



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE COMPUTACIÓN

Uso del efecto *Doppler* para detección de obstáculos en desplazamiento peatonal

Tesis que presenta
GUILLERMO MONROY RODRÍGUEZ

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Computación

Director de tesis
Dr. José Guadalupe Rodríguez García

CIUDAD DE MÉXICO

DICIEMBRE, 2016

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología, por la beca otorgada para realizar mis estudios de Maestría.

Al Centro de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, por los recursos materiales y humanos que me proveyeron e hicieron posible obtener el grado de Maestro en Ciencias en Computación.

A mi director de tesis, Dr. José Guadalupe Rodríguez, por el apoyo durante todo el proceso.

A mis sinodales, Dr. Gerardo de la Fraga y Dr. Amilcar Meneses, por su disposición para la revisión de esta tesis.

A la generación de la maestría 2014 del Departamento de Computación. Les deseo a todos éxito en sus objetivos. México puede ser mejor si hacemos cada día nuestras actividades pensando como el ente colectivo que somos.

A mis padres, Blanca y Guillermo; a mi hermana, Yadira; a mi cuñado, Nicolás, por el apoyo, amor y respeto a mi forma de ser, que siempre me han brindado.

Al amor de mi vida, Lizbeth. Tú que al estar conmigo, me colmas de amor, me apoyas, me consuelas, me reprendes, me haces feliz. Haces que sienta que todo es posible.

A mi amigo José Luis Gudiño, con quien comparto inquietudes, anhelos, penas y éxitos, y de quien estoy agradecido por brindarme su amistad desinteresada.

Quiero expresar mi admiración a todos los que me han enseñado algo, a los profesores que a través de sus cursos e investigaciones me han dado la pauta para comprender el mundo de la investigación; a los maestros, que a través de sus obras literarias, de sus tratados, de sus actos, de sus puntos de vista, de sus ideas, o simplemente de su existencia, aportaron belleza y conocimiento a mi vida. Estos maestros me han enseñado que el aquí y el ahora son el espacio y el momento precisos para cambiar el mundo, y que el camino es más importante que el destino.

Índice general

Resumen	XIII
Abstract	XV
1 Introducción	17
1.1 Motivación	18
1.2 Planteamiento del problema	18
1.3 Propuesta de solución	19
1.3.1 Hipótesis	19
1.3.2 Caso de estudio	19
1.4 Metodología	19
1.5 Justificación	20
1.6 Organización del documento	21
2 Marco teórico	23
2.1 Electromagnetismo	24
2.1.1 Historia del estudio del electromagnetismo	24
2.1.2 Formas de onda	26
2.1.3 Ruido sobre ondas	27
2.2 Efecto Doppler	27
2.3 Radar	28
2.3.1 Espectro y bandas electromagnéticas	30
2.3.2 Funciones básicas de radar	33
2.3.3 Clasificaciones de radares	34
2.4 Muestreo de señales	35
2.5 Detección de objetos usando radar	39
2.5.1 Detección empleando un umbral de señal	40
2.5.2 Probabilidad de falsa alarma y detección	41
2.6 Cómputo ubicuo y navegación asistida por el ambiente	43
2.6.1 Wearable Computing	44
2.6.2 Electronic Travel Aids	44
2.6.3 Sistemas de detección de obstáculos para navegación asistida	46

3	Estado del arte	47
3.1	SONAR	47
3.2	LIDAR	50
3.3	LADAR	52
3.4	RADAR	53
3.5	Ventajas y desventajas	54
4	Propuesta de solución	57
4.1	Requerimientos para la detección de obstáculos	57
4.2	Arquitectura del sistema	58
4.2.1	Consumo energético y portabilidad	69
5	Desarrollo	71
5.1	Hardware y software empleados	71
5.1.1	Sensor de microondas para movimiento	72
5.1.2	<i>Arduino</i>	72
5.1.3	Software empleado	75
5.2	Implementación	76
5.2.1	Primera fase	76
5.2.2	Segunda fase	82
5.3	Prototipo final	91
6	Pruebas	93
6.1	Escenarios de pruebas	93
6.2	Plataforma de pruebas	94
6.3	Análisis de resultados	95
6.3.1	Pruebas para la primera fase	95
6.3.2	Pruebas para la segunda fase	99
7	Conclusiones y trabajo futuro	103
7.1	Conclusiones	104
7.2	Trabajo futuro	105
	Acrónimos	107
	Bibliografía	109

Índice de figuras

1.1	Metodología para el desarrollo de tesis	20
2.1	Línea del tiempo de descubrimientos importantes en el campo del electro- magnetismo	25
2.2	Efecto <i>Doppler</i> para un observador y una fuente en movimiento	28
2.3	Bandas del espectro electromagnético, imagen de IEEE.	31
2.4	Diagrama de conversión directa e inversa	36
2.5	Diagrama a bloques de un ADC	36
2.6	Conversión analógico digital ideal	37
2.7	Muestreo periódico de una señal analógica	38
2.8	Función de densidad de probabilidad normal	42
2.9	Área de investigación para resolver el problema de la detección de obstáculos	45
2.10	Aproximaciones de los sistemas para la detección de obstáculos	46
3.1	Diseño de NavBelt	48
3.2	Prototipo del proyecto FIU	49
3.3	Cinturón con sensores ultrasónicos	49
3.4	Diseño de alto nivel del prototipo de la EPFL	50
3.5	Prototipo vOICe	51
3.6	Prototipo del proyecto Virtual Acoustic Space	51
3.7	Prototipo del proyecto de la universidad de Stuttgart	52
3.8	Prototipo NAVI y voluntario probando el sistema.	53
3.9	SmartVision. (a) Diagrama de proyecto SmartVision, (b) SmartVision en exteriores con etiquetas RFID.	53
3.10	Usuario que navega con el uso del sistema SLAM	54
3.11	Cronograma de trabajos <i>wearables</i> bajo ETA	54
4.1	Arquitectura del sistema para la detección de obstáculos: vista lógica . . .	60
4.2	Arquitectura: vista de despliegue	61
4.3	Arquitectura: vista física o de <i>Hardware</i>	62
4.4	Diagrama de bloques y dispositivo físico del Sensor HB100	63
4.5	Etapa de amplificación para HB100	64
4.6	Etapa de amplificación para onda intermitente	65
4.7	Detalle para el bloque procesador de señal	67

4.8	Aplicación de un cancelador de ruido	67
4.9	Umbralización de muestras	68
5.1	Plataformas <i>Arduino</i>	72
5.2	Partes de la plataforma <i>Arduino</i>	73
5.3	Montaje del módulo de amplificación de la señal	78
5.4	Interfaz de visualización para sistema basado en HB100	80
5.5	Diagrama de diseño para acondicionar la señal del sensor HB100	85
5.6	PCB para HB100	85
5.7	Montaje del prototipo en la fase 2	86
5.8	Sistema <i>wearable</i> para detección de obstáculos	91
6.1	Escenario de prueba sin obstáculos	94
6.2	Escenario de prueba con entrada	94
6.3	Escenario de prueba sin obstáculos	95
6.4	Archivo ejemplo de datos en la prueba del escenario 1 en la fase 2	96
6.5	Tres muestras caso de espacio libre fase 1	97
6.6	Tres muestras caso de apertura en el camino fase 1	98
6.7	Tres muestras caso de espacio cerrado fase 1	98
6.8	Muestra en escenario de espacio libre	100
6.9	Muestra en escenario parcialmente cerrado	101
6.10	Muestra en escenario cerrado	101

Índice de tablas

3.1	Comparativa de los prototipos	55
4.1	Características de peatones	58
4.2	Tiempos de respuesta necesarios para el sistema de detección	58

Índice de códigos

5.1	Función para la generación de trenes de pulsos	76
5.2	Conversión de señal analógica a digital	77
5.3	Muestreo y almacenamiento de las señales recibidas	78
5.4	Función para calcular frecuencias de entrada analógica	79
5.5	Filtrado para detectar objetos que se aproximen o alejen a velocidad peatonal	80
5.6	Función setup() de la interfaz de visualización	81
5.7	Función draw() para la interfaz de visualización	81
5.8	Función para crear la rejilla	82
5.9	Control de modo	83
5.10	Funciones para calibrar frecuencia Fx y ancho de pulso	84
5.11	Muestreo de frecuencias para la fase 2	86
5.12	Cancelador de ruido como función auxiliar de samplingWithCanceller . .	87
5.13	Función de envío de dos pulso consecutivos	87
5.14	Integrador	88
5.15	Detector de umbral	88
5.16	Función de alarma en el módulo detector	89
5.17	Retroalimentación sonora para el usuario	90
5.18	Comunicación serial	90

Resumen

En este trabajo se propone el uso del efecto *Doppler* para detectar obstáculos a velocidades de desplazamiento peatonal que se encuentra entre 0.19 y 1.21 m/s , siendo la velocidad peatonal típica de 0.6166 m/s . El procesamiento de las señales producto del efecto *Doppler*, permite detectar el movimiento y calcular las velocidades de los objetos en el entorno a partir del cambio de frecuencia en las ondas transmitidas y recibidas. El efecto *Doppler* sobre las microondas nos permite alcanzar distancias de propagación mayores a 15 metros.

Para detectar obstáculos en un entorno se debe obtener: la ubicación, distancia y tamaño de los objetos que obstruyen el paso en la trayectoria del desplazamiento. En los últimos 30 años se ha abordado el problema de la detección de obstáculos desde varios enfoques: usando imágenes, usando láser y usando ondas de sonido. Los resultados de estas aproximaciones han llevado a la generación de sistemas de detección de obstáculos con avances significativos; sin embargo, la distancia máxima a la que estos sistemas son capaces de detectar obstáculos es de cinco metros para entornos controlados. Además, estos enfoques presentan desventajas debido a factores como: temperatura, humedad en el medio, poca visibilidad, lluvia, ausencia de luz solar, baja calidad de las imágenes, complejidad en el procesamiento de los datos, entre otras. Las desventajas que las aproximaciones han reportado nos dan la oportunidad de explorar el efecto *Doppler* para la detección de obstáculos usando microondas electromagnéticas, empleando un sistema radar que se pueda portar o vestir: *wearable*.

Se propone la detección de obstáculos estáticos, dentro de entornos no controlados. El sistema que se propone es capaz de ayudar a la navegación del entorno y propone una mejora en el alcance de distancia en comparación con los sistemas estudiados hasta el momento. Se emplea el efecto *Doppler* en la banda *X* (10.525 GHz) para la detección de obstáculos. Además, se propone una arquitectura e implementación de un sistema *wearable*, para asistir al portador en la navegación de entornos no controlados con retroalimentación para el usuario.

Para la construcción del sistema se obtiene información del entorno, se acondiciona la señal y después, se procesa para identificar los obstáculos en una trayectoria definida. Por último se presentan los resultados al usuario, a través de una interfaz sonora. El uso de *Arduino* hace posible implementar los bloques de procesamiento de la señal mediante software, evitando el diseño y armado de circuitería electrónica. Se requiere del acondicionamiento de la señal del sensor para emplear su señal en la plataforma de desarrollo *Arduino*. El diseño de la etapa de procesamiento de la señal está basada en los principios de sistemas de radares. El sistema se compone físicamente de un sensor de frecuencias de microondas, un microcontrolador sobre la plataforma *Arduino*, un conversor analógico digital, un amplificador de señal y una bocina.

Palabras clave: efecto *Doppler*, detección de obstáculos, navegación peatonal, sistema de radar, dispositivos vestibles.

Abstract

In this work we propose to use the Doppler effect in order to detect obstacles at pedestrian travel speeds. The pedestrian travel speeds are between 0.19 and 1.21 *m/sec*, typically 0.6166 *m/sec*.

The processing of the signals produced by the Doppler effect, allows to detect the movement and to calculate the velocities of objects in the environment, through the change of frequency in the transmitted and received waves. The Doppler effect on microwaves allows to reach distances of propagation greater than 15 meters.

To detect obstacles in an environment, several parameters must be considered: location, distance and size of objects that block the passage in the trajectory of the displacement. In the last 30 years the problem of obstacle detection has been tackled from several approaches: images, lasers, and sound waves. The results of these approaches have led to the generation of obstacle detection systems with significant advances.

However, the maximum distance at which these systems are capable of detecting obstacles is up to five meters for controlled environments. In addition, these approaches have disadvantages due to factors such as: temperature, humidity, visibility, rainfall, sunlight absence, image quality, complexity in data processing, among others. These disadvantages have given us the opportunity to explore the Doppler effect for the detection of obstacles using electromagnetic microwaves on a wearable radar system.

This proposal aims to detect static obstacles within uncontrolled environments. The proposed system is capable of helping the navigation in the environment and proposes an improvement in the range of distance compared to the systems studied so far. The Doppler effect on the X band (10.525 GHz) is used for the detection of obstacles. In addition, we propose an architecture and implementation of a wearable system, to assist the bearer in navigating in uncontrolled environments with feedback for the user.

For the construction of the system, the information is obtained from the environment, the signal is conditioned and then processed to identify the obstacles in a defined path. Finally, the results are presented to the user, through a sound interface. The use of Arduino makes possible to implement the signal processing through software, avoiding the design and assembly of electronic circuitry. The conditioning of the signal from sensor is required in order to processing it on an Arduino device.

The processing signal stage is designed following the principles of the radars systems. This proposal is composed of a microwave sensor, an Arduino microcontroller, an analogic-digital converter, a signal amplifier, and a speaker.

Keywords: *Doppler effect, obstacle detection, pedestrian navigation, radar system, wearable.*

Introducción

CONTENIDO

1.1	Motivación	18
1.2	Planteamiento del problema	18
1.3	Propuesta de solución	19
1.3.1	Hipótesis	19
1.3.2	Caso de estudio	19
1.4	Metodología	19
1.5	Justificación	20
1.6	Organización del documento	21

Gracias al rápido desarrollo de la electrónica en las últimas décadas, actualmente se tienen disponibles dispositivos electrónicos como: sensores, microcontroladores, sistemas de radiofrecuencias, antenas, entre otros. El desarrollo tecnológico hace posible la creación de sistemas que pueden medir casi cualquier magnitud física del entorno. El desarrollo acelerado en los dispositivos y sistemas ha creado la necesidad de integración entre ellos para lograr diversos objetivos como son: investigar fenómeno ambientales y crear soluciones que impliquen varias áreas del conocimiento, por mencionar algunos. El cómputo ubicuo es el marco bajo el cual las tecnologías electrónicas y computacionales (como los sistemas de sensores, los protocolos de comunicación computacional y las arquitecturas de hardware y software) se integran para desarrollar soluciones que exploren las fronteras de áreas como: electrónicas, domótica, internet de las cosas, sistemas de monitoreo para la salud, redes de sensores, sistemas de radar e inteligencia ambiental.

Acorde con la necesidad de integrar los avances tecnológicos y científicos surge nuestro interés en explorar la detección de obstáculos empleando el efecto *Doppler* para ondas de radio.

El problema de la detección de obstáculos implica obtener en un entorno específico, la ubicación, distancia o tamaño de los objetos que obstruyen el paso en la trayectoria del desplazamiento. En los últimos 30 años se ha abordado el problema de la detección de obstáculos desde varios enfoques: procesamiento de imágenes (LIDAR¹), usando rayo láser (LADAR²), usando ondas sonoras (SONAR³) y usando ondas electromagnéticas (RADAR⁴). Los resultados de estas aproximaciones han llevado a la generación de sistemas de detección de obstáculos con avances significativos; sin embargo, la distancia máxima a la que estos sistemas son capaces de detectar obstáculos es de máximo cinco metros para entornos controlados. Basado en [1] podemos afirmar que la aproximación menos recurrente en los sistemas de detección de obstáculos es por RADAR.

Además, estos enfoques presentan desventajas debido a factores como temperatura, humedad en el medio, poca visibilidad, lluvia, ausencia de luz solar, baja calidad de las imágenes y complejidad en el procesamiento de los datos. Estas desventajas crean la oportunidad de explorar el efecto *Doppler* para la detección de obstáculos usando microondas electromagnéticas en un sistema de radar que se puede portar o vestir (*wearable*).

Por un lado se define cómputo ubicuo como la capacidad informática que se integra en el contexto humano de manera desapercibida⁵. Por otro lado, el *wearable computing* se define como una rama del cómputo ubicuo que trata sobre los dispositivos o sistemas que se pueden portar, como la vestimenta, con un propósito específico. Bajo la panorámica de *wearable computing* existen tres ramas en donde ubicar los sistemas de detección de obstáculos: *ETA (Electronic Travel Aids)*, *EOA (Electronic Orientation Aids)* y *PLO (Position Locator Devices)*.

La visión es la capacidad de percibir, a partir de los efectos de la luz (tales como la propagación, la reflexión y la refracción), información del medio ambiente que al ser procesada se interpreta como objetos, colores, distancias, tamaños y texturas. Cuando un sistema u organismo carece de la capacidad de visión, surge la necesidad de contar con otro sistema que sea capaz de procesar e interpretar la información del ambiente para sustituir dicha capacidad. En el marco de la visión, la función de detectar obstáculos consiste en identificar la ubicación, la distancia o el tamaño de los objetos que obstruyen el paso en una trayectoria dada.

En este trabajo se propone el empleo del efecto *Doppler* para detectar obstáculos mediante un sistema de radar en forma de *wearable*. Se quiere detectar obstáculos estáticos y en movimiento,

¹Light Imaging Detection and Ranging

²Laser Detection and Ranging

³Sound Navigation and Ranging

⁴Radio Detection and Ranging

⁵<http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/SciAmDraft3.html> | fecha de acceso: 3 de agosto de 2016.

dentro de entornos reales no controlados. Además, se espera que el sistema sea capaz de realizar una navegación del entorno con mayor precisión que los sistemas estudiados hasta el momento.

