dos partes: el dispositivo emisor y el dispositivo receptor. Las características de estos componentes se detallan en los apartados: “4.6.2.1 Módulo Emisor de Localización” y “4.6.2.2 Módulo Receptor de Localización”.

Por otro lado, ambos módulos basan su funcionamiento en el comportamiento de los dispositivos de ultrasonidos utilizados, por ello se habla más detenidamente de este tema en el apartado “4.6.1 Dispositivos de ultrasonidos”

4.6.1. Dispositivos de ultrasonidos

Los dispositivos de ultrasonidos son, básicamente, transductores de señal eléctrica a una señal sonora cuyo espectro está por encima de los 20 kHz, lo cual las hace inaudibles para el oído humano. Dichos transductores se suelen implementar mediante elementos piezoeléctricos, elementos que al ser sometidos a un cierto voltaje generan un momento de fuerza en una de sus caras lo cual hace que dicha cara vibre, generándose así la señal sonora. Dicho efecto también sucede en sentido inverso, es decir, si a un piezoeléctrico se le aplica una fuerza en una de sus caras (por ejemplo, a través de una señal de ultrasonidos) este generará un pequeño voltaje en sus extremos.

Las ondas de ultrasonidos tienen múltiples usos, por ejemplo, algunos animales como los murciélagos o los delfines los utilizan para detectar obstáculos en su camino (ellos generan una onda de ultrasonidos que rebota en el obstáculo y miden la diferencia de tiempos para conocer la distancia). Otras de sus aplicaciones son: caracterización interna de materiales en ensayos no destructivos, ecografías, técnicas de fisioterapia...

La selección de los dispositivos de ultrasonidos se basó en un análisis de los requisitos de los módulos en donde se iban a utilizar:

- En el módulo emisor, el dispositivo de ultrasonidos debe tener un amplio ángulo de emisión con el fin de cubrir el mayor espacio posible. Además, debe ser capaz de generar una onda lo más potente posible para que un nodo receptor situado al menos a 6 metros del emisor sea capaz de detectarla correctamente.
- En el módulo receptor, el dispositivo de ultrasonidos debe ofrecer una buena sensibilidad (nivel mínimo de señal de ultrasonidos que es capaz de detectar) y un amplio ángulo de recepción. Además, la señal que detecte debe ser lo suficientemente limpia (libre de ruido) para facilitar su posterior tratamiento y conversión a una señal digital.

Con las especificaciones definidas para cada uno de los módulos, se procedió a realizar una búsqueda de emisores y receptores que se ajustaran a los requisitos en los principales distribuidores de electrónica. Tras comparar entre los diferentes modelos disponibles, se decidió encargar los módulos de la compañía PROWAVE ya que eran los que mejores prestaciones ofrecían a nuestras necesidades. Por ello elegimos los modelos:

- 400EP14D (Transceiver, funciona como emisor y receptor)
- 400ER080 y 400ET080 (misma familia, receptor y emisor por separado)
- 400SR120 y 400ST120 (misma familia, receptor y emisor por separado)

Las especificaciones de estos dispositivos, según el fabricante, son:

Tabla 1: especificaciones de los módulos de ultrasonidos.

Nombre	Receptor / Transmisor	Frecuencia Central	Sensibilidad mínima	S.P.L. (potencia Emisión)	Direc-tividad	Rango Temp.	Máximo Vpp.
		KHz	dB	dB	º	ºC	V
400ST120	Recep. yTrans. Separados	40	-67	115	85	80 / -30	20
400ET080	Recep. yTrans. Separados	40	-80	100	125	80 / -30	15
400EP14D	Transceiver	40	-78	103	125	80 / -30	100

Con estos módulos se procedió a hacer una prueba práctica de la potencia de la señal de recepción con las posibles combinaciones entre unos dispositivos y otros. La prueba consistía en generar, mediante un generador de onda, una onda sinusoidal a una frecuencia de 40 kHz con un valor pico-pico de 20 voltios conectando dicha onda al emisor en estudio. El receptor se coloca en frente y en línea recta al emisor a una distancia de 60 cm, orientados de tal forma que la potencia recibida fuera máxima. Los datos de la potencia recibida se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2: la potencia esta medida en dBm.

Emisores	400ST120	400ET080	400EP14D
Receptores	dBm	dBm	dBm
400SR120	-11,18	-27,64	-27,05
400ER080	-23,53	-57,05	-50,00
400EP14D	-23,53	-40,00	-39,41

Como se puede apreciar en estas medidas, los módulos que proporcionan una mayor potencia recibida son la pareja de ultrasonidos “400ST120” y “400SR120”, por lo que nos decidimos por implementar tanto el módulo emisor como receptor con estos dispositivos.

Nota: A partir de este momento, siempre que nos refiramos a módulos de ultrasonidos nos estamos refiriendo a la pareja antes citada.

4.6.2. Implementación Hardware

4.6.2.1. Módulo Emisor de Localización

4.6.2.1.1. Introducción

A la hora de desarrollar el módulo emisor, se intentó satisfacer los siguientes requisitos:

- El módulo debe ser capaz de ser fácilmente desplegable (tamaño reducido, autónomo,...).
- Debe ofrecer un amplio ángulo de emisión.
- Debe ser capaz de emitir simultáneamente la señal de localización (ultrasonidos) y de señalización de inicio de transmisión (radiofrecuencia).
- Debe ser capaz de generar tanto la onda de ultrasonidos como la onda de radiofrecuencia con la suficiente potencia como para que un nodo sea capaz de detectar ambas ondas a una distancia de entre cinco a diez metros.

Para conseguir satisfacer estas exigencias, dividimos el módulo emisor en dos partes. Una encargada de transmitir la señal ultrasonidos con la suficiente potencia, y otra parte que consta del sistema de radiofrecuencia. Este último módulo se trata más detalladamente en el apartado “4.7 Sistema de Radiofrecuencia”

4.6.2.1.2. Implementación

Como ya se ha comentado en el capítulo “3 Fases del diseño”, durante la fase 1, el sistema de emisión de ultrasonidos se implementaba de manera software dentro de una única GP-Bot. Dicho algoritmo se encuentra documentado en el apartado “4.6.3.1 Fase de diseño 1: Algoritmo Localización”, por lo que tampoco vamos a profundizar mucho más en este tema.

A partir de la fase 2, se procedió a separar el módulo emisor del sistema receptor. Para ello se utilizó una arquitectura basada en FPGA, exactamente el modelo “Xilinx Spartan 3” del fabricante “Digilent”. Los motivos que nos impulsaron a utilizar esta arquitectura y no una basada en un microcontrolador fue la de obtener la máxima flexibilidad posible a la hora de desarrollar el nodo emisor, debido a que en aquel momento se desconocían cómo de complejo podría ser su implementación final. Dicha estructura no terminó por implementarse en un microcontrolador antes de la finalización de este proyecto, sin embargo, se espera que dicha implementación se desarrolle en etapas futuras.

Como ya se ha comentado anteriormente, a la hora de diseñar el hardware del sistema se procedió a dividir el problema en dos partes:

- Por un lado, se necesitaba un sistema capaz transmitir la señal de ultrasonidos con la suficiente potencia, lo cual requería amplificar la señal enviada por la FPGA a una señal cuyo valor pico a pico fuese el máximo aceptado por el transductor de ultrasonidos (20V). Este problema se solventó utilizando el chip L293B, un driver de voltaje que permite

modificar el valor pico a pico de una señal digital (el tren de pulsos que debe excitar al dispositivo de ultrasonidos).

- Por otro lado, el módulo debe incluir un dispositivo emisor de radiofrecuencia para ser capaz de indicar el inicio de transmisión de la señal al nodo. El chip de radiofrecuencia que se utilizó fue el FM-RTFRTFQ2-433. Los motivos que nos llevaron a escoger dicho componente y la implementación software del sistema de radiofrecuencia pueden consultarse en el apartado “4.7 Sistema de Radiofrecuencia”.

De este modo, el esquema resultante necesario para la implementación del módulo emisor fue el que se muestra en la Ilustración 11.

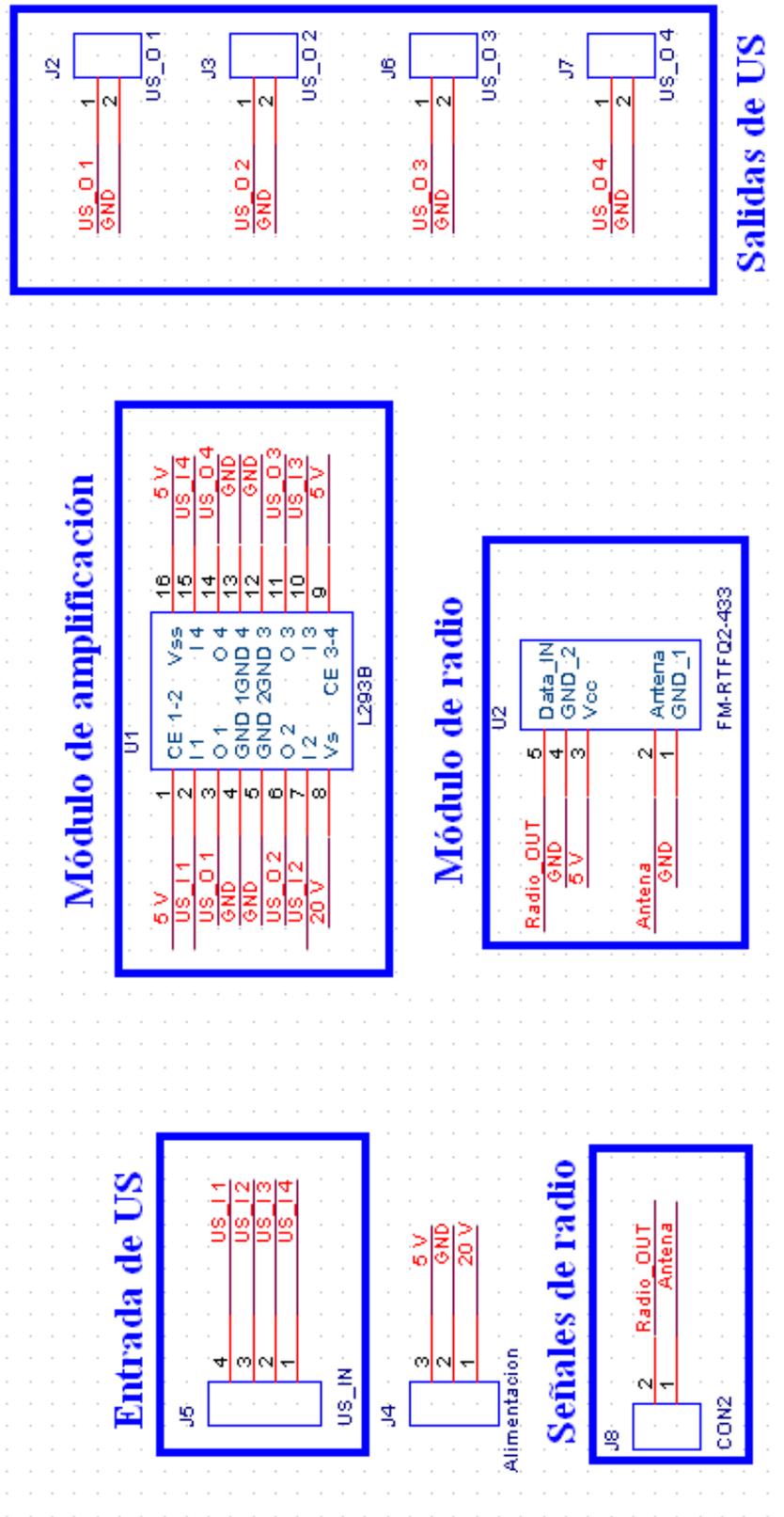


Ilustración 11: módulo de emisión de la baliza

4.6.2.2. Módulo Receptor de Localización

4.6.2.2.1. Introducción

El sistema receptor consta de dos partes. Una encargada de capturar la señal de radiofrecuencia y otra encargada de tratar la señal de ultrasonidos. Para el sistema de radiofrecuencia escogimos el componente parejo al dispositivo emisor utilizado en las balizas, es decir FM-RRFQ2-433, del cual se habla más detenidamente en el apartado “4.7 Sistema de Radiofrecuencia”.

A la hora de diseñar el módulo receptor de ultrasonidos, se tuvo en cuenta las limitaciones impuestas por el dispositivo de ultrasonidos (ofrece unas prestaciones mucho menores en alcance, sensibilidad,... que las del módulo de radiofrecuencia). Por estos motivos, el módulo receptor debe cumplir:

- Una buena sensibilidad (nivel mínimo de señal de ultrasonidos que es capaz de detectar).
- Un amplio ángulo de recepción.
- Debe ser capaz de filtrar y amplificar la onda recibida hasta el punto de poder tratar dicha señal para identificar el momento en que la recibe.
- Debe convertir la señal analógica a una señal digital que sea capaz de indicar a un módulo externo el momento de recepción de la señal de ultrasonidos.

4.6.2.2.2. Implementación

En un inicio, durante las fases de diseño 1 y 2, se optó por implementar el módulo receptor mediante amplificadores operacionales, pero debido a los resultados obtenidos durante las pruebas de localización realizadas en la fase 2, se optó por cambiar dichos amplificadores operacionales por unos operacionales de instrumentación (utilizados en la fase 3), con los cuales se logró mejorar considerablemente las prestaciones ofrecidas por el conjunto.

Implementación mediante amplificadores operacionales

Para cumplir los requisitos que nos habíamos fijado para los módulos receptores, se elaboró un esquema (Ilustración 12) que consta de:

- Una etapa de filtro de señal (Filtro): Se observó que todos los transductores de ultrasonidos introducían una importante componente de continua a la señal, por lo que para mejorar la calidad de la señal recibida se introdujo un filtro paso alto, el cual consta de un condensador junto con una resistencia, y que se encarga de filtrar dicha componente continua y deja pasar el resto de la señal.
- Dos etapas de amplificación (Ampli-1 y Ampli-2): Tras filtrar la señal, esta debe amplificarse para poder tratarla correctamente en las etapas

posteriores. Para ello se utilizó el esquema del amplificador inversor. Cabe comentar que en vez de conectar a tierra la entrada no inversora del operacional, la conectamos a la mitad del voltaje de alimentación suministrado al circuito (el cual se obtiene en el punto 'A' en la ilustración 12). Esto nos permite obtener un amplificador de onda completa con el cual se puede amplificar tanto la componente positiva como negativa de la señal sin necesidad de alimentar al circuito operacional con tensiones negativas, situando nuestra señal de entrada en $V_{cc}/2 \pm \text{señal_US}$. El motivo que llevó a utilizar dos etapas de amplificación fue el de lograr una mayor amplificación total, debido a limitaciones técnicas del propio operacional, la máxima ganancia en una sola etapa está acotada. Además, se ha intercalado entre ambas etapas un condensador con el fin de eliminar la componente continua que introduce el primer operacional en la señal.

- Una etapa de comparación (Comp): El objetivo de esta etapa es transformar nuestra señal analógica a una señal digital, la cual pueda tratar una unidad de procesamiento externo. Para ello, se hizo uso del esquema del comparador implementado con un operacional. Esto nos permite obtener como salida el voltaje de alimentación del módulo (un '1' lógico) si la señal recibida es mayor que un umbral (el cual obtenemos en el punto 'B' (Ilustración 12) y cuyo valor es el 54,54% del voltaje de alimentación).

Cabe mencionar que aunque aparecen varias fuentes de alimentación, todas ellas hacen referencia a una única fuente de 5 V (con la cual alimentamos el circuito). También mencionar que se utilizan como valor de referencia los 2,5 V en las etapas de amplificación de los operacionales con el fin de no utilizar doble alimentación y seguir logrando amplificadores de onda completa.

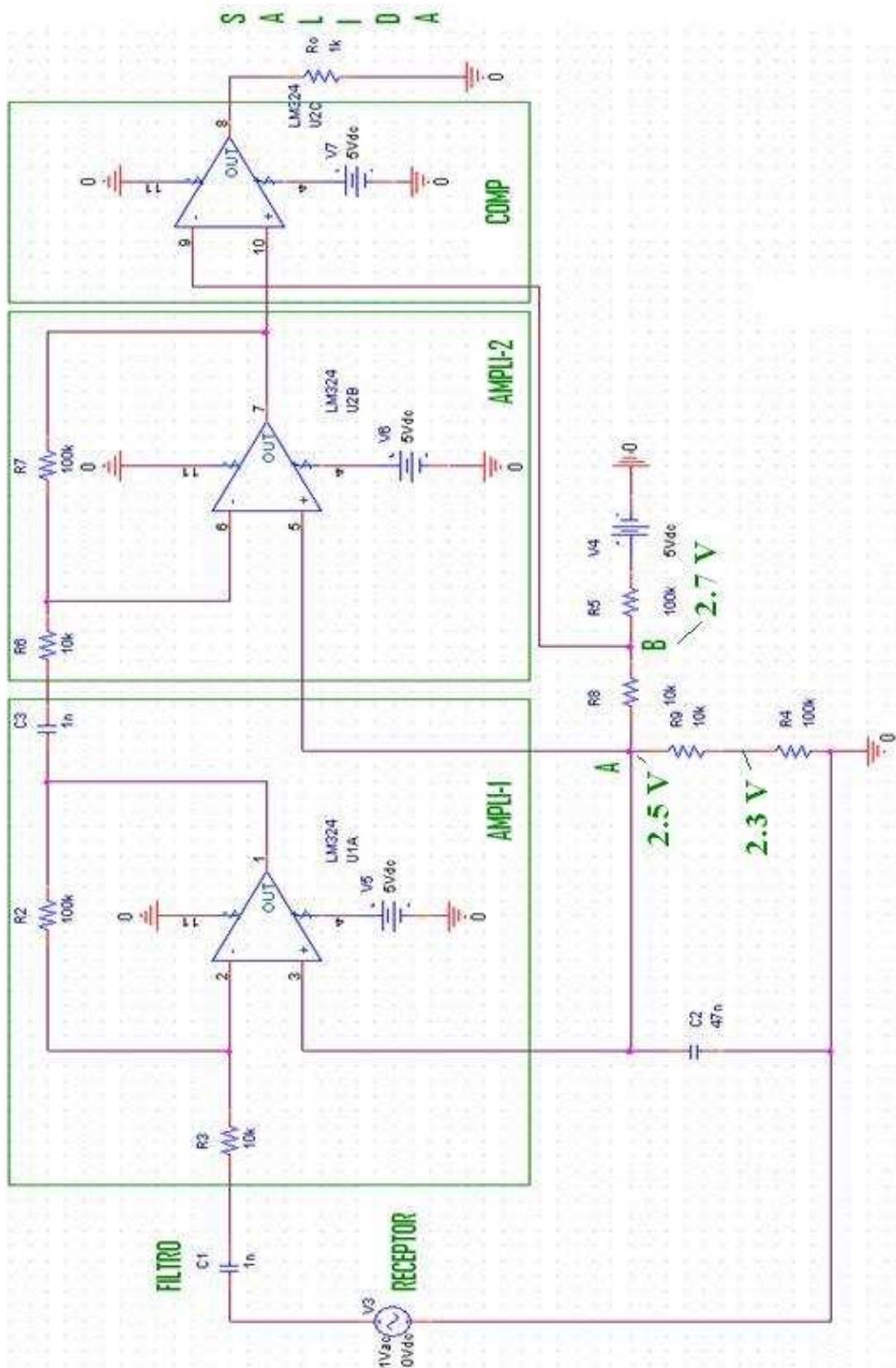


Ilustración 12: Circuito Receptor

Para implementar el esquema, se hizo una búsqueda de diferentes modelos de amplificadores operacionales existentes en el mercado. Los requisitos necesarios en nuestros amplificadores operacionales eran:

- Debían ser lo suficientemente rápidos como para tratar una señal a 40 kHz.
- Debían poder ser alimentados sin necesidad de utilizar alimentación negativa.
- Debía de proporcionar una buena amplificación de la señal.
- Debían introducir el menor ruido posible a la señal.
- Debían ser ‘rail-to-rail’ para poder aprovechar el máximo margen para la ganancia.

Tras un análisis de los diferentes operacionales existentes en el mercado, se decidió utilizar los amplificadores:

- LM324N.
- TLC2274ACN.
- TLV2473IN.
- MAX4167.

En primer lugar se procedió a hacer una medición de su calidad. Para ello, montamos los diferentes operacionales en sus correspondientes circuitos y fuimos aumentando la ganancia en las etapas de amplificación (Ampli-1 y Ampli-2) hasta que la señal de salida del comparador no era válida.

Las medidas se tomaron con una distancia entre los módulos de ultrasonidos (emisor-receptor) de un metro y donde ambos módulos estaban enfrentados. El emisor estaba conectado a la salida de uno de los pines PWM de la GP-Bot, es decir, el transductor de ultrasonidos se alimentaba con una tensión de valor pico a pico de 5V, y en ella estaba cargado el programa desarrollado inicialmente y que se detalla en el apartado “4.6.3.1 Fase de diseño 1: Algoritmo Localización”.

Las medidas ofrecidas por el programa eran descartadas ya que no se había realizado previamente el proceso de calibración del sistema. Los resultados que se muestran a continuación son capturas de pantalla del osciloscopio (Ilustración 13 - Ilustración 36). Cada una de las señales que se muestran en cada imagen representan:

- La primera señal representa la señal recibida por el módulo receptor (con escala vertical de 100 mV/div) (**naranja**).
- La segunda señal representa la señal tras la primera amplificación (con escala vertical de 2 V/div) (**rosa**).
- La tercera señal representa la señal tras la segunda amplificación (con escala vertical de 5 V/div) (**verde**).
- La cuarta señal representa la señal tras la comparación (con escala vertical de 5 V/div) (**morada**)

Nota: La escala horizontal utilizada es de 50 μ s/div (cuando no hay ruido) y de 200 μ s/div (cuando hay ruido).

Nota 2: Las capturas del osciloscopio correspondientes al MAX4167 (Ilustración 28 - Ilustración 31) difieren en color y escala respecto a los mencionados anteriormente.

LM324N

Las especificaciones técnicas de este operacional se pueden consultar en:

<http://focus.ti.com/lit/ds/slos066r/slos066r.pdf>

De entre las especificaciones del operacional, cabe destacar que tiene un ancho de banda a ganancia unidad de 1.2 MHz.

En las Ilustración 13 - Ilustración 17 se muestran las señales capturadas con el osciloscopio.

Como se puede observar de las gráficas que se obtienen, el operacional LM324N actúa bien como amplificador, sin embargo es demasiado lento como comparador, debido a que no se obtiene una correcta señal de salida. En el apartado “4.6.2.2.3 Comportamiento del Amplificador Operacional” se explica el motivo de este comportamiento.

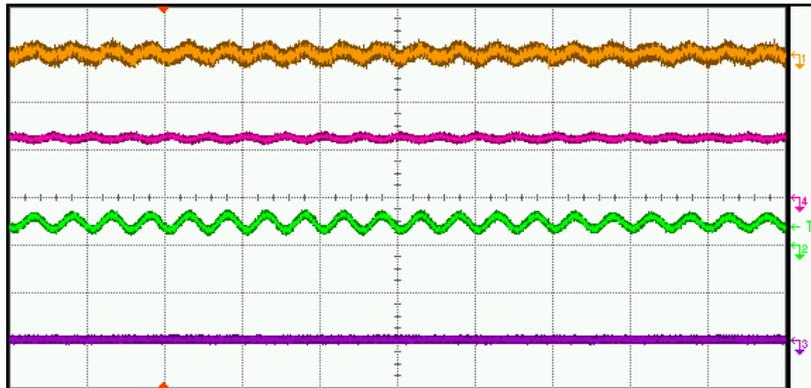


Ilustración 13: Ganancia 1ª Etapa: 10. Ganancia 2ª Etapa: 10

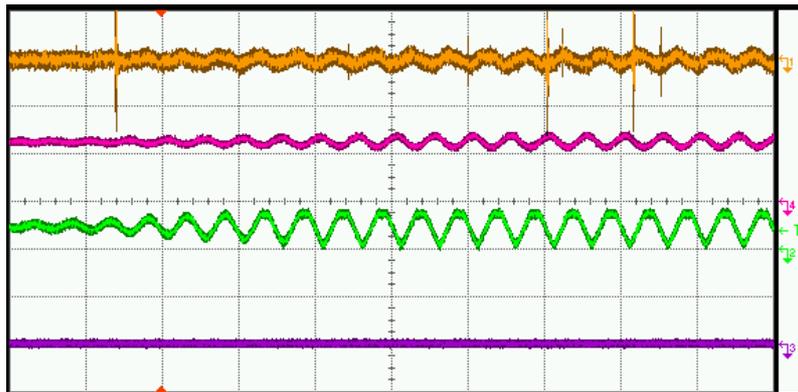


Ilustración 14: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 10

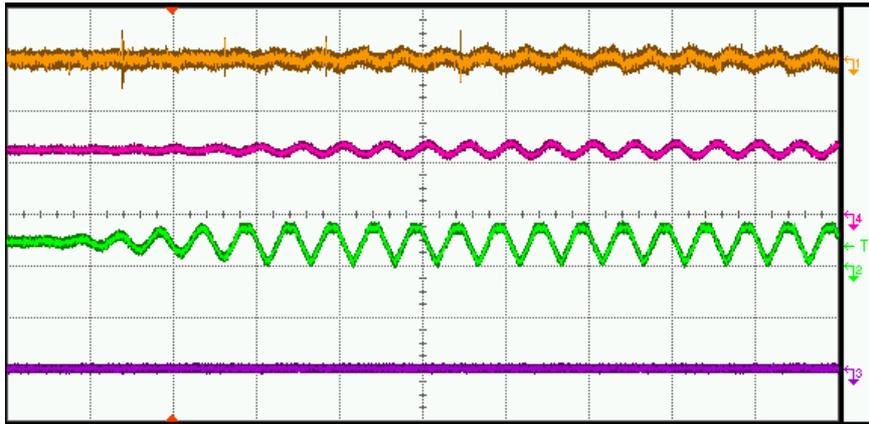


Ilustración 15: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 33

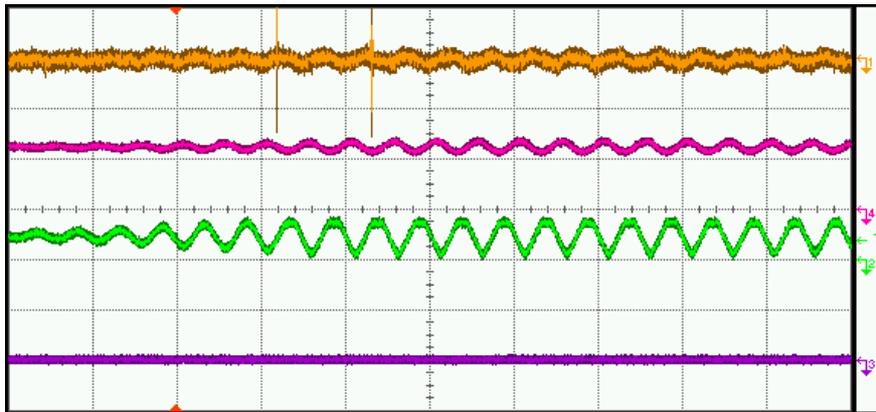


Ilustración 16: Ganancia 1ª Etapa: 100. Ganancia 2ª Etapa: 10

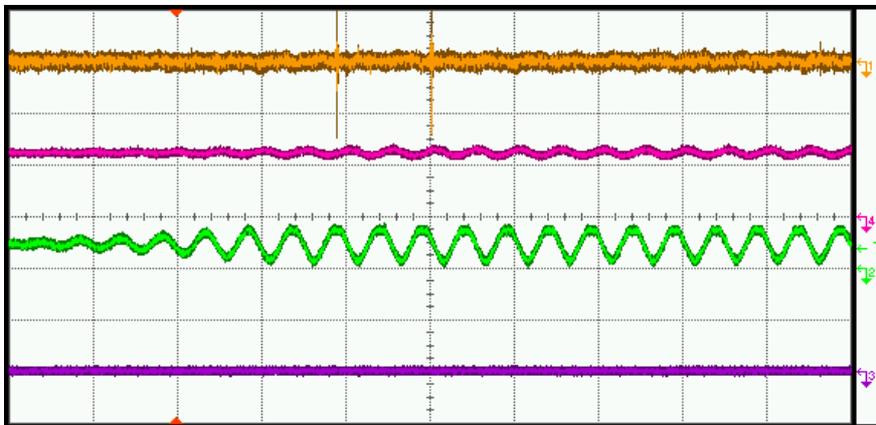


Ilustración 17: Ganancia 1ª Etapa: 100. Ganancia 2ª Etapa: 33

Las especificaciones técnicas de este operacional se pueden consultar en:

<http://focus.ti.com/lit/ds/slos190g/slos190g.pdf>

De entre las especificaciones del operacional, cabe destacar que tiene un ancho de banda a ganancia unidad de 2.2 MHz.