El uso del efecto *Doppler* para detectar obstáculos puede mejorar la detección a velocidades de desplazamiento peatonal. Las velocidades de desplazamiento peatonal, acorde con [2], se encuentra entre 0.19 y 1.21 m/s , siendo la velocidad típica de 0.6166 m/s que nos permiten tener una ventana de tiempo apropiada para el procesamiento de las señales. El procesamiento de las señales producto del efecto *Doppler* permite detectar el movimiento y calcular las velocidades de los objetos en el entorno a partir del cambio de frecuencia en las ondas transmitidas y recibidas.

El efecto *Doppler* sobre las microondas permite alcanzar rangos de propagación de las ondas mayores a 15 metros con dispositivos de baja potencia de consumo, que además son pequeños.

1.3 Propuesta de solución

En este trabajo se plantea la detección de obstáculos estáticos, dentro de entornos no controlados. Se propone una arquitectura de radar para radiofrecuencias que aprovecha el efecto *Doppler* en la banda *X* para la detección de obstáculos.

1.3.1 Hipótesis

Si se detectan obstáculos, contornos y objetos en movimiento del entorno usando el efecto *Doppler* entonces se puede anticipar las colisiones, conocer las distancias y dimensiones de los objetos.

1.3.2 Caso de estudio

Las personas débiles visuales tienen limitaciones de movilidad debido a su discapacidad visual, son susceptibles de accidentes y de dependencia de terceros para poder realizar sus actividades cotidianas tales como transportarse, hacer uso de servicios públicos, encontrar una ruta para llegar a su destino, etc.

1.4 Metodología

Para esta tesis de Maestría se tiene la siguiente metodología (figura 1.1):

Documentación. Realización del estado del arte sobre sistemas de detección de obstáculos, a través de una revisión bibliográfica continua. Documentar las ideas y propuesta de diseño que ayuden a clarificar las partes del sistema, y a tener una panorámica del desarrollo.

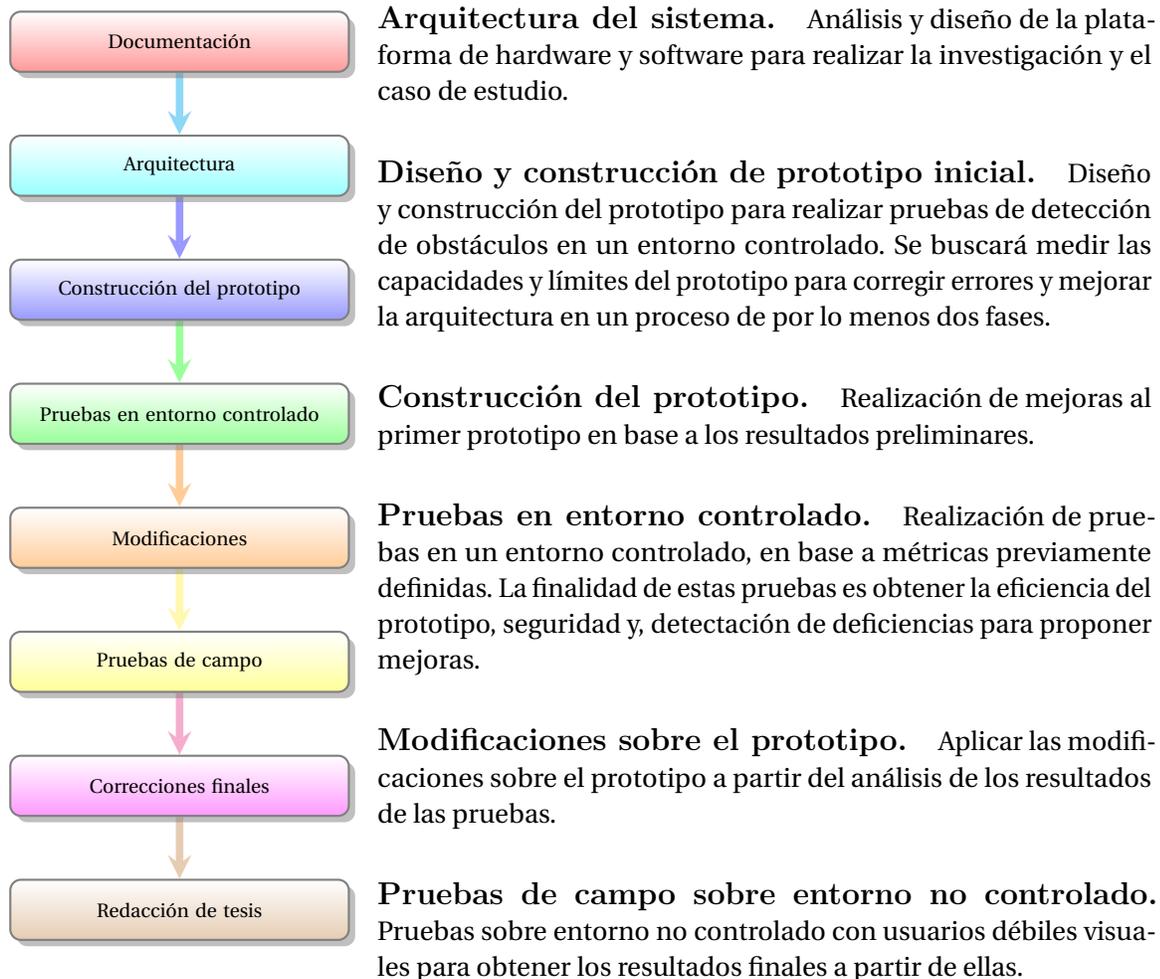


Figura 1.1: Metodología para el desarrollo de tesis

Redacción de tesis y artículo. Redacción de tesis.

1.5

Justificación

El efecto *Doppler* es el cambio de frecuencias entre la frecuencia de la onda propagada y la onda reflejada por un objeto. El efecto *Doppler* se produce para cualquiera que sea su naturaleza de las ondas: sonoras, radiofrecuencias o luz.

Fenómenos de la vida diaria tales como movimiento de objetos, emisión de sonido, propagación de la luz y propagación del calor, están asociados al efecto *Doppler* por lo tanto se puede estudiar los fenómeno mediante el análisis del comportamiento del efecto *Doppler*. La investigación del efecto *Doppler* para la detección de obstáculos es importante para lograr una visión artificial en entornos con poca visibilidad, condiciones ambientales peligrosas, apoyo a personas con problemas de visión, entre otros.

Para explorar el efecto *Doppler* asociado a la propagación de ondas de radiofrecuencias y usarlo para detectar obstáculos fue necesario construir un sistema basado en RADAR. El sistema se compone físicamente de un sensor de frecuencias de microondas, un microcontrolador sobre la plataforma *Arduino*, un conversor analógico digital, un amplificador de señal y etapa de salida para el usuario. El sistema de detección de obstáculos se desarrolló empleando un sensor para el efecto *Doppler* en la banda *X*, el cual es básicamente un dispositivo de RADAR. Se desarrolló el procesamiento de la señal teniendo como base los principios de sistemas de RADAR.

1.6 Organización del documento

Esta tesis está organizada en siete capítulos. En el [segundo](#) capítulo se revisan conceptos relevantes para comprender el estado del arte, la propuesta de solución al problema y en general, el resto del documento. En el [tercer](#) capítulo se revisan los trabajos relevantes que conforman el estado del arte de esta tesis. En el [cuarto](#) capítulo se expone la propuesta de solución para dar respuesta a la hipótesis planteada. En el [quinto](#) capítulo se plantea el desarrollo: construcción del prototipo en dos fases y el resultado de cada una. En el [sexto](#) capítulo se describen las pruebas al sistema y se analizan los resultados de las mismas. Y por último en el [séptimo](#) se tratan las conclusiones derivadas de esta tesis y el trabajo futuro.

Marco teórico

CONTENIDO

2.1	Electromagnetismo	24
2.1.1	Historia del estudio del electromagnetismo	24
2.1.2	Formas de onda	26
2.1.3	Ruido sobre ondas	27
2.2	Efecto Doppler	27
2.3	Radar	28
2.3.1	Espectro y bandas electromagnéticas	30
2.3.2	Funciones básicas de radar	33
2.3.3	Clasificaciones de radares	34
2.4	Muestreo de señales	35
2.5	Detección de objetos usando radar	39
2.5.1	Detección empleando un umbral de señal	40
2.5.2	Probabilidad de falsa alarma y detección	41
2.6	Cómputo ubicuo y navegación asistida por el ambiente	43
2.6.1	Wearable Computing	44
2.6.2	Electronic Travel Aids	44
2.6.3	Sistemas de detección de obstáculos para navegación asistida	46

En este capítulo revisaremos los conceptos básicos para entender las partes de la propuesta, a saber: La teoría electromagnética básica, el efecto *Doppler* sobre ondas electromagnéticas, el espectro electromagnético, los sistemas de RADAR, el procesamiento digital de señales, entre otros. Con lo anterior se pretende dar un fundamento suficiente para explicar el desarrollo del

presente trabajo de tesis dado que involucra varias disciplinas (Física, Electrónica, Sistemas de RADAR y Procesamiento de señales), además del área computacional.

2.1 Electromagnetismo

El electromagnetismo tiene sus inicios en observaciones de la cultura griega sobre fenómenos eléctricos y magnéticos alrededor del año 700 a.C. El filósofo griego Tale de Mileto observó que un pedazo de ámbar frotado con un paño de lana era capaz de atraer trozos de paja o trozos de tela. La palabra griega para ámbar es *elektron* de la cual se derivan términos como: electrón, electricidad, electrónica, entre otras. También se conocía la existencia de la fuerza magnética al observar que pedazos de roca natural llamada magnetita atraían partículas de hierro. [3]

Definimos que el electromagnetismo es el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos causados por cargas eléctricas en reposo o en movimiento [4].

2.1.1 Historia del estudio del electromagnetismo

En 1600, William Gilbert descubre que la electrificación no estaba limitada al ámbar sino que éste era un fenómeno general de la materia. Posteriormente, experimentos realizados por Charles Coulomb en 1785 confirmaron el comportamiento de las cargas electrostáticas en cualquier cuerpo y su relación a la distancia y fuerza de atracción o repulsión entre dos o más cargas [3].

En 1831, Michael Faraday y Joseph Heary, demuestran que, cuando los campos de fuerza magnética de un imán son cortados por una sección de un conductor eléctrico en este se induce una corriente eléctrica [3].

En 1873, James Clerk Maxwell, basado en los estudio de los fenómenos electromagnéticos de sus antecesores, formula leyes del electromagnetismo que se conocen actualmente como ecuaciones de Maxwell que explican en su totalidad los fenómenos electromagnéticos [3].

En 1878, Henrich Hertz verifica las predicciones de Maxwell produciendo y transmitiendo ondas electromagnéticas en el laboratorio. Las contribuciones de Maxwell a la ciencia del electromagnetismo fueron especialmente significativas debido a que las leyes formuladas por el son básicas para todas las formas de los fenómenos los electromagnéticos [3].

Presentamos en la figura 2.1 una breve línea del tiempo de los sucesos relacionados con el electromagnetismo.

Se define una onda electromagnética como la onda producida por la aceleración de una carga eléctrica y propagada por la variación periódica de las intensidades de, por lo general, los campos eléctricos y magnéticos perpendiculares [5].

A partir de [4] presentamos a continuación, la naturaleza del campo electromagnético descrito

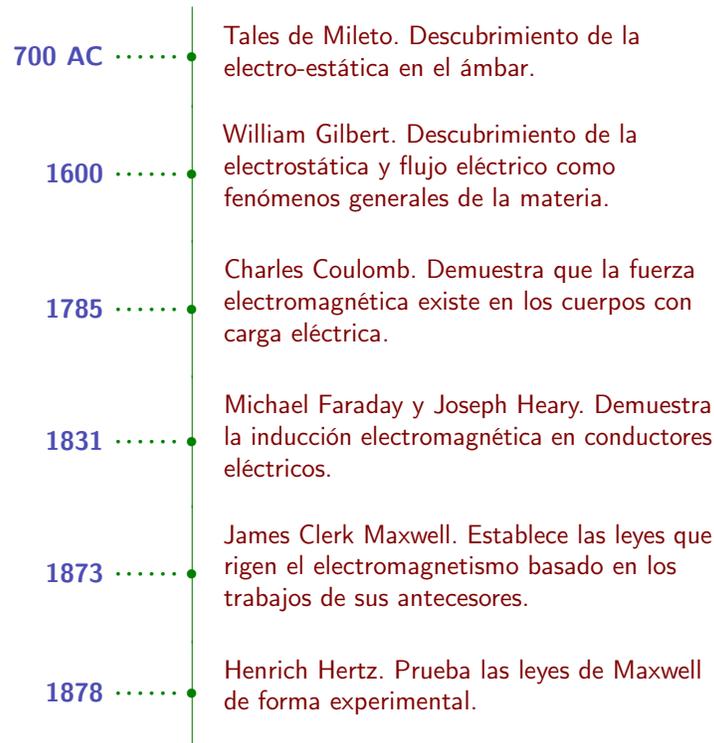


Figura 2.1: Línea del tiempo de descubrimientos importantes en el campo del electro-magnetismo

por las ecuaciones de Maxwell.

Ley de Gauss para campo eléctrico:
$$\oint_{\text{superficie cerrada}} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

La expresión anterior explicaba que el flujo de campo eléctrico que atraviesa cualquier superficie cerrada es igual al valor de la carga neta que hay en el interior de la superficie (Q_{enc}) dividida por la permitividad¹ del vacío (ϵ_0). En otras palabras, dado que las líneas de campo solo pueden comenzar o acabar en una carga eléctrica, el balance neto entre las líneas que “salen” y las que “entran” en la superficie cerrada solo puede ser calculadas debido a la presencia de carga neta en su interior. Si esta carga es cero, el número de líneas de campo que atraviesan el área en un sentido debe ser el mismo que en el otro.

¹La permitividad (llamada también constante dieléctrica) es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio

$$\text{Ley de Gauss para campo magnético: } \oint_{\text{superficie cerrada}} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.2)$$

La ley de Gauss para el magnetismo enuncia que el balance de flujo de campo magnético que atraviesa cualquier superficie cerrada debe ser siempre cero. En otras palabras, que no existen “cargas magnéticas” donde puedan comenzar o acabar las líneas de campo y, por tanto, que el número de líneas que “entran” dentro la superficie debe ser el mismo que las que “salen”.

$$\text{Ley de Faraday: } \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.3)$$

A diferencia de las dos primeras, una primera relación entre el campo eléctrico y el campo magnético. En este caso, se explica cómo un campo magnético variable crea o modifica el campo eléctrico. Es decir, que el rotacional del campo eléctrico \vec{E} en un punto cualquiera es igual al ritmo de variación (la derivada respecto al tiempo) del campo magnético B en aquel mismo punto, cambiado de signo.

$$\text{Ley de Ampere-Maxwell: } \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} + \mu_0 i_{enc} \quad (2.4)$$

La ley de Ampère-Maxwell establece que la integral de línea de un campo magnético alrededor de un circuito cerrado es proporcional a la corriente que atraviesa la superficie imaginaria dibujada por este circuito. Es decir, relaciona el campo magnético en una región con su causa, las corrientes eléctricas: cargas en movimiento.

Nos interesa la interacción de las ondas electromagnéticas con la materia que se dan en antenas, atmósfera y obstáculos. Los principios físicos que gobiernan las interacciones de las ondas electromagnéticas con la materia son la difracción (en la antena); atenuación, refracción y despolarización (en la atmósfera); y, por último, la reflexión (en los obstáculos). Adelante en este capítulo se relacionarán estos fenómenos físicos con los correspondientes componentes del sistema propuesto.

2.1.2

Formas de onda

Existen diversas formas de onda electromagnéticas, pero podemos tomar los dos casos principales: Forma de onda continua y forma de onda de intermitente.

Onda continua. Las ondas electromagnéticas continuas son generadas por algún tipo de oscilador y no son interrumpidas en ningún momento, este tipo de onda es periódica. La frecuencia puede ser o no constante.

Onda intermitente. Las ondas electromagnéticas intermitentes son generadas a partir de un oscilador de onda continua y son interrumpidas periódicamente. Al tiempo de interrupción de la onda está asociado con el llamado duración del ciclo, la frecuencia a la que se interrumpe la onda se le denomina: frecuencia de repetición del pulso (PRF¹).

2.1.3

Ruido sobre ondas

Se denomina ruido a las ondas que son producto de la agitación térmica de las moléculas del material que forma los conductores o el movimiento desordenado de los electrones y de otros portadores de corriente. El comportamiento del ruido normalmente interfiere con la propagación y con la recepción de ondas que contienen información deseada por los diseñadores de sistemas. Este fenómeno es inevitable y sucede en toda la materia, debido a que aunque parezca inmóvil, toda materia se encuentra en movimiento. Todos los objetos en el universo cuya temperatura esta por encima del cero absoluto (0 grados *Kelvin*), emite el llamado ruido térmico. El ruido térmico emite, prácticamente, todas las frecuencias del espectro electromagnético. Distinguir el ruido de las señales útiles es uno de los principales retos para cualquier sistema que emplee ondas electromagnéticas.