En las Ilustración 18 - Ilustración 22 se muestran las señales capturadas con el osciloscopio.

Como se puede observar de las gráficas que se obtienen, el operacional TLC2274ACN introduce ruido en la amplificación, lo cual genera una salida de comparación incorrecta. En el apartado “4.6.2.2.3 Comportamiento del Amplificador Operacional” se explica el motivo de este comportamiento.

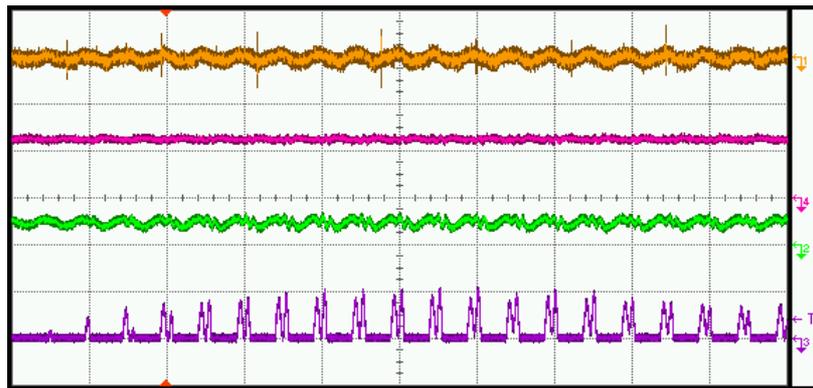


Ilustración 18: Ganancia 1ª Etapa: 10. Ganancia 2ª Etapa: 10

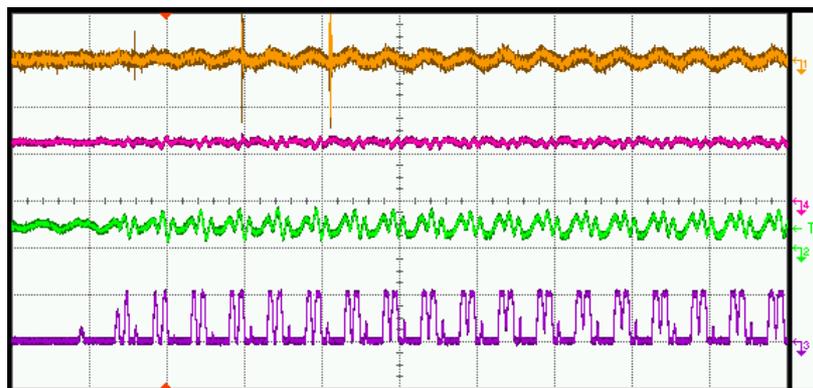


Ilustración 19: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 10

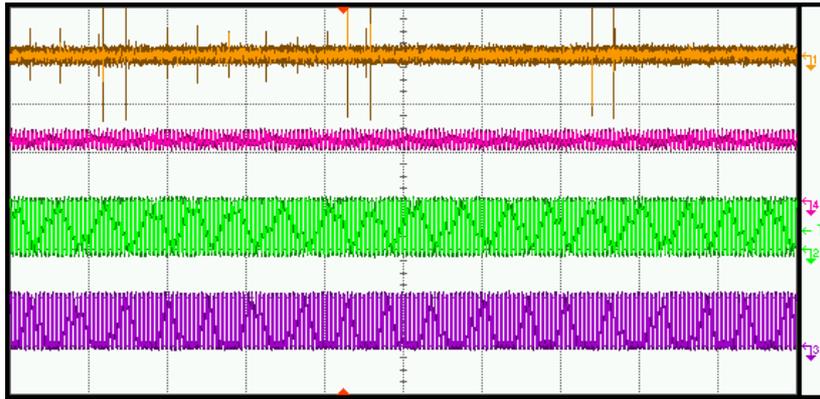


Ilustración 20: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 33 (Ruido)

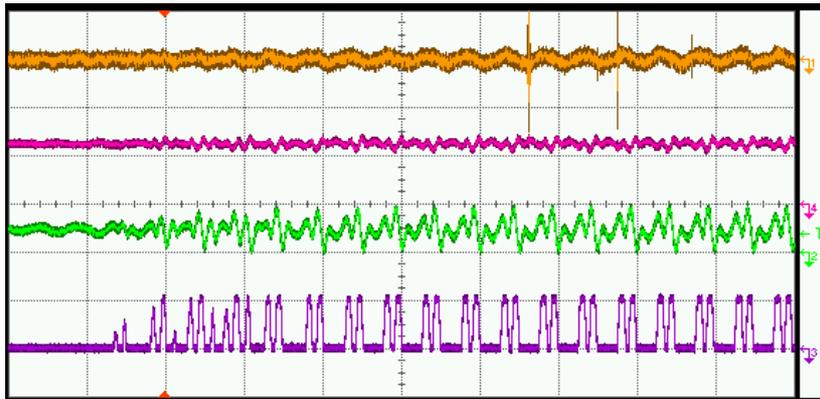


Ilustración 21: Ganancia 1ª Etapa: 100. Ganancia 2ª Etapa: 10

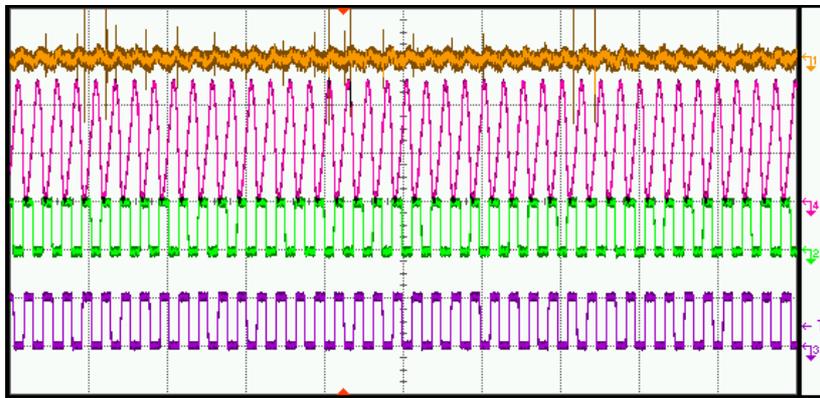


Ilustración 22: Ganancia 1ª Etapa: 100. Ganancia 2ª Etapa: 33(Ruido)

Las especificaciones técnicas de este operacional se pueden consultar en:

<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tlv2473.pdf>

De entre las especificaciones del operacional, cabe destacar que tiene un ancho de banda a ganancia unidad de 2.8 MHz.

Las señales capturadas con el osciloscopio se muestran en las Ilustración 23 - Ilustración 27.

Como se puede observar de las gráficas que se obtienen, el operacional TLV2473IN introduce ruido en la amplificación, lo cual genera una salida de comparación incorrecta. En el apartado “4.6.2.2.3 Comportamiento del Amplificador Operacional” se explica el motivo de este comportamiento.

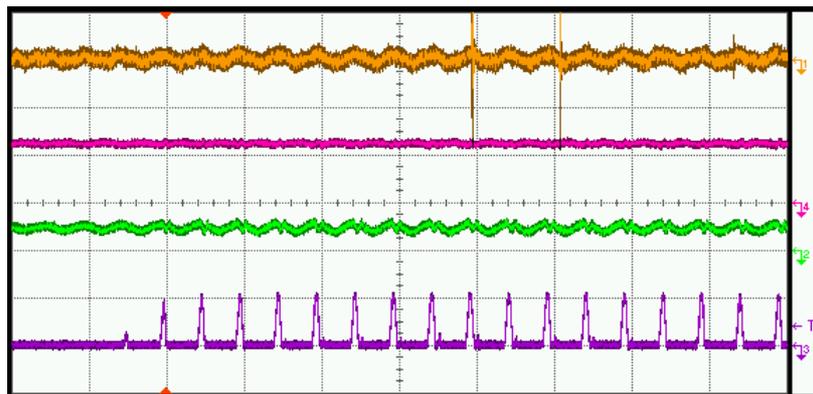


Ilustración 23: Ganancia 1ª Etapa: 10. Ganancia 2ª Etapa: 10

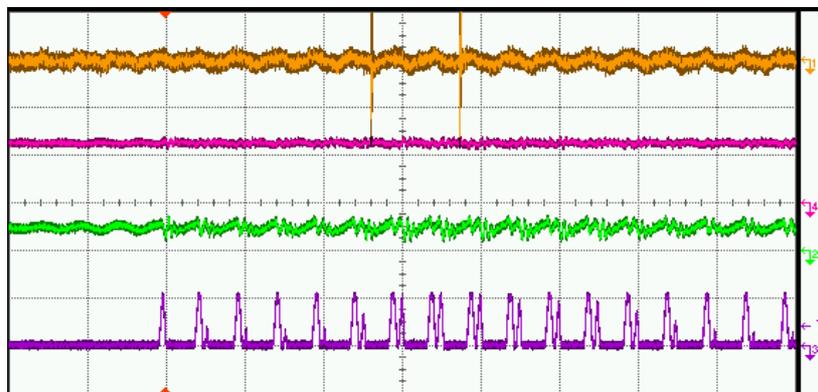


Ilustración 24: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 10

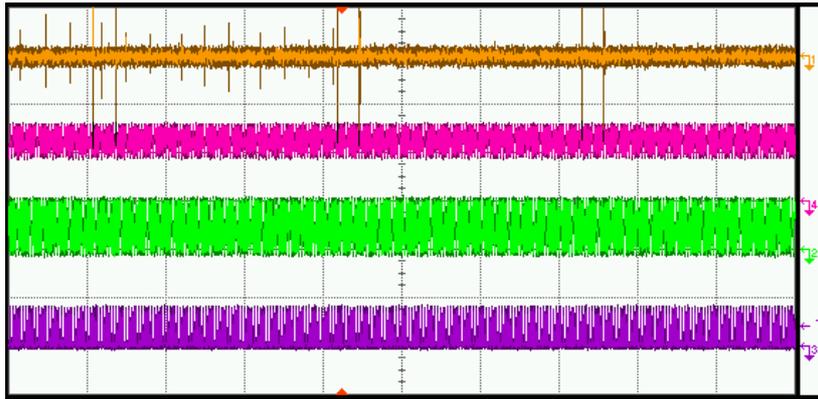


Ilustración 25: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 33(Ruido)

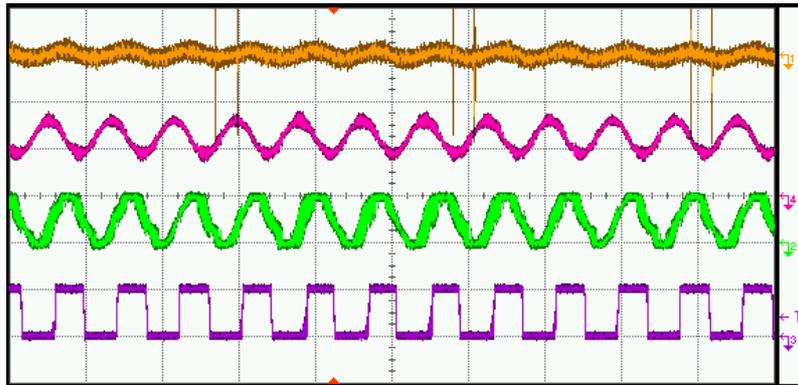


Ilustración 26: Ganancia 1ª Etapa: 100. Ganancia 2ª Etapa: 10 (Ruido)

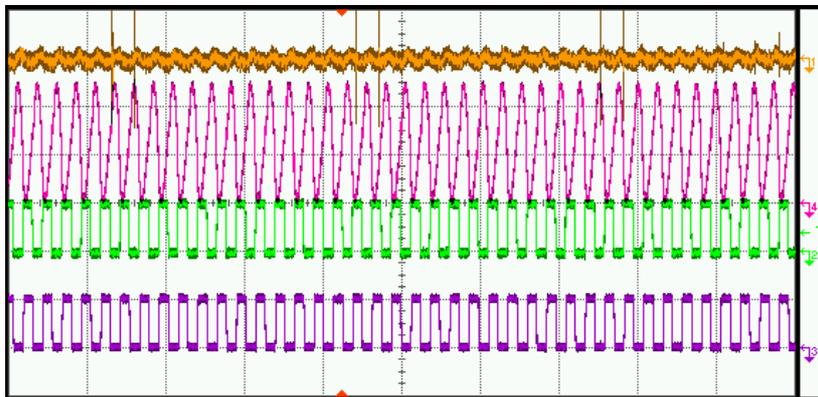


Ilustración 27: Ganancia 1ª Etapa: 100. Ganancia 2ª Etapa: 33(Ruido)

MAX4167

Las especificaciones técnicas de este operacional se pueden consultar en:

<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX4165-MAX4169.pdf>

De entre las especificaciones del operacional, cabe destacar que tiene un ancho de banda a ganancia unidad de 2.8 MHz.

Las ilustraciones Ilustración 28 - Ilustración 31 muestran las señales capturadas con el osciloscopio. Cada una de las señales representa:

- La primera señal (**morada**) representa la señal recibida por el módulo receptor (con escala vertical de 200 mV/div)
- La segunda señal (**naranja**) representa la señal tras la primera amplificación (con escala vertical de 2 V/div)
- La tercera señal (**verde**) representa la señal tras la segunda amplificación (con escala vertical de 5 V/div)
- La cuarta señal (**rosa**) representa la señal tras la comparación (con escala vertical de 5 V/div)
- La escala horizontal utilizada es de 50 μ s/div (cuando no hay ruido) y de 200 μ s/div (cuando hay ruido)

Como se puede observar de las gráficas que se obtienen, el operacional MAX4167 introduce poco ruido en la amplificación, pero no permite amplificar mucho la señal. En el apartado “4.6.2.2.3 Comportamiento del Amplificador Operacional” se explica el motivo de este comportamiento.

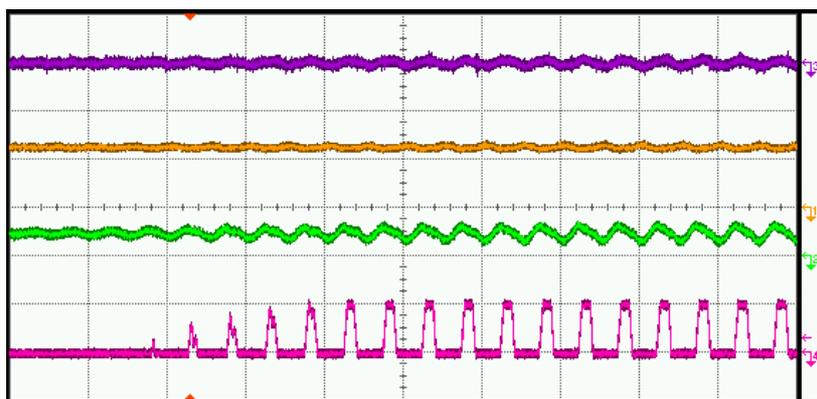


Ilustración 28: Ganancia 1ª Etapa: 10. Ganancia 2ª Etapa: 10

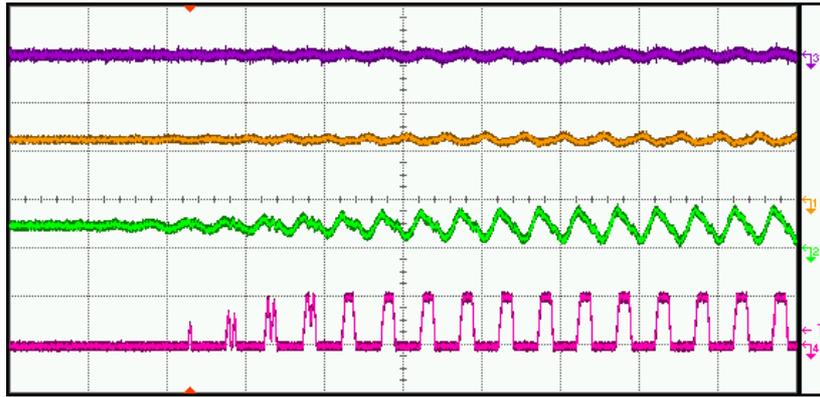


Ilustración 29: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 10

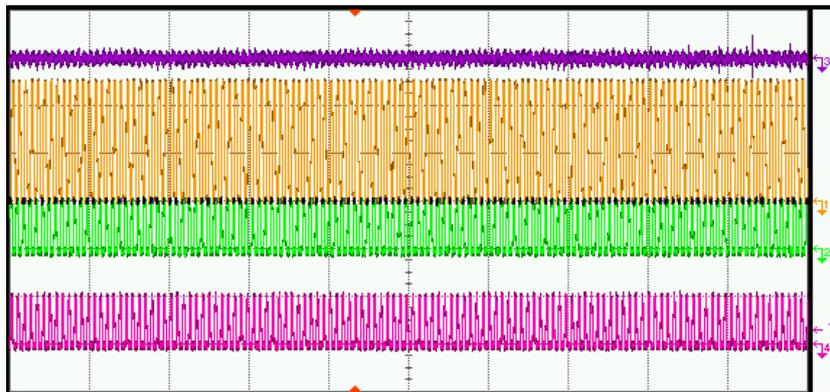


Ilustración 30: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 33 (Ruido)

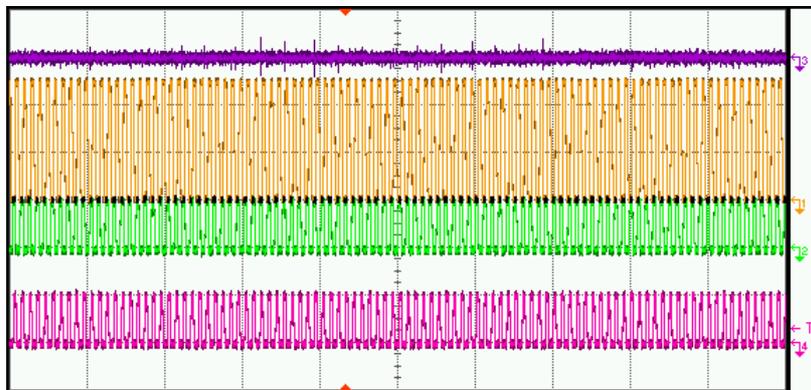


Ilustración 31: Ganancia 1ª Etapa: 100. Ganancia 2ª Etapa: 10 (Ruido)

Combinación LM324N + TLC2274ACN

Tras un análisis del comportamiento de los circuitos anteriormente descritos, procedimos a combinar el comportamiento de dos de ellos. El LM324N, como amplificador y el TLC2274ACN, como comparador, obteniendo los resultados que se detallan a continuación.

Las especificaciones técnicas de este operacional se pueden consultar en:

<http://focus.ti.com/lit/ds/slos190g/slos190g.pdf>

<http://focus.ti.com/lit/ds/slos066r/slos066r.pdf>

Las señales capturadas con el osciloscopio se recogen en las Ilustración 32 - Ilustración 36.

Como se puede deducir de las gráficas, si combinamos estos dos operacionales conseguimos reducir el nivel de ruido generado durante la amplificación, además de lograr una buena etapa de comparación, logrando un módulo receptor que permite detectar una señal de ultrasonidos a una mayor distancia. En el apartado “4.6.2.2.3 Comportamiento del Amplificador Operacional” se explica el motivo de este comportamiento.

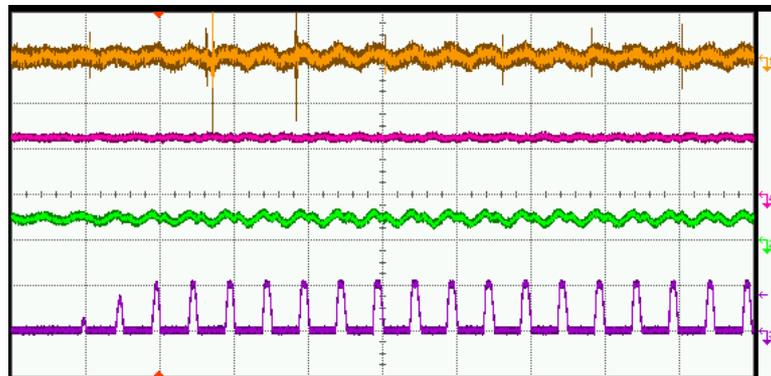


Ilustración 32: Ganancia 1ª Etapa: 10. Ganancia 2ª Etapa: 10

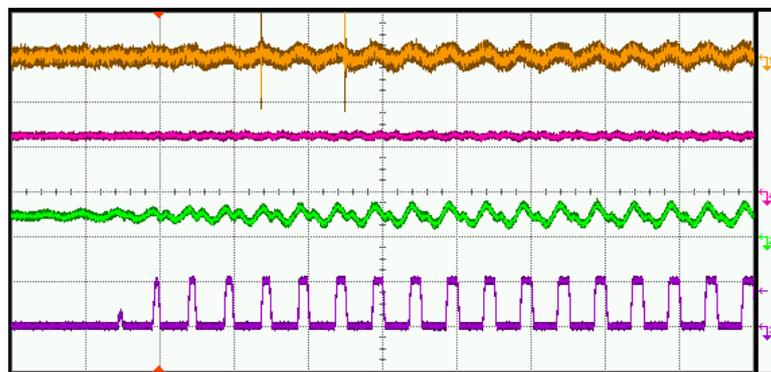


Ilustración 33: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 10

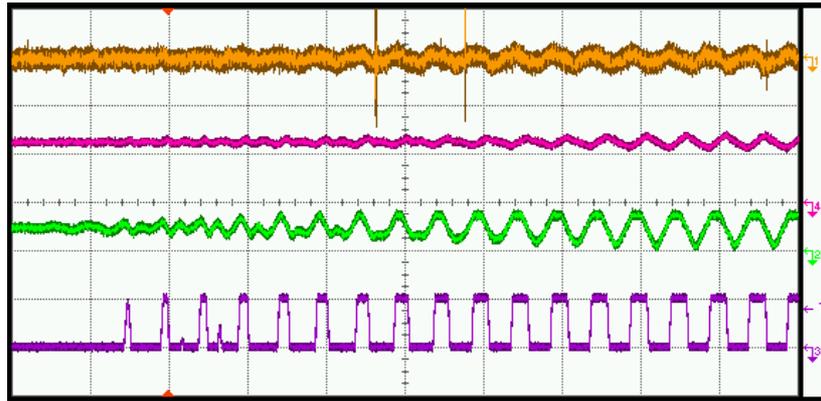


Ilustración 34: Ganancia 1ª Etapa: 33. Ganancia 2ª Etapa: 33

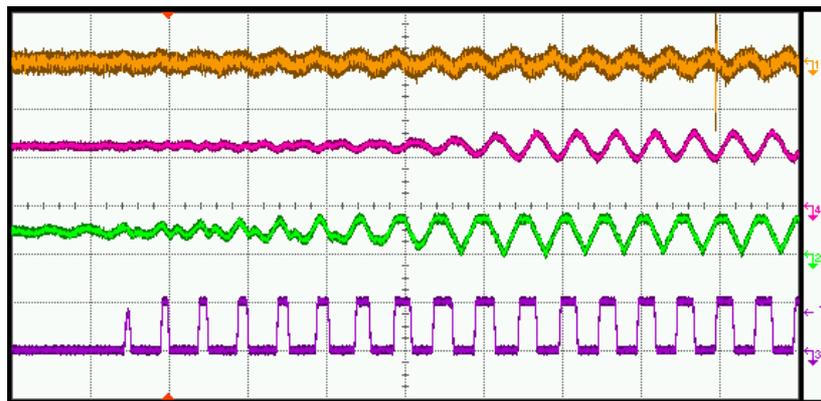


Ilustración 35: Ganancia 1ª Etapa: 100. Ganancia 2ª Etapa: 10

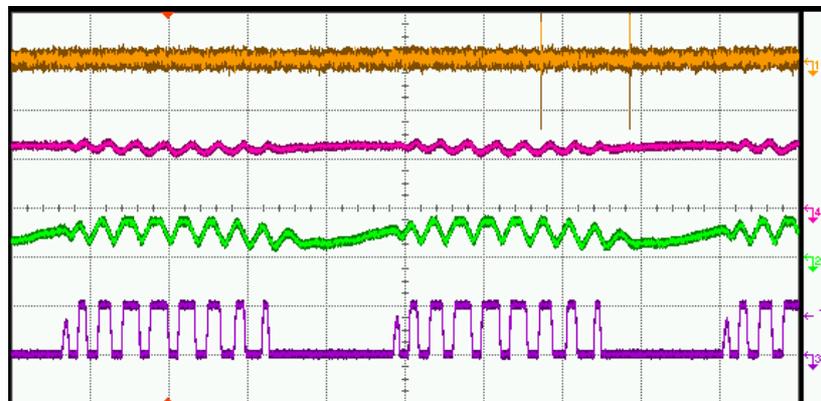


Ilustración 36: Ganancia 1ª Etapa: 100. Ganancia 2ª Etapa: 33(Ruido)

Solución escogida Fase 1 - 2

Tras el análisis de las gráficas mostradas anteriormente, la opción óptima de entre las que hemos analizado es “Combinación LM324N + TLC2274ACN” con unas etapas de amplificación de 100 y 10 respectivamente, ya que es la que nos permite una mayor amplificación en nuestra señal recibida de ultrasonidos y reduce el ruido recibido por el receptor.

Implementación mediante amplificadores de instrumentación

Una vez comprobado el rendimiento del circuito anterior en varias pruebas, las cuales se recogen en el apartado “4.8 Resultados Posicionamiento” se decidió realizar las mismas medidas sustituyendo los amplificadores operacionales por unos amplificadores de instrumentación, los cuales están diseñados para amplificar las diferencias de tensión a sus entradas de una forma más precisa que los amplificadores operacionales.

Su implementación se basó en el esquema que se muestra en la Ilustración 12, pero adaptándolo para la utilización del modelo de amplificador instrumental ‘INA2331’. Teniendo en cuenta las medidas a realizar, se dotó al circuito de salidas auxiliares (una salida antes de la etapa del comparador y un pin para conocer la masa de la placa) y de un *jumper* (con el cual seleccionar si se desea una o dos etapas de amplificación).

Cabe mencionar, que la ganancia que se obtiene en cada etapa de amplificación corresponde a:

$$g = 5 + \frac{5 \cdot R2}{R1}$$

De este modo, si dejamos fijo R1, la ganancia se obtiene modificando el valor de R2 según la fórmula antes descrita. La ganancia de la segunda etapa de amplificación se basa en la misma fórmula, sustituyendo R1 por R5 y R2 por R6. El nuevo esquema se muestra en la Ilustración 37.

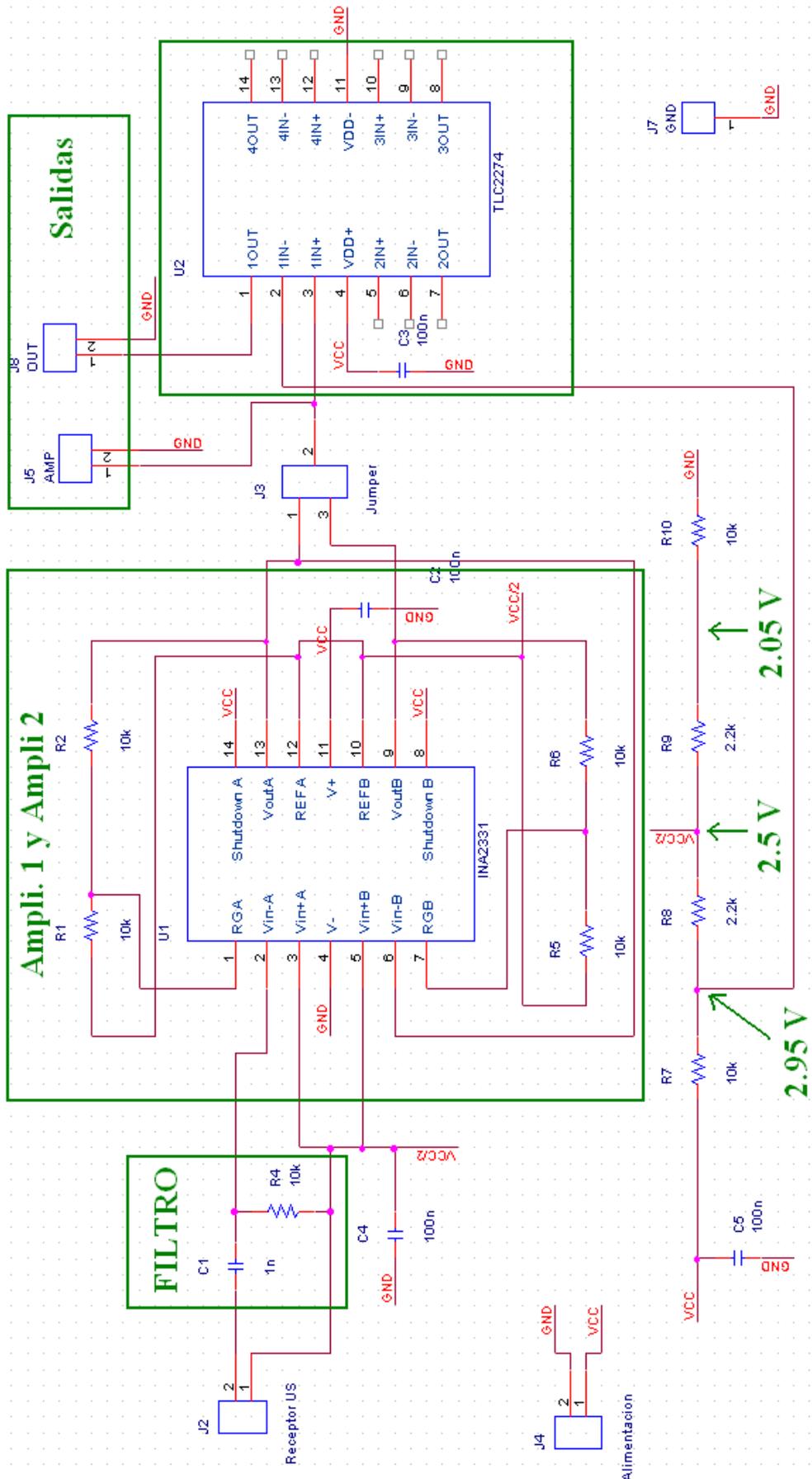


Ilustración 37: Esquemático módulo receptor (INA2331)

Construida la placa, se procedió a hacer una comparación de la misma respecto a la placa implementada mediante amplificadores operacionales. Para ello, se fijó el receptor a tres metros del emisor en línea recta y alimentamos el emisor con una señal de 5V de valor pico-pico. Por otro lado, el módulo del receptor estaba alimentado con 4 pilas recargables, obteniendo un voltaje de alimentación de 5,64 V.

Los resultados obtenidos tras la etapa de amplificación se recogen en las Ilustración 38 - Ilustración 45.

Combinación LM324N + TLC2274ACN

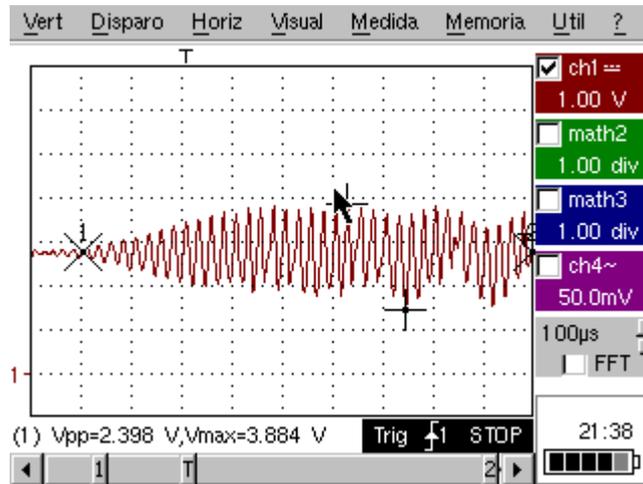


Ilustración 38: Señal Recibida con LM324

INA2331 – 1 Etapa – Ganancia 505

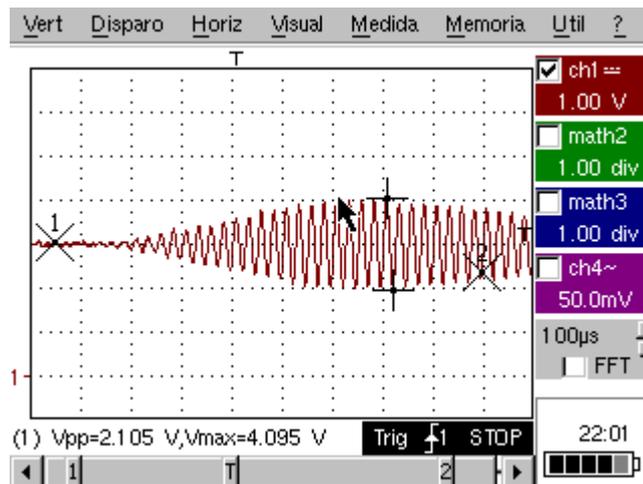


Ilustración 39: Señal Recibida Ganancia 505

INA2331 – 1 Etapa – Ganancia 1105

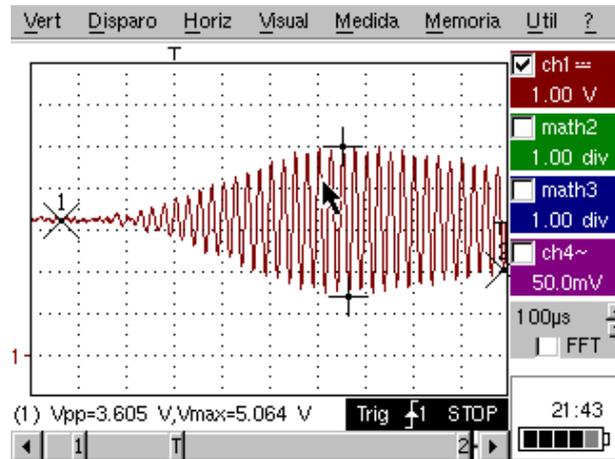


Ilustración 40: Señal Recibida Ganancia 1105

INA2331 – 1 Etapa – Ganancia 1955

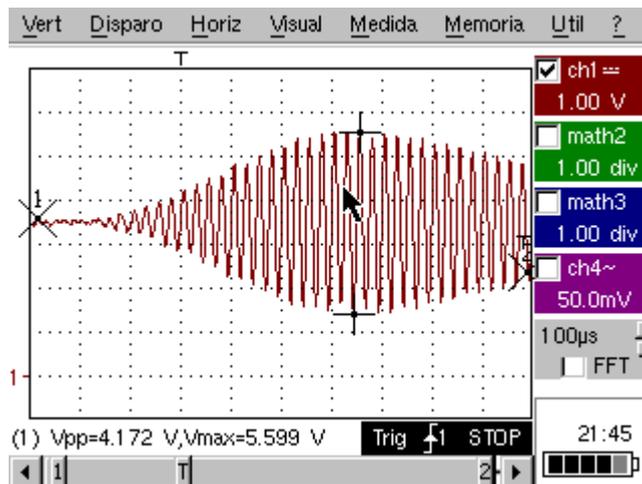


Ilustración 41: Señal Recibida Ganancia 1955

INA2331 – 1 Etapa – Ganancia 3405

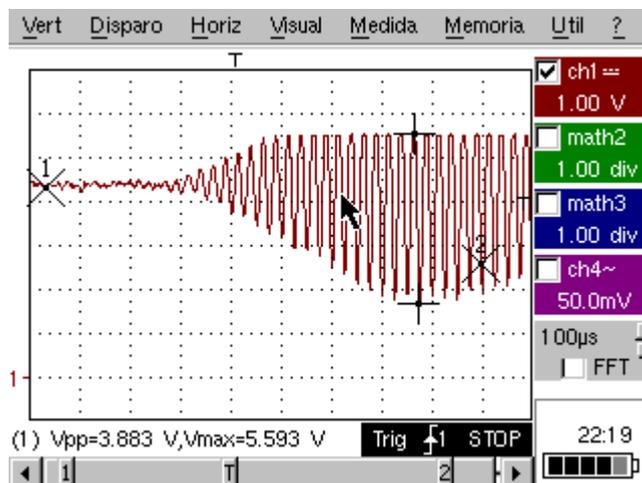


Ilustración 42: Señal Recibida Ganancia 3405

INA2331 – 1 Etapa – Ganancia 5005

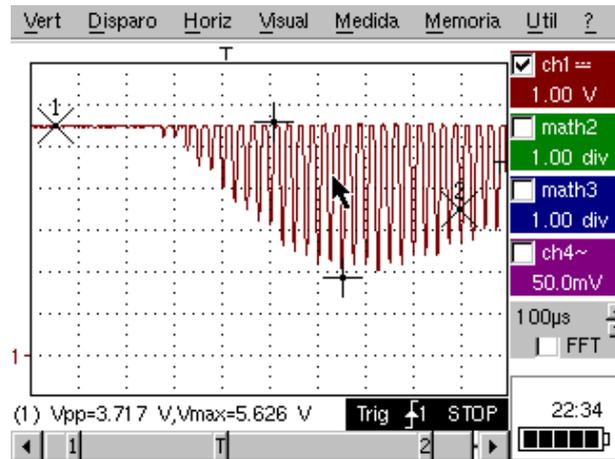


Ilustración 43: Señal Recibida Ganancia 5005

INA2331 – Ganancias 505 – 10 (A la salida de la 1ª Etapa)

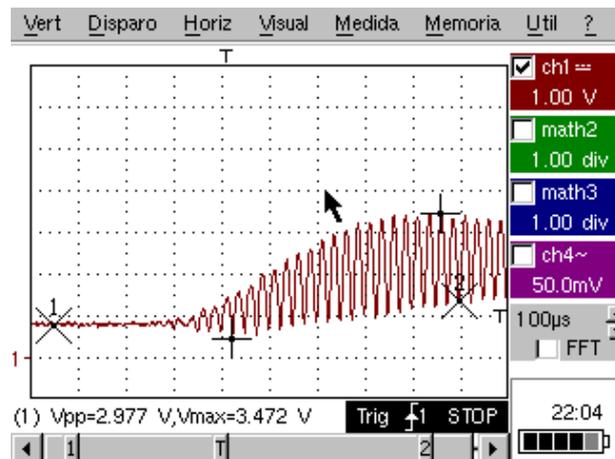


Ilustración 44: Señal Recibida 1ª Etapa

INA2331 –Ganancias 505 – 10 (A la salida de la 2ª Etapa)

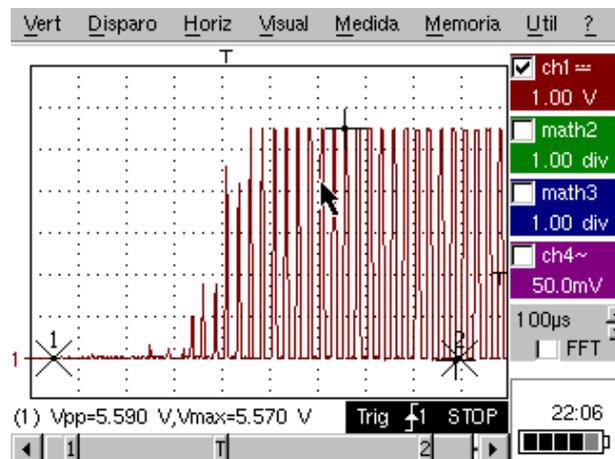


Ilustración 45: Señal Recibida 2ª Etapa

Como se puede apreciar en la Ilustración 44 y en la Ilustración 45, se puede concluir que al introducir dos etapas la ganancia total pedida al circuito es mayor que la que este puede otorgar, por lo que da como salida una señal incorrecta.

Los resultados obtenidos se pueden condensar en la siguiente tabla con el fin de facilitar su comparación entre ellos:

Tabla 3: Comparación resultados obtenidos

Modelo	R1	R2	Ganancia teórica	Vpp	Vmax	Vreposito	Vmin	Vreposito - Vmin
LM324	-	-	-	2,398	3,884	2,7	1,486	1,214
INA2331	1 kΩ	100 kΩ	505	2,105	4,095	3,1	1,99	1,11
INA2331	1 kΩ	220 kΩ	1105	3,605	5,064	3,3	1,459	1,841
INA2331	1 kΩ	390 kΩ	1955	4,172	5,599	3,6	1,427	2,173
INA2331	1 kΩ	680 kΩ	3405	3,883	5,593	4,3	1,71	2,59
INA2331	1 kΩ	1000 kΩ	5005	3,717	5,626	5,6	1,909	3,691

Analizando la tabla, se puede apreciar que los resultados obtenidos son bastante mejor que los obtenidos con el modelo implementado mediante amplificadores operacionales, llegando a obtener el doble de tensión pico a pico de señal. Además, se puede apreciar en las imágenes que la señal es mucho más limpia si utilizamos amplificadores instrumentales.

Sin embargo, aparece un problema relacionado con la tensión en reposo de la señal. A medida que aumentamos la ganancia, la señal va aumentando su componente de continua debido a la ganancia en modo común del circuito, pasando de los 2,5 V ideales al máximo ofrecido por la fuente de alimentación. Este problema repercute en la etapa de comparación posterior, en donde el circuito deja de comportarse como inicialmente estaba diseñado. Este hecho se debe a que el valor de comparación no es superior al valor de la tensión en reposo, lo que deriva en que:

- Si ambos valores están próximos entre sí, el comparador no será capaz de distinguir el ruido de la señal real (Ilustración 46 e Ilustración 47).

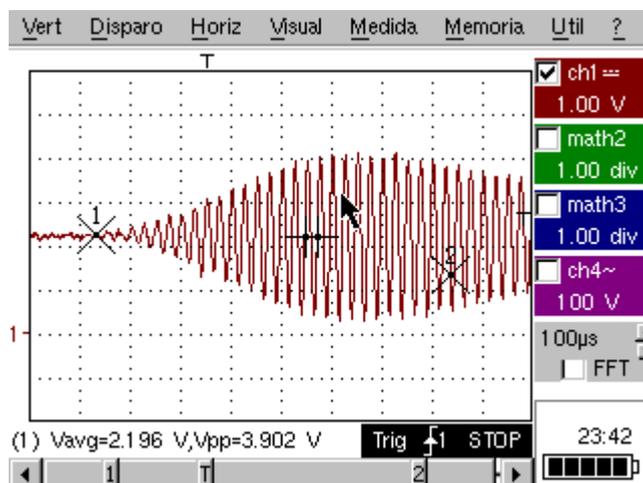


Ilustración 46: Señal tras etapa de amplificación (g = 1105)

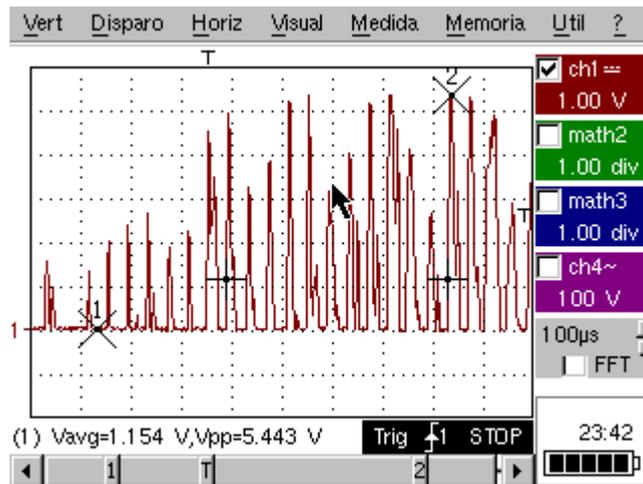


Ilustración 47: Señal tras etapa de comparación ($g = 1105$)

- Si la tensión de referencia es mayor que la señal de comparación, la salida del comparador se invierte, pasando de estar en reposo a 0 V y entregar un tren de pulsos al detectar la señal, a estar en reposo a 5 V y entregar el tren de pulsos al recibir la señal (Ilustración 48 e Ilustración 49).

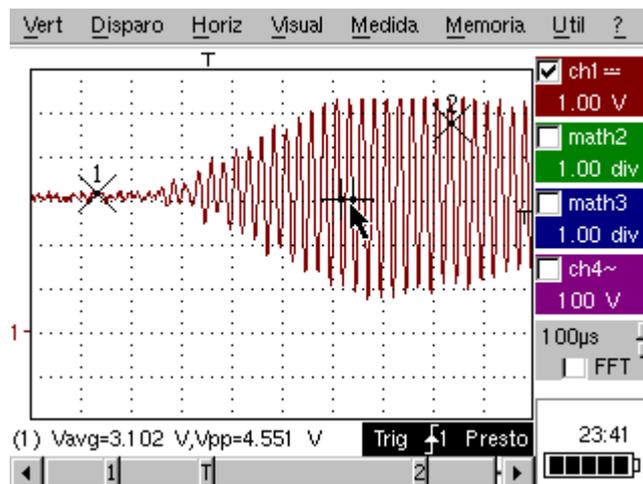


Ilustración 48: Señal tras etapa de amplificación ($g = 1955$)

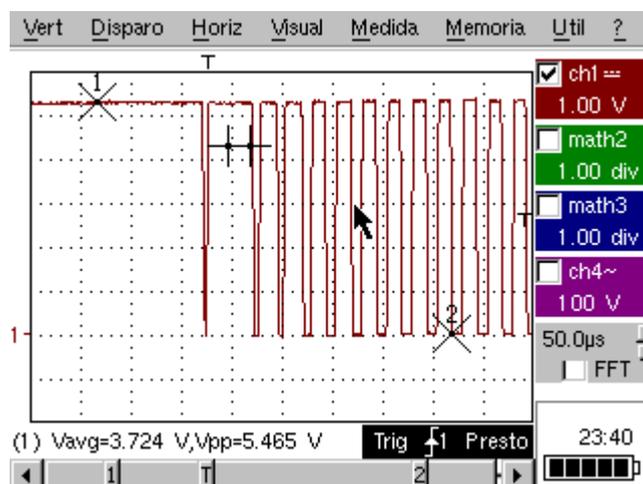


Ilustración 49: Señal tras etapa de comparación ($g = 1955$)

Solución escogida

Por los problemas detectados, se decidió modificar la red resistiva modificando el valor de la resistencia R10, bajando dicho valor a los 3,3 k Ω . Esto origina un descenso en el valor de la tensión en reposo antes de la etapa de amplificación, la cual al sumarle la componente relacionada con la ganancia en modo común hace que nuestra señal se sitúe cerca del valor de comparación, tal y como estaba diseñado (Ilustración 50 e Ilustración 51).

Tras el análisis realizado anteriormente, optamos por implementar el módulo receptor con una sola etapa de ganancia, con R1 = 1 k Ω y R2 = 680 k Ω , con lo que teóricamente se obtiene una ganancia de 3405, lo cual nos ofrecía la señal a 3 metros si alimentamos los emisores de ultrasonidos a 5 V que se muestra en la Ilustración 50 y en la Ilustración 51.

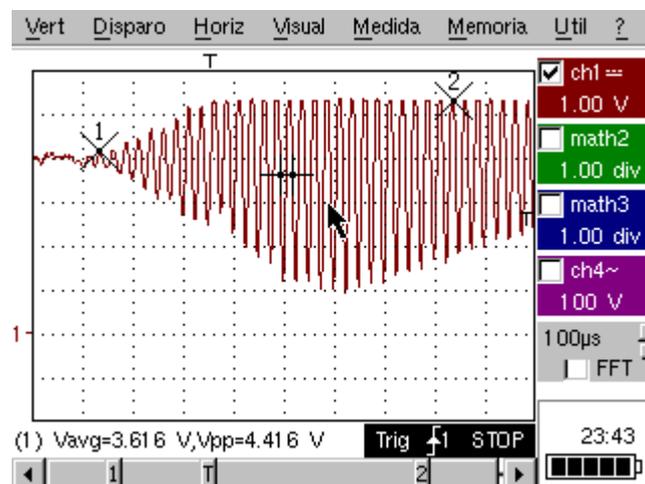


Ilustración 50: Señal tras etapa de amplificación ($g = 3405$)

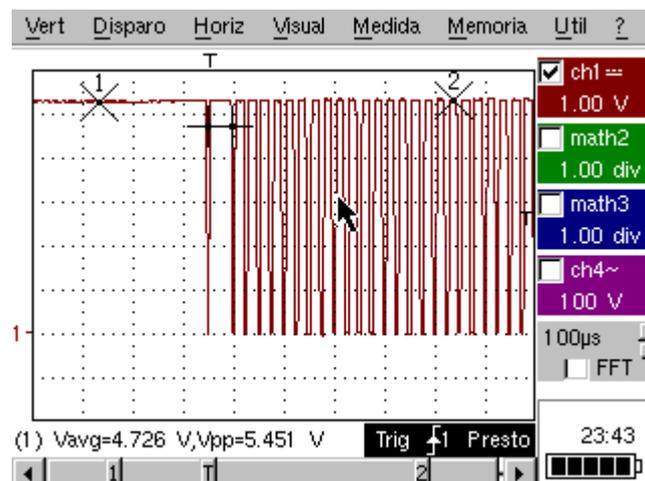


Ilustración 51: Señal tras etapa de comparación ($g = 3405$)

4.6.2.2.3. Comportamiento del Amplificador Operacional

Para comprender el comportamiento de un amplificador operacional debemos introducir el concepto de ancho de banda para ganancia unidad. Todo operacional tiene definido dicho valor y esto nos indica la frecuencia máxima a la cual el operacional es capaz de amplificar la señal por 0 dB, es decir, multiplicar la señal por uno. A partir de ese valor, la ganancia que es capaz de proporcionar el amplificador se incrementa en 20 dB por década hasta un máximo en el que la amplificación permanece constante.

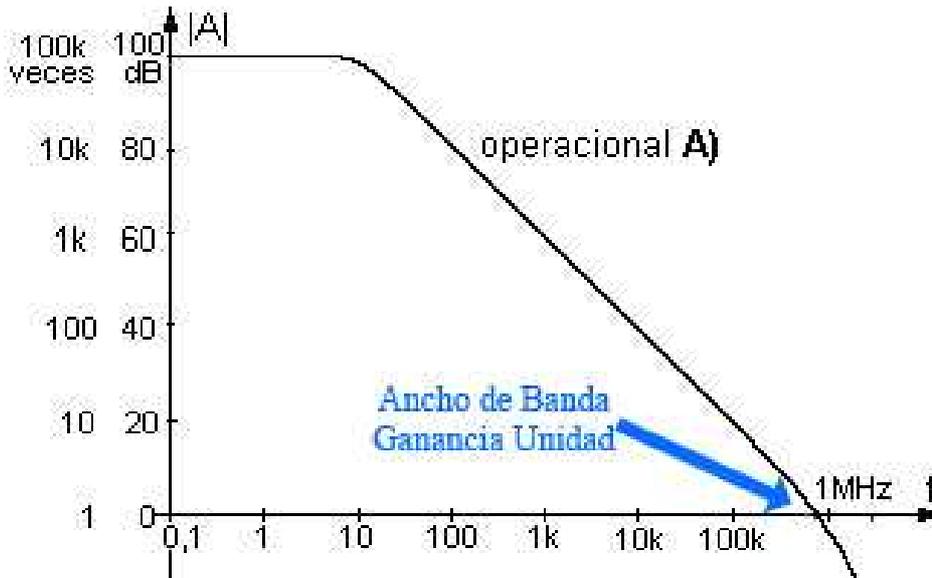


Ilustración 52: Gráfica de ganancia del circuito operacional

Conocer el comportamiento del amplificador operacional permite explicar las causas por las cuales los diferentes modelos de amplificadores actuaban mejor o peor como amplificadores o comparadores.

Así, para el amplificador LM324N cuyo ancho de banda para ganancia unidad es de 1.2 MHz (su curva de ganancia se puede aproximar por la mostrada en la Ilustración 52), si deseáramos conseguir una amplificación de 40 dB en nuestra señal, la componente de máxima frecuencia de nuestra señal debería de ser de unos 10 kHz (Ilustración 53). Si nuestra señal tiene componentes frecuenciales mayores de 10 kHz, estas componentes no se amplificarán a 40 dB sino a la ganancia que indica la curva naranja (Ilustración 53), lo cual distorsionaría nuestra señal original.

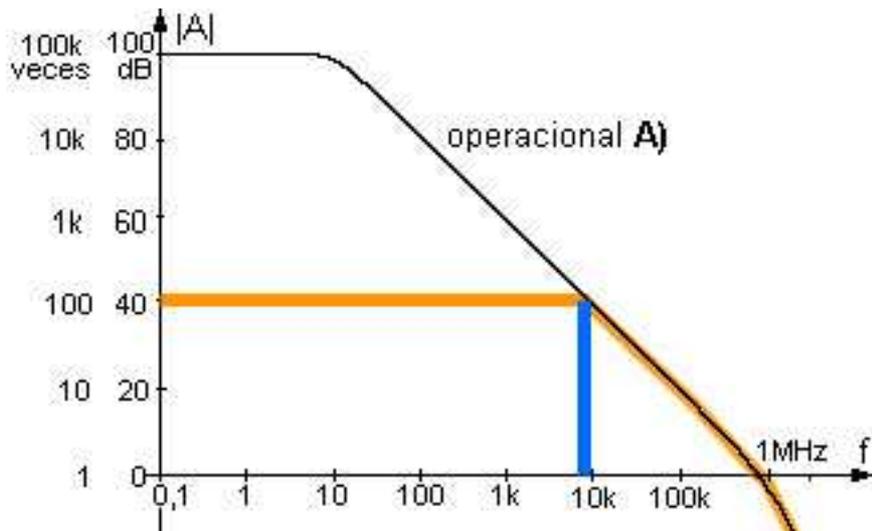


Ilustración 53: Ganancia a 40 dB

En nuestro caso concreto, lo que estamos tratando de amplificar se podría considerar prácticamente como una señal pura de 40 kHz, cuya transformación frecuencial equivale a una delta de Dirac centrada en 40 kHz. En el caso del LM324N, la máxima ganancia a esa frecuencia está en torno a los 25-27 dB, es decir, que proporciona una amplificación máxima de entre una 316 y 500 veces la señal original.

Las componentes frecuenciales de mayor frecuencia, en su inmensa mayoría ruido, son amplificadas por un valor menor de amplificación, lo cual produce un efecto de atenuación en dichas componentes al compararlas con la amplitud de la señal deseada, por lo que la señal resultante es mucho más “limpia” que la que se obtiene con el resto de los operacionales, los cuales al tener un mayor valor de ancho de banda a ganancia unidad, amplifican el ruido por ese mismo valor, distorsionando en mayor medida la señal.

Sin embargo, el reducido ancho de banda a ganancia unidad del LM324N impide utilizarlo como comparador a 40 kHz, debido a que el comparador requiere de un mayor ancho de banda para generar los saltos entre unos y ceros lógicos, mientras que el resto de operacionales, al disponer de ese mayor ancho de banda a ganancia unidad sí permiten comportarse como comparadores a 40 kHz.

Por último, falta por explicar el efecto que se podía observar en los operacionales cuando se les aplica una ganancia muy elevada, debido al propio comportamiento del amplificador operacional cuando se realimenta de forma negativa (Ilustración 54), tal y como lo se ha implementado en nuestro circuito, el cual tiene una función de transferencia igual a:

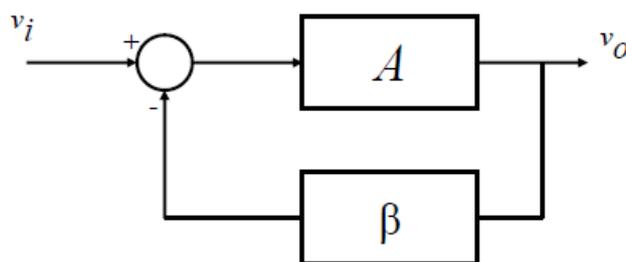


Ilustración 54: Esquema de realimentación

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 + AB}$$

Donde A es la ganancia del amplificador y B corresponde a la red de realimentación, en nuestro caso resistiva ($B = \frac{R1}{R1 + R2}$).

El circuito comienza a oscilar cuando el denominador se hace 0, lo cual implica que:

$$1 = -AB$$

En nuestro sistema, como B siempre es mayor que 0, A debe ser negativo, lo cual implica que la fase del circuito operacional vale 180°. Al no estar utilizando amplificadores compensados, el segundo polo inherente en el operacional está en una frecuencia a la cual el operacional sigue otorgando una ganancia mayor que la unidad, por lo que existe un valor de 'A' a partir del cual se obtiene la condición antes mencionada, empezando a oscilar el circuito (Ilustración 55).