2.2

Efecto Doppler

El efecto *Doppler* es llamado así en honor a su descubridor, Christian Andreas Doppler². Acorde con [6], el efecto *Doppler* es el cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. *Doppler* describió este efecto en 1842 en su tratado *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels* [7], el cual trata sobre el color de la luz en estrellas binarias y otros astros

En 1843, el efecto *Doppler* fue probado experimentalmente[8]. El experimento se realizó empleando un tren haciendo sonar su bocina y que se movía a distintas velocidades. La longitud de onda de la fuente de sonido es definida por $\lambda = \frac{C_{sonido}}{f}$, donde C_{sonido} es la velocidad de propagación de la onda sonora en el medio dado y f es la frecuencia del sonido producido por la fuente. Se tienen tres casos para el modelo del efecto *Doppler*.

Caso 1: Si solo se mueve la fuente a una velocidad v_s relativa al medio, la frecuencia percibida por el observador, como lo muestra la figura 2.2, es:

$$f' = \frac{C_{sonido}}{C_{sonido} \pm v_s} \cdot f = \frac{1}{1 \pm v_s / C_{sonido}} \cdot f \quad (2.5)$$

¹Pulse Repetition Frequency

²Físico y matemático austriaco (1803–1853).

Si $v_s/C_{sonido} \ll 1$, entonces el cambio de frecuencia *Doppler* percibida por el observador es aproximadamente:

$$f' = \frac{1}{1 \pm v_s/C_{sonido}} \cdot f \cong \left(1 \pm \frac{v_s}{C_{sonido}}\right) \cdot f \quad (2.6)$$

Caso 2: Si la fuente es estacionaria y el observador se mueve con una velocidad v_0 relativa al medio, la frecuencia percibida por el observador es:

$$f' = \frac{C_{sonido} \pm v_0}{C_{sonido}} \cdot f = \left(1 \pm \frac{v_0}{C_{sonido}}\right) \cdot f \quad (2.7)$$

Caso 3: Si el observador y la fuente se encuentran en movimiento simultáneamente, la frecuencia percibida por el observador es:

$$f' = \frac{C_{sonido} \pm v_0}{C_{sonido} \mp v_s} \cdot f = \frac{1 \pm \frac{v_0}{C_{sonido}}}{1 \mp \frac{v_s}{C_{sonido}}} \cdot f \quad (2.8)$$

Cuando la fuente y el observador se aproximan entre sí, el signo + del signo \pm en la ecuación 2.8 se aplica, si por el contrario, la fuente y el observador se alejan se aplica el signo – del signo \mp a dicha ecuación.

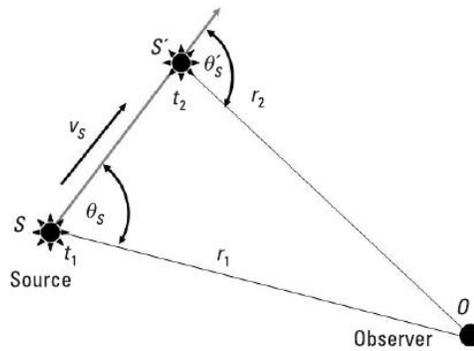


Figura 2.2: Efecto *Doppler* para un observador y una fuente en movimiento

2.3 Radar

Esta sección esta basada en [9] y [10]. Un RADAR es aquel dispositivo o sistema que transmite y recibe señales de radio de forma síncrona. El procesamiento de las señales recibidas proporciona

una medida de distancia relativa al objeto que reflejó las señales. Sir Robert Watson-Watt es considerado el inventor del RADAR. Después de la verificación de los principios experimentales del RADAR, Watson-Watt obtuvo la patente en 1935.

Los dispositivos o sistemas RADAR transmiten señales electromagnéticas hacia un objeto y reciben de regreso una señal del mismo objeto. En base al tiempo de regreso de la señal que regresa, el RADAR puede medir la distancia a la que se encuentra el objeto. Si un objeto se mueve, la frecuencia de la señal recibida estará desplazada con respecto de la señal original o transmitida (Figura 2.2).

Se puede medir el alcance, o la distancia, con base en las propiedades de la energía electromagnética radiada. Esta energía normalmente viaja a través del espacio en línea recta, a velocidad constante y con variaciones mínimas ocasionadas por fenómenos atmosféricos y condiciones meteorológicas. La energía electromagnética viaja a través del aire a aproximadamente la velocidad de la luz, trescientos mil kilómetros por segundo.

Las ondas electromagnéticas se reflejan sobre superficies conductoras; por lo tanto, si las ondas reflejadas retornan al punto de emisión de las ondas se puede inferir que se encuentra un obstáculo en la trayectoria de propagación.

La distancia se determina usando como referencias el tiempo en que la señal de alta frecuencia transmitida golpea el objetivo y la constante de propagación C_0 . Una forma de medir la distancia entre el radar y un objeto es transmitir un pequeño pulso electromagnético y medir el tiempo que tarda el eco en volver. La distancia de un objetivo desde el radar se conoce como alcance inclinado. El alcance inclinado es la distancia del RADAR hacia cada blanco u objetivo medido perpendicular a la línea del vuelo. Mientras el alcance terrestre es la distancia horizontal entre el emisor y su objetivo. El cálculo de la distancia requiere el conocimiento de la elevación del objetivo.

Dado que las señales viajan al objetivo y regresan, el tiempo que se demoran en ir y regresar es dividido por dos para obtener el tiempo que la señal toma para llegar al objetivo. Por lo tanto surge la siguiente fórmula para calcular el rango:

$$R = \frac{c_0 t}{2} \quad (2.9)$$

De la ecuación 2.9, c_0 = velocidad de la luz = 3×10^8 [m/s], t = tiempo [s] y R = rango [m]. Rango es la distancia desde el radar hasta el objetivo detectado a lo largo de la línea de visión.

$$v = \frac{s}{t} \quad (2.10)$$

El factor de dos en (2.9) se obtiene si analizamos que la señal va hasta el objetivo y regresa antes de ser detectado.

$$C_0 = \frac{2R}{t}, \quad (2.11)$$

$$R = \frac{C_0 t}{2} \quad (2.12)$$

La resolución del objetivo de un radar es su capacidad para distinguir entre objetivos que están muy cercanos en rango o en rumbo. El radar de control de armas, requiere gran precisión y deberá ser capaz de distinguir entre los objetivos que están a unos metros de distancia. El RADAR de búsqueda es generalmente menos preciso y sólo distingue entre objetivos que están alejados unos de otros. La resolución es dividida generalmente en dos categorías; resolución en rango y resolución en dirección.

La resolución en rango es la habilidad de un sistema de radar para distinguir entre dos o más objetivos en el mismo dirección pero a diferente distancia. El grado de resolución en rango depende del ancho del pulso transmitido, del tipo y tamaño de los objetivos, y de la eficiencia del receptor y la pantalla. El ancho del pulso es el factor primario en la resolución en distancia. Un sistema bien diseñado de RADAR, con todos los otros factores en la máxima eficiencia, deberán tener la habilidad para distinguir objetivos que se encuentren separados a la mitad del tiempo del ancho del pulso τ . De cualquier manera, teóricamente la resolución en distancia para un sistema de radar puede ser calculado teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$S_r \geq \frac{C_0 \tau}{2} \quad (2.13)$$

2.3.1

Espectro y bandas electromagnéticas

El espectro de las ondas electromagnéticas muestra las frecuencias hasta 1024 Hz. Esta extensa y completa gama es subdivida en subgrupos para tener en cuenta las propiedades físicas de las ondas que lo componen.

La división de las frecuencias en los distintos rangos fue determinada teniendo en cuenta criterios pasados, los cuales surgieron históricamente y fueron quedando obsoletos, entonces una nueva división de las bandas de frecuencia que se utilizan a nivel internacional. El nombre tradicional de banda de frecuencias todavía se utiliza en la literatura.

Los sistemas de radar trabajan en una amplia banda de frecuencias de transmisión. Cuanto mayor sea la frecuencia de un sistema de radar, tanto más se ve afectada por condiciones meteorológicas como la lluvia o las nubes. Pero entre mayor es la frecuencia de transmisión, mejor es la precisión del sistema de radar.

El uso de estas bandas de radar por debajo de 300 MHz tienen una larga tradición histórica, porque estas frecuencias representan la frontera de la tecnología de radio en el tiempo durante la Segunda Guerra Mundial. Hoy en día estas frecuencias se utilizan para los radares de alerta temprana llamados radares sobre el horizonte (OTH¹).

Utilizando estas frecuencias más bajas, es más fácil obtener transmisores de alta potencia. La atenuación de estas ondas electromagnéticas es más bajo que el uso de frecuencias más altas. Por otra parte, la precisión es limitada, ya que una menor frecuencia requiere antenas físicamente muy grandes, las cuales determinan el ángulo de precisión y el ángulo de resolución. Estas

¹Over The Horizon

bandas de frecuencia son utilizadas por otros sistemas de comunicaciones y por los servicios de radiodifusión también, por lo tanto el ancho de banda de este radar es limitado (a expensas de la precisión y la resolución).

Estas bandas de frecuencia están experimentando actualmente un regreso y se les está dando un significado especial en aplicaciones militares. Esta sección se redactó en base a [10] la siguiente descripción para las bandas empleadas por los sistemas de RADAR, como se muestra en la figura 2.3.

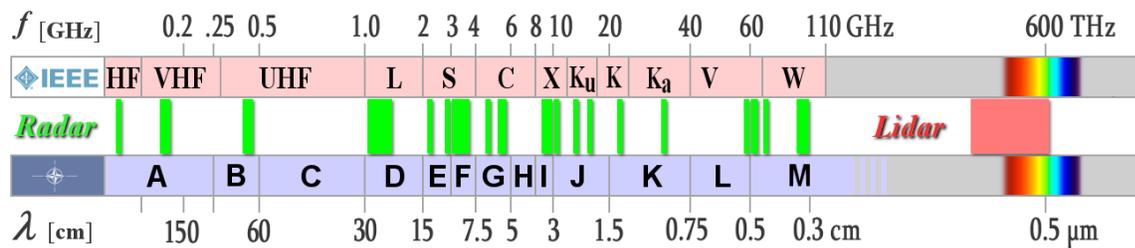


Figura 2.3: Bandas del espectro electromagnético, imagen de IEEE.

Banda C (Banda Radar UHF¹). Existen algunos conjuntos de radares especializados, desarrollados para esta banda de frecuencia (300 MHz a 1 GHz). Es una buena frecuencia para el funcionamiento de los radares, para la detección y el seguimiento de satélites y misiles balísticos cubriendo largas distancias. Estos radares funcionan para alerta temprana y detección de objetivos como radar de vigilancia para el Sistema de Defensa Aérea Extendida Media (Medium Extended Air Defense System, MEADS). Para algunas aplicaciones como radar meteorológico, ejemplo: perfiladores de viento trabajan con estas frecuencias ya que las ondas electromagnéticas son muy poco afectadas por las nubes y la lluvia.

La nueva tecnología de radares de banda ultra ancha (Ultrawideband, UWB) utiliza todas las frecuencias de las bandas A-a-C. Los radares UWB transmiten pulsos muy bajos en todas las frecuencias simultáneamente. Estos son utilizados para examinar técnicamente materiales y como Radar de Penetración Terrestre (Ground Penetrating Radar, GPR) para exploraciones arqueológicas.

Banda D (Banda Radar L). Esta banda de frecuencias (1 a 2 GHz) es la preferida para el funcionamiento de los radares de vigilancia aérea de largo alcance por encima de 250 NM^2 ($\sim 400 \text{ km}$). Estos radares transmiten pulsos de alta potencia, ancho de banda amplio y una modulación intrapulsada. Debido a la curvatura de la tierra, el rango máximo alcanzable es limitado para los objetivos que vuelan con baja altitud. Estos objetos desaparecen muy rápido tras el horizonte del radar.

²nudos marinos

En el manejo del tráfico aéreo (ATM), los radares de vigilancia de largo alcance como el radar de vigilancia de ruta aéreas (ARSR) trabaja en esta banda de frecuencia. Acoplado con un radar de vigilancia de mono pulso secundario (MSSR) que utilizan una proporción relativamente grande, y muy lenta rotación de antena. Como una especie de rima nemotécnica se puede recordar que los radares de banda L tienen antena de gran tamaño o largo alcance.

Banda E/F (Banda Radar S). En la banda de frecuencia de 2 a 4 GHz la atenuación atmosférica es ligeramente superior que en la Banda D. Los equipos de radar en esta banda necesitan una potencia de transmisión mayor a la usada en los rangos más bajos de frecuencia para lograr un alcance máximo bueno. Como ejemplo dado, el radar de energía media (MPR), con una potencia de impulso de hasta 20 MW. En este rango de frecuencia la influencia de las condiciones meteorológicas es mayor que en la banda D. De cualquier modo, algunos radares meteorológicos trabajan esta Banda E/F, pero sobretodo en condiciones climáticas subtropicales y tropicales, porque es aquí donde el radar puede ver más allá de una fuerte tormenta.

Radares Especiales de Vigilancia en Aeropuertos (ASR) se utilizan en los aeropuertos para detectar y mostrar la posición de la aeronave en el terminal aéreo con un alcance medio de hasta 50-60 NM (~ 100 km). Un ASR sirve para apoyar a los controladores aéreos pues detecta la posición de las aeronaves y las condiciones meteorológicas en las proximidades de los aeropuertos civiles y militares. Como una especie de rima nemotécnica se puede recordar que los radares de banda S (contrario a la banda L) tienen una antena pequeña o corto alcance.

Banda G (Banda Radar C). En la banda de frecuencia G hay muchos sistemas móviles de vigilancia usados en el campo de batalla militar, control de misiles y conjuntos de radares de vigilancia con un corto o mediano alcance. El tamaño de las antenas proporciona una excelente precisión y resolución, además que su tamaño no es un inconveniente para un rápido traslado. La influencia de condiciones meteorológicas adversas es muy alta. Por lo tanto los radares de vigilancia aérea son en su mayoría equipados con antenas de polarización circular. Esta banda de frecuencias está predeterminada para la mayoría de los tipos de radares meteorológicos usados para localizar precipitaciones en zonas templadas como Europa.

Banda I/J (Banda de Radar X y Ku). En esta banda de frecuencia (8 a 12 GHz) la relación entre la longitud de onda utilizada y el tamaño de la antena es considerablemente mejor que en las bandas de menor frecuencia. La Banda I/J es una banda de radar relativamente popular para aplicaciones militares como radares aerotransportados para el ejercicio de las funciones de interceptor, caza y ataque de combatientes enemigos y objetivos en tierra. El tamaño de la antena muy pequeña proporciona un buen rendimiento. Sistemas de guía de misiles en la banda I/J son de un tamaño conveniente y por tanto

de interés para las aplicaciones donde la movilidad y el peso ligero son importantes y el alcance lejano no es un requisito importante.

Esta banda de frecuencia es ampliamente usada por radares civiles y militares para la navegación marítima. Las antenas más pequeñas y económicas, con alta velocidad de rotación son perfectas para proporcionar una cobertura suficiente y una buena precisión. La guía de ondas ranurada y las pequeñas antenas de remiendo son usadas como antenas de radar protegidas bajo una cúpula protectora.

Esta banda de frecuencia es también popular para los radares de imágenes espaciales o aéreas usando como base el radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR), tanto para la inteligencia electrónica militar y/o para ser aplicado en el estudio geográfico de la superficie terrestre (creación de mapas). Un radar de apertura sintética inversa especial es usado como instrumento de vigilancia marítima para el control de la polución, buscando prevenir la contaminación del medio ambiente.

Banda K (Banda Radar K y Ka). Cuanto más alta es la frecuencia, más altas son la absorción y la atenuación atmosféricas de las ondas. Por otra parte, la exactitud y la resolución en distancia se incrementan también. Los usos del radar en esta banda de frecuencia proporcionan muy poco cubrimiento en distancia, resolución muy alta y datos de alta tasa de renovación. En el ATM estos sistemas de radar son llamados: Radares de Movimiento en la Superficie (Surface Movement Radar, SMR) o Equipo de detección en la superficie del aeropuerto (Airport Surface Detection Equipment, ASDE). La utilización de pulsos de transmisión muy cortos de unos nanosegundos permite una resolución en distancia que deja visualizar el contorno del avión en la pantalla de los radares.

Banda V. Debido a la dispersión molecular (En este caso se trata de la influencia de la humedad del aire). Esta banda de frecuencia genera una alta atenuación. La aplicación para los radares esta limitada para una corta distancia de un par de metros.

Banda W. Aquí aparecen dos fenómenos de atenuación atmosférica: un máximo de atenuación de alrededor de unos 75 GHz y un mínimo relativo a unos 96 GHz Ambos rangos de frecuencia prácticamente están en uso. En la ingeniería automotriz pequeños dispositivos de radar que funcionan a 75. . . 76 GHz para asistentes de frenado y asistente de estacionamiento. La atenuación alta (aquí la influencia de las moléculas de oxígeno O_2) mejora la inmunidad a la injerencia de estos conjuntos de radar.

Los sistemas de radar, no obstante que tiene un gran número de aplicaciones específicas, en lo general realizan tres funciones básicas [11].

- 1) **Búsqueda/Detección.** A partir del fenómeno de reflexión y teniendo algún punto de referencia en la posición se puede calcular la posición o presencia de obstáculos en la trayectoria de las ondas electromagnéticas. Prácticamente todos los radares requieren de encontrar o detectar un objetivo sin contar con información previa acerca del volumen o posición del mismo.
- 2) **Rastreo.** Una vez que se detecto el objetivo deseado se le sigue mediante movimientos del radar. El rastreo o seguimiento implica la medición de la posición, distancia y velocidad del objetivo.
- 3) **Imagen.** En general el proceso de obtener una imagen de radar sigue los pasos: (1) desarrollar un perfil para el alcance del objetivo, (2) desarrollar un perfil de la sección por la cual las ondas electromagnéticas cruzan la superficie del objetivo. Una vez realizados los pasos anteriores se barre o recorre el área de interés y se obtiene la imagen o representación gráfica.