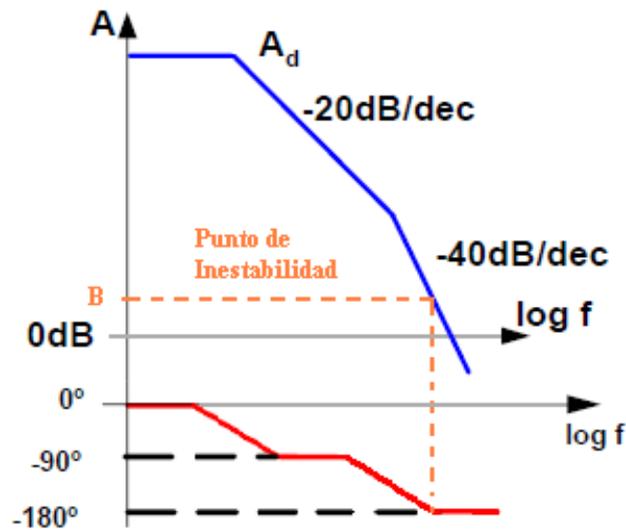


Ilustración 55 Ganancia-Fase Amplificador no compensado

4.6.3. Implementación Software

Una vez definidos e implementados los módulos de los que iba a constar nuestro sistema, procedimos a desarrollar el software necesario para la utilización de dichos módulos por parte de la lógica del nodo. Como ya se ha comentado en el capítulo “3 Fases del diseño”, el proyecto se podría dividir en 3 fases, cada una con su implementación software correspondiente:

- Fase 1: Como ya se ha comentado previamente, en esta fase se perseguía comprobar si el algoritmo necesario para la localización se podía implementar en un microcontrolador de bajo coste, por lo que la arquitectura en la que se implementó el algoritmo fue la GP-Bot. En esta fase, el algoritmo de localización consta básicamente de un *timer* (contador) que se activa cuando se comienza a emitir la señal de ultrasonidos y se detiene en el instante de detectarla, obteniendo así el tiempo de vuelo de la señal. Dicho algoritmo se detalla en el apartado “4.6.3.1 Fase de diseño 1: Algoritmo Localización”.
- Fase 2: Tras conseguir la implementación del algoritmo en la GP-Bot, se observó que las prestaciones ofrecidas por esta tecnología estaban muy limitadas por la propia capacidad computacional de la GP-Bot. Por este motivo, y para analizar en más detalle la tecnología de localización empleada, se comenzó a utilizar sistemas basados en tecnología FPGA, en donde sus limitaciones computacionales no afectaban a nuestro sistema. Como ya se ha comentado, en esta fase los módulos emisor y receptor estaban separados físicamente, por lo que el algoritmo implementado constaba de dos partes:
 - o Una relacionada con el emisor, cuyo algoritmo se basaba en la emisión cada 2 segundos una señal de radiofrecuencia junto con un tren de pulsos de ultrasonidos por una de los posibles emisores.
 - o Un algoritmo para el receptor, el cual basaba su funcionamiento en esperar una señal de radiofrecuencia válida para activar un timer y detenerlo cuando se detectase un tren de pulsos de ultrasonidos válidos.

Ambos algoritmos se describe más detalladamente en el apartado “4.6.3.2 Fase de diseño 2: Algoritmo Localización”.

- Fase 3: Tras analizar las prestaciones ofrecidas por el sistema de localización, se procedió a la implementación del algoritmo final en la GP-Bot. Para ello añadimos a la GP-Bot el receptor de radio. Básicamente, el algoritmo esperaba la recepción de una señal correcta de radiofrecuencia para activar un timer, el cual se detenía tras detectar la señal de ultrasonidos. Dicho algoritmo se puede ver con más detalle en el apartado “4.6.3.3 Fase de diseño 3: Algoritmo Localización Final”

4.6.3.1. Fase de diseño 1: Algoritmo Localización

La GP-Bot se utilizó inicialmente como banco de pruebas para comprobar si realmente era posible la implementación del algoritmo de localización en un microcontrolador de bajo coste, como ya se ha comentado en el capítulo “2 Arquitecturas Utilizadas”. Por ello, se diseñó el algoritmo para que la GP-Bot actuara tanto de emisor de ultrasonidos como de receptor, sin necesidad de implementar el sistema de radiofrecuencia. El microcontrolador era capaz de conocer de forma precisa el tiempo de vuelo de la señal de ultrasonidos, implementando un contador que comenzaba a funcionar justo antes de emitir la señal y se detenía una vez detectado un tren de pulsos de ultrasonidos válido. El contador contaba a una velocidad de 635 kHz, cuyo valor se obtiene al aplicar un *pre-scaler* (factor de división) de 4 a la señal del bus de la GP-Bot (2,54 MHz).

Cabe resaltar que la velocidad del sonido no es siempre constante, sino que esta depende de la temperatura y del medio por el que se propague la señal. Dicha velocidad viene determinada por la fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

La cual en el caso en la onda se propague por el aire equivale a:

$$v = 331.6 \sqrt{1 + \frac{t(^{\circ}\text{C})}{273}}$$

Aunque se implementó en la GP-Bot un algoritmo para medir distancias según la velocidad teórica a la que viaja el sonido en función de la temperatura, utilizando para ello un termómetro digital, realizamos una serie de medidas a 21°C (lo cual implicaría una velocidad de propagación de 345 m/s).

En la “Tabla 4: Distancias mediante US - GP-Bot” se muestra los resultados ofrecidos por el algoritmo implementado en la GP-Bot. La primera columna representa la distancia a la cual se encontraban el módulo emisor del receptor, mientras que la segunda muestra los pulsos capturados del ‘*timer*’ del microcontrolador entre el instante de emisión y recepción. Las sucesivas columnas muestran el error al pasar dichos pulsos a distancias utilizando la velocidad teórica y la velocidad calculada empíricamente mediante ajuste por mínimos cuadrados. Como se puede observar en dicha tabla, el error obtenido al utilizar la velocidad teórica aumenta a medida que lo hace la distancia, por lo que la velocidad real a la que viaja el sonido difiere con la velocidad teórica calculada inicialmente.

Teniendo en cuenta que la GP-Bot, muestrea la señal a 635 kHz, podemos calcular la velocidad empírica de la señal como:

$$v = \frac{\text{distancia (m)} \cdot \text{frecuencia}}{\text{pulsos (distancia)} - \text{pulsos (0 m)}}$$

Despejando de la ecuación anterior, obtenemos que la velocidad a la que se propaga la señal de ultrasonidos es 334,2 m/s, la cual es aproximadamente un 4% menor

que la velocidad teórica. Este error se debe a que el piezoeléctrico con el cual se implementó el receptor necesita de un tiempo de excitación para conseguir otorgar a su salida una señal lo suficientemente potente como para que el comparador la de por buena. Además, este tiempo será mayor cuanto menor sea la intensidad de la señal recibida, es decir, a mayor distancia, la intensidad de la señal disminuye por lo que aumenta el tiempo necesario por el piezoeléctrico en excitarse, lo cual repercute en un mayor tiempo entre que se detecta la señal de radiofrecuencia hasta que se detecta una señal de ultrasonidos válida, lo cual hace que la velocidad de propagación medida sea menor que la velocidad teórica.

Tabla 4: Distancias mediante US - GP-Bot

distancia (mm)	medida empírica (pulsos)	Error fórmula teórica (mm)	Error fórmula empírica (mm)
200	459	-20,24858398	0,26784805
190	441	-20,14116211	-0,566249109
180	423	-20,03374023	-1,400346267
170	405	-19,92631836	-2,234443426
160	374	-12,5190918	3,551278134
150	356	-12,41166992	2,717180976
140	339	-12,86577148	1,373866993
130	319	-11,63530273	1,558203483
120	302	-12,0894043	0,2148895
110	285	-12,54350586	-1,128424483
100	267	-12,43608398	-1,962521642
90	249	-12,32866211	-2,7966188
80	231	-12,22124023	-3,630715959
70	200	-4,814013672	2,155005601
60	182	-4,706591797	1,320908443
50	164	-4,599169922	0,486811284
40	147	-5,053271484	-0,856502699
30	129	-4,945849609	-1,690599857
20	111	-4,838427734	-2,524697016
10	79	3,130322266	3,770241369
0	64	1,553173828	1,408493737

Para resolver este problema, realizamos un ajuste por mínimos cuadrados de las medidas tomadas en función de la distancia obteniendo la siguiente curva:

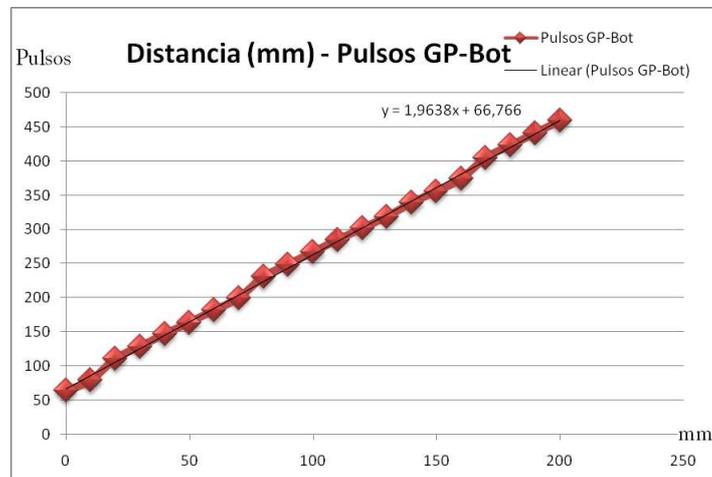


Ilustración 56: Distancia (mm) - Pulsos GP-Bot

En donde la recta ajustada por mínimos cuadrados corresponde a:
 $Pulsos = 1,9638 \cdot Distancia \text{ (mm)} + 66,766$

Por lo que calculando la función inversa nos queda:

$$Distancia = \frac{Pulsos - 66.766}{1.9638}$$

Esta última ecuación se implementó en la GP-Bot asignando constantes a variables de tipo entero. Esto origina que se produzca un error de precisión, que aunque no es muy crítico en el OFFSET (error menor que un milímetro), no es así en la pendiente (el error es 1,84 %). Esto origina que a medida que aumentemos la distancia a la que nos encontremos del emisor, el error en el valor de la pendiente incrementa el error en la distancia calculada. Por ejemplo, si el receptor estuviese a 5 metros del emisor, el contador mediría 1049 pulsos, sin embargo ese valor se asociaría a una distancia de 4,91 metros.

Este error puede reducirse si se reduce el ‘*pre-scaler*’ (factor de división que se aplica al reloj de la GP-Bot) ya que al aumentar el número de pulsos por milímetro, reducimos el error de redondeo. Sin embargo, el reducir el ‘*pre-scaler*’ conlleva aumentar el tamaño del tipo de variable sobre el que se almacena el valor de la distancia medida. Como los valores leídos deben elevarse al cuadrado para poder aplicar las fórmulas de triangulación, el alcance máximo viene delimitado por el máximo tamaño del tipo de variable el cual, en nuestro caso, es fijo (la GP-Bot puede trabajar como mucho con variables de 32 bits, lo cual implica que las medidas se deben almacenar en variables de 16 bits). De este modo, si se reduce el *pre-scaler* se reduce el alcance máximo de cada medida, el cual está fijado por los requisitos impuestos durante el diseño del sistema (el alcance máximo debe ser superior a 6 metros). Esta limitación fue uno de los motivos principales que impulsó a la utilización de arquitecturas basadas en FPGAs para el análisis de la máxima precisión del algoritmo de posicionamiento que estábamos implementando, ya que este tipo de arquitecturas permiten el uso de variables de mayores dimensiones y utilizan además tipos de datos de punto flotante.

Una vez analizada la forma en que se calcula las distancias a cada uno de los emisores, se procedió a implementar el algoritmo de localización dentro de la propia GP-Bot. Para simplificar su desarrollo, se implementó el algoritmo de localización en dos dimensiones con dos emisores, el cual se describe en el apartado “4.3.2.1 TOA 2 Dimensiones”, siguiendo el siguiente algoritmo:

- Inicialmente se configura el microcontrolador para que este pueda aceptar interrupciones para uno de los pines del timer. La interrupción salta cuando hay un flanco de subida o bajada en el pin, momento en que se captura el valor almacenado en el timer, al cual se conecta el módulo receptor de ultrasonidos.
- Cuando se desea localizar el nodo, este reinicia el timer y le indica que comience a contar.
- Posteriormente se crea el tren de pulsos de ultrasonidos a 40 kHz, el cual se envía a los emisores de ultrasonidos por los pines correspondientes.
- El módulo receptor al recibir una señal de ultrasonidos generará un cambio a la entrada del pin asociado al timer generando una interrupción. En dicha

interrupción se captura el valor del timer y se asocia al tiempo de vuelo de la señal.

- En la siguiente interrupción se mide si el ancho del primer pulso se corresponde con el de una señal a 40 kHz, dando la medida por buena, o no, consideramos que hemos detectado ruido, por lo que se sigue esperando la recepción de la señal.
- Cuando se da una medida por buena, se convierte dicha medida a milímetros y se asocia a una variable que la relaciona con el emisor que lanzó la señal.
- Cuando se reciben las señales validas de los dos emisores, se procede a aplicar el algoritmo de posicionamiento, localizando al nodo.

Como ya se ha indicado en el capítulo “2 Arquitecturas Utilizadas”, la GP-Bot se utiliza a la vez de emisor y receptor de ultrasonidos. Esto permite prescindir del sistema de radiofrecuencia para indicar el momento de inicio de emisión de la señal de ultrasonidos.

El microcontrolador no dispone de ningún método para el cálculo de las raíces cuadradas que requiere el algoritmo, lo cual nos obligó a aproximar la raíz cuadrada mediante una aproximación basada en la diferencia existente entre los cuadrados.

Todos los números al cuadrado guardan una relación entre ellos. Por ejemplo:

$$0^2 = 0$$

$$1^2 = 1$$

$$2^2 = 4$$

$$3^2 = 9$$

Con la diferencia entre un número y su anterior, la serie que nos queda es: 1, 3, 5, 7,... la cual se extiende hasta infinito. Si aplicamos dicha serie para el cálculo del siguiente número al cuadrado nos queda:

$$n_i = n_{i-1} + [n_{i-1} - n_{i-2} + 2] = 2 \cdot n_{i-1} - n_{i-2} + 2$$

Donde n_i se corresponde con el cuadrado del número ‘i’.

Esta relación entre los cuadrados de los números nos permitió calcular la raíz cuadrada de un número, implementando el siguiente algoritmo:

- Inicializamos una variable ‘cuadrado’ a 0 y otra ‘numero’ a 0.
- Vamos sumando a ‘cuadrado’ los números de la serie descrita anteriormente y al mismo tiempo incrementamos en 1 la variable ‘numero’ hasta superar al número del que queremos conocer su raíz cuadrada.
- La variable ‘numero’ contiene la raíz cuadrada del número inicial.

Esta aproximación reduce la precisión en el cálculo de la distancia hasta los emisores, lo cual repercute en un error en el cálculo de la posición en la que nos encontramos, ya que descarta todos los decimales que acompañan a la raíz cada vez que llamamos a la función.

Todo el algoritmo implementado se puede consultar en el proyecto “lateration” de la carpeta “Ficheros\Fase1\lateration” incluida en el CD anexo.

4.6.3.2. Fase de diseño 2: Algoritmo Localización

Durante esta fase del proyecto, nos centramos en realizar un análisis en profundidad de nuestro sistema de localización. Por ello, y debido a las limitaciones técnicas que nos imponía la GP-Bot, se optó por utilizar arquitecturas basadas en FPGA, las cuales permiten una potencia de cálculo mucho más que suficiente para nuestra aplicación.

Cabe resaltar que, con el fin de obtener una visión del conjunto lo más parecida a la versión final del sistema, se optó por separar el módulo emisor del receptor para la realización de dichas medidas, implementando por ello el sistema de radiofrecuencia en ambos módulos.

4.6.3.2.1. Algoritmo implementado en el emisor

El emisor se implementó en una arquitectura basada en FPGA, debido a la gran flexibilidad y potencia que esta permite. La implementación hardware de los diferentes módulos necesarios para implementar el sistema se puede encontrar en el apartado “4.6.2.1 Módulo Emisor de Localización”.

El algoritmo final implementado en dicho sistema basa su funcionamiento en la emisión simultánea de un tren de pulsos de ultrasonidos a través de una de las balizas y de una señal de radiofrecuencia, modulada en código Manchester, en donde se introduce información sobre qué baliza era la que había emitido la señal. La FPGA va alternando cada dos segundos la baliza emisora, enviando cada vez un tren de quince pulsos de ultrasonidos. El sistema de radiofrecuencia se comenta más detalladamente en el apartado “4.7 Sistema de Radiofrecuencia”.

Nota: Cabe resaltar que, aunque en este proyecto todas las balizas están conectadas a una misma FPGA, la cual se encarga de gestionar qué baliza es la encargada de emitir, se prevé que en versiones futuras del sistema, cada baliza se implemente en un módulo separado, lo cual simplificaría enormemente su despliegue, y que estas se comuniquen entre sí a través de un protocolo de transmisión secuencial.

4.6.3.2.2. Algoritmo implementado en el receptor

El receptor se implementó en otra FPGA, en la cual se cargó el procesador Microblaze [XILINX] junto con un módulo encargado de decodificar la señal de ultrasonidos y otro encargado de decodificar la señal de radiofrecuencia. El algoritmo basaba su funcionamiento en una máquina de estados como la que se muestra en la Ilustración 57:

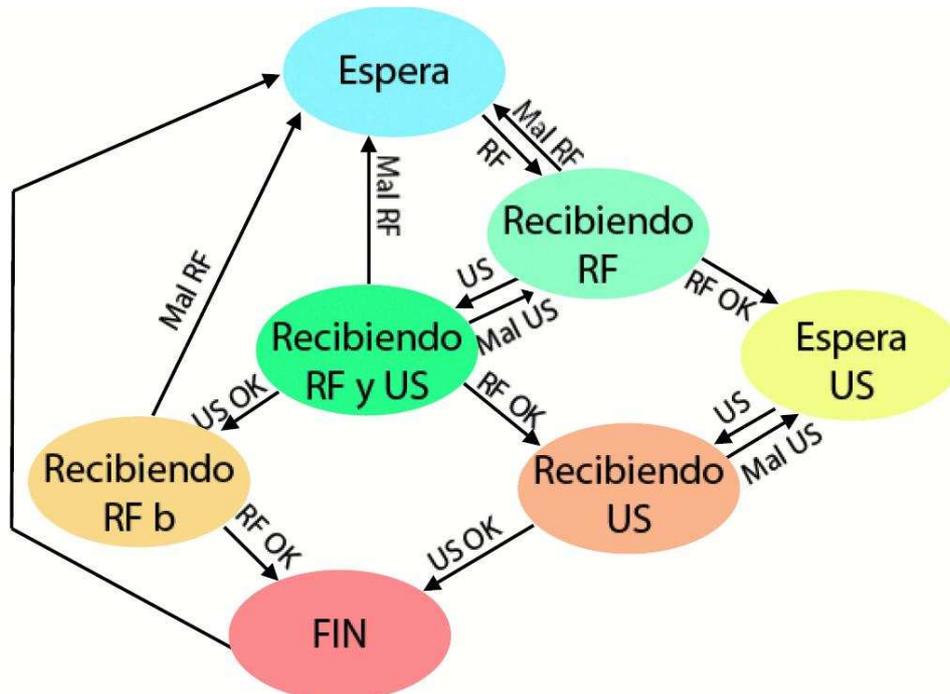


Ilustración 57: Maquina de estados FPGA

Como se puede observar en el esquema, el programa comienza su funcionamiento en un estado 'Espera'. En este estado se queda estático hasta el momento en que el módulo de radiofrecuencia detecta un cambio a su entrada, cambiando al estado 'Recibiendo RF' e inicializando un contador destinado a almacenar el tiempo de vuelo de la señal. El algoritmo se sale de este estado por tres motivos:

- Se termina de recibir correctamente la señal de radiofrecuencia, pasando al estado de 'Espera de US'.
- Se detecta un error en la señal de radiofrecuencia, parando y reiniciando el contador y volviendo al estado 'Espera'.
- Se comienza a detectar el inicio de la señal de ultrasonidos, pasando al estado 'Recibiendo RF y US'.

Si el programa se encuentra en el estado 'Espera de US', sólo puede salir de dicho estado si detecta que comienza a recibir una señal de ultrasonidos, pasando al estado 'Recibiendo US'.

Desde el estado 'Recibiendo RF y US' puede avanzar al estado:

- 'Espera': Si se detecta un error en la señal de radiofrecuencia.
- 'Recibiendo US': Si se recibe correctamente la señal de radiofrecuencia.
- 'Recibiendo RF': Si se detecta que la señal de ultrasonidos es errónea.
- 'Recibiendo RF b': Si se detecta que la señal de ultrasonidos es correcta. En este instante se detiene el contador, obteniendo de este modo el tiempo de vuelo de la señal.

Desde el estado ‘Recibiendo US’, se avanza o bien al estado ‘FIN’, si se detecta que la señal de ultrasonidos es correcta (momento en que se detiene el contador obteniendo así el tiempo de vuelo de la señal) o se vuelve al estado ‘Espera de US’, si se detecta algún error en el formato de la señal de ultrasonidos.

Del estado ‘Recibiendo RF b’ sólo se puede avanzar al estado de ‘Espera’, si se detecta que la señal de radiofrecuencia es incorrecta o al estado ‘FIN’ si se detecta que la señal de radiofrecuencia es correcta.

Por último, en el estado ‘FIN’, se guarda la medida capturada por el contador y la baliza origen de la señal y se vuelve al estado inicial ‘Espera’ con el fin de ser capaces de detectar nuevas señales. Ese valor guardado puede ser consultado por Microblaze a través un enlace PLB.

Cabe destacar que se ha implementado un ‘*timeout*’, tiempo tras el cual se vuelve a un estado inicial, en nuestro sistema el estado ‘Espera’. Dicho ‘*timeout*’ se activa cuando se abandona el estado ‘Espera’ y permite evitar que el sistema quede bloqueado en algún estado por motivos ajenos. Por ejemplo, si se desconectan el dispositivo de ultrasonido, el sistema podría quedarse bloqueado en el estado ‘Espera US’, aunque estuviese recibiendo diferentes señales de radio.

Toda la máquina de estados se implementa en el fichero “user_logic.vhd” de la carpeta “Ficheros\Fase2\Nodo\MicroBlaze52MHzv3\pcores\plb_fm_us_v1_00_a\hdl\vhd”, el cual puede consultarse en el CD anexo a esta memoria.

Nota: En el fichero “user_logic.vhd” se encuentra además la instanciación de los módulos receptores de radiofrecuencia y ultrasonidos, así como un proceso “proceso_registros” gracias al cual, los valores de las distancias calculadas se almacenan en un registro en función de la baliza que emitió la señal. Todo lo anteriormente citado es utilizado por el procesador Microblaze para aplicar las fórmulas de triangulación. Además, cabe resaltar que dispone de un conjunto de salidas utilizadas única y exclusivamente para la depuración del código.

Cada uno de los módulos utilizados por el Microblaze durante el proceso de triangulación son los siguientes:

Módulo receptor de radiofrecuencia

La implementación del módulo receptor de radiofrecuencia, así como el sistema de transmisión, se detallan en el apartado “4.7 Sistema de Radiofrecuencia”. Sólo indicar que dicho módulo tiene por entradas una señal de reloj, una de reset y una destinada a conectar la salida del chip de radio a la FPGA. Además, entrega a la salida un bit que indica que está recibiendo datos (si detecta cambios a su entrada), un bit que indica que los datos recibidos son válidos (los bits recibidos se ajustan con el protocolo definido en el emisor) y un conjunto de 3 bits que indican qué baliza es la que ha transmitido la señal (en caso de que dicha transmisión sea dada por buena).

El código implementado se puede encontrar en el fichero “control_fm.vhd” de la carpeta “Ficheros\Fase2\Nodo\MicroBlaze52MHzv3\pcores\plb_fm_us_v1_00_a\hdl\vhd”, el cual puede consultarse en el CD anexo.

Módulo receptor de ultrasonidos

El módulo receptor de ultrasonidos consta principalmente de un sistema que mide el ancho de un tren de pulsos de ultrasonidos detectado (en cada flanco de reloj se comprueba si el estado de la señal de entrada ha cambiado, y se observa si cada periodo de la señal se corresponde con un periodo de una señal entre 35 a 45 kHz). Tras comprobar que tres pulsos seguidos de ultrasonido cumplen con la condición antes citada, se considera que se ha recibido correctamente la señal de ultrasonidos, indicándolo a través de un bit al resto de módulos existentes.

Dicho código se puede encontrar en el fichero “control_us.vhd” de la carpeta “Ficheros\Fase2\Nodo\MicroBlaze52MHzv3\pcores\plb_fm_us_v1_00_a\hdl\vhdl” del CD anexo a esta memoria.

Programa cargado en el Microblaze

El programa cargado en el Microblaze es un programa en código C, que basa su funcionamiento en:

- En un comienzo, el programa inicializa un array de enteros a ‘-1’ (indicando que no se han capturado medidas válidas) en donde almacenar el valor de los registros relativos a las distancias hasta las balizas (en pulsos de reloj).
- Posteriormente, el algoritmo está constantemente comprobando si el valor almacenado en los registros se corresponde con el valor almacenado en el array. El valor almacenado en los registros sólo modifica su valor durante el estado ‘FIN’ de la máquina de estados, el cual indicaba que se había calculado correctamente una distancia a una determinada baliza, mientras que los valores almacenados en el array sólo son accesibles desde el código C implementado en el Microblaze. Cuando dicho valor es diferente, el programa deduce que se ha generado una nueva medida, enviándola por el puerto serie y actualizando el valor correspondiente del array.
- Cada vez que determina que tiene una nueva medida, se convierten todas las medidas implicadas a mm, tras lo cual se aplica el algoritmo de localización, enviando la posición por el puerto serie.

El código del programa se puede encontrar en el fichero “localizador.c” que se encuentra en la carpeta “Ficheros\Fase2\Nodo\MicroBlaze52MHzv3\pcores\plb_fm_us_v1_00_a\hdl\vhdl”, del CD anexo a esta memoria.

Calibración de los dispositivos de ultrasonidos

Tras la experiencia obtenida durante la fase de diseño 1, se procedió a medir el tiempo de vuelo de la señal a diferentes distancias con el fin de poder calcular la curva que relacionara distancia-tiempo (Ilustración 58). El emisor de ultrasonidos estaba

emitiendo una señal cuadrada de valor pico a pico de 20 V, en vez de los 5 V utilizados durante la fase previa. Las medidas obtenidas se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5: Medidas de US 1 dimensión

Distancia (mm)	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Media	DesvEst.
1000	154817	153704	154982	154885	154890	154655,6	535,2
900	139904	139945	139907	139908	139960	139924,8	25,9
800	124895	127561	124891	123779	123855	124996,2	1531,6
700	110038	108949	110079	110080	108904	109610	624,4
600	94081	95222	93876	93976	94022	94235,4	556,6
500	78978	80393	79067	79078	79048	79312,8	605,1
400	63952	63907	63926	63991	62861	63727,4	485,4
300	49263	50473	50545	50483	50513	50255,4	555,5
200	32946	32911	32977	32866	32945	32929	42,3
100	17944	18172	17916	17971	17947	17990	103,6

Las medidas representan los pulsos contados por la FPGA desde que recibe el inicio de la señal de radio hasta que recibe un tren de pulsos de ultrasonidos válidos. De este modo, obtuvimos la siguiente curva de calibración:

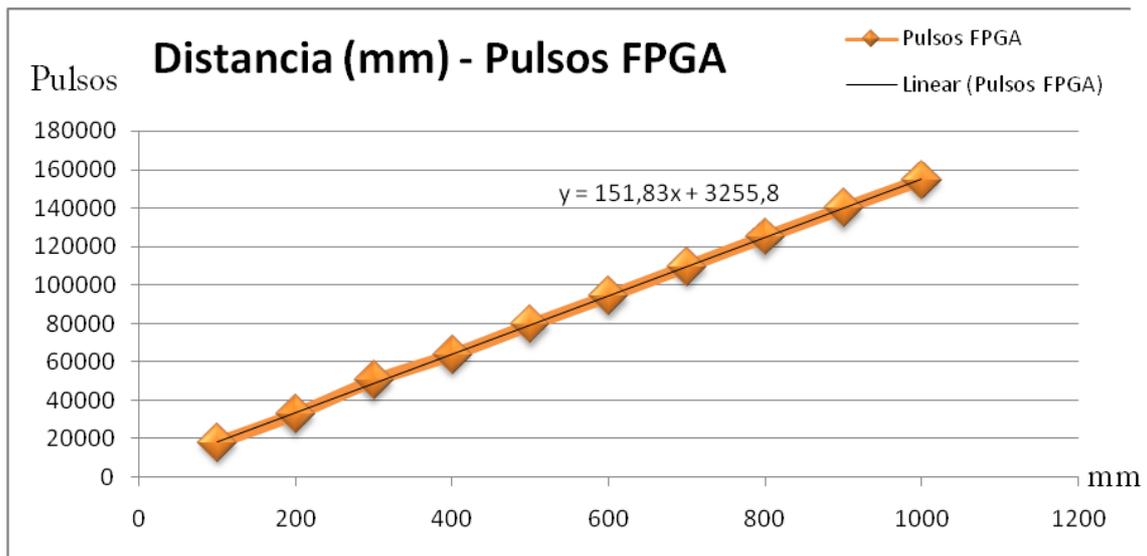


Ilustración 58: Curva de calibración distancia-pulsos

El ajuste por mínimos cuadrados nos da como resultado la recta:

$$\text{Pulsos} = 151,83 \cdot \text{distancia (mm)} + 3255,8$$

Tras el cálculo de la curva de calibración se procedió a implementar dicha curva en la propia FPGA, para que la FPGA pudiera implementar el correspondiente algoritmo de localización. Para ello, se invirtió la curva antes mostrada para poder conocer la distancia a partir de los pulsos contados, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\text{Distancia} = \frac{\text{Pulsos} - 3256}{152}$$

Para reducir el coste computacional de la operación, se asignaron las constantes de offset y pendiente a variables de tipo entero, lo cual obligó a redondear los números antes calculados. Esta aproximación introduce un error en la pendiente que implicará que a mayores distancias, la diferencia entre el valor calculado y el real será mayor, pero a diferencia que lo que nos sucedía durante la fase de diseño 1, los valores de las constantes son lo suficientemente elevados como para poder descartar sus decimales sin cometer un gran error. Por ejemplo:

Si la distancia entre emisor y receptor es de 5 metros (al igual que en el ejemplo implementado en el apartado “4.6.3.1 Fase de diseño 1: Algoritmo Localización”), los pulsos contados por la FPGA receptora, desde que recibe la señal de radiofrecuencia hasta que detecta la señal de ultrasonidos, serán 762406 pulsos. Sin embargo, cuando convierta esos pulsos a distancia, obtendrá que la distancia a la que se encuentra es 4,994 metros, cometiendo un error del 0.11 %. Este error se suma al error generado al calcular la propia curva de calibración, pero, como se puede observar en la tabla, como la desviación estándar de las medidas es pequeña, podemos asumir que las medidas tomadas son fiables.

Si calculamos la velocidad a la que viaja la señal de ultrasonidos en nuestro sistema basado en FPGA, aplicando la ecuación que se muestra a continuación y considerando que la frecuencia de funcionamiento de la FPGA es de 52 MHz, obtenemos que la velocidad de propagación es 349,99 m/s.

$$v = \frac{\text{distancia (m)} \cdot \text{frecuencia}}{\text{pulsos (distancia)} - \text{pulsos (0m)}}$$

Como se puede observar, la diferencia entre la velocidad obtenida y la velocidad teórica (345 m/s) es menor del 2%. El hecho en que la velocidad calculada sea mayor que la teórica puede deberse a que la temperatura con la cual se realizaron las medidas no fuese exactamente 21°C (la temperatura se tomó con un termómetro digital) o que al estar apoyados tanto emisor como receptor sobre una superficie, la onda de ultrasonidos viajase más rápidamente por dicha superficie que por el aire. Al igual que en el caso anterior, existe un error debido al tiempo que necesita el piezoeléctrico para otorgar a su salida una tensión lo suficientemente elevada para que el comparador la de por buena, pero en este caso, al haber alimentado al emisor con 20V, en vez de los 5V del caso anterior, la intensidad de la señal emitida es mayor, por lo que el piezoeléctrico requiere de menos tiempo para entregar a su salida una señal válida, lo cual repercute en que el error debido a este efecto sea mucho menor que en el caso anterior.

4.6.3.3. Fase de diseño 3: Algoritmo Localización Final

Tras el análisis del sistema mediante la FPGA, se retornó a nuestros objetivos iniciales, la implementación del módulo receptor en un microcontrolador de bajo coste (en nuestro caso la GP-Bot). Como ya se ha indicado anteriormente, se prevé implementar las balizas en microcontroladores de bajo coste. Por tanto, el sistema de emisión sigue siendo el desarrollado durante la fase 2 del proyecto, es decir, existe una arquitectura basada en FPGA que lleva la gestión de la emisión de las diferentes balizas del sistema, donde la única diferencia respecto al caso anterior es que el tiempo entre emisión de las balizas se redujo a medio segundo.

Utilizando como base el código desarrollado durante la fase 1, se modificó dicha implementación para la inclusión del sistema de radiofrecuencia. El código que permite la captura de las medidas de las diferentes balizas, se implementa mediante interrupciones asociadas a los timers de la GP-Bot, las cuales se detallan a continuación:

- Inicialmente, sólo está activado el timer asociado al módulo de radiofrecuencia. Cuando se genera la primera interrupción, se activa el timer asociado al dispositivo de ultrasonidos comenzando a medir el tiempo de vuelo de la señal.
- Tras la primera interrupción de radiofrecuencia, el programa sigue capturando el tiempo que transcurre entre las interrupciones de radiofrecuencia, almacenando dichos valores en un array si dichos valores se encuentran entre unos márgenes predefinidos. En caso de no ser válidos, se detiene el timer de ultrasonidos y se vuelve al estado anterior.
- Cuando el tiempo de recepción total de la señal supera un tiempo estimado, calculado en base al periodo y el número de bits de la misma, el programa detiene brevemente la captura de interrupciones y comienza a decodificar la señal de radiofrecuencia.
- Tras capturar la señal de radiofrecuencia, el programa comienza a intentar decodificar el código Manchester, lo cual se detalla en el apartado “4.7 Sistema de Radiofrecuencia”, lo cual da como resultado o bien que se considere por buena la señal, almacenando en una variable el valor de la baliza y esperando a que se detecte una señal correcta de ultrasonidos, o, por el contrario, descartando la señal, deteniendo el timer de ultrasonidos y reiniciando el proceso.
- Mientras tanto, al estar activo el timer de ultrasonidos, este permite que se generen sus correspondientes interrupciones. Al generarse la primera interrupción, se actualiza la variable asociada al tiempo de vuelo de la señal, mientras que en las sucesivas interrupciones, se comprueba que el ancho de los pulsos de la señal de ultrasonidos son válidos (se corresponde con el de una señal de 40 kHz), siendo necesario detectar al menos 3 pulsos de ultrasonidos válidos para dar por válida la medida.

Nota: Debido a problemas originados por la capacidad limitada de la GP-Bot a la hora de atender interrupciones, se detectó que existía un problema si la señal de ultrasonidos llegaba en el mismo instante que la señal de radiofrecuencia. Esto originaba que el programa no pudiese atender ambas interrupciones a la vez y terminara por quedarse bloqueado, siendo necesario reiniciarlo. Por este motivo, se

decidió retrasar la emisión de la señal de ultrasonidos, lo cual permitió recibir la señal de radiofrecuencia antes de la señal de ultrasonidos, siempre y cuando no nos encontráramos muy cerca de la baliza (a menos de 20 cm.), a costa de incrementar el tiempo necesario entre las emisiones de las balizas.

Al igual que lo sucedido durante las fases de diseño previas, fue necesario generar una curva de calibración para asociar las distancias al número de pulsos contados por los timers. Los resultados del proceso de calibración se recogen en la Tabla 6 e Ilustración 58:

Tabla 6: Calibración US GP-Bot Fase 3

Distancia (cm)	Medidas (Pulsos)			Media
5	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
10	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
15	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
20	1084	1084	1084	1084,00
25	1172	1172	1172	1172,00
30	1260	1260	1261	1260,33
35	1347	1347	1346	1346,67
40	1436	1436	1435	1435,67
45	1524	1525	1525	1524,67
50	1611	1611	1612	1611,33
55	1700	1699	1700	1699,67
60	1783	1783	1783	1783,00
65	1878	1878	1877	1877,67
70	1966	1967	1966	1966,33
75	2056	2056	2056	2056,00
80	2156	2156	2144	2152,00
85	2242	2232	2243	2239,00
90	2331	2332	2332	2331,67
95	2409	2409	2410	2409,33
100	2510	2509	2510	2509,67
105	2597	2597	2598	2597,33
110	2685	2686	2687	2686,00
115	2774	2774	2775	2774,33
120	2862	2862	2863	2862,33
125	2950	2951	2950	2950,33
130	3040	3040	3040	3040,00

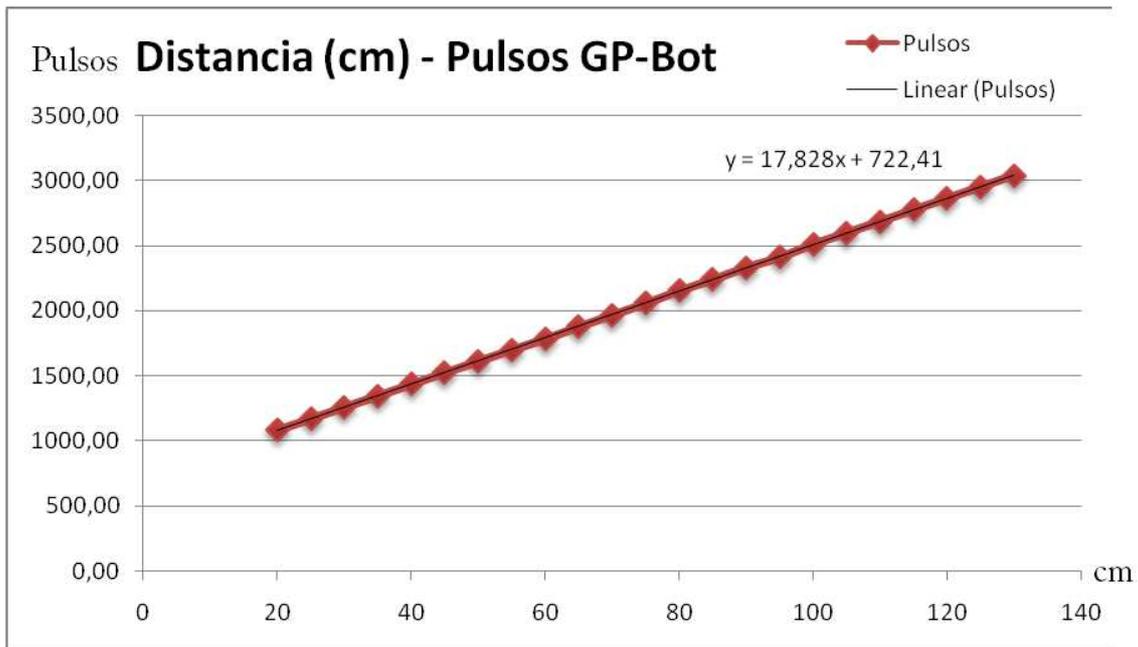


Ilustración 59: Calibración US GP-Bot Fase 3

El ajuste por mínimos cuadrados es:

$$\text{Pulsos} = 1,7828 \cdot \text{distancia (mm)} + 722,41$$

Calculando la función inversa nos queda que:

$$\text{Distancia (mm)} = \frac{\text{Pulsos} - 722,41}{1,7828}$$

Con el fin de no obtener los mismos problemas que se detectaron durante la fase 1 al redondear las constantes por su parte entera, se optó por modificar la ecuación de arriba por esta otra:

$$\text{Distancia (mm)} = \frac{(\text{Pulsos} - 722,41) \cdot 1000}{1,7828 \cdot 1000} = \frac{(\text{Pulsos} - 722,41) \cdot 1000}{1782,8}$$

Esto permitió reducir considerablemente el error en la pendiente de la curva al aproximar las constantes por números enteros.

Uniendo todo lo anteriormente descrito, el algoritmo de localización consta básicamente de:

- Inicialmente se habilita el timer de radiofrecuencia, posibilitando capturar las interrupciones e iniciar el proceso de captura de distancia hasta las balizas.
- Seguidamente, el programa se detiene a la espera de capturar todas las distancias a las diferentes balizas del sistema.
- Una vez captura todas las señales, vuelve a detener todos los timers (impidiendo de este modo capturar nuevas interrupciones) y convierte las medidas capturadas a las diferentes balizas a mm utilizando la fórmula antes expuesta.

- Por último se aplica el algoritmo de posicionamiento implementado durante la fase 1.

Todo el código que se describe arriba puede consultarse en el fichero “lateration2D.c” de la carpeta “\Ficheros\Fase3\Nodo\Librerias 2” del CD anexo.

Nota: Durante la implementación de este algoritmo en el programa Freescale Codewarrior se detectaron problemas debidos a que la pila se situaba demasiado cerca del código fuente, por lo que al realizar invocaciones a diversas funciones en el código, la pila terminaba por sobrescribir el código fuente, impidiendo su correcta ejecución. Este problema se solvento editando el fichero “Proyect.prm” que se puede encontrar en la carpeta ‘prm’ del proyecto. Fue necesario modificar la penúltima línea, sustituyendo al valor que acompañaba a ‘STACKSIZE’ por el valor ‘0xA0’.

4.7. Sistema de Radiofrecuencia

4.7.1. Introducción

Los sistemas de radiofrecuencia se han convertido con el paso de los años en elementos imprescindibles en cualquier tipo de aplicación relacionada con robótica, ya que gracias a ellos se otorga una mayor flexibilidad y robustez al conjunto, posibilitando eliminar la necesidad de trasladar el nodo a un punto fijo para capturar los datos de sus sensores, modificar el comportamiento del robot mediante aplicaciones telemáticas o detectar errores en el sistema, entre otras muchas aplicaciones.

En nuestro sistema, la comunicación entre el nodo y el sistema central, se realiza a través de la tecnología ZigBee, mientras que el sistema de radiofrecuencia en FM se utiliza únicamente para indicar el instante preciso en que se comienza a emitir la señal de ultrasonidos. Esta división se prevé eliminar en versiones futuras del proyecto, eliminando la tecnología ZigBee para la comunicación entre los diferentes nodos-balizas del sistema y sustituyéndola por el sistema de radiofrecuencia en FM.

El motivo por el cual se utiliza la tecnología ZigBee para establecer la comunicación es que, inicialmente, se pensó en esta tecnología para implementar todo el sistema de radiofrecuencia. Sin embargo, cuando ya disponíamos del sistema funcionando nos percatamos que dicha tecnología no era válida como sistema de señalización del instante preciso de las señales de ultrasonidos, ya que el propio módulo de ZigBee introduce un gran ‘jitter’ (tiempo que se tarda en emitir una determinada señal, desde que se le indica al módulo de emisión, varía de manera impredecible), restando precisión a las medidas del tiempo de vuelo de la señal. Este ‘jitter’ es debido a que el módulo realiza una gestión de acceso al medio de manera ajena al propio programador del sistema, lo cual repercute en el tiempo necesario para emitir cada señal en función del estado del medio en el instante de transmisión. Por este motivo, tuvimos que descartar esta tecnología para implementar el sistema de señalización. Sin embargo, la ventaja de esta tecnología era que permitía establecer una comunicación inalámbrica a través del puerto serie de manera transparente al sistema, lo cual nos facilitó la realización de las pruebas de precisión del sistema sin necesidad de implementar ningún sistema de modulación de señal.

Nota: a partir de este momento, siempre que nos refiramos a módulos de radiofrecuencia nos estamos refiriendo a los módulos de radiofrecuencia en FM utilizados como sistema de señalización de inicio de la señal de ultrasonidos.

Para la elección de los chips de radiofrecuencia, se buscó en los diferentes distribuidores una pareja de emisor-receptor que trabajaran en una banda de trabajo lo más baja posible. Esta decisión fue tomada debido principalmente a que cuanto menor sea la frecuencia de trabajo, la atenuación que sufren las señales de radio es menor que en las bandas más elevadas (Ilustración 60), lo cual tiene como resultado posibilitar un mayor alcance del sistema y un menor consumo de este.

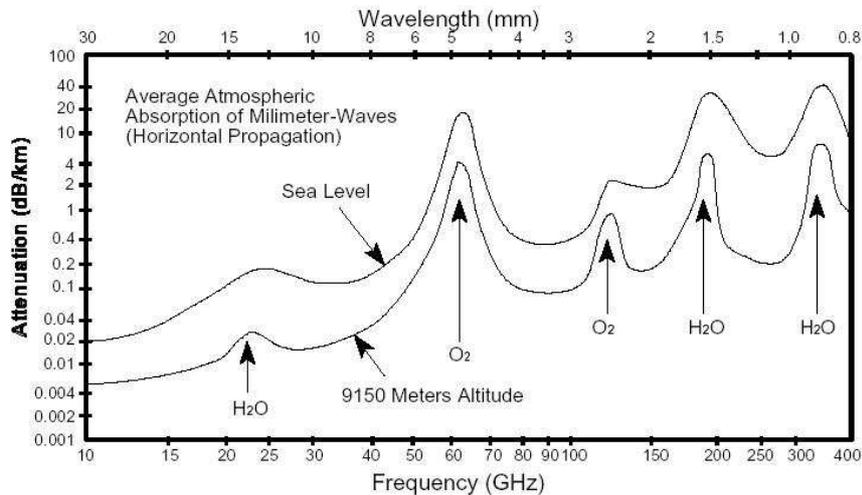


Ilustración 60: Atenuación Radiofrecuencia (www.ogtm.org.mx/~microon/inicio.html)

Por otro lado, se escogió la modulación FM en vez de AM ya que la primera dispone de una mejor relación SNR (señal frente al ruido).

Tras realizar una búsqueda en varios proveedores se decidió decantarse por los modelos:

- FM-RRFQ2-433: chip receptor de radiofrecuencia. De entre sus características cabe destacar que permite trabajar con señales de hasta 9,6 kb/s y que su banda de trabajo está centrada entorno a los 433 MHz.
- FM-RTFQ2-433: chip emisor de radiofrecuencia. El chip es el sistema parejo al receptor antes citado, por lo que sus características eléctricas son semejantes.

El datasheet de ambos chips puede consultarse en el siguiente enlace:
<http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-27/DSA-520843.pdf>

Para el protocolo de comunicación se utiliza el código Manchester. Con la codificación Manchester se consigue que en cada tiempo de bit haya una transición entre dos niveles de señal, lo cual permite que con cada bit se pueda obtener la señal de reloj, lo que hace posible una sincronización precisa del flujo de datos, a pesar de que consume el doble de ancho de banda que una transmisión asíncrona. Los motivos que nos llevaron a utilizar esta codificación fueron su relativa sencillez de implementación, en comparación con otras codificaciones bifase y su facilidad para distinguir entre secuencias consecutivas de unos o ceros.

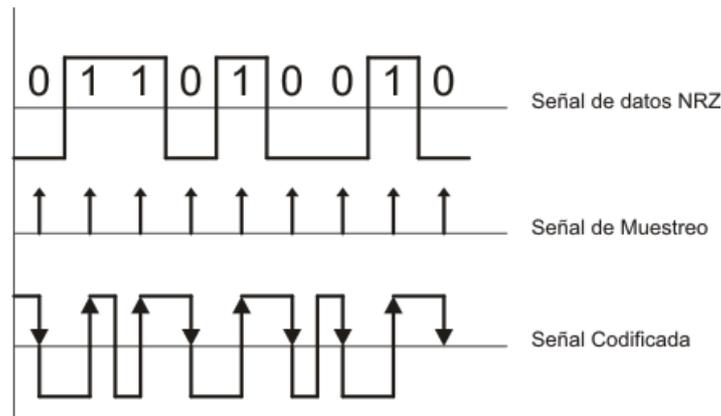


Ilustración 61: Codificación Manchester (Imagen de TextosCientíficos.com)

Como ya se ha indicado en apartados anteriores, el receptor de radiofrecuencia se implementó tanto en arquitecturas basadas en FPGA como en un microcontrolador. Sin embargo, el sistema de emisión sólo se ha implementado en arquitecturas basadas en FPGA.

En ambos casos se ha implementado el mismo protocolo para transmitir la información, el cual consta de:

- Inicialmente se envían dos '1' para indicar el inicio de la señal y facilitar la sincronización del receptor.
- Seguidamente se envían los 3 bits asociados a la baliza que estaba emitiendo la señal de ultrasonidos.
- Por último se enviaba un '1' para indicar el fin de la transmisión.

Cabe destacar que, como el sistema sólo se utiliza para señalización del inicio de emisión de la señal de ultrasonidos, no se contempla que haya transmisiones más largas que las antes citadas, por lo que si el receptor recibe una transmisión que supere el número de bits antes transmitidos, este la descarta al considerarla que no se ajusta al protocolo.

4.7.2. Módulo Emisor

Para la codificación del algoritmo de emisión, tuvimos en cuenta el chip encargado de transmitir la señal FM (FM-RTFQ2-433), el cual tiene como máxima tasa binaria de transmisión 9,6 kb/s.

Lo primero que se hizo fue escoger la tasa de transmisión. Dejando un margen de seguridad, y como nuestro sistema no requiere de un gran flujo de datos, se escogió que la tasa de transmisión fuese de 8 kb/s. Considerando que en la codificación Manchester se requiere el doble ancho de banda que en una codificación tradicional, nuestra señal de información debía tener una frecuencia de 4 kb/s. Para implementar dicha señal, se utilizó un contador y una variable que contenía el número de pulsos correspondiente al periodo de una señal a 8 kHz, posibilitando así generar las transiciones en "mitad" del bit mediante la máquina de estados que se muestra a continuación (Ilustración 62).

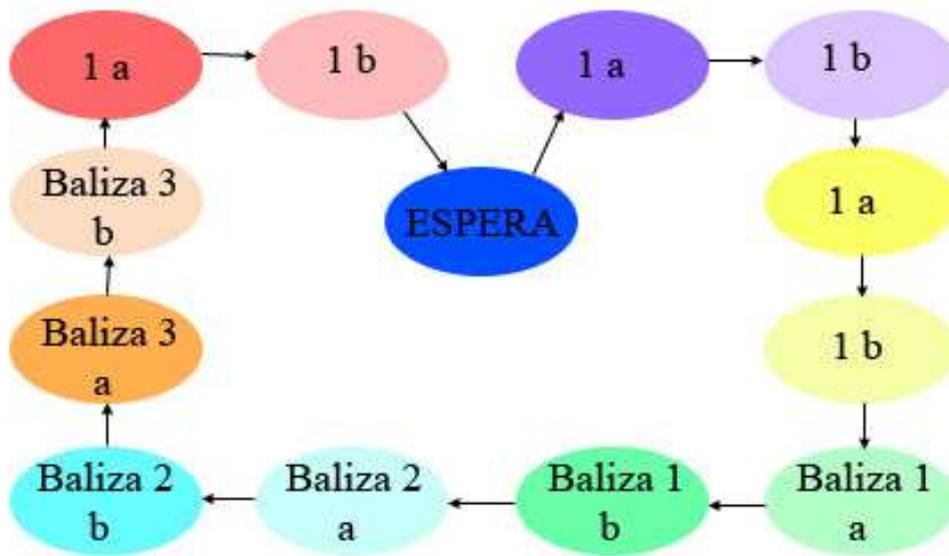


Ilustración 62: Máquina estados emisor RF

Como se puede apreciar en la imagen, desde el estado de espera se pasa a transmitir el primer '1' de nuestra señal. Desde ese momento hasta que se vuelve al estado de espera, se salta de un estado a otro cuando el contador alcance el valor de comparación antes calculado. Los estados con la letra 'a' hacen referencia a la parte inicial de la codificación del bit, mientras que los que tienen la letra 'b' hacen referencia a la parte final de la codificación. Por otro lado, los estados "1 x" (siendo x 'a' ó 'b') hacen referencia al envío de los '1' de nuestra señal de información, los cuales nos sirven para indicar el inicio y fin de la comunicación, mientras que los estados "Baliza y" (siendo y 1, 2 ó 3) hacen referencia a los bits en los que se transmite la información sobre qué baliza está emitiendo en ese instante.

- Las flechas rojas indican que si en cualquier estado, la señal recibida no cumple con las restricciones temporales, su duración es demasiado corta o larga, el sistema decide que la señal no se ajusta al protocolo empleado en nuestro sistema de transmisión, dando la señal por incorrecta y volviendo al estado inicial.

Por último, cabe señalar que excepto en el estado de espera, siempre que el sistema se encuentre en alguno de los otros estados, el módulo muestra a su salida la señal “recibiendo_fm” a ‘1’, indicando que se está recibiendo una señal de radiofrecuencia. Durante la última transición, el programa activa además las señales “valido_fm”, indicando que la señal recibida cumple con todos los requisitos impuestos (frecuencia y protocolo), y se ofrece al exterior la baliza capturada a través de la señal “baliza”.

4.7.3.2. Implementación en la GP-Bot

El sistema implementado en la GP-Bot difiere en el planteamiento respecto al esquema de recepción propuesto para el sistema basado en FPGA. Debido a limitaciones computacionales de la GP-Bot para atender interrupciones simultáneas, al intentar implementar el esquema basado en máquinas de estado, el sistema requería de mucho tiempo de computación para atender cada una de las interrupciones, lo cual hacía que fuera incapaz de atender correctamente las interrupciones por ultrasonidos. Por este motivo se implementó el siguiente algoritmo:

- Con cada interrupción de radiofrecuencia, el sistema captura el tiempo transcurrido desde la interrupción anterior. Si dicho tiempo está dentro de unos márgenes calculados en función del periodo de la señal, el sistema considera que la señal es válida, almacenando dicho valor en un array e incrementando en esa medida una variable que almacena el tiempo total de transmisión de la señal. En caso contrario, el programa interpreta que la señal recibida es incorrecta y descarta dicha señal, reiniciando el array y la variable con el tiempo de transmisión total de la señal.
- Cuando el tiempo de transmisión total de la señal alcanza un determinado valor, calculado en base a la frecuencia de muestreo y del número de bits que se esperan recibir, el programa comienza a decodificar la señal capturada. Para ello, convierte las medidas de tiempo capturadas a una señal normalizada de ‘1’ y ‘0’, representando de este modo nuestra señal en código Manchester.
- Con la señal en código Manchester, comprobamos que dicha señal se ajusta al protocolo implementado en el emisor, decodificando la información de la baliza y almacenándola en su correspondiente variable.

Nota: Cabe recordar que es el sistema de radiofrecuencia el que activa el timer asociado a la señal de ultrasonidos cuando detecta un primer pulso válido de la señal de radiofrecuencia y que este se desactiva cuando la señal de ultrasonidos es válida o cuando la señal de radiofrecuencia es errónea.

4.8. Resultados Posicionamiento

En esta sección se recogen los resultados obtenidos con el sistema de localización. Con el fin de mostrar sólo las máximas prestaciones del sistema, en esta sección sólo se recogen las medidas tomadas utilizando la tecnología de las FPGAs, es decir, los realizados durante la fase de diseño 2 del proyecto. Durante la realización de las medidas se ha puesto especial cuidado en eliminar cualquier tipo de restricción o efecto que pudiese reducir las prestaciones de nuestro sistema, tanto debido a limitaciones hardware-software (insuficiente capacidad de cómputo, aproximaciones de funciones,...) como a efectos adversos realizados durante los procesos de las medidas (obstáculos intermedios, mala orientación de los emisores-receptores, cálculo incorrecto de la velocidad de propagación del sonido,...).

Para comprobar cuán fiable era nuestro sistema se procedió, inicialmente, a realizar una serie de medidas experimentales de la distancia calculada entre el nodo emisor de ultrasonidos y el nodo receptor. Para ello se enfrentaron ambos transductores de ultrasonidos y se fueron tomando medidas desde los 40 cm hasta los 300 cm con intervalos de 20 cm, tomando en cada punto 10 muestras. En la Ilustración 64 se muestra el histograma donde se recoge la frecuencia de los errores relativos detectados (error en la distancia respecto a la distancia real). Como se puede observar en dicha ilustración, para más de un 70 % de las medidas el error no supera el 1,00 %, siendo el error medio del conjunto de 0,78 % y presentando las medidas una desviación estándar del 0,60 %.