Cualquier radar realiza por lo menos una de las funciones antes expuestas o una combinación de ellas.

2.3.3

Clasificaciones de radares

La clasificación de los radares, acorde con [11], se tienen por antenas, por modo de operación, la información que proporcionan y por las funciones que desempeñan. La clasificación por el número de antenas es como sigue:

1. Mono-estático: una sola antena o dos antenas separadas por una distancia muy pequeña
2. Bi-estático: dos antenas suficientemente separadas
3. Multi-estático: más de dos antenas separadas

También tenemos una clasificación por el modo de operación:

1. Onda continua (CW). Este modo es cuando la señal emitida no se interrumpe mientras el radar se encuentre encendido
2. Onda continua con modulación (FWCM). Este modo es cuando la señal no se interrumpe y además, la frecuencia de transmisión varía periódicamente de tal forma que se tiene una marca en la señal emitida
3. Onda intermitente o pulsante (Pulse). Este modo de operación se tiene cuando la onda transmitida es interrumpida de forma constante por una frecuencia mucho menor que la frecuencia de operación, por ejemplo si tenemos la frecuencia de transmisión de 10 GHz la frecuencia que se emplea para interrumpir la señal es del orden de 2 kHz

Es posible, también, clasificar a los radares por la información que proporcionan:

- Coherente. Un radar coherente es aquel que puede entregarnos amplitud y fase en su señal
- No coherente. Un radar no coherente es aquel que nos entrega solamente la amplitud en su señal

Por último, tomando en cuenta las funciones que cada aplicación de radar realiza, se tiene la siguiente clasificación:

1. Búsqueda o Detección
2. Rastreo
3. Imagen

Exactitud: La exactitud es el grado de conformidad entre la posición y/o la velocidad estimada o medida de una plataforma en un momento dado y su verdadera posición o velocidad [11]. La exactitud en el desempeño de la radio-navegación por lo general se presenta como una medida estadística de error del sistema y se especifica como:

- Previsible: La exactitud de una posición en relación con las coordenadas geográficas o geodésicas de la tierra.
- Repetible: La precisión con la que un usuario puede volver a una posición cuyas coordenadas han sido medidas anteriormente con el mismo sistema de navegación.
- Relativa: La precisión con que un usuario puede determinar una posición en relación a otro (ignorando todos los posibles errores).

El valor declarado de la exactitud requerida representa la incertidumbre del valor reportado con respecto al valor verdadero e indica el intervalo en el que el valor verdadero reside con una probabilidad formulada. El nivel de probabilidad recomendado es del 95 por ciento, que corresponde a 2 desviaciones estándar de la media normal (*Gaussiana*) de la distribución de la variable. La suposición de que todas las correcciones se tienen en cuenta implica que los errores en los valores tendrán un valor medio (o sesgo) cercano a cero. La exactitud entonces se refiere a qué tan cerca del valor real se encuentra el valor medido.

En términos estadísticos, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. Cuanto menor es el sesgo más exacta es una estimación. Cuando expresamos la exactitud de un resultado se expresa mediante el error absoluto que es la diferencia entre el valor experimental y el valor verdadero. El valor verdadero es ese valor que, bajo condiciones operacionales, caracteriza perfectamente la variable a ser medida u observada sobre el tiempo representativo, intervalo de área o volumen necesario, teniendo en cuenta localización y exposición.

2.4 Muestreo de señales

Las técnicas de señales digitales proporciona un método alternativo para procesar una señal analógica de interés práctico tales como la voz, señales biológicas, sísmicas, del sonar y de los distintos tipos de comunicaciones. Para realizar esto, es necesario contar con una interfaz entre la señal analógica y el procesador digital y viceversa. Estas interfaces son el convertidor Analógico-Digital (ADC¹) y el convertidor Digital-Analógico (DAC²) como se muestra en la figura 2.4.

¹Analogic Digital Converted

²Digital Analogic Converted



Figura 2.4: Diagrama de conversión directa e inversa

Conversión analógico a digital y digital a analógico Para procesar señales analógicas por medios digitales es necesario convertirlas a formato digital, esto es, transformarlas en una secuencia de números de precisión finita. Este procedimiento se denomina conversión analógico-digital (ADC). Conceptualmente, se puede ver en la figura 2.5 que la ADC posee un proceso de tres pasos los cuales son:

Muestreador. Esta es la conversión de una señal en tiempo continuo a una señal en tiempo discreto obtenida tomando muestras de la señal en tiempo continuo en instantes de tiempo discreto. Así $x_a(t)$ es la entrada al muestreador, la salida es $x_a(nT) = x(n)$, donde T se denomina el intervalo de muestreo.

Cuantificador. Esta es la conversión de una señal en tiempo discreto con valores continuos a una señal en tiempo discreto con valores discretos (señal digital). El valor de cada muestra de la señal se representa mediante un valor seleccionado de un conjunto finito de valores posibles. La diferencia entre la muestra sin cuantificar $x(n)$ y la salida cuantificada $x_q(n)$ se denomina error de cuantificación.

Codificador. En el proceso de codificación, cada valor discreto $x_q(n)$ se representa mediante una secuencia binaria de b bits.

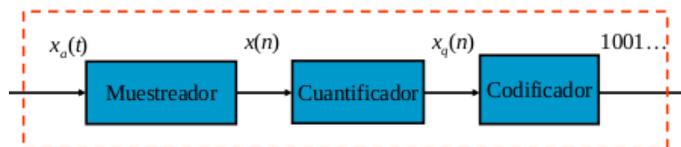


Figura 2.5: Diagrama a bloques de un ADC

Muestreo de señales analógicas Basado en [12], presentamos a continuación algunas bases para comprender la tasa de muestreo de *Nyquist*, fundamental para el procesamiento de señales.

Si la frecuencia más alta contenida en una señal analógica $x_a(t)$ es $F_{max} = B$ y la señal se muestrea a una velocidad $F_s > 2F_{max}$, entonces $x_a(t)$ se puede recuperar totalmente de sus muestras mediante la siguiente función de interpolación:

$$g(t) = \frac{\sin(2\pi B t)}{2\pi B t} \quad (2.14)$$

Así, $x_a(t)$ se puede expresar como:

$$x_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a\left(\frac{n}{F_s}\right) g\left(t - \frac{n}{F_s}\right) \quad (2.15)$$

donde $x_a(n/F_s) = x_a(nT) = x(n)$.

Cuando el muestreo de $x_a(t)$ se realiza a la tasa mínima de muestreo $F_s = 2B$, la fórmula de reconstrucción (2.15) se transforma en

$$x_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a\left(\frac{n}{2B}\right) \left(\frac{\sin 2\pi B(t - \frac{n}{2B})}{2\pi B(t - \frac{n}{2B})}\right) \quad (2.16)$$

La tasa de muestreo dada por $F_N = 2B = 2F_m$ se denomina tasa de *Nyquist*. La Figura 2.6 ilustra el proceso de un DAC ideal que usa esta función de interpolación.

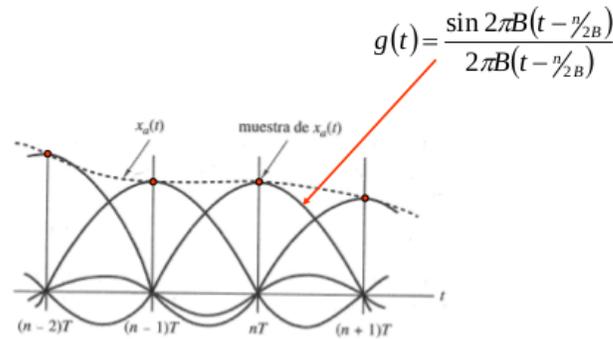


Figura 2.6: Conversión analógico digital ideal

Existen muchas maneras de muestrear una señal, la más común es el muestreo periódico o uniforme. Este proceso se describe mediante la relación:

$$x(n) = x_a(nT) \quad (2.17)$$

donde $x(n)$ es la señal en tiempo discreto, obtenida tomando muestras de la señal analógica $x_a(t)$ cada T segundos. Este proceso se ilustra en la Figura 2.7. El intervalo de tiempo T entre dos muestras sucesivas se denomina periodo de muestreo o intervalo de muestreo, y su recíproco ($1/T = F_s$) se llama velocidad de muestreo, muestras por segundo o frecuencia de muestreo, la cual se mide en *Hertz*. El muestreo periódico establece una relación entre las variables t de tiempo continuo y n de tiempo discreto. Estas variables se relacionan linealmente a través del periodo de muestreo T o equivalentemente, a través de la velocidad de muestreo como:

$$t = nT = \frac{n}{F_s} \quad (2.18)$$

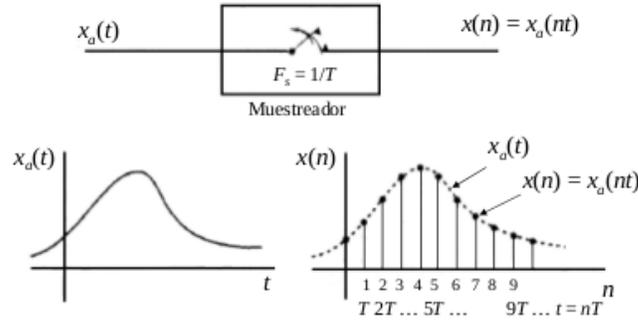


Figura 2.7: Muestreo periódico de una señal analógica

Como consecuencia de (2.18), existe una relación entre la variable frecuencia F de las señales analógicas y la variables frecuencia f de las en tiempo discreto. Para establecer dicha relación si se considera una señal analógica de la forma:

$$x_a(t) = A \cdot \cos(2\pi F t + \theta) \quad (2.19)$$

Cuando se muestrea periódicamente a una velocidad de $F_s = 1/T$ muestras por segundo, da lugar a:

$$x_a(nT) \equiv x(n) = A \cdot \cos(2\pi n F T + \theta) \quad (2.20)$$

$$x(n) = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi n F}{F_s} + \theta\right) \quad (2.21)$$

Si una señal en tiempo discreto es expresada como:

$$x(n) = A \cdot \cos(2\pi n f + \theta) \quad (2.22)$$

Al comparar la relación (2.21) con la (2.22), se observa que las variables de frecuencia F y f están linealmente relacionadas como:

$$f = \frac{F}{F_s} \quad (2.23)$$

Si $\omega = 2\pi f$ y $\Omega = 2\pi F$ entonces la 2.23 queda como:

$$\omega = \Omega T \quad (2.24)$$

La relación dada por (2.23) justifica el nombre de frecuencia normalizada o relativa, que se usa para describir a la variable f .

Como se ve en 2.23, se puede usar a f para determinar a la frecuencia F , solo si la frecuencia de muestreo F_s es conocida. El rango de la variable de frecuencia F o Ω para senoides en tiempo continuo es:

$$-\infty < \Omega < +\infty \quad -\infty < F < +\infty \quad (2.25)$$

Sin embargo, la situación es diferente para senoides en tiempo discreto, las cuales establecen que:

$$-1/2 < F < 1/2 \quad -\pi < \omega < \pi \quad (2.26)$$

Sustituyendo (2.23) y (2.24) en (2.26) se encuentra que la frecuencia de la senoide en tiempo continuo, cuando se muestrea a una velocidad $F_s = 1/T$ debe encontrarse en el rango.

$$-\frac{1}{2T} = -\frac{F_s}{2} \leq F \leq \frac{F_s}{2} = \frac{1}{2T} \quad (2.27)$$

o equivalentemente:

$$-\frac{\pi}{T} = -\pi F_s \leq \Omega \leq \pi F_s = \frac{\pi}{T} \quad (2.28)$$

El llamado *aliasing* es el efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se muestrean digitalmente. Cuando esto sucede, la señal original no puede ser reconstruida de forma unívoca a partir de la señal digital. Para evitar las ambigüedades que resultan del *aliasing*, se debe seleccionar una velocidad de muestreo lo suficientemente alta, esto es, se debe escoger a $F_s/2$ mayor que a $F_{\text{máx}}$. Por lo tanto para evitar el problema de *aliasing*, se selecciona a F_s como:

$$F_s > 2F_{\text{máx}} \quad (2.29)$$

La ecuación (2.29) es muy importante para cualquier procesamiento de señal en la cual se requiere que no existan pérdidas de información a partir de una señal continua, es decir, analógica.

2.5 Detección de objetos usando radar

Basados en los capítulos 2, 3, 7 y 8 de [11], describiremos los conceptos principales para realizar la detección de objetos con un sistema de RADAR.

Un sistema de radar esta diseñado para realizar alguna de las tres funciones mencionadas anteriormente en este capítulo a saber: búsqueda, seguimiento o imagen. Cuando la función principal del sistema de radar es la de búsqueda no se cuenta con información previa sobre las características del objeto a buscar. Llamaremos indistintamente a los objetos u obstáculos como objetivos en lo sucesivo.

Normalmente se diseña un RADAR para un tipo de objetivo específico, dado el volumen o sección transversal, el material y la posible distancia a la que se buscará. Los parámetros para el

diseño del sistema de radar están en estrecha relación con los requerimientos para el sistema o la aplicación tecnológica de la que es parte.

A manera de ejemplo, para comprender la detección imaginemos que tenemos un prisionero que intenta escapar de la prisión y nosotros contamos con una lámpara que podemos dirigir hacia la barda o cerca de la prisión; encontraremos al prisionero si alumbramos la posición correcta en el justo momento en que el prisionero intente pasar por la cerca, pero de no ser el caso aunque el prisionero esté en el espacio de búsqueda no será detectado por el sistema. De manera análoga funciona el sistema de radar pero empleando señales electromagnéticas a través de antenas receptoras y transmisoras.

Los radares realizan la búsqueda de objetivos moviendo la dirección de la antena en un periodo de tiempo determinado y con un alcance también conocido.

2.5.1

Detección empleando un umbral de señal

El concepto de detección de un objetivo involucra la decisión de establecer un espacio de búsqueda y definir el barrido del mismo. Para realizar el barrido del área de búsqueda el sistema de radar mueve la dirección de la antena para dirigir la posición de la emisión y recepción de las ondas electromagnéticas. La posición de la antena es definida por el llamado *azimuth* y la elevación. Las antenas y el sistema de radar tienen un alcance determinado dado por el diseño y la potencia a la que se calculó el sistema que controla las emisiones de ondas.

La técnica más sencilla para realizar la detección de un objetivo es la de tener un operador del sistema de radar y que se mantenga observando una pantalla donde él pueda determinar si se observa un punto lo suficientemente brillante que indica un objetivo detectable y determine que, efectivamente, por el comportamiento del punto se trata de un objetivo que se ha detectado.

Actualmente, en la mayoría de los sistemas de radar, la detección se realiza automáticamente. Para realizar la detección automáticamente se requiere de un bloque del sistema denominado procesador de señal o procesador de datos. En este bloque se realiza la detección de los objetivos. Se establece un nivel de señal *umbral* o voltaje. El umbral es un valor que sirve de nivel de referencia para comparar con las señales de entrada. El valor es útil para determinar si se detecta un obstáculo, lo cual ocurre cuando el valor de entrada del sistema sobrepasa el umbral. El valor umbral es definido en base a la interferencia, debido a que es la principal causa de falsas alarmas en la detección de obstáculos. La interferencia se define como aquellas señales que impiden o hacen difícil que se realice la detección. Las señales que conforman la interferencia pueden ser:

- Clutter¹
- Noise²
- Jamming³

¹Clutter se traduce como la acción de llenar o cubrir con un conjunto de cosas.

²Noise se traduce como ruido.

³Jamming se traduce como la acción de comprimir algo contra otra cosa.

Si la señal recibida es suficientemente alta, en relación con el umbral, entonces es declarado que se detectó un objetivo. Si la señal recibida no es mayor que el umbral, se declara que no se detectó un objetivo.

El umbral también debe mantenerse lo más bajo posible para tener una buena sensibilidad para la detección. En la mayoría de sistemas de radar la interferencia no solo está compuesta de ruido (*noise*) térmico propio de la composición de la materia, sino también está compuesto de la superposición de ondas de objetos que no son parte del objetivo que se pretende detectar denominado *clutter* y de interferencia inducida por otros sistemas o *jamming noise*. La interferencia producida por *jamming* y por *clutter* depende del alcance, ángulo y el efecto *Doppler* de las celdas vecinas de la celda donde se encuentra el objetivo. Como una consecuencia, el nivel de interferencia puede variar por muchos decibels (*dB*: relación logarítmica entre dos señales) durante la operación de tal manera que mantener un umbral fijo resulta inútil. Por las razones expuestas, en un sistema de radar el umbral debe ser adaptable y auto-ajustable en función de los niveles de interferencia local dando lugar a lo que se conoce como la constante de falsa alarma (CFAR¹).

Para que se detecte exitosamente la señal debe ser dominante sobre la interferencia local presente. Un caso donde se presentan problemas para la detección es cuando la señal de los objetos en los que no estamos interesados es de mayor intensidad que la del objetivo a detectar. En este caso el procesamiento espectral de la señal es a menudo empleado, este procesamiento es denominado indicador de movimiento del objetivo (MTI²). El procesamiento MTI o procesamiento *Doppler* sirve para reducir el nivel de señal del *clutter* en relación con la señal recibida.

Cuando la señal dominante es la interferencia *jamming* a menudo se emplea la técnica de ángulo de recepción. Si el sistema sufre de interferencia por *clutter* adicionalmente a *jamming* se emplea una técnica de procesamiento adaptable espacio-temporal (STAP³), la cual es una combinación de las anteriores.