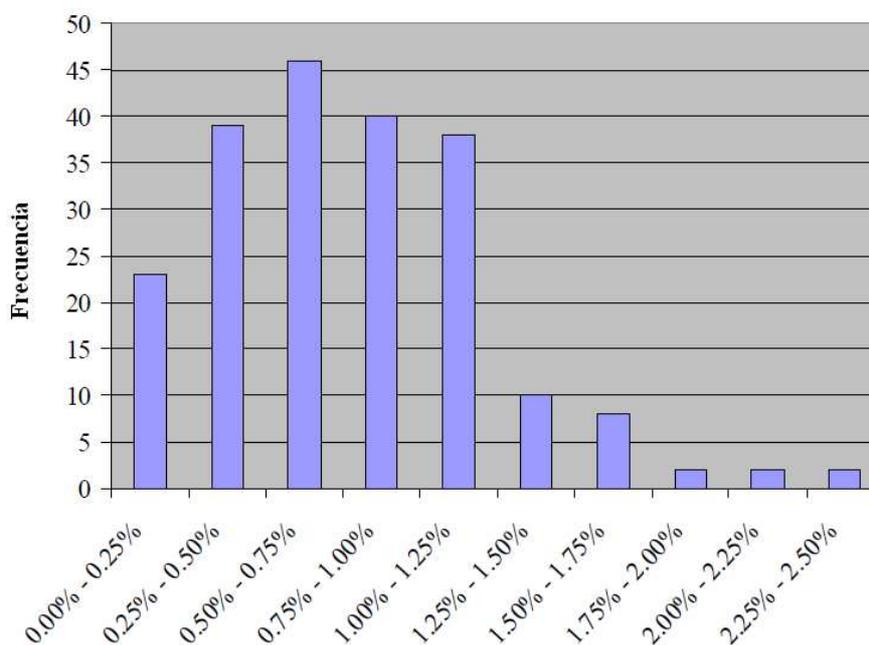


Ilustración 64: Errores relativos cálculo de distancias

Tras realizar estas medidas, se procedió a comprobar el comportamiento de nuestro sistema durante el proceso de triangulación. Para ello se implementó el sistema de localización en dos dimensiones con sólo dos emisores, cuyo funcionamiento se ha detallado en el apartado “4.3.2.1 TOA 2 Dimensiones”. El entorno de localización era el propio suelo y entre los emisores de ultrasonidos y el propio receptor no existía ningún tipo de obstáculo. Además, en todo momento el sistema se encontraba detenido para la

realización de las medidas. Uno de los emisores se encontraba en la posición (0, 0), mientras que el segundo se encontraba en la posición (1500, 0). El campo de medidas constaba en una maya de 1500 mm por 3000 mm con saltos de 500 mm, realizando las medidas en $(a \cdot 500 \text{ mm}, b \cdot 500 \text{ mm})$ con $a \in [1,2]$ y $b \in [1,6]$. En cada uno de estos puntos se realizaron 10 medidas. La Ilustración 65 muestra las posiciones estimada por el receptor para cada una de las 10 medidas tomadas en cada uno de los puntos antes indicado.

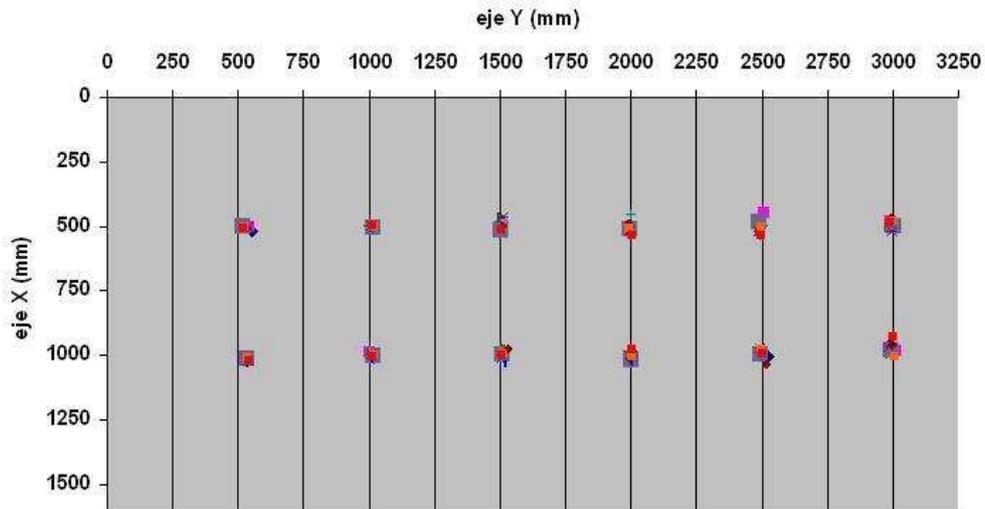


Ilustración 65: Resultados posicionamiento 2D

Las 120 muestras tomadas dan como resultado los errores que se recogen en el histograma de la Ilustración 66. La máxima distancia existente entre la posición calculada y la posición indicada por la maya es de 72,46 mm, en la posición (1000, 3000). El error medio detectado es de 20,08 mm, existiendo una desviación estándar en las medidas de 13,44 mm. Cabe destacar, que a diferencia del caso anterior, la precisión con la que se realizó la maya es muy limitada debido a la gran extensión de la misma, por lo que parte del error detectado anteriormente es debido a las imprecisiones en la propia maya.

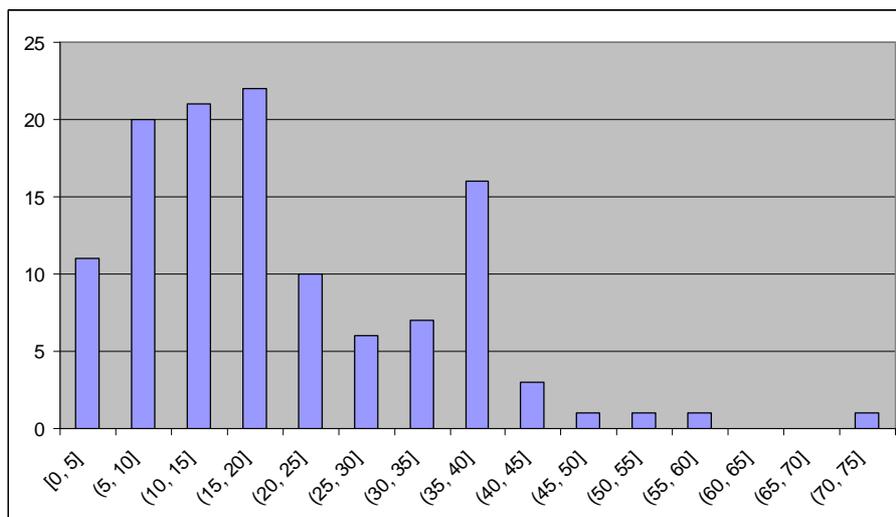


Ilustración 66: Histograma de errores absolutos de localización

Una de las conclusiones que se desprenden del análisis del caso anterior es que debido a la geometría del propio sistema de localización, los errores recogidos en ambos ejes dependen de la posición en la que se encuentre el nodo. Así, aunque los errores generados en el cálculo de las distancias son independientes de la baliza emisora, el efecto de estos errores en el cálculo de la posición sí que depende con la posición de localización. Esto es debido a que la posición se calcula mediante intersección de circunferencias. Así, si la distancia a la posición que se desea calcular es menor que la distancia entre los emisores (Ilustración 67), los errores introducidos en el cálculo de las distancias implicarán un mayor error en el cálculo en el eje Y que en el eje X, siendo este error aproximadamente igual al error con el que se tomó la medida. En cambio si el nodo se encuentra en una posición alejada (Ilustración 68), el error en el cálculo de la posición será mayor en el eje X. Además, el error será mayor cuanto más alejado se encuentre el nodo, ya que a mayor distancias, las circunferencias generadas tenderán a ser concéntricas, por lo que el punto de corte entre ambas tenderá a separarse más del inicial.

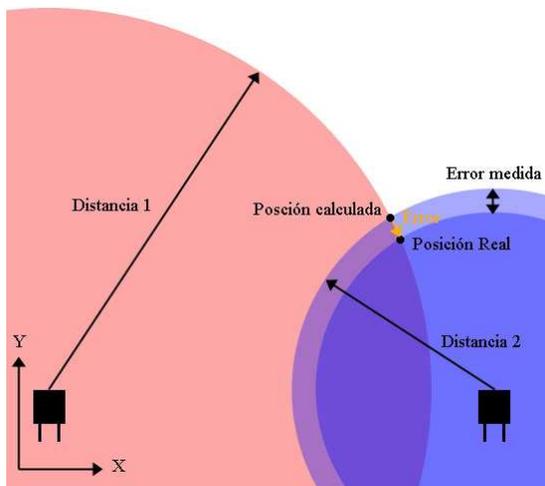


Ilustración 67: Efecto errores distancias

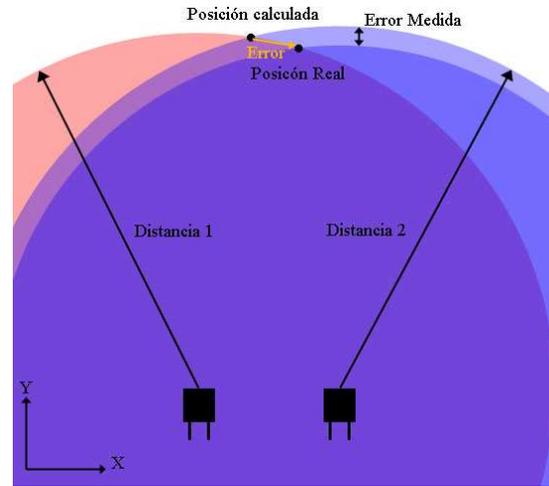


Ilustración 68: Efecto errores distancias

5. SISTEMA DE ORIENTACIÓN

5.1. *Introducción*

Para poder garantizar la correcta navegación del sistema, este debe disponer, además de un sistema de localización para conocer su posición de un sistema de orientación. Para cumplir con los requisitos impuestos al inicio del proyecto, el sistema de orientación debe ser de bajo coste, no debe limitar la autonomía del robot y debe estar adaptado a un entorno '*indoor*'. Esto nos llevó a pensar en un sistema de brújula electrónica.

Estos sistemas cumplen los requisitos iniciales, ya que son módulos de bajo coste, porque apenas requieren componentes para acondicionar la señal entregada por el sensor (costando cada módulo unos 8 €), lo cual permite añadir uno en cada nodo receptor, otorgándoles la autonomía deseada. Al detectar el campo magnético terrestre, este también es detectable dentro de edificios, lo cual hace al módulo válido para sistemas '*indoor*', aunque en dicho entorno existen generadores de campo magnético que pueden distorsionar nuestras medidas (ordenadores, cables,...) los cuales habrá que tener en cuenta a la hora de calcular la orientación del robot.

Este capítulo se divide en los siguientes apartados:

- Una pequeña visión global de los sistemas más importantes de orientación.
- Una introducción a la orientación mediante el uso de brújulas.
- Un análisis de los diferentes sensores magnéticos.
- Una pequeña descripción del funcionamiento del sensor KMZ52, con el cual se ha implementado la orientación en función del campo magnético terrestre.
- Un análisis de la implementación hardware realizada para acondicionar la señal entregada por el sensor.
- Un análisis software del algoritmo implementado para la lectura del sensor.
- Una exposición y análisis de los resultados obtenidos tras la implementación del sistema.

Nota: El sistema de orientación sólo se implementó en la GP-Bot, aunque durante el diseño del mismo se tuvo en cuenta su posterior uso en las arquitecturas basadas en FPGA.

5.2. *Sistemas de Orientación*

La orientación es una parte fundamental en un sistema de navegación. Sin esta, el dispositivo sería incapaz de conocer la dirección en la cual se debe trasladar, por lo que, aunque conociera su posición y dispusiese de los mapas de la zona, no podría realizar una navegación correcta.

Actualmente, existen varios mecanismos para conocer la orientación de un elemento a través de sistemas electrónicos:

- Orientación basada en medidas de posiciones relativas. Esta orientación se basa en que, cuando el robot se mueve, este modifica su posición. De este modo el programa es capaz de generar el vector de movimiento entre su posición inicial y su posición final (Ilustración 69). Gracias a esto, el programa puede corregir la orientación del robot, intentándolo orientarlo en la dirección correcta. Por ejemplo, el sistema GPS funciona de este modo.
- Orientación gracias a referencias visuales. Este mecanismo se basa en que el sistema dispone de una cámara con la cual captura imágenes de una determinada zona (techo, paredes,...) gracias a las cuales es capaz de orientarse. Un ejemplo de este tipo de sistemas de orientación es el que se utiliza para orientarse en función de flechas existentes en el techo que indican el norte del conjunto (Ilustración 70).
- Orientación por sistemas de radiofrecuencia. Gracias a la utilización de antenas direccionales, el receptor puede girar su antena hasta que la potencia recibida de la señal sea máxima (Ilustración 71), sabiendo de este modo la dirección en la que se encuentra la antena emisora, lo cual, junto con el conocimiento de su posición y de la posición de la antena, permite al nodo conocer su orientación actual. Las bases de este mecanismo fueron utilizadas por barcos en alta mar para conocer su posición (apartado "4.2 Algoritmos de posicionamiento") y orientación.
- Por último, se puede realizar la orientación en base a una dirección de referencia, por ejemplo, el campo magnético terrestre (Ilustración 72). Este principio es el que se utiliza en la orientación mediante brújulas.

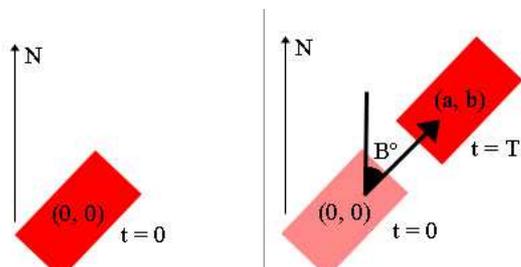


Ilustración 69: Orientación por posiciones relativas

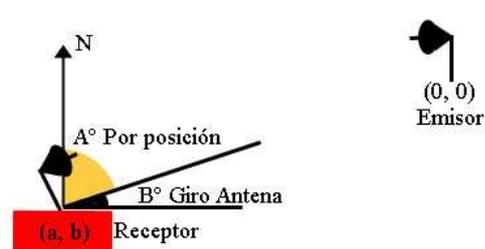


Ilustración 71: Orientación por radiofrecuencia

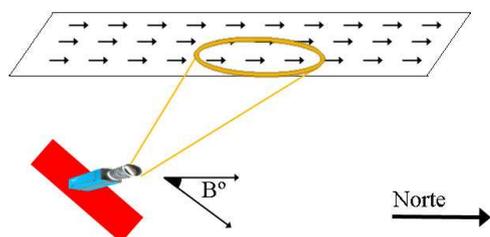


Ilustración 70: Orientación por referencias visuales

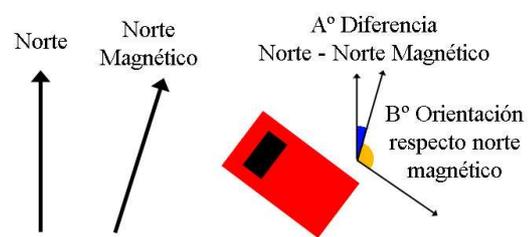


Ilustración 72: Orientación mediante brújula electrónica

De entre los métodos descritos anteriormente, se implementó el que basa el cálculo de la orientación respecto a un campo de referencia, en nuestro caso, el campo magnético terrestre. Los motivos que llevaron a tomar esta decisión fueron que la orientación por posiciones relativas requiere de un tiempo extra para conocer la orientación del nodo, ya que es necesario mover el robot cada vez que se desea calcular

el ángulo respecto al norte, lo cual es muy lento sobre todo a la hora de orientar al robot. El problema de la orientación por referencias visuales es que requiere de un algoritmo de tratamiento de imagen, lo cual conlleva un gran coste computacional, del cual no disponemos en nuestro microcontrolador. Por último, descartamos el sistema de orientación por radiofrecuencia debido al elevado coste que conlleva la utilización de antenas direccionales, además de la mayor complejidad del sistema receptor.

5.2.1. Sistemas de Orientación mediante el uso de brújulas

La brújula fue inventada en China, aproximadamente en el siglo IX, e inicialmente consistía en una aguja imantada flotando en una vasija llena de agua. Más adelante fue mejorada para reducir su tamaño e incrementar su practicidad, cambiándose la vasija de agua por un eje rotatorio, y añadiéndose una rosa de los vientos que sirve de guía para calcular direcciones. La brújula señala constantemente al norte magnético, el cual, aunque se aproxima con el norte geográfico, no coincide exactamente con él (Ilustración 73).

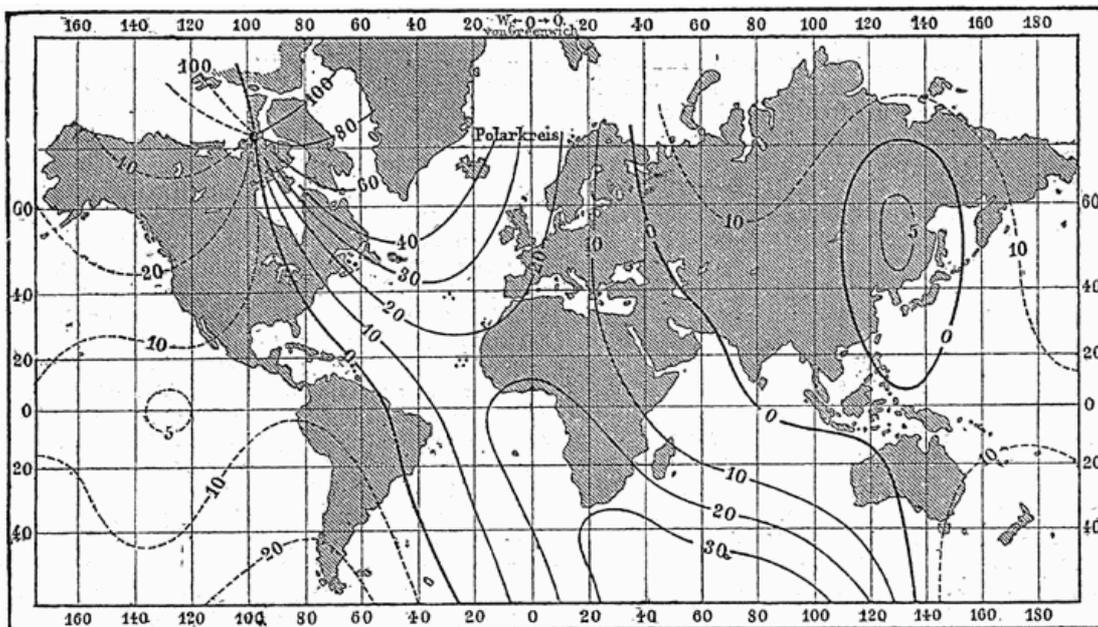


Ilustración 73: Declinación magnética

Nuestro sistema se basa en el mismo principio que la brújula antes citada. El sistema consta de dos sensores magnéticos orientados de forma perpendicular entre sí, donde cada uno ellos es capaz de detectar la intensidad del campo magnético terrestre en la dirección en la que está orientado [Salinas2008]. Dicha intensidad variará en función de la orientación del campo magnético respecto al eje sobre el que esté orientado el sensor (Ilustración 74). Conociendo este hecho, es posible implementar la función inversa, la cual calcula cuánta desviación existe respecto al norte magnético a partir de las medidas entregadas por los sensores.

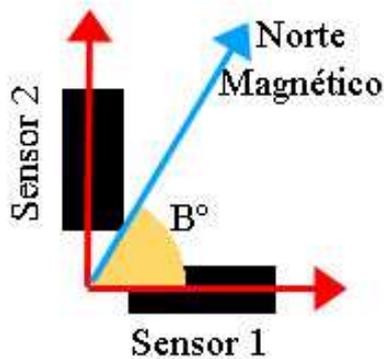


Ilustración 74: Medida sensores magnéticos

Las medidas leídas por los sensores de la Ilustración 74 son:

$$\text{Sensor}_1 = K_1 \cdot \cos(B^\circ)$$

$$\text{Sensor}_2 = K_2 \cdot \sin(B^\circ)$$

Donde K_i representa una constante de la máxima intensidad de campo magnético leído por los sensores.

Para calcular la función inversa es necesario calcular el arcotangente de las medidas ofrecidas por los sensores. Sin embargo, ambos sensores no tienen por qué tener la misma sensibilidad (K_1 puede ser diferente de K_2) por lo que antes de calcular el arcotangente de ambos sensores es necesario normalizar las medidas leídas de los sensores (dividiendo cada sensor por su correspondiente K).

Nota: Cabe destacar que la función arcotangente sólo devuelve medidas entre -90° y 90° [arcotangente (0) = arcotangente (180)], por lo que para conocer si estamos en ese rango o en el rango $90^\circ - 270^\circ$, lo deducimos en función de los propios valores entregados por los sensores.

5.3. Sensores Magnéticos

Hoy en día se pueden encontrar dos tipos de sensores magnéticos:

- Basados en el efecto Hall: Se conoce por efecto Hall a la aparición de un campo eléctrico, perpendicular a la circulación de la corriente, en un conductor cuando a este se le aplica un campo magnético (Ilustración 75)
- Basados en magnetorresistencias: Las magnetorresistencias son componentes que presentan una variación en su resistividad en función del campo magnético que se les aplique.

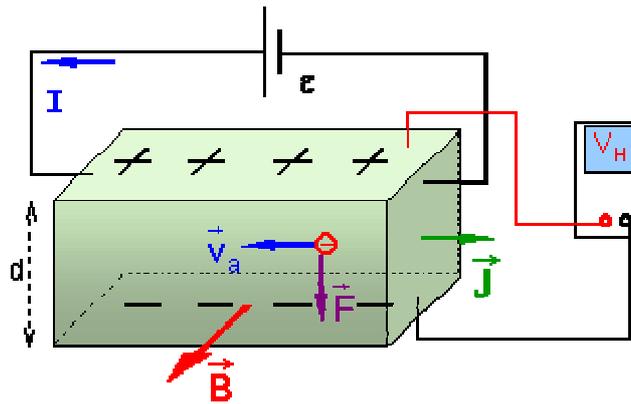


Ilustración 75: Efecto Hall. Imagen obtenida de <http://personales.upv.es/jquiles/prffi/magnetismo/avuda/hlphall.htm>

La principal diferencia entre estos tipos de sensores, aparte del principio físico en que se basan, es su sensibilidad. Mientras que los sensores de efecto Hall presentan una baja sensibilidad, utilizándose para detectar grandes cambios en los campos magnéticos, medida de corrientes eléctricas, sistemas de posición sin contacto,... las magnetorresistencias tienen una alta sensibilidad y se suelen emplear para medidas de precisión de pequeños campos magnéticos, como en la realización de brújulas electrónicas.

El diseño de brújulas electrónicas es relativamente nuevo, por lo que el número de fabricantes que disponen en sus catálogos de los componentes de precisión necesarios para la realización de las mismas son escasos. Tras realizar una búsqueda exhaustiva se encontraron los siguientes sistemas:

Sensores magnetorresistores

- KMZ51: Este chip basa su funcionamiento en un magnetorresistor de alta sensibilidad. Las variaciones en el magnetorresistor se acondicionan mediante un puente de Wheatstone, convirtiendo variaciones en la resistividad del componente en variaciones de tensión. De entre sus especificaciones cabe destacar que dispone de un sistema de polarización de los propios magnetorresistores, el cual garantiza que la sensibilidad de los dispositivos no varíe con el tiempo, y de un mecanismo de corrección del 'offset' de la señal, ya que el sensor no es posible calibrarlo de fábrica, por lo que para calibrar el sensor se requiere de este mecanismo y del de polarización (Ver "Nota" para conocer cómo se calibra el sensor). El datasheet del componente se puede consultar en: http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/KMZ51_3.pdf.
- HMC1021Z: Este dispositivo es semejante al anterior y su modo de funcionamiento es idéntico. Lo único que lo diferencia del anterior es el margen de intensidad de campo magnético con el cual trabaja el sensor, el cual es 3 veces superior al anterior. Sin embargo, su elevado coste (unas 3 veces superior al anterior) fue el motivo por el cual fue descartado. El datasheet del dispositivo se puede consultar en el siguiente enlace: <http://www.datasheetarchive.com/pdf/Datasheet-029/DSA00516216.pdf>.

Nota: El chip KMZ51 y HMC1021Z disponen de un mecanismo de calibración. Este se basa en polarizar el sensor en una dirección y realizar una medida de su valor. Al polarizarlo en sentido opuesto, la curva de calibración se invierte (líneas discontinuas de la Ilustración 76), lo cual nos permite calcular el valor medio de la señal, restándosele a la misma para eliminar el 'offset'.

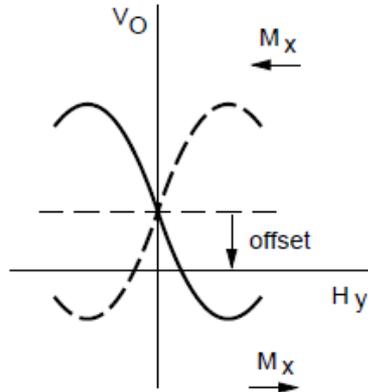


Ilustración 76: Calibración magnetorresistores

Brújulas electrónicas

- CMPS03: Este sistema basa su comportamiento en el sensor KMZ51 descrito anteriormente. Dispone de dos de estos sensores orientados de forma perpendicular, junto con un microcontrolador que se encarga de realizar las operaciones de cálculo y calibración de los mismos. Para más información sobre este componente se puede consultar la web: <http://www.superrobotica.com/S320160.htm>
- PW6945: este sistema basa su cálculo de orientación en la utilización de imanes y de sensores de tipo Hall de alta precisión. Sin embargo la máxima precisión que puede llegar a alcanzar es bastante limitada. Para más información sobre este dispositivo se puede consultar la web: <http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-29/DSA-566081.pdf>

Con el objetivo de reducir espacio y ahorrar costes, se descartaron todas las brújulas electrónicas y se decidió realizar un esquema basado en el sistema “CMPS03”, eliminando el microcontrolador del sensor de campo magnético ya que los cálculos para calcular la orientación se realizan en el propio micro del sistema. Además, se observó que existe en el mercado el sensor KMZ52, un chip que contiene en su interior dos KMZ51 orientados perpendicularmente, con el cual se facilita su implementación.

5.4. Implementación del sistema de orientación

5.4.1. Implementación Hardware

Para la implementación hardware del dispositivo se tuvo en cuenta el sistema de calibración y acondicionamiento del propio sensor.

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, el sistema de calibración requiere de dos módulos, uno encargado de polarizar los dos sensores y otro encargado de corregir el *offset* de la señal.

- Para el sistema de polarización se requiere someter a dos patillas del chip, por cada eje, a una diferencia de potencial. Para ello, reservamos varios pines del microcontrolador, los cuales conectamos directamente al sensor y a través de los cuales suministramos el voltaje necesario para realizar la polarización.
- Por otro lado, es necesario un mecanismo para la corrección del *offset*, el cual se basa en suministrar un determinado voltaje de polarización a una bobina existente dentro del propio chip. La bobina genera un pequeño campo magnético en función de la tensión aplicada, el cual se suma al que se desea medir, consiguiendo eliminar el *offset* de la señal. Como la arquitectura que va a utilizar el sensor no dispone de convertor digital-analógico, dicho mecanismo se implementa mediante potenciómetros conectados entre la alimentación y la masa de la placa. Con estos potenciómetros es posible seleccionar el voltaje con el cual se desea corregir el *offset* y, gracias a los conmutadores que les siguen, es posible indicar si se desea corregir un *offset* negativo o positivo.

Una vez calibrado el sensor es necesario amplificar la tensión ofrecida por el puente de Wheatstone. Para lograr esta amplificación se utiliza el amplificador instrumental INA2331, donde cada uno de los dos circuitos de amplificación del chip se asigna a uno de los ejes del sensor. La ganancia se selecciona con la relación entre las resistencias R1-R2 (para el primer eje) y R3-R4 para el segundo, según la ecuación que se muestra a continuación:

$$g = 5 + \frac{5 \cdot R2}{R1}$$

Para garantizar que la tensión de referencia sobre la cual se amplifica nuestra señal se mantenga constante, se ha añadido al diseño el chip de referencia REF2925, el cual garantiza que dicha tensión se mantenga entre 2,45 y 2,55V.

Por último, se añadió un chip convertor analógico-digital para poder utilizar dicha placa con las arquitecturas basadas en FPGA, debido a que estas no disponen de estos convertidores.

El esquemático que finalmente se implementó en el circuito es el que se muestra en la Ilustración 77.

5.4.2. Implementación software

Para la implementación software se siguió el mecanismo descrito al final del apartado “5.2.1 Sistemas de Orientación mediante el uso de brújulas”. Como se describe en dicho apartado, para la implementación del algoritmo se necesita calcular el arcotangente de las dos medidas capturadas. Sin embargo, esta función no está implementada en la GP-Bot, por lo que para poder utilizarla se tuvo que implementar una tabla de referencia con los valores que toma la arcotangente para determinados ángulos de giro (5°, 15°, 25°,... hasta 85°). La función arcotangente recibe como parámetros los valores del cateto opuesto y del cateto adyacente al ángulo que se desea conocer, en nuestro caso, los valores normalizados de los dos ejes del sensor. El algoritmo divide el cateto opuesto entre el cateto adyacente y busca en la tabla entre qué valores se encuentra el valor calculado, devolviendo el valor intermedio entre ambos márgenes. Por tanto, la resolución máxima de nuestro sistema es 10°, lo cual es suficiente para nuestro sistema de navegación.