2.5.2

Probabilidad de falsa alarma y detección

El ruido en la salida receptora es voltaje que varía de forma aleatoria. Debido al efecto de la división de las ondas o *scatter*, se producen interferencia constructiva y destructiva múltiple. La mayoría de los objetivos de interés presentan voltajes, producto del rebote o eco, que varían de un pulso al siguiente; sin embargo, aunque el objetivo es modelado como un eco en el voltaje, la salida de voltaje en el receptor, cuando el objetivo está presente, es una variable compleja conformada por la amplitud y la fase, y también, es una combinación de ruido y señal que se comporta como una variable aleatoria.

¹Constant False Alarm Ratio

²Moving Target Indicator

³Space-Time Adaptive Processing

Por tanto, el proceso de detección de la presencia de un objetivo basado en la señal de voltaje es un proceso estadístico, con una probabilidad asociada para la detección, P_D , menor a la unidad, y una probabilidad de falsa alarma, P_{FA} , normalmente mayor a cero.

La fluctuación del voltaje en la señal con ruido, y el voltaje en la señal del objetivo, v están caracterizadas en términos de su función de densidad de probabilidad, PDF¹, p_v , las funciones describen la probabilidad relativa que una variable aleatoria tomará bajo diferentes valores. Por ejemplo, la función de densidad de probabilidad *gausiana* o normal muestra el voltaje mostrada en la figura 2.8, v , que puede tomar valores positivos o negativos con igual probabilidad, regularmente toman valores cercanos a cero para valores grandes ya sea positivos o negativos.

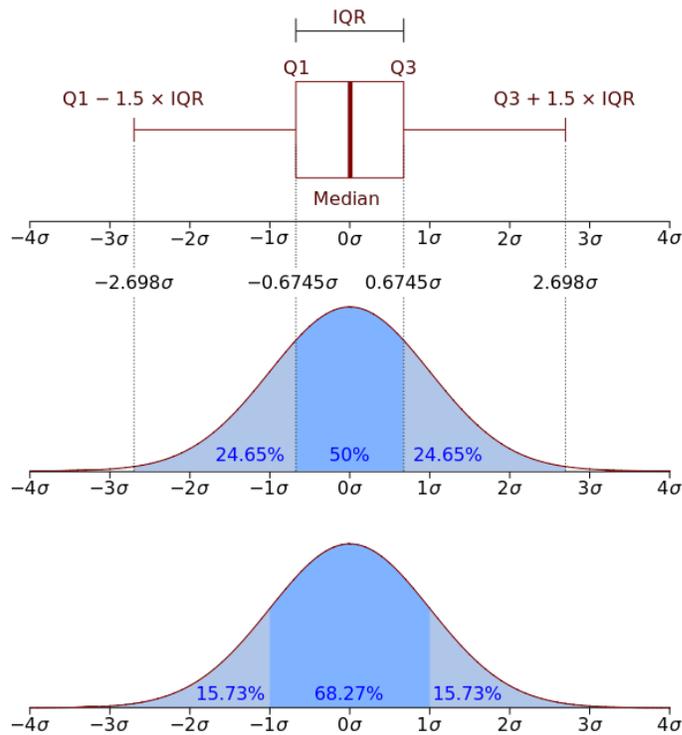


Figura 2.8: Función de densidad de probabilidad normal

Las funciones de densidad de probabilidad son empleadas para calcular probabilidades. Por ejemplo, la probabilidad de que la variable aleatoria, v , exceda algún valor de voltaje umbral V_t , es el área bajo la la PDF en la región $v > V_t$, a cual es:

$$Prob\{v > V_t\} = \int_{V_t}^{\infty} P_v(v) dv \quad (2.30)$$

¹Probability Density Function

Para aplicar la ecuaciones 2.30 y determinar la probabilidad de falsa alarma, P_{FA} , para el voltaje umbral dado, supongamos que la función de densidad de probabilidad del voltaje del ruido está dado por $p_i(v)$. Un voltaje umbral, V_t , es definida como algún nivel de voltaje suficientemente por arriba del valor máximo del ruido. Ello para limitar las falsas alarmas a un rango aceptable para el sistema.

La probabilidad de falsa alarma es la integral de la PDF desde el voltaje umbral hasta el infinito positivo

$$P_{FA} = \int_{V_t}^{\infty} P_i(v)dv \quad (2.31)$$

Incrementando o decrementando el nivel del umbral V_t puede incrementarse o decrementarse P_{FA} . Entonces P_{FA} puede encontrarse en cualquier nivel deseado eligiendo la V_t adecuada. Se puede determinar el voltaje requerido resolviendo 2.31 para V_t con la P_{FA} deseada.

Una vez que se establece el umbral en base a la distribución de probabilidad de P_{FA} , la probabilidad de detectar un objetivo depende de la PDF de la señal más el ruido, P_{s+i} , la cual depende de la fluctuación estadística de ambas señales: ruido y la señal del objetivo. La probabilidad de detección también depende del SNR¹. La probabilidad de detección de los objetivos, P_D , es la integral de la señal más el ruido en la PDF a partir del voltaje umbral, V_t , hasta el infinito positivo.

$$P_D = \int_{V_t}^{\infty} P_{s+i}(v)dv \quad (2.32)$$

2.6

Cómputo ubicuo y navegación asistida por el ambiente

A mediados de los 80 en el Xerox Parc Lab de California Mark Weiser junto con su equipo en Xerox, elaboraron el primer escenario de cientos de pequeños ordenadores interconectados, que pasaban prácticamente inadvertidos, en forma de insignias, tarjetas y pizarras electrónicas.

De acuerdo con [13], Weiser decía que “estos ordenadores ubicuos deberán saber en qué habitación se encuentran para adaptarse al entorno e identificarán a su usuario mediante un sistema de radio búsqueda internacional”.

Basados en [14] describimos algunos hechos relevantes del área. En Junio de 1998, *Palo Alto Ventures* y *Silicon Artists*, por encargo del Vicepresidente Ejecutivo de *Royal Philips Electronics*, Roel Pieper, desarrollan un primer informe que incluye la definición y el escenario de *Ambient Intelligence (AmI)*.

Bajo la dirección de Roel Pieper y la subdirección de Stefano Marzano, actual CEO de *Philips Design*, reúnen a un nutrido grupo de expertos, de distintas empresas e institutos de investigación de todo el mundo como el *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*. Juntos definieron la visión en que estos ordenadores ubicuos interconectados aprenderían de sus usuarios y de verdad mejorarían la vida de la gente.

¹Signal to Noise Ratio

Por primera vez el ser humano no tendría que adaptarse a las máquinas, sino que la tecnología se adaptaría a él. "La inteligencia penetrará en el entorno como una presencia ambiental, entorno en el que nuestras necesidades se verán satisfechas del mismo modo en que la sangre circula en nuestro cuerpo: sin mediar una orden consciente", decían estos pioneros en su libro blanco.

Philips inició sus investigaciones de Inteligencia Ambiental en el *Home Lab*, al tiempo que otras corporaciones e instituciones hicieron lo propio. *Philips* sigue liderando este campo y presentando aplicaciones concretas que se inspiran en esta visión y que se agruparon en la presentación comercial de *La Casa conectada*, que presentó en 2003 en el *Ce Bit*¹, Rudy Provoost es el actual CEO de *Philips Electronic Consumer*.

Inteligencia Ambiental, esta tecnología de tecnologías, ha sido denominada por la Comisión Europea como el principal escenario de futuro para el siglo *XXI*. La Comisión europea ha patrocinado varios congresos de carácter internacional que se han realizado en Holanda, con el liderazgo de *Philips*.^[15]

2.6.1

Wearable Computing

De acuerdo con [1] el *wearable computing* es una rama del cómputo ubicuo que trata sobre los dispositivos o sistemas que se pueden portar, como la vestimenta, con un propósito específico.

Bajo la panorámica de *weareable computing* existen tres ramas en donde ubicar los sistemas de detección de obstáculos: ETA², EOA³ y PLO⁴.

En la ETA, motivo de nuestro trabajo, se encuentran los sistemas o dispositivos que pueden detectar obstáculos en exteriores e interiores. La detección de obstáculos es una de las directrices que conforman la ETA acorde con el *National Research Council*⁵ para ETA.

2.6.2

Electronic Travel Aids

El cómputo ubicuo que se define como la capacidad informática que se integra en el contexto humano de manera desapercibida⁶ y por otro lado, tenemos el *wearable computing* que se define como una rama del cómputo ubicuo que trata sobre los dispositivos o sistemas que se pueden portar, como la vestimenta, con un propósito específico.

Bajo la panorámica de *weareable computing* existen tres ramas en donde ubicar los sistemas de detección de obstáculos: ETA, EOA y PLO como se muestra en la figura 2.9.

¹ Feria de exhibición tecnológica, www.cebit.de/home | fecha de acceso: 3 de agosto de 2016

²Electronic Travel Aids

³Electronic Orientation Aids

⁴Position Locator Devices

⁵<http://www.nationalacademies.org/nrc/> | fecha de acceso: 3 de agosto de 2016.

⁶<http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/SciAmDraft3.html> | fecha de acceso: 3 de agosto de 2016.

1. ETAs: dispositivos capaces de transformar la información que obtienen del ambiente, la cual es normalmente obtenida por los humanos por el sentido de la vista, y la presentan de de tal forma que sea interpretada por alguno de los sentidos restantes: oído, tacto, principalmente.
2. EOAs: dispositivos que proveen orientación antes o durante un viaje. Ellos pueden ser externos al usuario y pueden ser llevados o no por el usuario.
3. PLOs: dispositivos y tecnologías de geo-localización tales como: GPS¹, EGNOS², entre otros.

En la ETA se encuentran los sistemas o dispositivos que pueden detectar obstáculos en exteriores e interiores. La detección de obstáculos es una de las directrices que conforman la ETA de acuerdo al *National Research Council*³ [1].

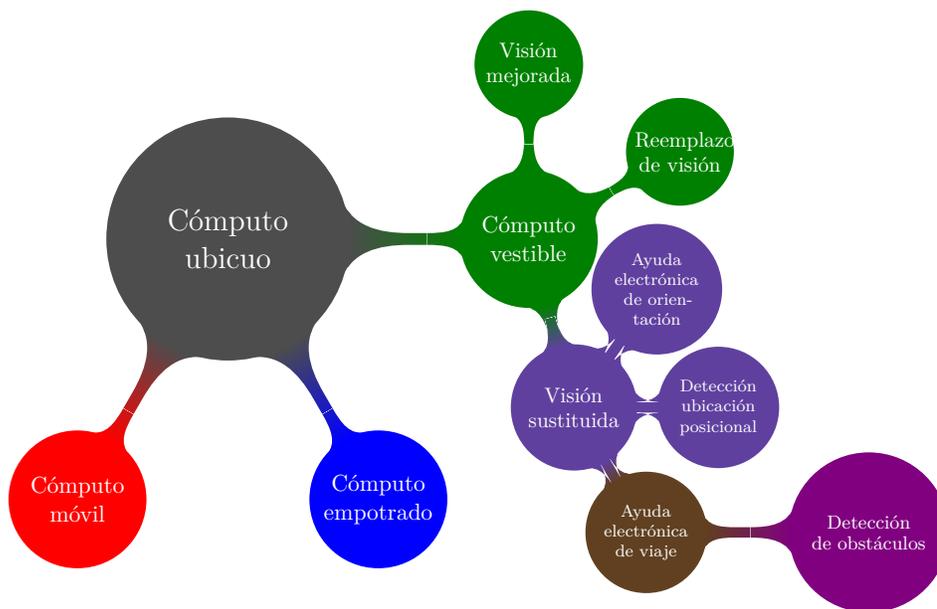


Figura 2.9: Área de investigación para resolver el problema de la detección de obstáculos

¹Global Position System

²European Geostationary Navigation Overlay Service

³<http://www.nationalacademies.org/nrc/> | fecha de acceso: 3 de agosto de 2016.

De acuerdo con Dakopoulos et al.[1] la clasificación de los sistemas relativos a visión en el marco de ETA (figura 2.9) son las siguientes:

Vision enhancement. Involucra una o más cámaras de entrada, procesamiento de la información obtenida y una salida visual en pantalla.

Vision replacement. Involucra el despliegue de la información directamente en el nervio óptico o en la corteza cerebral en el área de la visión.

Vision substitution. Es similar a *vision enhancement* con la diferencia de que la salida es no-visual: auditiva, táctil o combinación de las dos. Debido a que el oído y el tacto son sentidos con menor capacidad sensitiva que la vista, la información entregada debe ser procesada de tal forma que sea útil para dichos sentidos.

Se ha abordado el problema de la detección de obstáculos desde varios enfoques (figura 2.10), como lo reportan Discant et al. [16], entre ellos se encuentran: RADAR, LIDAR, LADAR y SONAR.

Existen trabajos cuyo propósito es guiar a personas débiles visuales mediante el uso de sensores de distancia [17], procesamiento de imágenes obtenidas por cámaras montadas en un robot o dispositivo que acompaña al usuario [18], escaneo láser [19] o teléfonos inteligentes.



Figura 2.10: Aproximaciones de los sistemas para la detección de obstáculos

Estado del arte

CONTENIDO

3.1	SONAR	47
3.2	LIDAR	50
3.3	LADAR	52
3.4	RADAR	53
3.5	Ventajas y desventajas	54

Presentamos el estado del arte para los sistemas que ayudan a los usuarios en la navegación de entornos. El estado del arte está organizado en cuatro partes acorde con la clasificación del enfoque empleado por los trabajos reportados: ondas sonoras (SONAR), ondas electromagnéticas (RADAR), haces de luz (LIDAR) y haces laser (LADAR). Comenzaremos ubicando el área de investigación para el presente trabajo de tesis. Después, haremos una revisión a los trabajos más relevantes para cada uno de los enfoques y por último haremos un análisis del estado del arte.

Dakopoulos y Bourbakis en su artículo sobre la navegación empleando wearables [1] establece tres categorías: 1) *Electronic Travel Aids (ETAs)*, 2) *Electronic Orientation Aids (EOAs)* y 3) *Position Locator Devices (PLDs)* dentro del cómputo vestible (*wearable computing*) (figura 2.9).

Ubicándose en la categoría *ETA*, se presentan a continuación los sistemas que abordan la detección de obstáculos que se encontraron en la literatura disponible.

3.1

SONAR

Echolocation: este sistema se basa en la idea de la ubicación mediante el uso de ecolocalización (inspirada en los murciélagos). El diseño del sistema emplea un microprocesador y dispositivos ultrasónicos para detectar obstáculos.

Dos sensores ultrasónicos son fijados sobre un armazón para anteojos que también cuenta con un par de audífonos. Las señales reflejadas por los objetos son procesadas por el microprocesador y se presentan sonidos estereofónicos al usuario el par de audífonos para indicarle la presencia de obstáculos. [20]

Se realizaron casos de prueba con el dispositivo y se mostró que funciona en entornos controlados, no obstante, se requiere más y mejores pruebas que apoyen la viabilidad del sistema. Se destaca la simplicidad y portabilidad como mejores características de este sistema.

Navbelt: es un sistema en forma de cinturón equipado con un conjunto de sensores ultrasónicos y una computadora. El sistema le proporciona al usuario, mediante un par de audífonos, una panorámica auditiva del entorno que lo rodea.

La computadora recibe la información del conjunto de sensores ultrasónicos, conformado por ocho sensores, se crea un mapa de los ángulos de cada sensor y la distancia del objeto que detecta dicho sensor (figura 3.1).

El algoritmo de detección de obstáculos produce los sonidos acorde con el modo en que se encuentre el sistema: Modo navegación o modo imagen. En el modo navegación la computadora sabe el destino del usuario y lo guía mediante un sonido periódico que indica la dirección óptima. Se reportan pruebas del modo navegación simuladas y en un ambiente real, para el segundo caso se requiere de un número mayor de sensores. El modo imagen, ocho tonos de diferentes amplitudes son transmitidos por los sensores de manera sucesiva, cada sonido está relacionado con una de ocho posibles direcciones, posteriormente se crea el mapa auditivo como en el modo navegación para ser presentado al usuario.[21]

Las desventajas que presenta el sistema son: El sistema es bastante grande (mochila, audífonos y un cinturón con ocho sensores), se cuenta únicamente con la retroalimentación auditiva y los usuarios requieren de un periodo de adaptación y entrenamiento extenso.

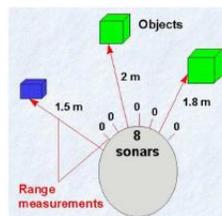


Figura 3.1: Diseño de NavBelt

Proyecto FIU: este proyecto emplea un sistema de lectura multidireccional que permite reconstruir el espacio 3D. El prototipo se conforma de dos subsistemas: el sonar y la unidad de control de la brújula (figura 3.2). La brújula está compuesta de seis sensores de distancia ultrasónicos en las seis direcciones radiales alrededor del microcontrolador; se cuenta con un

generador sonar 3D, el cual esta compuesto de audífonos y un *PDA* equipado con el *software* capaz de procesar la información que obtiene de la unidad de control de la brújula y del sonar [22].

El sistema emplea el algoritmo *HRTF (head-related transfer functions)* el cual crea un ambiente de sonidos 3D que representa los obstáculos detectados. La principal desventaja es que el sistema es lento y se le confiere al usuario la responsabilidad de crear los mapas mentales que le permitan navegar por el ambiente.