Hay que tener en cuenta que ambos ejes no tienen por qué presentar la misma intensidad de señal, lo cual repercute en que es necesario normalizar las señales de ambos ejes para poder calcular el arcotangente correctamente. Para obtener los valores máximos y mínimos de las señales entregadas por los dos ejes del sensor, es necesario realizar un proceso de calibración del propio sensor. Este proceso se basa en ordenar al robot que gire 360° o más, mientras se detiene cada pocos grados para capturar las medidas ofrecidas por el sensor, almacenando los valores máximos y mínimos de cada eje. Como estamos calibrando el sensor de orientación, el ángulo que gira el robot se implementa mediante un contador. El ángulo de giro es muy difícil fijarlo, ya que este depende de la potencia a la que se alimenten los motores, el agarre-diámetro de las ruedas conectadas al motor y la superficie sobre la que se encuentre el robot. Por este motivo, se asignó un valor lo suficientemente alto al tope del contador como para asegurar que el robot siempre girase al menos una vuelta completa. Además, el robot captura los valores entregados por el sensor al inicio del proceso de calibración, lo cual le permite orientarse tal y como se encontraba inicialmente (una vez finalizada la calibración del dispositivo).

Tras esto, se toman cuatro muestras de ambos ejes y se calcula su valor medio. Seguidamente, se procede a normalizar las señales siguiendo la siguiente fórmula:

$$medida_{normalizada} = \frac{medida - min}{max - min} * 100 - 50$$

Los valores ‘min’ y ‘max’ son los valores mínimo y máximo que puede entregar el eje, los cuales se calculan durante el proceso de calibración del sistema. Este proceso de normalización da como resultado una conversión del valor de las medidas del rango ‘min’ a ‘max’ al rango -50 a 50, los cuales se pasan a la función arcotangente con la cual se conoce los grados de desviación respecto el norte.

Por último, falta indicar que la lectura de las medidas ofrecidas por el sensor se realizan a través del conversor analógico-digital del microcontrolador. Tras la implementación del sistema, se observó que en los instantes posteriores a la polarización de los sensores, las medidas leídas del sensor no concordaban con las medidas correspondientes a la orientación en la que realmente se encontraba. Para

resolver este problema, tras la polarización, se realizan una serie de medidas con el único fin de esperar un breve instante de tiempo a que el sensor se polarice correctamente.

El algoritmo que permite orientar al robot a un determinado ángulo basa su funcionamiento en el siguiente esquema:

- Inicialmente se normaliza la petición del usuario en el rango 0° a 360° . Ajustando la petición a la resolución del sistema. Por ejemplo, si se desea orientar al robot -25° respecto norte, esta petición se transforma a 335° respecto norte y se normaliza a 330° (para una resolución de 10°).
- Posteriormente se calcula la orientación inicial del robot, para poder obtener de este modo la diferencia en grados entre la orientación actual y la orientación deseada, volviendo a normalizar dicho valor entre 0° y 360° .
- Con la diferencia en grados, se decide el sentido del giro de los motores, con el fin de reducir lo más rápidamente posible dicha diferencia. El tiempo de giro de los motores se calcula de manera proporcional a la diferencia en grados entre la orientación inicial y la orientación deseada.

Nota: El proceso antes descrito se repite de forma indefinida hasta que la orientación del robot concuerde con la orientación deseada.

Resumiendo todo lo anteriormente descrito, el algoritmo de orientación implementado en la GP-Bot se divide en tres fases:

- La primera fase sólo se ejecuta la primera vez que se desea calcular la orientación del robot, momento en que se procede a la calibración del sensor, comenzando a girar sobre sí mismo y capturando los valores mínimo y máximo de cada uno de los dos ejes del sensor.
- En la segunda fase, se dispone a conocer la orientación del robot. Para ello, se leen los valores ofrecidos por ambos ejes del sensor, se normalizan y se llama a la función arcotangente para conocer la desviación respecto al norte magnético.
- La tercera fase corresponde al proceso de orientación del robot. En dicho proceso, el robot comienza a girar hasta que la orientación deseada concuerda con la orientación del robot.

5.5. Resultados obtenidos del sistema orientación

Para realizar unas medidas de cómo de fiable es nuestro sistema de orientación se utilizó una brújula para conocer cuántos grados de desviación existían entre la orientación calculada por el robot y la orientación real del mismo. Para ello, tras calibrar al robot le ordenamos que se orientase respecto a lo que el consideraba el norte y anotamos su orientación real. Posteriormente le fuimos indicando que se orientase 10° respecto al norte, 20° ,... hasta cubrir los 360° . Debido al mecanismo de orientación, decidimos realizar dos series de medidas. Una en sentido ascendente 0° , 10° , 20° ,... y otra en sentido descendente 360° , 350° , 340° ,... obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados sistema orientación

Orientación introducida	Orientación robot		Error	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
0	1	3	1	3
10	12	14	2	4
20	20	20	0	0
30	41	38	11	8
40	52	52	12	12
50	62	60	12	10
60	73	68	13	8
70	84	82	14	12
80	93	90	13	10
90	103	100	13	10
100	115	108	15	8
110	130	120	20	10
120	135	132	15	12
130	141	144	11	14
140	150	148	10	8
150	158	155	8	5
160	173	170	13	10
170	180	178	10	8
180	190	190	10	10
190	195	194	5	4
200	199	198	1	2
210	210	206	0	4
220	221	223	1	3
230	234	230	4	0
240	239	240	1	0
250	245	245	5	5
260	259	260	1	0
270	270	273	0	3
280	280	280	0	0
290	295	299	5	9
300	304	309	4	9
310	310	315	0	5
320	323	325	3	5
330	335	335	5	5
340	350	350	10	10
350	355	356	5	6

Los errores antes mostrados se pueden concentrar en el histograma de la Ilustración 78. Como se puede apreciar, la orientación real del robot difiere de la orientación introducida hasta en 20°, presentando un error medio de 6,74° y una desviación estándar de 4,86°. Aunque este error es bastante elevado, como la aplicación

final va a disponer de mecanismos de navegación robustos, el error introducido por la orientación es aceptable.

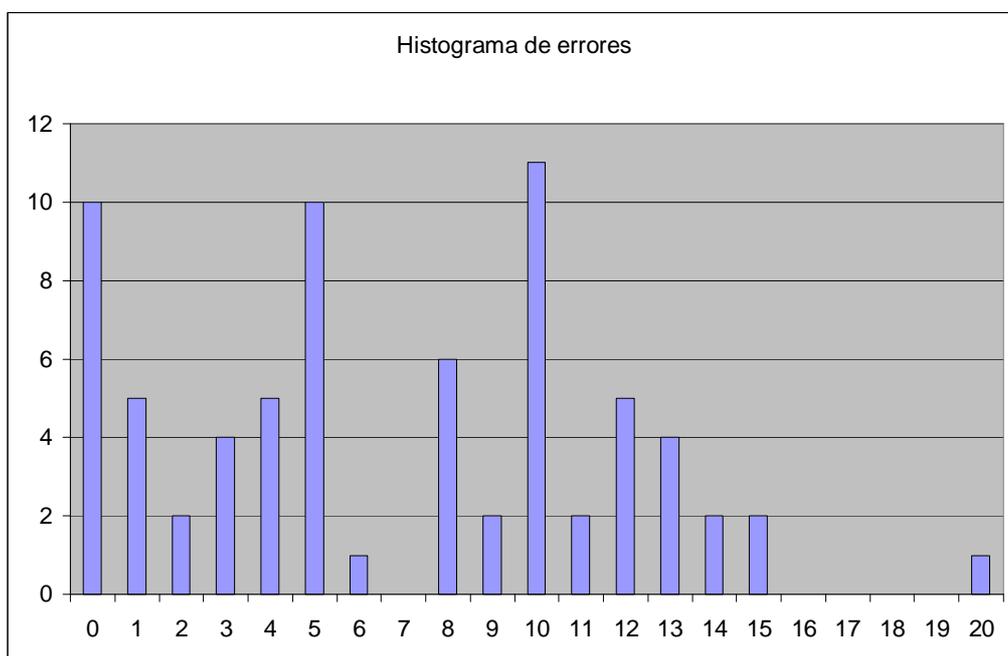


Ilustración 78: Histograma errores brújula electrónica

6. SISTEMA DE NAVEGACIÓN

6.1. *Introducción*

Los sistemas de navegación basan su funcionamiento en dos aspectos fundamentales:

- El sistema de posicionamiento: El robot necesita conocer su posición lo más exactamente posible para poder calcular las rutas hasta su destino.
- El sistema de orientación: Para poder recorrer las rutas calculadas anteriormente, se requiere conocer la orientación del robot, para garantizar que el movimiento que realiza el robot sea en la dirección correcta.

En nuestro caso, el sistema de posicionamiento se implementó mediante ultrasonidos, todo lo cual se recoge en el capítulo “4 Sistema de localización” mientras que para el sistema de orientación se utilizó una brújula electrónica, de la cual se habla detalladamente en el capítulo “5 Sistema de orientación”. Sin embargo, un sistema que considera sólo estos dos aspectos es un sistema muy limitado, por lo que para que el sistema de navegación fuese completamente eficiente, este debería incluir al menos, además de los sistemas antes descritos, un mapa del entorno en el que se encuentra el robot, para de este modo, evitar que este se estrelle contra obstáculos fijos (paredes, mesas,...) y se le debería dotar a este de tecnología capaz de detectar obstáculos a su alrededor, con el fin de evitar colisiones contra obstáculos móviles (personas, sillas,...).

Debido a la complejidad en el desarrollo del mapa y de los sistemas detectores de obstáculos, se decidió no implementar para esta versión del sistema dichos mecanismos, sin embargo estos mecanismos se esperan implementar en etapas posteriores de este mismo proyecto. Esto da lugar a que en esta versión del proyecto, el sistema de navegación está diseñado para funcionar en entornos sin obstáculos.

Así, en este capítulo se muestra el proceso de integración del sistema de posicionamiento y del sistema de orientación. El capítulo se divide en los siguientes apartados:

- Un pequeño análisis de los diferentes sistemas de navegación existentes hasta la fecha.
- Una descripción del sistema de navegación implementado.
- Un análisis de los resultados obtenidos con nuestro sistema.

Nota: Cabe destacar que durante todo este capítulo, se ha utilizado la GP-Bot para la implementación del algoritmo de navegación.

6.2. **Sistemas de Navegación**

Hoy en día, los sistemas de navegación están muy extendidos en la mayoría de los aspectos de nuestra vida cotidiana. De entre todos los existentes, los más frecuentes son:

- Navegación mediante piloto automático: esta tecnología se utiliza en los aviones y barcos. Antaño se basaba en intentar mantener una dirección señalada por una brújula, mientras que los sistemas más modernos incorporan sistemas inerciales con los cuales conocer la posición exacta.
- Navegación por balizamiento: Estos sistemas se basan en la distribución de una serie de balizas, de las cuales se conoce su posición exacta, y en el cálculo de las distancias a cada baliza. De entre todos los sistemas existentes, cabe destacar el sistema GPS, el cual es el sistema de navegación más extendido en el mundo, gracias al cual se puede conocer la posición de un receptor en cualquier lugar del mundo, hasta con precisión de centímetros, implementado en aplicaciones militares, o de metros, implementado en aplicaciones comerciales. Cabe destacar que estos sistemas no permiten conocer de manera precisa la orientación del sistema, por lo que suelen requerir de mecanismos auxiliares para el cálculo de la misma.
- Navegación mediante sistema de referencia: Utilizado en entornos controlados. El entorno dispone de puntos de referencia que permiten calcular la posición y orientación del receptor en base a ellos (líneas de colores en el suelo, códigos de barras en las paredes,...)

De entre los sistemas antes descritos, se implementó un sistema de navegación basado en balizamiento por ultrasonidos junto con una brújula electrónica para conocer la orientación del sistema. Los principales motivos que llevaron a escoger esta tecnología y no las otras antes mostradas fue su reducido coste, el cual no supera los 15€, mientras que la precisión final del conjunto es bastante elevada, esta no acumula errores con el paso del tiempo y es fácilmente desplegable (sólo son necesarias 2 o 3 balizas por habitación para posibilitar la localización en la misma). Además, es una tecnología adaptada a entornos '*indoor*'.

Los motivos que llevaron a descartar el resto de tecnologías fueron:

- En los sistemas inerciales existe un error inherente al sistema que se va acumulando a medida que el nodo se desplaza por el espacio.
- Los sistemas de balizamiento por radiofrecuencia (GPS, Galileo,...) no están diseñados para entornos '*indoor*', además, la precisión de los sistemas comerciales es bastante reducida.
- Los sistemas basados en referencias tienen el principal problema de necesitar seleccionar si se desea simplicidad en el diseño, seguidores de línea, o si se desea flexibilidad de movimiento, reconocimiento de imagen. El problema del primero es que las rutas de navegación están limitadas, ya que el sistema no contempla que el robot se separe del sistema de referencia y estas hay que distribuirlas por todo el camino que desea que siga el robot, mientras que los segundos conllevan un gran coste

computacional, debido a la necesidad de procesar todo el entorno en busca de las referencias.

- Además, a excepción de los sistemas basados en referencias cercanas (seguidores de línea), el resto de los sistemas conllevan que el coste del sistema sea bastante elevado, siendo este superior a los 50€ por módulo.

6.3. Implementación del sistema de navegación

La implementación del sistema de navegación se basó en los módulos de localización por ultrasonidos de la fase de diseño 3, descritos en el apartado “4.6 Implementación del sistema de localización”, y del módulo de orientación descrito en el apartado “5.4 Implementación del sistema de orientación”. El control del sistema se implementó mediante un servidor que atendía peticiones a través del puerto serie, conectado con el PC del usuario mediante la tecnología ZigBee. Los detalles del servidor y su funcionamiento se pueden consultar en el apartado “6.3.1 Servidor”. Por último, el sistema de navegación se basa en intentar minimizar las distancias hacia la posición objetivo primero en un eje y luego en el otro. Dicho algoritmo y los motivos que nos llevaron a esta implementación se pueden consultar en el apartado “6.3.2 Algoritmo de Navegación”.

6.3.1. Servidor

Con el fin de facilitar la gestión de todos los elementos disponibles en la GP-Bot, se diseñó un servidor que permitiese al usuario acceder a la GP-Bot mientras esta estuviese operativa y solicitar que realizase determinadas acciones. Este servidor consta básicamente de:

- Inicialmente configura todos los dispositivos y pines de la GP-Bot (timers, ADCs, puertos entrada-salida,...)
- Seguidamente se queda esperando las instrucciones del usuario.
- Cuando recibe una instrucción, procede a ejecutarla, volviendo tras su ejecución al estado de espera de nuevas instrucciones.

Las diferentes instrucciones implementadas son:

- Help ‘h’: al solicitar esta instrucción, el servidor devuelve una lista con las posibles instrucciones que puede atender.
- Move ‘M’: esta instrucción hace que el control de los motores pase a modo manual, pudiendo hacer que el robot avance ‘w’, retroceda ‘s’, gire a la izquierda ‘a’ o gire a la derecha ‘s’. De este modo sólo se vuelve al estado de espera tras pulsar ‘q’ (Quit).
- Move to ‘m’: esta instrucción le indica al robot que se desea realizar una navegación hasta una determinada posición, por lo que el robot se queda esperando a que se introduzca la posición deseada. Dicha posición se debe introducir para ser dada por correcta con el siguiente formato: xAAyBBBq, donde AAA hacen referencia a la posición en el eje x del destino y BBB a la posición en el eje y. Por ejemplo: x50y250q

- Distance 'd': al invocar a esta instrucción el algoritmo devuelve la distancia, en pulsos de la GP-Bot, a la primera baliza que detecte, sin realizar la triangulación. Esta instrucción fue la utilizada durante el proceso de calibración del sistema de localización.
- Position 'p': esta instrucción hace que el robot comience el cálculo de su posición, tal y como se describe en el apartado "4.6.3.3 Fase de diseño 3: Algoritmo Localización Final".
- Sensor 's': Esta instrucción se pensó para posibilitar la lectura de los diferentes sensores conectados al sistema. Sin embargo, como este modelo todavía está en una fase bastante temprana, sólo se dispone del sensor de campo magnético, por lo que al invocar esta instrucción el programa devuelve la orientación actual del robot.
- Orientation 'o': mediante esta instrucción se solicita al programa que oriente al robot X grados respecto al norte magnético.
- Orientation to 'O': esta instrucción es una modificación de la instrucción anterior. Lo que se solicita mediante esta instrucción es que el robot se oriente hacia una determinada posición. Dicha posición se debe introducir del mismo modo que la instrucción 'Move to'.

Nota: El código en donde encuentra la atención de las peticiones por parte del usuario se puede consultar en el proyecto "Lateration v1.2" dentro de la carpeta "Ficheros\Fase3\Nodo", mientras que el código para la captura de las instrucciones se haya en el fichero "lateration2D.c" de la carpeta "Ficheros\Fase3\Nodo\ Librerias 2" del CD adjunto.

6.3.2. Algoritmo de Navegación

El algoritmo de navegación consta de las siguientes fases:

- Inicialmente se calcula la posición en la que se encuentra el robot.
- Seguidamente se orienta al robot en una dirección que minimice la distancia hasta el objetivo, avanzando una distancia proporcional a la distancia hasta el mismo.
- Se vuelve a calcular la posición en la que se encuentra el robot, repitiendo el proceso antes descrito hasta que el error sea menor que 5 cm en ambos ejes.

En un primer momento, se pensó en orientar al robot hacia la posición destino y avanzar en dicha dirección (Ilustración 79), pero tras la realización de varias pruebas y debido a los errores que introducía el propio sistema de orientación, al final eran necesarias demasiadas interacciones para alcanzar dicha posición. Por este motivo, se optó por orientar al robot según el eje X del sistema de coordenadas y minimizar la diferencia en ese eje, procediendo después a realizar un nuevo proceso de posicionamiento y orientación en el eje y, minimizando la diferencia en ese eje (Ilustración 80). Esto dio como resultado que el sistema fuese más fiable, debido a que los errores de orientación parecían compensarse mutuamente, lo cual permitía al nodo llegar a su destino de una forma más rápida.

El sistema de navegación se implementó en el fichero “main.c” del proyecto “Lateration v1.2”, el cual se encuentra en la carpeta “Ficheros\Fase3\Nodo” del CD adjunto.

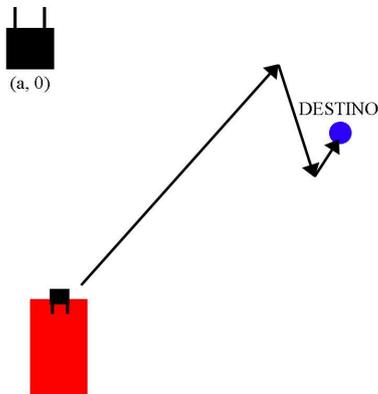


Ilustración 79: Navegación directa

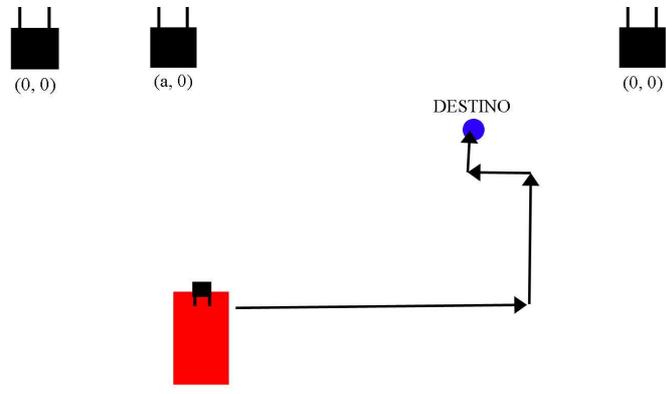


Ilustración 80: Navegación ejes

6.4. Resultados del sistema de Navegación

El sistema final de navegación cumple con los requisitos impuestos, ya que como se puede comprobar en el vídeo “Navegacion.avi” que se encuentra en la carpeta “Video” del CD anexo, el nodo es capaz de alcanzar su destino en pocas iteraciones, normalmente 1 ó 2.

Durante las pruebas realizadas, nos percatamos de que el sistema de navegación es bastante sensible a la presencia de campos magnéticos externos (componentes electrónicos, cables por los que circula elevada corriente,...) ya que dichos campos hacen que la brújula electrónica deje de calcular su orientación respecto al norte magnético. En dichos casos, el cálculo que realiza para la orientación del robot es incorrecto lo cual repercute en una navegación incorrecta. Por este motivo, se prevé que en versiones futuras el sistema incluya un mecanismo de orientación de refuerzo, para poder orientar al robot en estas situaciones, o marcar en el mapa de navegación aquellas zonas en donde exista una presencia de campo magnético distinto del terrestre.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1. Conclusiones

Con este proyecto se demuestra que es posible implementar un sistema de navegación de bajo coste pensado para funcionar dentro de edificios. Además, se ha conseguido otorgar autonomía a los nodos del sistema, realizando en estos todas las operaciones necesarias para realizar una eficiente navegación.

Todo sistema de navegación debe incluir como mínimo un sistema de localización, un sistema de orientación y debe disponer de un algoritmo de navegación con el cual viajar desde una posición hasta otra de manera eficaz.

El sistema de localización se ha implementado basándose en el cálculo de la posición en un entorno conociendo las distancias absolutas entre el nodo y las diferentes balizas del sistema. Para el cálculo de las distancias absolutas a cada una de las diferentes balizas del sistema se han utilizado dispositivos de ultrasonidos y de radiofrecuencia. Debido a la gran diferencia entre el tiempo de propagación de ambas señales, la señal de radiofrecuencia se ha utilizado para indicar el instante de emisión de la señal de ultrasonidos, mientras que para calcular el tiempo de vuelo se mide el tiempo transcurrido entre que el nodo detecta el inicio de la señal de radio hasta la recepción de una señal válida de ultrasonidos. Con dicho tiempo de vuelo, se obtiene la distancia a las balizas, multiplicando dicho tiempo por la velocidad de propagación de la onda de ultrasonidos. Con las diferentes distancias a cada una de las balizas, el nodo es capaz de conocer su posición buscando qué punto en el espacio satisface dichas distancias mediante intersección de circunferencias, ya que el sistema está pensado para la localización de un nodo en dos dimensiones.

Para el sistema de orientación se ha escogido la opción de utilizar una brújula electrónica, ya que de este modo se posibilita conocer la orientación del nodo, sin incurrir en un coste excesivo para el mismo ni necesitar de excesivo tiempo o capacidad computacional para calcular su orientación. La brújula electrónica se ha implementado utilizando dos sensores de campo magnético que miden la intensidad de dicho campo en 2 ejes colocados de manera perpendicular entre sí. De este modo, con las medidas leídas de estos dos sensores, tras acondicionar la señal y normalizar sus valores, es posible calcular los grados de diferencia entre la orientación del robot y el norte magnético, aplicando la función arcotangente a la división de ambas medidas. Como el norte magnético se mantiene constante en casi todo el entorno de navegación (a excepción de las zonas cercanas a componentes electrónicos), dicha referencia es válida para el cálculo de la orientación.

Por otro lado, para el sistema de navegación se ha optado por implementar un algoritmo simple el cual basa su funcionamiento en reducir la diferencia entre la posición del nodo y la posición destino, primero en un eje para posteriormente avanzar en el otro eje hasta que la diferencia entre la posición del nodo y la posición destino no difiere más de 5 cm en los dos ejes.

Por último, se ha implementado un servidor en el nodo, el cual puede atender las peticiones de un usuario situado en un PC, y con el cual se comunica por medio de ZigBee.

Cabe destacar que parte de los resultados de este proyecto fin de carrera, en concreto los referentes al sistema de localización por ultrasonidos, han sido publicados. Se trata del artículo “Low Cost Indoor Ultrasonic Positioning Implemented in FPGA”, publicados en el congreso internacional 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON).

7.2. Trabajo Futuro

Para un futuro a corto plazo se prevé implementar las balizas mediante microcontroladores de bajo coste, creando un protocolo de emisión que permita distribuir varias balizas independientes en una misma habitación y posibilitando de este modo la localización eficaz del nodo en todo el entorno.

Además, se pretende mejorar el sistema de navegación para la inclusión de un mapa del entorno, con el cual ser capaces de evitar que los nodos intenten atravesar zonas prohibidas. Junto a esto, se pretende incluir en cada nodo sensores con los que poder detectar obstáculos. Así, el sistema de navegación dispondría de una visión detallada de su entorno, siendo más eficiente y útil que el que ahora está implementado.

También se pretende implementar el sistema de localización en tres dimensiones para, de este modo, abarcar todo el espacio en el cual puede situarse un nodo.

Asimismo, se pretende implementar todo el sistema en arquitecturas basadas en FPGAs, para de este modo poder contar en el sistema con nodos con una mayor potencia de cómputo para la realización de tareas que sobrepasasen las capacidades computacionales de los microcontroladores de 8 bits.

Por otro lado se prevé eliminar la tecnología ZigBee del sistema, utilizando los propios módulos FM de radiofrecuencia y un protocolo propio para la comunicación entre los diferentes nodos del sistema para establecer la comunicación entre ellos.

Cabe destacar que debido a los problemas presentados por el sistema de orientación frente a la presencia de campos electromagnéticos, no se descarta incluir un sistema de orientación de refuerzo, para que cuando se detecten estos problemas el nodo sea capaz de realizar una orientación correcta aunque para ello requiera de mayor tiempo o su orientación no sea tan precisa como con el sistema implementado.

Por último, cabe resaltar que este sistema está pensado para aplicaciones con diversos nodos en un mismo sistema que realicen tareas colaborativas o que sirvan como una red de sensores móviles, por lo que en base de la aplicación final que se desee otorgar al sistema final, se prevé la inclusión en los nodos del sistema de los sensores e instrumentos con los cuales realizar las tareas demandadas por la aplicación.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [Bensky2007] Alan Bensky “*Wireless Positioning. Technologies and applications*” Ed. Artech House December 2007.
- [Dijk2004] Dijk, E.O. van Berkel, C.H. Aarts, R.M. van Loenen, E.J. “A 3-D Indoor Positioning Method using a Single Compact Base Station” Pervasive Computing and Communications. Second IEEE Annual Conference on 2004.
- [GlezdeRivera2002] <http://arantxa.ii.uam.es/~gdrivera/robotica/inicio.htm>.
- [Isense] www.isense.com.
- [Mannings2008] Robin Mannings “*Ubiquitous Positioning*” Ed. Artech House Jun 2008.
- [McCarthy2003] McCarthy, P. Muller, H.L. “*RF-free ultrasonic positioning*” in Proc. Wearable Computers, Seventh IEEE International Symposium on 2003.
- [Priyantha2000] N. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, “*The Cricket Location-Support System*” in Proc. ACM 6th Int. Conf. on Mobile Computing and Networking. (MOBICOM), August 2000.
- [Sanchez2009] Alberto Sanchez, Santiago Elvira, Angel de Castro, Guillermo Glez-de-Rivera, Ricardo Ribalda, Javier Garrido “*Low Cost Indoor Ultrasonic Positioning Implemented in FPGA*” 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) Novembre 2009.
- [Salinas2008] Aldana Salinas 2008 “*Tesis Brújula Electrónica*” Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/406/1/TESIS%20FINALaldanasalinas.pdf>.
- [Xilinx] www.xilinx.com/tools/microblaze.htm.
- [Ward1997] Andy Ward, Alan Jones, Andy Hopper “*Performance Analysis of UPS (Ultrasonic Positioning System) Using DGPS*” IEEE Personal Communications, Vol. 4, No. 5, October 1997, pp 42-47.

Presupuesto

1) Ejecución Material	
Compra de ordenador personal	750,00 €
Software necesario (Xilinx ISE, ModelSim, Orcad Pspice y Codewarrior)	1.800,00 €
Material de oficina	100,00 €
Compra equipo electrónico	1.000,00 €
Total de ejecución material	3.650,00 €
2) Beneficio Industrial	
6% sobre Ejecución Material	219,00 €
3) Gastos generales	
16% sobre Ejecución Material	584,00 €
4) Honorarios Proyecto	
900 horas a 16 €/ hora	14.400,00 €
5) Material fungible	
Gastos de impresión	60,00 €
Encuadernación	20,00 €
6) Subtotal del presupuesto	
Subtotal Presupuesto	18.130,00 €
7) I.V.A. aplicable	
16% Subtotal Presupuesto	2.900,80 €
8) Total presupuesto	
Total Presupuesto	21.030,80 €

Madrid, Septiembre 2009
El Ingeniero Jefe de Proyecto
Fdo.: Santiago Elvira Díaz
Ingeniero Superior de Telecomunicación

Pliego de condiciones

Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un *Sistema de redes inalámbricas con robótica colaborativa*. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales.

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.
6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.
8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, Sistema de redes inalámbricas con robótica colaborativa o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción

provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata, anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares.