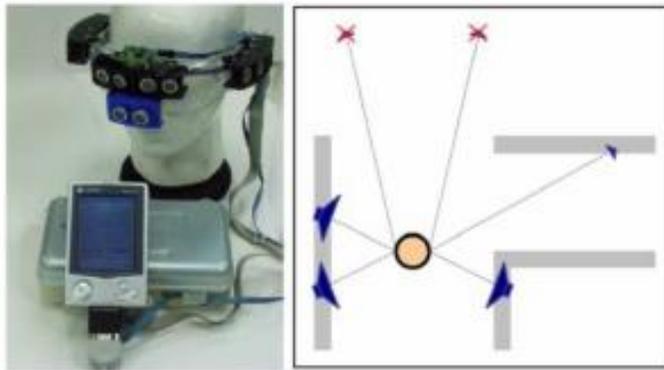


Figura 3.2: Prototipo del proyecto FIU

Personal Radar: Andreas Riener presenta su *Personal Radar* [17], un *wearable* que emplea una serie de detectores de distancia ultrasónicos en un cinturón con retroalimentación vibrotáctil (figura 3.3). Este trabajo presenta ventajas sobre los antes analizados, la principal de ellas es que hace uso de una red de sensores y ello amplía la región de detección, que por omisión tiene cada uno de los sensores cubriendo casi 180 grados de visión (figura 1.10). La desventaja es que emplea ultrasonido, el cual es susceptible a las condiciones climáticas, y además, el alcance de sus sensores es del orden de 3 metros de forma confiable.



Figura 3.3: Cinturón con sensores ultrasónicos

Proyecto EPFL: el proyecto de la *École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)* [23] hace uso de *SONAR* ultrasónico en una red de 4 sensores que rodea al usuario, el sistema procesa las señales recibidas y retro-alimenta al usuario mediante estímulos táctiles; el sistema soporta comunicación vía *bluetooth* con un *PDA (Personal Digital Assistant)* (figura 3.4). La desventaja de este desarrollo está nuevamente en las condiciones climatológicas y la distancia que es capaz de detectar (3 metros). También, el prototipo es incapaz de representar adecuadamente las dimensiones espaciales y, en la experimentación, se presentan interferencias debido al movimiento de las manos delante del sistema.

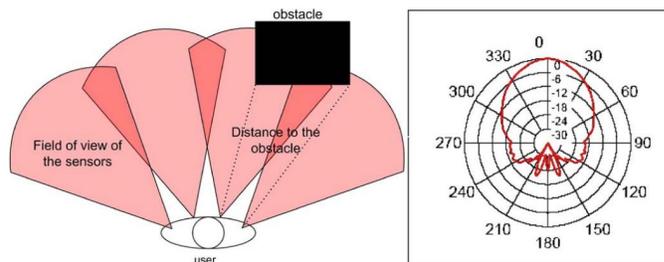


Figura 3.4: Diseño de alto nivel del prototipo de la EPFL

3.2

LIDAR

vOICe: la implementación del sistema consta de: Una cámara montada sobre unos anteojos, un par de audífonos y una computadora portátil. La cámara captura imágenes y de forma directa, sin filtrar, crea un mapeo uno a uno de las imágenes a sonido que, en principio es invertible; el resultado del mapeo, los sonidos, son presentados al usuario mediante los audífonos. La propuesta se basa en el argumento de que el sistema auditivo humano es capaz de aprender, procesar e interpretar patrones de sonido complicados y rápidos (figura 3.5).

Se reporta que se realizó una nueva implementación del sistema, esta vez sobre un teléfono celular con cámara. El *software* necesario para el sistema se empotró en el teléfono. Con esta mejora se avanzó en la portabilidad del sistema. Sin embargo las desventajas del sistema son: El usuario requiere de un entrenamiento extenso y los patrones de sonidos son muy complejos dando al usuario un nuevo problema para sacarle provecho al sistema [24].

Proyecto de la Universidad de Guelph: la Universidad de Guelph [25], Canadá, desarrollo un dispositivo compuesto con dos cámaras estereoscópicas, una unidad táctil o guante con sensores en cada dedo, y una computadora portátil. A cada dedo del guante le corresponde una dirección espacial. También emplea un algoritmo de estereovisión, el mapeo de profundidad



Figura 3.5: Prototipo vOICE

es creado dividiendo el área observada en cinco segmentos y haciéndolo corresponder con uno de los elementos vibratorios de cada dedo en el guante.

Si un píxel en el área correspondiente detecta un obstáculo a una distancia de 3 pies se activa el elemento vibratorio correspondiente informando al usuario que se encuentra un obstáculo cerca en la dirección. Se observa que el usuario tiene un tiempo de aprendizaje para poder hacer uso del sistema de forma eficaz.

Virtual acoustic space: el proyecto crea un mapa auditivo a partir del ambiente para orientar al usuario a crear él mismo la percepción del espacio a nivel neuronal. El prototipo es conformado por dos micro-cámaras a color, un procesador y un par de audífonos montados sobre el marco de unas gafas convencionales (figura 3.6). Las cámaras, usando visión estereoscópica, captura la información del ambiente. El procesador, empleando *HRTF*, crea un mapa en profundidad con atributos como la distancia, color, o la textura y genera los sonidos correspondientes a la posición de las fuentes sonoras existentes en el ambiente [26].

Los resultados reportados son que el 75% de las personas pudieron detectar objetos y sus distancias en habitaciones pequeñas. Los usuarios pudieron moverse libremente en el ambiente y obtener información de los objetos a su alrededor como: Paredes, mesas, ventanas, y puertas abiertas.

La principal desventaja del sistema es que no se probó en exteriores.



Figura 3.6: Prototipo del proyecto Virtual Acoustic Space

Proyecto de la Universidad de Stuttgart: se trata de un sistema con un bastón abatible y una computadora portátil. El sensor es equipado con dos cámaras, un teclado, una brújula electrónica, un indicador 3D, y una bocina [27]. El sistema se asemeja a una linterna (figura 3.7). La computadora contiene *software* para la detección de distancia y tamaño basada en imágenes a color. Las desventajas son: el usuario debe dirigir constantemente el bastón hacia la dirección de visión del dispositivo, el sistema es susceptible a las condiciones de luz y su alcance depende de la calidad de las imágenes.



Figura 3.7: Prototipo del proyecto de la universidad de Stuttgart

Navegación asistida para débiles visuales: el prototipo *NAVI* se compone de una cámara de vídeo digital, una cinta para la cabeza, audífonos estereofónicos, un *SBPS* (*single-board processing system*), baterías recargables, y un chaleco (para sostener las baterías y el *SBPS*) (figura 3.8). La idea del sistema es que el humano enfoque con el dispositivo los objetos en su centro de visión y sea capaz de distinguir entre el fondo y el objeto. La cámara de vídeo captura vídeo en escala de grises y es convertida en resolución 32 x 32. Se emplea *LVQ* (*learning vector quantization*) en una red neuronal [19].

SmartVision: Faria presenta su *White Cane* [18] para ayudar a la navegación de entornos con su *wearable* en forma de bastón, el cual emplea: sistema de visión (*LIDAR*), WIFI, sensores de lectura de RFID, GPS (figura 3.9). Esta solución tiene las desventajas de ser susceptible del clima, grado de visibilidad y tener un rango de distancia del orden de los 3 metros para la detección de obstáculos en interiores.

3.3

LADAR

Universidad Bremen: Esteban Bayro et al. [19] presenta un *wearable* basado en escaneo mediante el uso de láser de corto alcance (figura 3.10). El alcance promedio de un láser de corto alcance se encuentra en el rango de 0.6 a 2.5 metros con una precisión aproximada de 4 mm. El

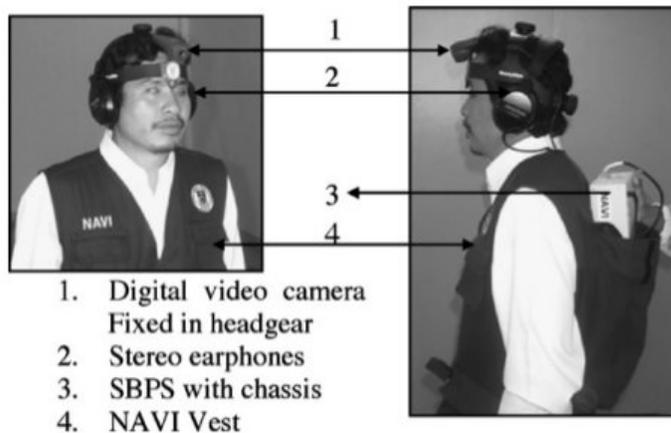


Figura 3.8: Prototipo NAVI y voluntario probando el sistema.

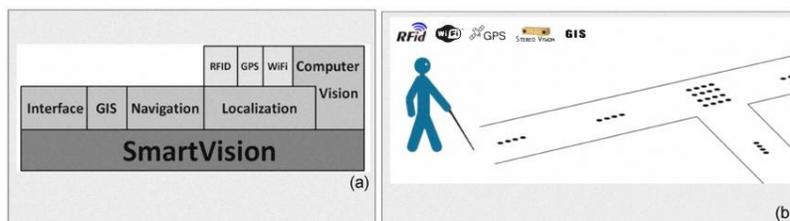


Figura 3.9: SmartVision. (a) Diagrama de proyecto SmartVision, (b) SmartVision en exteriores con etiquetas RFID.

wearable emplea también la tecnología de dispositivos móviles denominada *SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)*; el dispositivo pretende auxiliar a personas ciegas para navegar en entornos desconocidos (figura 3.10). El sistema tiene soporte a comandos de voz y permite marcar puntos en el ambiente mientras es explorado. Destacamos que el sistema funciona en interiores y exteriores; para exteriores se emplea GPS. El sistema es capaz de realizar mapas del ambiente que explorado pero no se reportan pruebas para aprovechar esta característica. La solución tiene la desventaja ser susceptible al grado de visibilidad del entorno y temperatura.

3.4

RADAR

No se encontraron trabajos para asistir al peatón en la literatura que empleen la aproximación radar.

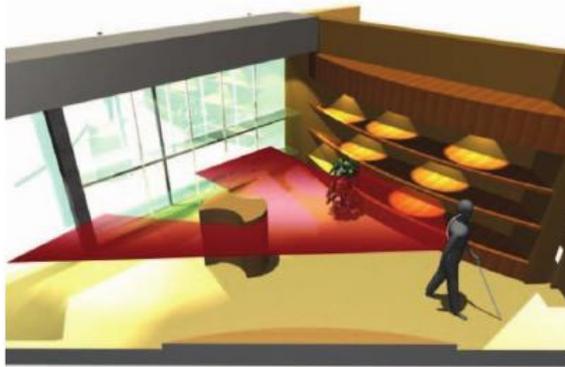


Figura 3.10: Usuario que navega con el uso del sistema SLAM

3.5 Ventajas y desventajas

La aproximación más frecuente es LIDAR mediante el uso de cámaras digitales de captura de imágenes o vídeo y el subsecuente procesamiento de las imágenes obtenidas. Destacamos que para la detección de obstáculos en exteriores se presentan desventajas para las aproximaciones LIDAR, LADAR y SONAR debido a las condiciones climatológicas como humedad en el medio, poca visibilidad, lluvia, ausencia de luz solar, por mencionar algunas. Para el caso de RADAR la desventaja que podemos mencionar se encuentra en la capacidad de reflexión de ondas de los obstáculos; sin embargo, se ha reportado la detección de obstáculos, personas y automóviles en la literatura [9, 1].

A continuación presentamos, en la figura 3.11, una breve línea del tiempo de los trabajos que se han analizado en este estado del arte.

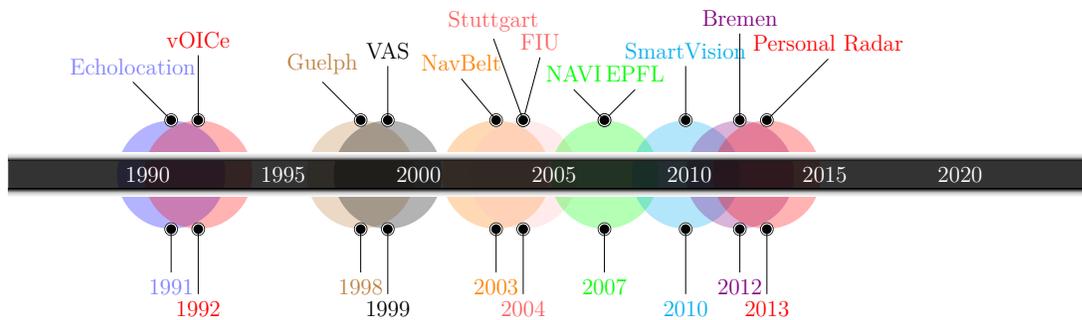


Figura 3.11: Cronograma de trabajos *wearables* bajo ETA

Tabla 3.1: Comparativa de los prototipos

Proyecto	Año	Aproximación	Alcance	Sensores	Desventajas
Echolocation	1991	SONAR	3m	2	Alcance corto y susceptibilidad al clima.
vOICe	1992	LIDAR	–	1	El usuario requiere entrenamiento.
University of Guelph	1999	LIDAR	2m	–	El usuario requiere entrenamiento.
VAS	1999	LIDAR	2m	–	No fue probado en exteriores.
NavBelt	2003	SONAR	3m	8	Sistema de dimensiones, requiere entrenamiento del usuario.
Stuttgart	2004	LIDAR	3m	–	Alcance dependiente de la calidad de las imágenes y susceptible de condiciones climatológicas.
FIU Project	2004	SONAR	3m	6	Sistema de procesamiento lento.
EPFL	2007	SONAR	3m	4	Susceptible de condiciones climatológicas y alcance corto.
SmartVision	2010	LIDAR	3m	–	Susceptible a condiciones de luz y temperatura.
NAVI	2012	LIDAR	–	2	Susceptible de luz y temperatura.
Bremen	2012	LADAR	2.5m	1	Susceptible a condiciones de luz y temperatura.
Personal Radar	2013	SONAR	3.5m	5	Susceptible de condiciones climatológicas y alcance corto.

A partir del análisis de los trabajos de investigación presentamos, a manera de resumen, algunas características sobre y desventajas en la tabla 3.1.

Por un lado, podemos observar en la tabla 3.1 que la mayoría de los trabajos que exploran la aproximación SONAR el alcance se encuentra en el rango de los 3 metros, aun empleando múltiples sensores. Por otro lado las aproximaciones LIDAR son numerosas y la mayoría no reportan el alcance de detección pero reportan los tiempos de respuesta en el orden de 30 ms, 40-80 ms, 45-65 ms [28].

Propuesta de solución

CONTENIDO

4.1	Requerimientos para la detección de obstáculos	57
4.2	Arquitectura del sistema	58
4.2.1	Consumo energético y portabilidad	69

Se presenta una arquitectura para detectar obstáculos usando los principios básicos de los sistemas de radar. Presentamos primero los requerimientos funcionales y no-funcionales, seguidos por las partes que conforman la arquitectura y el detalles sobre cada una de ella.

4.1

Requerimientos para la detección de obstáculos

Para la creación de un sistema que sea capaz de detectar obstáculos y que éste cumpla con las características de un sistema portable se propone una arquitectura basada en un sistema de radar con capacidad para satisfacer la funcionalidad de detección, tal como se describió en la sección 2.3.3. La respuesta del sistema debe ser suficientemente rápida para proveer al peatón de la información que le permita navegar de una manera segura, es decir, minimizando el riesgo de chocar con un obstáculo en el camino seguido.

A continuación presentamos los requerimientos funcionales y no-funcionales.

Requerimientos funcionales

1. Detectar obstáculos
2. Calcular la proximidad desde el dispositivo
3. Calcular la velocidad de aproximación al dispositivo

4. Retro-alimentar al peatón para guiarlo en su caminata

Requerimientos no-funcionales

1. Tiempo corto de respuesta del dispositivo
2. Imperceptibilidad o tamaño pequeño del dispositivo
3. Bajo consumo energético

Para satisfacer los requerimientos, por un lado, se propone una arquitectura que atiende los requerimientos funcionales y, por otro lado, se plantea el uso de hardware de dimensión física pequeña y de bajo consumo energético que implemente dicha arquitectura. En la tabla 4.1 se muestran las velocidades típicas de caminata para los peatones.

Acorde con [2], la velocidad de un peatón oscila entre 11.5 y 73 m/mín esto es entre 0.19 y 1.21 m/s y la velocidad promedio es de 0.6166 m/s.

Tabla 4.1: Características de peatones

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo
Densidad (peatón/ m^2)	0.16	1.61	3.12
Velocidad (m/min)	11.5	37	73
Flujo (peatón/min/m de ancho)	9	46	75

Si tenemos una velocidad típica de 0.6166 m/s y si los objetos entran en la región de detección a partir de 15 metros, entonces el tiempo necesario para detectar obstáculos será de aproximadamente 24 segundos. El tiempo de respuesta se encuentra dentro del rango 12.4 a 78.95 segundos, como se puede observar en la tabla 4.2

Tabla 4.2: Tiempos de respuesta necesarios para el sistema de detección

	Velocidad (m/s)	Tiempo de respuesta (seg.)
Mínima	0.19	78.95
Típica	0.62	24.33
Máxima	1.21	12.40

4.2

Arquitectura del sistema

Tomando en cuenta los requerimientos funcionales y los no funcionales proponemos una arquitectura de sistema para detectar obstáculos empleando un microcontrolador y un sensor de efecto *Doppler* en ondas de radio. A continuación presentamos en tres vistas la arquitectura del sistema: vista lógica (figura 4.1), vista de despliegue (figura 4.2) y vista física (figura 4.3).