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.
3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.
7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.
8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.
9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.
10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.
11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial,

siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.

Low Cost Indoor Ultrasonic Positioning Implemented in FPGA

Alberto Sanchez, Santiago Elvira, Angel de Castro, Guillermo Glez-de-Rivera, Ricardo Ribalda, Javier Garrido

HCTLab, Univ. Autonoma de Madrid.

Francisco Tomas y Valiente 11, Madrid, Spain

alberto.sanchezgonzalez@uam.es

Abstract— This paper presents a low cost indoor ultrasonic-based positioning system. This system allows the mobile nodes of a Wireless Sensor Network to know their location using radiofrequency and ultrasonics. To achieve this goal, a matrix of transmitting anchor points is installed whereas the mobile nodes receive these transmitted signals and estimate the time-of-flight of the ultrasonic signals. Using two time-of-flight measurements and trilateration equations, the location of the mobile nodes can be inferred in a 2-D space.

Keywords— Wireless Sensor Network, location, ultrasonics, trilateration, Field Programmable Gate Array.

I. INTRODUCTION

In recent years, Wireless Sensor Networks (WSN) have been thoroughly studied. Specific topics like deployment of the nodes, security or the incorporation of mobile nodes in the network have been continuously investigated. If mobile nodes are added into the network, the location and tracking of these nodes turn into important tasks [1-5]. If the application of the WSN is in indoor environment, traditional outdoor location systems, like GPS (Global Positioning System) or the forthcoming Galileo, cannot be used. These systems provide a precision of a few meters, which is usually not enough for indoor purposes. Besides, their indoor reliability is poor because of the scarce coverage of these systems inside a building. Indoor location is relevant not only for WSN but also for many other applications such as robotics, warehouse management, domotics, etc.

There are several indoor location technologies based on RFID (radio-frequency identification), image recognition, ultrasonics, etc. RFID technology allows to know if the distance between an anchor point (transmitter) and a mobile node (receiver) is lower than a fixed distance, depending on the transmitting power. Modifying the transmitting power, the system can take several measurements estimating the position of the mobile node. However, the achieved precision is not sufficient for many applications. Image recognition provides fine precision but requires expensive hardware such as cameras and strong processing. Ultrasonics is an inexpensive and accurate technology. Transmitting an ultrasonic signal between two points, the time-of-flight of the signal can be measured, obtaining the distance between the receiver and the transmitter. Taking several measurements between one point

and some well-known points, the location of the first can be estimated.

Some of the existing indoor location systems use ultrasonics, with the support of radiofrequency signals. The MIT Cricket Indoor System [6-7] uses a matrix of transmitting anchor points which are installed at the ceiling. The receiving mobile nodes measure the distance to the anchor points, but they don't locate themselves. The objective of the system is to know the room where the mobile nodes are. Nevertheless, a precise location can be made with an external PC. In the Bat Ultrasonic Location System [8], a matrix of receiving anchor points is installed at the ceiling as well. The mobile nodes, which are attached to people, transmit at the same time ultrasonics and a radio signal to the anchor points. The calculus of the position is centralized in a PC and the result must be transmitted back to the mobile nodes. The system of Randell and Muller [9-11] uses transmitting anchor points and receiving mobile nodes, providing an accurate location. An evolution of this system uses just ultrasonics, although it requires stronger processing. The system of Single Compact Base Station [12] uses just a small base with three transmitting anchor points, reducing the precision of the system, as well as the installation of the location system. There are also some commercial systems of the company InterSense [13-14] which offer high precision combining ultrasonics and magnetometers, gyroscopes and accelerometers. However, these commercial systems cost thousands of dollars.

In the present work, an inexpensive 2-D ultrasonic-based location system is presented. As in the Cricket System, there are some transmitting anchor points whilst the mobile nodes receive the transmissions of the first ones. Nonetheless, the calculus of the location is executed in the mobile node, without any external device (no need of external PC) and using low cost devices. The rest of the paper is organized as follows: Section 2 explains the trilateration technique. Section 3 explains how to estimate distances between nodes and the mathematical problem of trilateration. Section 4 describes the proposed architecture. Section 5 shows the experiments that have been performed and their results. Section 6 presents the conclusions.

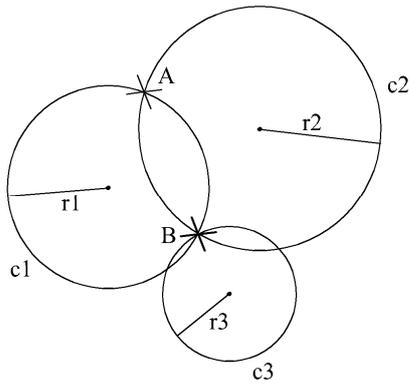


Fig. 1. Trilateration problem in 2-D space.

II. TRILATERATION

The location of a mobile node in a WSN could be calculated measuring angles between the node and some well-known anchor points, which is called triangulation, or it can be measured calculating distances between them, which is called trilateration. Triangulation requires more complex hardware and software, increasing the cost of the system. For example, it needs unidirectional antennas, and trigonometric equations which are more complex than trilateration equations.

Trilateration requires three measured distances between the node (target of the location) and the reference points in a 2-D space, whereas four measurements are needed to trilaterate in a 3-D space. In any case, with a proper configuration, just two and three anchor points are needed for 2-D and 3-D spaces respectively. An example of a possible configuration for 2-D trilateration with only two anchor points is presented in section III. In the general case, once the measurements are taken, the 2-D point where the node stands is the intersection of three circumferences whose geometric centers, which can not be colinear, are the reference points and their radiuses are the measured distances. Fig. 1 shows this geometric problem. With two distance measurements (r_1 and r_2), the receiver location is in the intersection of two circumferences centered in the points where the respective anchor points are, and whose radiuses are r_1 and r_2 . The intersection gives two possible solutions: A and B. If the receiver gets a third measurement from another anchor point, the new circumference with radius r_3 intersects with only one of those points. This point is the unambiguous position of the receiver.

If a 3-D space is considered, the target is in the intersection of four spheres whose geometric centers, which can not be coplanar, are the reference points and their radiuses are the measured distances. Fig. 2 shows the problem of trilateration in a 3-D space. If the receiver achieves the distances r_1 , r_2 , r_3 and r_4 , it can calculate unambiguously its position. The intersection of two spheres, s_1 and s_2 , of radiuses r_1 and r_2 is a circumference c_1 . The receiver is in this circumference. If a third sphere is considered, s_3 with a radius of r_3 , it intersects with c_1 in two points: A and B. The fourth sphere, s_4 with a

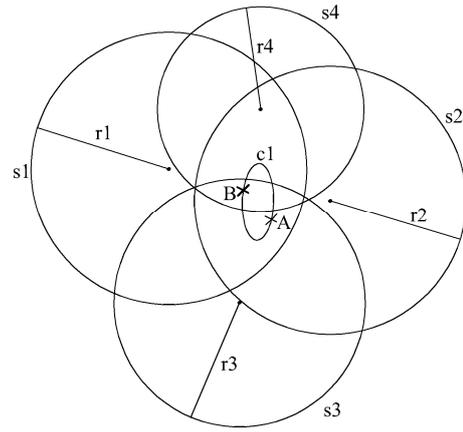


Fig. 2. Trilateration problem in 3-D space.

radius of r_4 , intersects with one of the two points. This is the point where the receiver stands.

Although trilateration in a 2D and 3D-space is possible with three or four measurements respectively, the more measured distances, the more precision is obtained. When more points are used, it is called multilateration.

The explained trilateration technique is called TOA (Time of Arrival), in which the receiver knows the time the signal arrives relative to the emitting time. In this case, the receiver must know the time when the signal was emitted. There is another method called DTOA (Difference of Time of Arrival), in which the transmitters emit their signals at the same time (in different channels or with a fixed and known time offset between signals), so the receiver can measure the time difference between their arrivals. The receiver doesn't have to know the time of emission, but the problem of trilateration turns into the calculus of intersections between hyperbolic surfaces rather than spheres, increasing the complexity.

WSN nodes use radio frequency communication (RF) to collaborate in their tasks. This hardware can be used to indicate the start of the emission. If the transmitter of the ultrasonics emits an RF signal at the same time, the receiver knows the time when the ultrasonic signal is emitted because radio propagation speed is about 10^6 times greater than ultrasonics propagation speed. Obtaining the time interval between emission and reception of ultrasonics, TOA method can be applied, which involves easier processing. Besides, the use of RF in WSN to location purposes, which is explained in Section 3, does not imply added costs because RF is already present in WSN. In the present work, the 2-D TOA method is chosen for these reasons.

III. LOCATION

Before trilateration can be performed, a set of distance measurements must be taken, translating the time-of-flight of a signal into distances.

A. Distance Estimation

The distance between two points can be calculated measuring the time of flight of a signal which is emitted from one point to the other. In indoor positioning, ultrasonics are commonly used due to their slow speed of propagation and, therefore, estimation can be more accurate. The speed of sound is approximately of $3.4 \cdot 10^2$ m/s, whereas the speed of radio is around $3 \cdot 10^8$ m/s. For that reason, if a system samples the incoming signals at 100 MHz, the resolution of the sampler could be up to $3.4 \cdot 10^{-6}$ m (0.0034 mm) with ultrasonics (but it is usually lower because of the frequency of the ultrasonic signal), while the resolution with radio signals is only up to 3 m. In any case, the receiver can estimate the time of flight just if it knows the time when the signal was emitted, so time synchronization is needed. The easier way to achieve that is emitting a radio signal at the same time of the ultrasonic one. Radio propagation speed is much greater than ultrasonics, so radio can be used as a synchronization method.

The distance between each anchor point and the mobile node can be represented as follows:

$$d_{t-a} = (t_{us} - \text{offset}) \cdot v_{us} \quad (1)$$

where t_{US} is the measured time of flight of the ultrasonic (US) signal, v_{us} is the speed of sound, which depends on the temperature of the room, and *offset* is a set of fixed delays empirically checked.

t_{us} is not known but the time difference between the arrival of radio and US signals can be measured. t_{US} is the sum of the time of flight of the radio signal (t_{radio}) plus the time difference between the arrival of both ($t_{difference}$):

$$d_{t-a} = (t_{difference} + t_{radio} - \text{offset}) \cdot v_{us} \quad (2)$$

Considering that the time of flight of the radio wave is insignificant due to the speed of light, the distance can be calculated just with the time difference.

$$d_{t-a} = (t_{difference} - \text{offset}) \cdot v_{us} \quad (3)$$

B. Location

Once distances are estimated, the location can be accomplished. The configuration proposed in the paper is the location of a target (x_t, y_t) in a 2-D space with two anchor points placed at $(0, 0)$ and $(b, 0)$. Fig. 3 shows this problem. The mobile node is in the intersection of two circumferences centered in the anchor points. When the distances d_{t-a1} and d_{t-a2} are measured, there are two equations that must be satisfied:

$$\begin{aligned} d_{t-a1}^2 &= x_t^2 + y_t^2 \\ d_{t-a2}^2 &= (b - x_t)^2 + y_t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

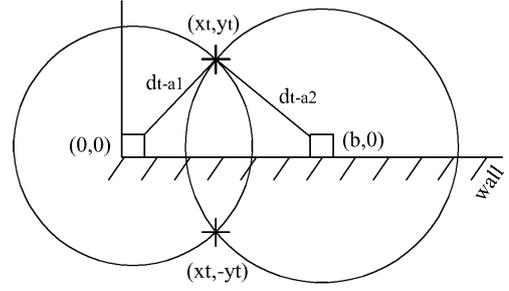


Fig. 3. Trilateration in a 2-D space with two anchor points.

Solving the equation system, the coordinates x_t and y_t are:

$$\begin{aligned} x_t &= \frac{d_{t-a1}^2 - d_{t-a2}^2 + b^2}{2b} \\ y_t &= \pm \sqrt{d_{t-a1}^2 - x_t^2} \end{aligned} \quad (5)$$

As two reference points are used in a 2-D space, there are two solutions. Nevertheless, the anchor points can be deployed close to a wall of the room so just the positive values of the Y axis are considered. Without this restriction, another anchor point would be needed to know unambiguously the position of the mobile node.

IV. DESIGN

A. Architectural Design

Both anchor points and mobile nodes can play whether transmitting or receiving role. An architecture in which anchor points transmit and mobile nodes receive is called passive. On the other hand, an architecture in which anchor points receive and mobile nodes transmit is called active. These architectures have some differences that must be considered. A passive system is more scalable. The transmitters must take turns to emit their signals and the number of anchor points is, usually, lower than the number of mobile nodes. Therefore, the latency in an active architecture is much higher than in a passive architecture. With receiving mobile nodes, an undefined number of them can coexist with a fixed number of anchor points. The system can support any number of nodes with the only condition that they are in range. One disadvantage of the passive architecture is the precision of the location with moving nodes. If the mobile node is moving, the distance measurements are taken at different geometric points, increasing the error of trilateration. However, in the active architecture, just one emission of the signals is needed because all the anchor points receive that signal, avoiding this accumulative error.

The active architecture has another inconvenient. The mobile nodes emit their location signals and the anchor points receive them. The calculus of the location is made out of the mobile nodes. Consequently, the result has to be transmitted back to the node. That last transmission contains the location

of the mobile node, and any node or external device knows that position, threatening the user privacy. On the other hand, passive architecture allows the calculus to be made in the mobile nodes, not requiring the transmission of the location. Location systems like GPS or Galileo use a passive architecture.

A passive system has been chosen because of its scalability and user-privacy. The aim of the present design is a low-cost indoor location system achieving the maximum reachable precision. The system has been implemented in a Xilinx FPGA because it permits rapid-prototyping. However, a less accurate but low-cost design can be developed with an 8-bit processor.

B. Electronic Design

Fig. 4 shows the top level design of the presented indoor location system. In the anchor points, an ultrasonic transmitter (400ST120) is excited using square pulses of 20 V peak-to-peak. A Spartan3 Xilinx FPGA drives a 15-pulses output signal at 40 kHz. This signal, which voltage is between 0 and 3.3 V is converted into 0-20 V with a L293B push-pull driver. This higher voltage increases the range of the transmission. At the same time of the ultrasonic transmission, a radio frame is emitted by a 433 MHz FM transmitter (FM-RTFQ1-433). The frame consists of six Manchester-coded bits: two start bits (used for synchronization), one stop bit, and three bits which specify the ID of the transmitting anchor point. A 3 bit identifier has been chosen due to the slow transmission rate of the FM transmitter (9.6 kb/s). With a long frame, the US signal can arrive before the anchor point identifier has been decoded, increasing the latency of the positioning. Eight anchor points can coexist in the same coverage area, over-defining the equation system 5 and improving the global accuracy.

The mobile nodes have a 433 MHz receiver (FM-RTFQ1-433), an US receiver (400SR120) whose output is amplified

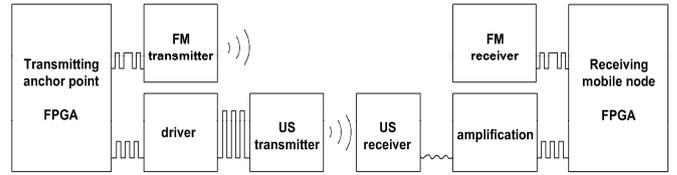


Fig. 4. Top level design of the indoor location system.

and a Spartan3A Xilinx FPGA which samples both signals to decode the identifier of the transmitting anchor point and measures the time difference between them. The ultrasonics amplification is needed because the reception signal is dimmer as the receiver moves away from the transmitter. Fig. 5 shows the amplifier circuit, which consists of two-stage amplification, whose gains are 100 and 33 respectively. The capacitors and the resistors in series before the input of the amplification stages behave like high-pass filters at 16 kHz (the ultrasonic signal is emitted at 40 kHz). High frequencies are attenuated by the LM324 operational amplifiers due to their narrow bandwidth. The circuit is supplied with 5 V. The reference voltage of the amplification is 2.5 V, which is obtained by a voltage divider. The ultrasonics receiver generates a voltage difference at its terminals with a frequency of 40 kHz which is amplified twice by the operational amplifiers. One-stage amplification with a higher gain is not possible because of the technical limitations of the operational amplifier. The output of the second stage is driven into a TLC2274 comparator with a threshold of 3.12 V. The comparator sets its output at '1' when the amplified signal exceeds the threshold and otherwise it sets a '0'. If there is no receiving signal, the output of the amplification will be the reference voltage (2.5 V), which is fed in the positive terminals of the operational amplifiers. When an ultrasonic signal is received, the output voltage will exceed the threshold (3.12 V) periodically creating a square signal at 40 kHz, which can be detected by the FPGA.

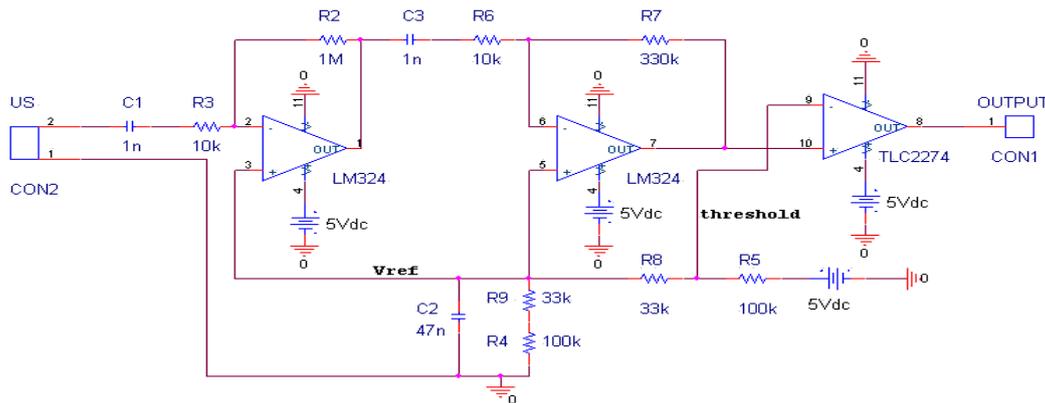


Fig. 5. Schematic of the US amplifier circuit.

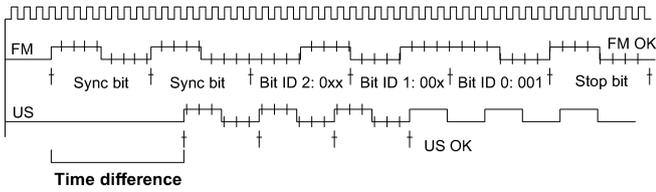


Fig. 6. Example of a frame from anchor point number 1.

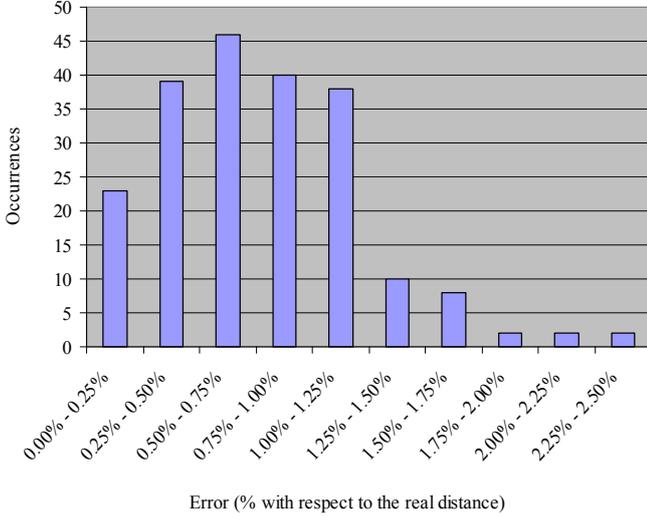


Fig. 7. Histogram of % of error in distance measurements over 135 samples.

The FPGA waits for an incoming FM signal. Just at that moment, the FPGA starts a counter which keeps counting until the ultrasonic pulses arrive. The FM sampler takes the two first bits to measure the period of the signal to synchronize with the transmitter. If the period meets the time constraints, the sampler takes the other bits, using this period. If the period doesn't meet them, or the full frame is not valid, the operation will be aborted. The third, fourth and fifth bits of the radio signal express the ID of the anchor point that transmits this frame. Likewise, the ultrasonic pulses are sampled to check if they satisfy some timing constraints (basically the frequency which should be 40 kHz). Because of the poor reliability of the ultrasonic communication, that constraint will be more relaxed than the FM one. For both signals, the timing checking is applied to complete periods, instead of semi-periods. Although several US pulses are received, when three well-formed ultrasonics pulses are sampled, the US frame is approved. Fig. 6 shows the sampling of the two signals: ultrasonics, and the Manchester-coded FM bits.

When a time difference is measured, and both signals are successfully checked, the time difference will be stored in a register. There are eight registers: one per possible anchor point, so the last valid distance measurement to each anchor point is available. The registers contain the time difference between the ultrasonic and radio signals, expressed in number

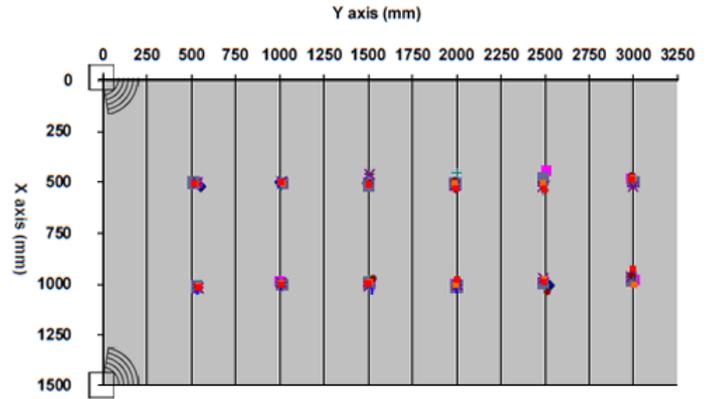


Fig. 8. Results from the trilateration process.

of cycles. The FPGA implementation includes a Xilinx MicroBlaze soft-processor which collects the measurements. The number of cycles written in the registers must be multiplied by the clock period to be translated to real time. Constantly, a program running on the processor reads the eight registers which store the last measurements from each anchor point. The program translates the time differences into distances using Equation 3. With those distances, the program is able to trilaterate using Equation 5, taking two distances simultaneously.

V. RESULTS

The system has been tested in an experimental setting. The distance estimation has been checked using Equation 3. 15 distance measurements between an anchor point and the mobile node have been taken each 20 cm inside an interval between 40 and 300 cm. Fig. 7 shows a histogram which represents the number of occurrences inside a specific percentage error interval. The represented percentage shows the relation between the error measurement and the real distance. The histogram shows that 148 of the 210 samples get an error lower than 1.00%. The average error is 0.78% and the standard deviation is 0.60%.

Trilateration has been tested with two anchor points and one mobile node, using equation 5. The distance between the anchor points is 1.5 m. A grid of 1.5 m x 3 m has been used to check the real position of the mobile node. The node has been positioned in several points to check the error between the real position and the position estimated by the system.

Fig. 8 shows the results of the estimated location of the mobile node compared to the real location. The points where the location has been estimated are $(a, 500)$ mm where $a \in [1, 2]$ and $b \in [1, 6]$. 10 measurements have been taken in every point where the mobile node has been positioned, for a total of 120 measurements. The maximum detected absolute error is 72.46 mm in position (1000, 3000) mm. The average absolute error is 20.08 mm and the standard deviation is 13.44 mm. The inaccuracies of the grid partly cause this error, which

TABLE I
ERROR WHEN D_{t-a1} AND D_{t-a2} ARE SKEWED

Mobile node in (250, 250) mm, 90° to anchors	$D_{t-a2} - 10$ mm		D_{t-a2}		$D_{t-a2} + 10$ mm	
	x_t	y_t	x_t	y_t	x_t	y_t
$D_{t-a1} - 10$ mm	0.0	-14.4	-7.0	-7.2	-14.1	-0.2
D_{t-a1}	7.0	-7.2	0.0	0.0	-7.2	7.0
$D_{t-a1} + 10$ mm	14.1	-0.2	7.2	7.0	0.0	14.0

Mobile node in (250, 1000) mm, 28° to anchors	$D_{t-a2} - 10$ mm		D_{t-a2}		$D_{t-a2} + 10$ mm	
	x_t	y_t	x_t	y_t	x_t	y_t
$D_{t-a1} - 10$ mm	0.0	-10.3	-20.5	-5.4	-41.2	-0.8
D_{t-a1}	20.5	-5.4	0.0	0.0	-20.7	5.0
$D_{t-a1} + 10$ mm	41.2	-0.8	20.7	5.0	0.0	10.3

affects more the location estimation than the distance measurement.

Fig. 8 shows that the error in x axis is greater than in y axis. This difference of error is due to the geometrical configuration when the mobile node has a distance to the wall greater than the distance between anchor points, and therefore the angle to both anchor points is very different to 90°, which is the optimal. Table I shows the error in x and y axis when the distances d_{t-a1} and d_{t-a2} are skewed ± 10 mm. In these examples, the anchor points are in (0, 0) mm and (500, 0) mm respectively, and the mobile node is in (250, 250) mm and (250, 1000) mm. The table shows that, in the position (250, 250) mm, which has a 90° angle to the anchor points, the maximum x-axis error is 14.1 mm and the maximum y-axis error is 14.4 mm. However, if the mobile node is in (250, 1000) mm, which has a 28° angle to the anchor points, the maximum x-axis error is 41.2 mm whereas the maximum y-axis error is 10.3 mm.

VI. CONCLUSIONS

This paper presents a low cost indoor location system implemented in an FPGA that can be used in mobile WSN as well as in robotics, domotics, etc. The location of a mobile receiver is inferred measuring the time-of-flight of ultrasonics with the support of radiofrequency for synchronization purposes. The achieved precision is suitable for many applications whilst the cost of the system is reasonably low. Using only two anchor points for 2-D location, the installation effort and costs of the system are reduced. If 3-D location is intended, three anchor points would be necessary. Besides, the location system could be implemented in an 8-bit processor to reduce costs even more.

REFERENCES

[1] E.M. Petriu, T.E. Whalen, R. Abielmona, A. Stewart, "Robotic sensor agents: a new generation of intelligent agents for complex environment monitoring," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol.7, no.3, pp. 46-51, Sept. 2004.

[2] K. Romer, F. Mattern, "The design space of wireless sensor networks," *IEEE Wireless Communications*, vol.11, no.6, pp. 54-61, Dec. 2004.

[3] Liang Yua; Weidong Chen; Yugeng Xi, "A Review of Control and Localization for Mobile Sensor Networks," in *Proc Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006. (WCICA)*, vol.2, no., pp.9164-9168.

[4] V. Giordano, P. Ballal, F. Lewis, B. Turchiano, J.B. Zhang, "Supervisory control of mobile sensor networks: math formulation, simulation, and implementation," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol.36, no.4, pp.806-819, Aug. 2006.

[5] Md.A. Rahman, Md.S. Miah, W. Gueaieb, A.E. Saddik, "SENORA: A P2P Service-Oriented Framework for Collaborative Multirobot Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol.7, no.5, pp.658-666, May 2007.

[6] N. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The Cricket Location-Support System," in *Proc. ACM 6th Int. Conf. on Mobile Computing and Networking. (MOBICOM)*, August 2000.

[7] N. Priyantha, A. Miu, H. Balakrishnan, and S. Teller, "The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications," in *Proc. ACM 7th Int. Conf. on Mobile Computing and Networking. (MOBICOM)*, pages 1-14, Rome, Italy, 2001.

[8] A. Ward, A. Jones, A. Hopper, "A new location technique for the active office," *IEEE Personal Communications*, vol.4, no.5, pp.42-47, Oct 1997

[9] C. Randell and H. Muller. "Low Cost Indoor Positioning System," in *Proc. Int. Conf. on Ubiquitous Computing (Ubi-Comp)*, pages 42-48, Atlanta, Georgia, USA, 2001.

[10] M.R. McCarthy, H.L. Muller, "RF free ultrasonic positioning," in *Proc. Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2003*, vol., no., pp. 79-85, 18-21 Oct. 2005

[11] M.R. McCarthy, P. Duff, H.L. Muller, C. Randell, "Accessible Ultrasonic Positioning," *IEEE Pervasive Computing*, vol.5, no.4, pp.86-93, Oct.-Dec. 2006

[12] E.O. Dijk, C.H. van Berkel, R.M. Aarts, E.J. van Loenen, "3-D indoor positioning method using a single compact base station," in *Proc. Second IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications, 2004. (PerCom)*, vol., no., pp. 101-110, 14-17 March 2004

[13] E. Foxlin, M. Harrington, and G. Pfeifer., "Constellation: A Wide-Range Wireless Motion-Tracking System for Augmented Reality and Virtual Set Applications," in *Proc. ACM SIGGRAPH 1998*, pages 371-378, Orlando, Florida, USA, 1998.

[14] www.intersense.com