La arquitectura se propone para el sistema portable para la detección de obstáculos está compuesta por los siguientes módulos:

- 1 Generador dinámico de pulsos
- 2 Transmisor de señal
- 3 Antenas
- 4 Receptor de señal
- 5 Amplificador de señal
- 6 Conversor Analógico Digital
- 7 Procesador de señal
 - a Muestreo de señal
 - b Cancelador de ruido
 - c Integrador
 - d Monitor de umbral
- 8 Detector
- 9 Interfaz de usuario
- 10 Interfaz de comunicación

A continuación explicaremos cada uno de los módulos listados apoyándonos en las vistas de arquitectura.

1 Generador dinámico de pulsos. El generador de pulsos es un módulo de *hardware* controlado mediante *software*. El componente de hardware se encuentra dentro de la plataforma *Arduino* como se muestra en la figura 4.2 y es a través de la programación de software que se instruye a la plataforma a controlar el voltaje en una de sus terminales físicas.

Este módulo es el encargado de crear un tren de pulsos cuadrados que son ajustados acorde a los valores de frecuencia y ancho de pulso que se desee, estos parámetros son valores lógicos.

A nivel lógico, las entradas de este módulo son dos valores lógicos: frecuencia y ancho de pulso.

El componente software es una función que se ejecuta a periodos constantes de tiempo, de tal forma que la salida de la terminal de la plataforma *Arduino* oscila entre los valores 1 lógico (5 voltios) y de 0 lógico (0 voltios), y además, el estado de 1 lógico se mantiene por un porcentaje del periodo de la frecuencia establecida en los parámetros de la función.

La salida del módulo es una señal cuadrada de 5 voltios pico a pico con la frecuencia y ancho de pulso ajustado en la entrada.

El objetivo de crear un generador de pulsos con un determinado ancho de pulso y frecuencia variable es el de contar un tren de pulsos que alimente y controle la terminal de alimentación del sensor de efecto *Doppler*. El mecanismo de generación de pulsos a una frecuencia y duración de ciclo nos permite poner al sensor en modo pulso y con ello obtener una señal que nos permita realizar el procesamiento de la señal en el módulos de procesador de señal. Este módulo le entrega al módulo transmisor de señal.

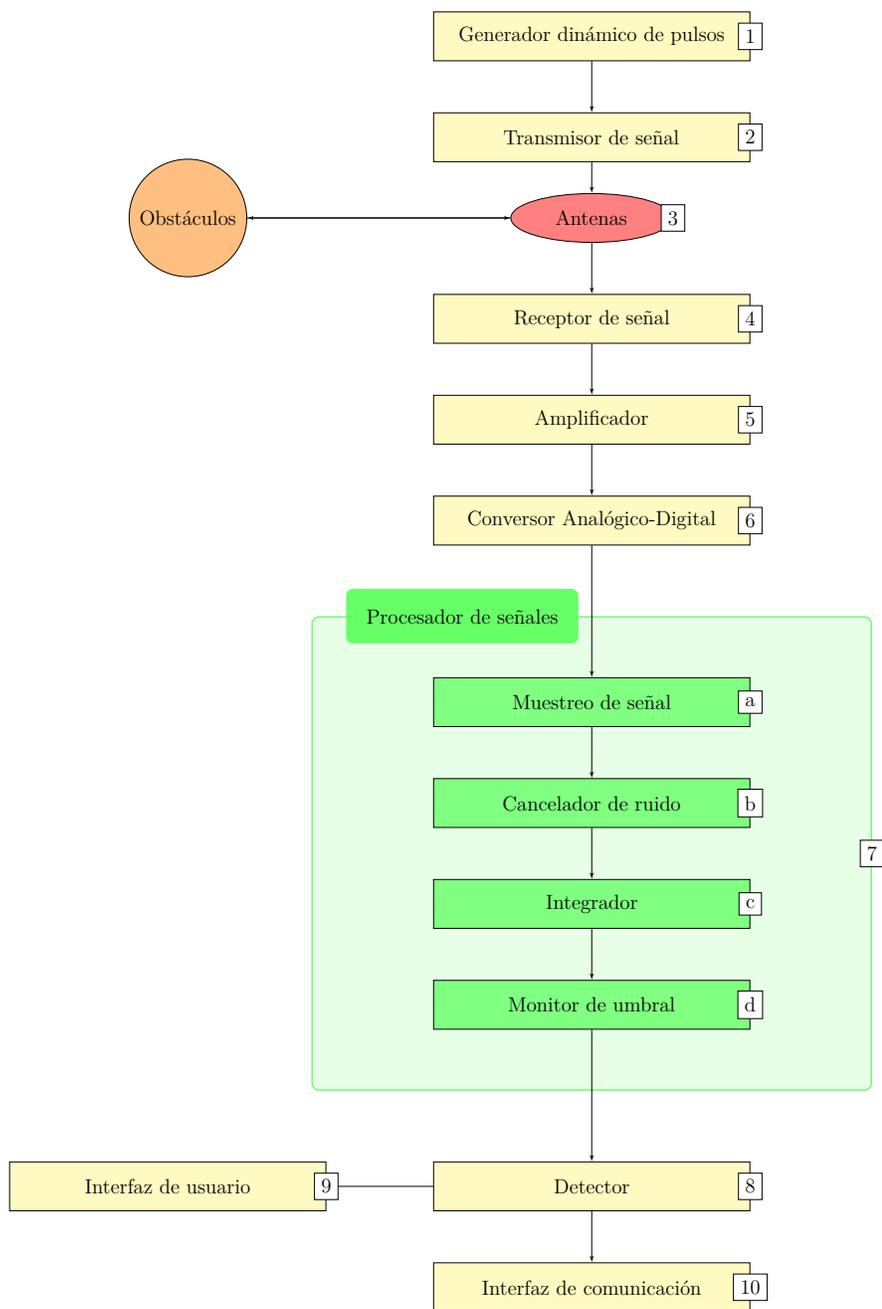


Figura 4.1: Arquitectura del sistema para la detección de obstáculos: vista lógica

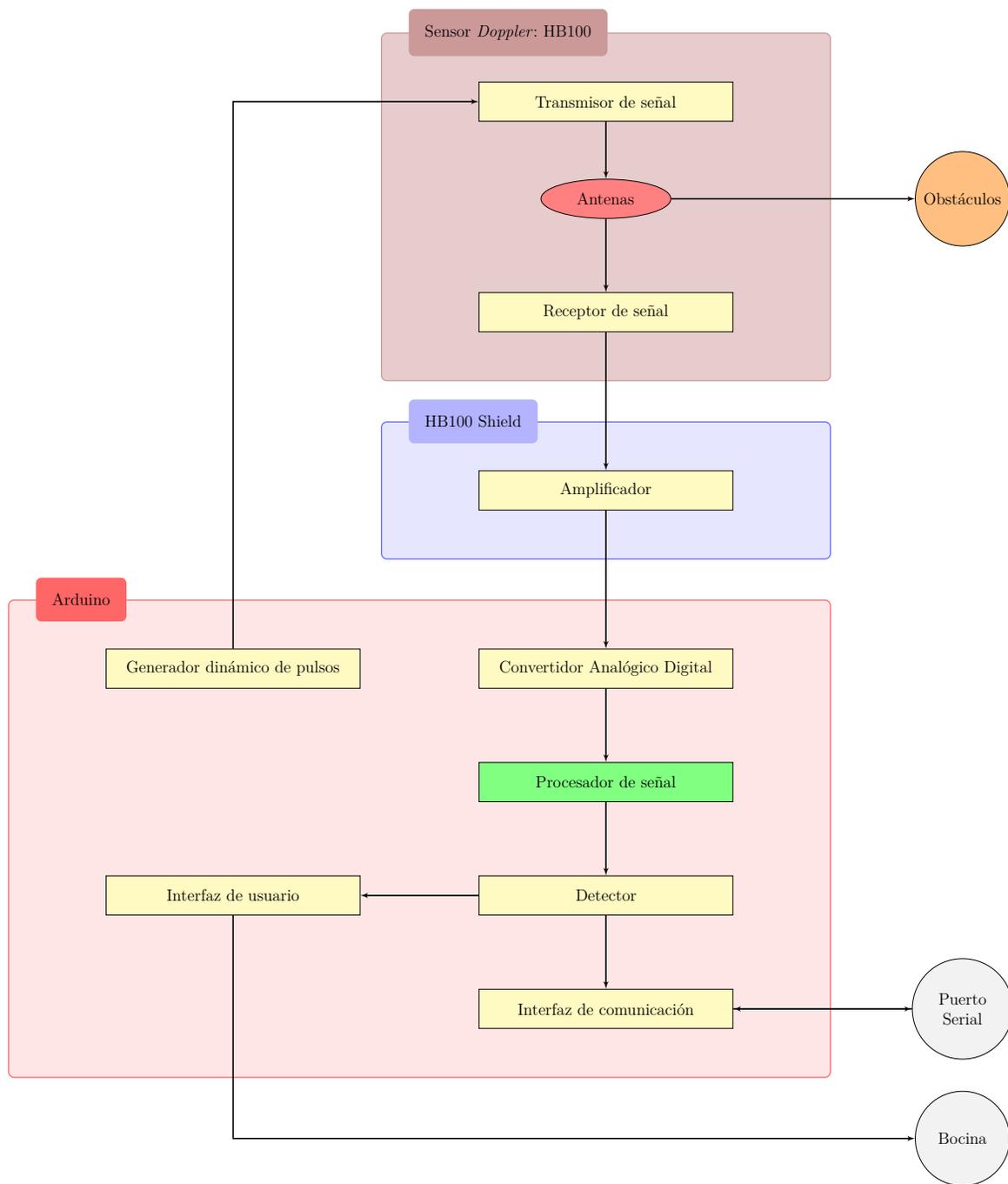


Figura 4.2: Arquitectura: vista de despliegue

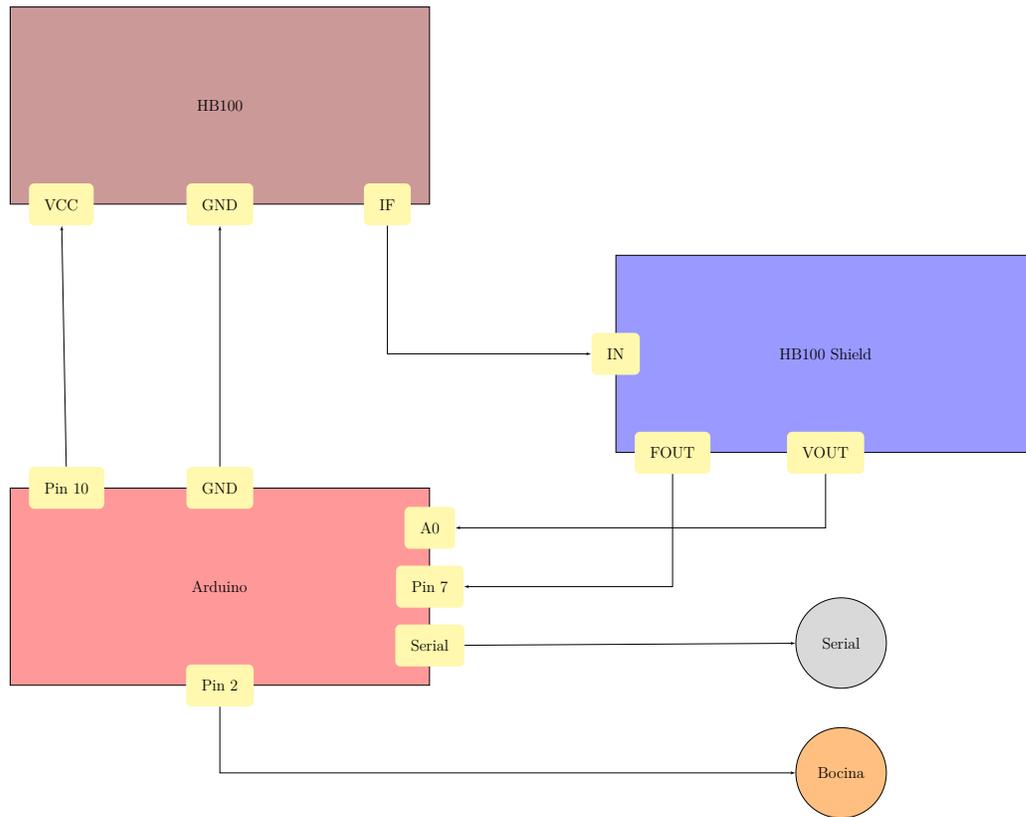


Figura 4.3: Arquitectura: vista física o de *Hardware*

2 Transmisor de señal. El transmisor de señal es un componente en hardware conformado por circuitos electrónicos que conectan un oscilador interno, en el caso del HB100 a una frecuencia de 10.525 GHz, a la antena transmisora del sensor de microondas de radio como se muestra en la figura 4.4a.

Este componente se encuentra dentro del sensor HB100. La entrada lógica de este componente es por la terminal de alimentación VCC¹ la cual, a partir del tren de pulsos que genera el módulo 1, puede entrar en el modo de operación de onda continua o en el modo de pulso o intermitente. En la figura 4.2 se muestra la conexión física además de los módulos 2 y 3. La salida de este módulo es a través de la antena de transmisión que se encuentra en el módulo 3 correspondientes a las antenas.

¹Voltage at the Common Collector

3 Antenas. Este módulo es de hardware y está constituido por dos antenas tipo panel: antena transmisora (Tx) y antena receptora (Rx), figura 4.4. La disposición de esta antena se puede observar en la figura 4.4b.

La antena de transmisión Tx es la encargada de radiar las microondas con la frecuencia de operación que vienen del oscilador a través del módulo de transmisión de señal. La antena de recepción Rx es la encargada de recibir las ondas en la banda X, rango de frecuencias de 8 a 12 GHz, y mediante el componente electrónico mezclador se obtiene el cambio de frecuencia entre las microondas transmitidas y recibidas, es decir la frecuencia *Doppler*. La frecuencia *Doppler* es obtenida en la terminal IF¹. Las antenas emiten y reciben ondas electromagnéticas, que son convertidas en señales eléctricas por los componentes electrónicos del dispositivo HB100.

Este módulo tiene como entrada la señal del módulo 2 y como salida el mezclador que se muestra en la figura 4.4a que es la entrada del módulo 4. La señal de salida es una señal de onda continua, o señal analógica, que contiene información en frecuencia y amplitud.

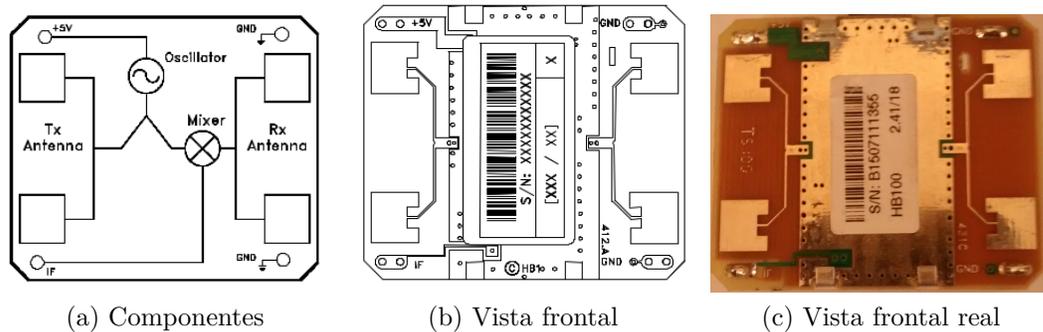


Figura 4.4: Diagrama de bloques y dispositivo físico del Sensor HB100

El dispositivo HB100 es considerado un sensor no-coherente y monoestático. No coherente debido a que solo proporciona información de la frecuencia y no de la fase de la frecuencia *Doppler*. Y monoestático porque, a pesar de que cuenta con dos antenas, la distancia de las antenas es de 4 cm y esto hace para fines prácticos no significa una diferencia en los puntos físicos de emisión y recepción.

4 Receptor de señal. Este módulo es de hardware y se encuentra como parte del dispositivo sensor HB100. En la figura 4.4a se muestra el mezclador y su conexión entre la señal del oscilador y la llegada desde la antena Rx del módulo 3. La terminal IF es la salida de este módulo. La salida entrega una señal que contiene la información de la frecuencia *Doppler* y la amplitud generada en voltaje es la intensidad de reflexión del objeto que rebotó la señal emitida por el dispositivo. El

¹Intermediate Frequency

voltaje de salida es del orden de los micro voltios, debido a ello, se requiere amplificar la señal para que pueda ser procesada por el microcontrolador. Se entrega la señal de micro voltios al módulo 5 (amplificador), la conexión física se puede apreciar en la figura 4.3, donde la terminal IF conecta con la terminal IN del denominado HB100-Shield. En la vista de despliegue se puede observar el módulo 4 conectado con el 5.

5 Amplificador. Este módulo es de hardware. Se encuentra en un circuito electrónico compuesto por dos etapas de amplificación de señal en voltaje dispuestas en cascada. La finalidad de este módulo es la de acondicionar la señal a partir de los micro voltios llevarla al rango de 2 a 5 voltios.

Para hacer la amplificación de la señal de entrada y convertir la señal al rango de detección de la plataforma *Arduino* se requiere de una etapa de amplificación de la señal. La etapa de amplificación propuesta por el fabricante del HB100 son para el modo onda continua (figura 4.5) y para modo onda intermitente (figura 4.6). El fabricante del HB100 proporciona el diseño de un amplificador para modo onda continua y otro para modo pulso, estos diseños se muestran en las figuras 4.5 y 4.6 respectivamente.

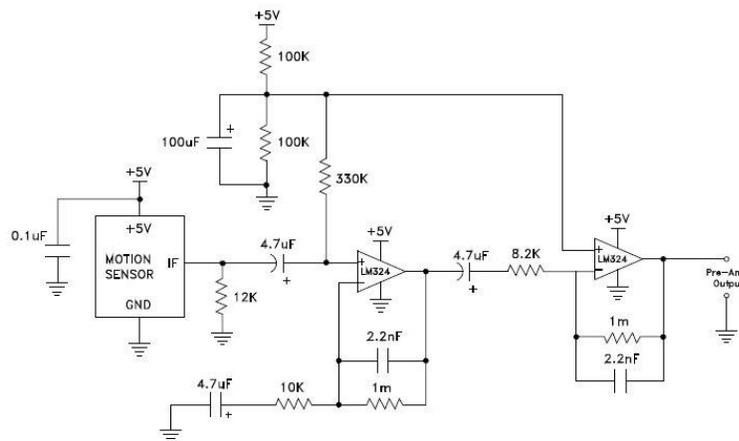


Figura 4.5: Etapa de amplificación para HB100

De la figura 4.5 se pueden apreciar en los dos casos dos amplificadores operacionales conectado uno a la salida del otro y, además, en el modo de pulso se tiene un generador de pulsos conectado a la alimentación del HB100. El comportamiento del amplificador de modo de pulso se reemplaza por el módulo 1 que controla la alimentación del HB100 como se puede observar en la figura 4.2.

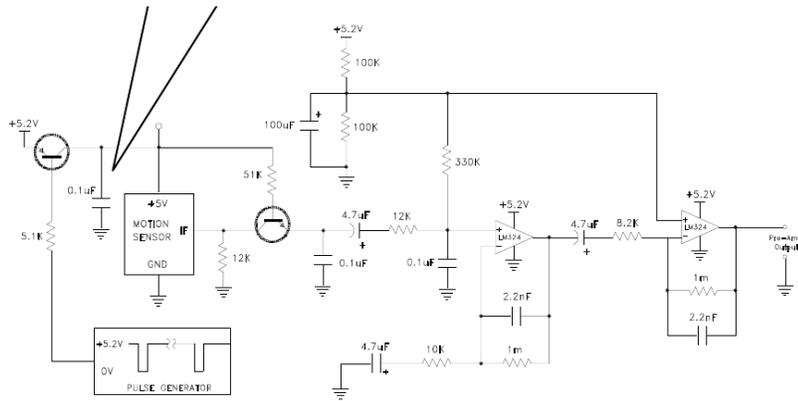


Figura 4.6: Etapa de amplificación para onda intermitente

Para el sistema es necesario crear una tarjeta de amplificación que denominamos HB100-Shield, que se acopla físicamente al sensor HB100 y provee 4 terminales: VCC, GND¹, FOUT² y VOUT³. La entrada de este módulo es una señal eléctrica del orden de micro voltios. Las salidas son: 1) señal eléctrica variable en voltaje en el orden VOUT y 2) una señal analógica que proporciona la frecuencia a través de una señal cuadrada de 0 a 5 voltios.

6 **Convertor Analógico-Digital.** Este módulo es de hardware y de software. La parte hardware y software se encuentran en *Arduino*, el software controla al convertidor analógico-digital que la plataforma proporciona para sus terminales: A0, A1, A2, A3, A4 y A5; la parte software es una función de la plataforma que se llama la instrucción: *analogRead(A0)* en este caso para la terminal A0, internamente se mapean los valores recibidos en A0 en el rango de 0 a 5 voltios a sus valores lógicos correspondientes en la escala de 0 a 1023 teniendo con ello una resolución de 4.9 mV por unidad. Este módulo tiene como entradas dos tipos de señal: 1) señal de voltaje analógico y 2) señal analógica cuadrada. La señal de voltaje analógico es procesada por el convertidor analógico digital del *Arduino* y la señal analógica cuadrada es contada por una función de la plataforma para obtener un valor lógico que representa la frecuencia *Doppler* de la señal que viene del HB100 a través del módulo 5. Para la conversión de la señal analógica cuadrada se requiere de una función contadora de pulsos para un tiempo definido por el programador.

A nivel lógico este módulo entrega dos valores al siguiente módulo 7 (figura 4.2) que es el procesador de señal.

¹Ground Terminal

²Frequency Out

³Voltage Out

7 **Procesador de señal.** Este módulo está compuesto de 4 módulos: a) Muestreo de señal, b) Cancelador de ruido, c) Integrador y d) Monitor de umbral. El módulo es totalmente de software y se encuentra dentro de la plataforma *Arduino*. En la figura 4.7 se muestran los módulos que componen al Procesador de señal.

Para que el HB100 se comporte como un radar MTI se debe calcular la fase entre pulsos consecutivos en el dominio del tiempo. El sistema compara las fases entre dos pulsos, indicándonos si existe un objetivo o no en función de si hay un desfase entre ellos.

El radar transmite dos pulsos consecutivos que impactarán en el objeto a detectar, el objeto puede estar estático o en movimiento, los pulsos retornan al detector. Si el objetivo es estático, tanto la fase como la amplitud de ambos retornos son iguales; si está en movimiento, estos parámetros variarán de un retorno a otro. El paso siguiente es sustraer un retorno del otro, si el objetivo está quieto ambos pulsos se cancelarán, y si está en movimiento obtendremos su señal.

Hay dos procesos fundamentales en el funcionamiento de un radar MTI:

1. Detección de la fase de los pulsos recibidos mediante un detector de fase.
2. Sustracción entre dos pulsos consecutivos.

Este módulo emplea el segundo proceso y realiza la sustracción entre dos pulsos en el submódulo *b* denominado Cancelador de ruido.

El dispositivo HB100 puede comportarse como un radar MTI si llevamos a cabo el procesamiento de la señal con los pasos: 1) Muestreo de señal, 2) Cancelación de ruido, 3) Integración de la señal y 4) Umbralización. Debido a estos pasos se definieron los módulos que muestra la figura 4.7. Las entradas son dos: 1) valor de voltaje de la señal (0 a 1023) y 2) valor de frecuencia de la señal (0 a 4,294,967,295). La salida del módulo es un arreglo de 50 valores lógicos cada uno de ellos enteros sin signo que van de (0 a 4,294,967,295).

a **Muestreo de señal.** Este módulo realiza el muestreo de la señal en un periodo de tiempo dado, creando así un arreglo de 50 valores lógicos. La entrada de este módulo es un valor lógico que cambia en relación al tiempo, dicho valor se encuentra en el rango de 0 a 4,294,967,295. La señal que se recibe del conversor analógico digital registrada y almacenada en un arreglo de enteros. Las muestras se toman intervalos de tiempo de un segundo.

Como se mencionó en el marco teórico, la tasa de *Nyquist* establece que para una frecuencia máxima de señal, F_{max} , debemos como mínimo tomar $2F_{max}$ como tasa de muestreo.

$$F_{Nyquist} = 2F_{max} \quad (4.1)$$

De la ecuación (4.1) y de la relación $F_d = 19.49V$ para obtener la velocidad, V , en función de la frecuencia *Doppler*, F_d . Tenemos que la $F_{max} = 19.49(1.21) = 23.58Hz$.

Si $F_{Nyquist} = 2(23.58) = 47.1658$. Entonces podemos tomar como tasa de muestreo $F_{Nyquist} \simeq 48Hz$.

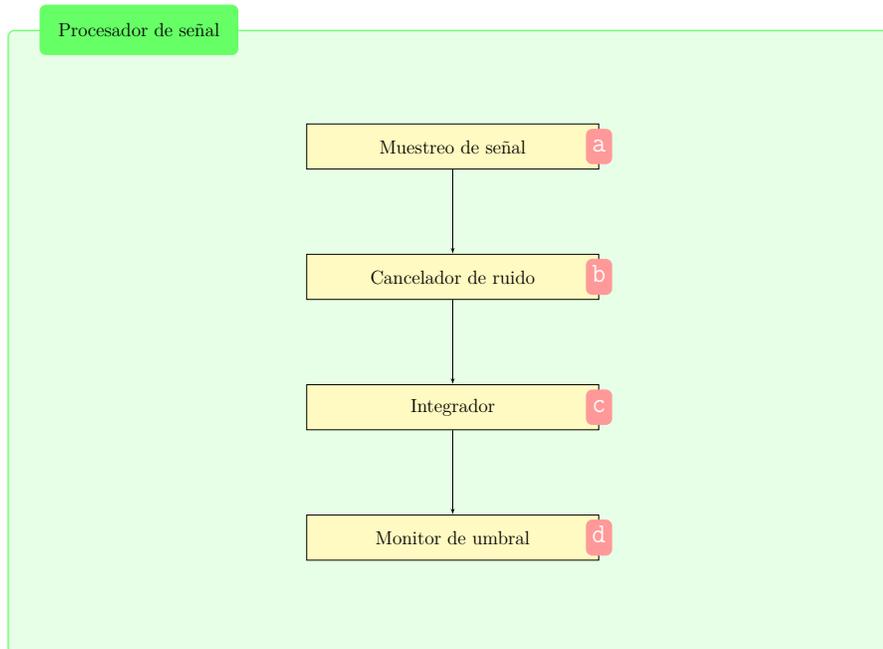


Figura 4.7: Detalle para el bloque procesador de señal

El módulo toma el muestreo atendiendo la relación establecida por *Nyquist*, de tal forma que toma 50 muestras por segundo de la señal y entrega como salida un arreglo de 50 enteros.

b **Cancelador de ruido** El cancelador de ruido es un módulo de software y se encuentra en *Arduino*. Su función es realizar la comparación de una muestra con la inmediatamente consecutiva, para poder realizar la detección de objetos en movimiento. El primer barrido sobre el arreglo de muestras que recibe se pasa por una línea de retardo y llega al sustractor; el segundo barrido llega al sustractor directamente. De ese modo se consigue el efecto de cancelar dos barridos que han llegado a intervalos de tiempo distintos.

A continuación se halla el valor absoluto de la señal que proporciona el sustractor, y tras eso se obtiene la señal que se procesará para detectar objetivos, este proceso es mostrado en la figura 4.8.

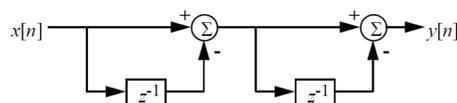


Figura 4.8: Aplicación de un cancelador de ruido

En este proceso existirán varios problemas:

1. La frecuencia *Doppler* no se podrá detectar debido a que el muestreo será equivalente a su periodo, por lo que la fase será siempre la misma, para solucionar este problema existen varias propuestas:
 - Operar a frecuencias bajas
 - Operar con PRF altas
 - Uso de varias PRF simultáneamente
 - Uso de mas de una frecuencia de desplazamiento

De las propuestas este módulo opera con PRF altas desde 2 KHz hasta 4 MHz.

El *clutter*, recordemos que se trata de interferencia por comprensión en las ondas, tendrá siempre una respuesta imprevisible y será difícil tratarlo, por lo que esto tendrá por efecto inestabilidad. Una solución viable es colocar mas de un cancelador de línea en cascada, con lo que ganaríamos rango de muestreo y por lo tanto resolvemos la inestabilidad inicial.

c) Integrador. Este módulo es de software y se encuentra en *Arduino*. Las entradas de este módulo es un arreglo lógico almacenado en la memoria de la plataforma *Arduino*. La salida es un arreglo con las mismas características del arreglo de entrada pero con los valores procesados.

El proceso de integración de pulsos se encarga de sumar los pulsos en una ventana de muestra, es decir, para $k = 10$ se toman los $k/2$ elementos a la “izquierda” y $k/2$ elementos a la “derecha” de la 50 muestras en un vector o arreglo, S ; por ultimo el resultado para el elemento k -ésimo es promediado por el valor de la ventana. El resultado se guarda para ser procesador en la siguiente fase.

d) Monitor de umbral. Este módulo es de software y se encuentra en *Arduino*. La entrada del módulo es un arreglo de valores enteros y un parámetro entero que representa el umbral. La salida es un valor entero que representa el conteo de valores que sobrepasaron el umbral.

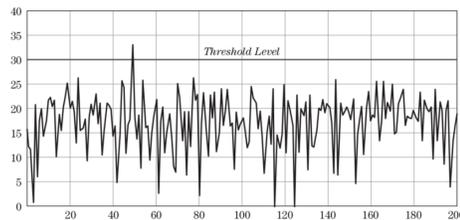


Figura 4.9: Umbralización de muestras

Se establece el umbral para el cual se procesará la muestra de datos S obtenida del integrador, como muestra la figura 4.9. El umbral es calculado para cada muestra. El umbral no

permanece fijo para lograr incrementar el SNR, el proceso se explicó en la sección 2.4, y de esta forma aumentar la posibilidad de detección sin falsas alarmas por la presencia de interferencia.

8 **Detector** Este módulo es de software que se encuentra en *Arduino*. Este módulo realiza cálculos que se interpretan como la presencia de un camino sin obstáculos o lo contrario. La entrada del módulo está compuesta de un arreglo muestra con las frecuencias obtenidas en un periodo de tiempo dado. La salida es un valor lógico que se pasa al módulo 9 y al módulo 10 simultáneamente.

Una vez que obtenemos un valor para el umbral, éste es comparado con los valores de la muestra S . Para la comparación con la muestra se establecen valores de probabilidad para la detección o para la probabilidad de falsa alarma, según sea el caso. Como resultado de establecer la probabilidad de falsa alarma se condensan y se promedian los valores procesador de la muestra S , si son mayores que el valor de probabilidad de falsa alarma se establece que se ha detectado un objeto en el camino y esta información es pasada a la siguiente fase del procesamiento.

9 **Interfaz de usuario** Este es un módulo hardware y software que se encuentra en *Arduino*. El módulo recibe como entrada un valor entero que es interpretado como una frecuencia sonora. La salida de este módulo es una frecuencia en el espectro de los sonidos audibles por el hombre.

El módulo traduce en tonos sonoros la presencia o proximidad de los objetos detectados por el sistema y los entrega por la terminal 7, como muestra la figura 4.2 a una bocina o audífono para informar al usuario sobre la detección.

10 **Interfaz de comunicación** Este es un módulo hardware controlado por software que entrega datos secuencialmente por la terminal serial de *Arduino* bajo el protocolo serial estándar. Este módulo es el encargado de comunicar la información por el puerto serial de *Arduino* pero es extensible a otras tecnologías según sea requerido.

4.2.1

Consumo energético y portabilidad

Para satisfacer los requerimientos no-funcionales se eligió el sensor *HB100* y la plataforma *Arduino*. El sensor *HB100* tiene dimensiones físicas 40 x 46.5 cm y un peso de 8 gramos. El consumo energético del dispositivo es de 40 mA.

La plataforma *Arduino Lilypad* tiene dimensiones físicas de 6 x 9 cm y un peso de 10 gramos. El consumo energético por entrada es de 40 mA por entrada o salida y se emplean 3 lo que da 120 mA.

El sistema requiere de una etapa de acondicionamiento de señal para poder emplear la plataforma *Arduino* por lo cual se emplea una tarjeta para el acondicionamiento de la señal del

sensor diseñada en base a las especificaciones del fabricante del sensor que tiene un consumo aproximado de 80 mA. La placa *HB100 Shield* tiene un peso de 7 gramos.

Entonces para el sistema completo tenemos un consumo de 240 mA. Para la plataforma *Arduino Lilypad* contamos con una batería de Litio la cual es capaz de entregar 400 mAh, entonces tenemos un tiempo de autonomía de 1.66 horas. Si bien no es un tiempo muy grande, consideramos que es suficiente para usar el dispositivo en caminatas no tan largas.

Si usamos una batería típica para *smartphone*, que proporciona 2600 mAh, el tiempo de autonomía del dispositivo es de 10.83 horas. El peso total del dispositivo es de 25 gramos.

Las dimensiones, peso y consumo energético con esta selección de *hardware* es adecuada para satisfacer los requerimientos no-funcionales.

Desarrollo

CONTENIDO

5.1	Hardware y software empleados	71
5.1.1	Sensor de microondas para movimiento	72
5.1.2	<i>Arduino</i>	72
5.1.3	Software empleado	75
5.2	Implementación	76
5.2.1	Primera fase	76
5.2.2	Segunda fase	82
5.3	Prototipo final	91

En este capítulo se describe la creación del prototipo que implementa la arquitectura descrita en el capítulo anterior. La implementación se llevó a cabo en dos fases, en la primera, se logró implementar la arquitectura básica y, en la segunda, se implementó mejoras en varios de los módulos como se describe a lo largo de este capítulo. La primera parte del capítulo se describen los componentes de *hardware* y *software* necesarios para la implementación del prototipo del sistema. En seguida se describe la evolución del prototipo hasta llegar el prototipo final.

5.1 Hardware y software empleados

Para implementar la arquitectura descrita en el capítulo anterior requerimos de los elementos de *hardware* listados a continuación.

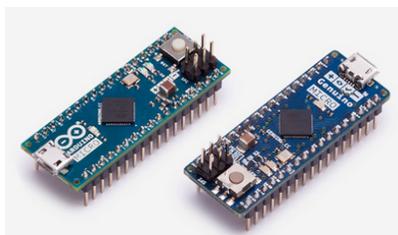
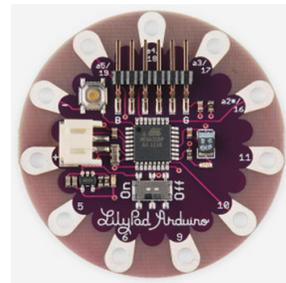
1. Sensor de efecto *Doppler* en la banda X
2. Fase electrónica de acondicionamiento de señal
3. Plataforma *Arduino*

HB100 Microwave Motion Sensor. En base a la literatura en la rama del *e-Health care* se encontró que se emplean sensores de movimiento que actúan como radares en la banda electromagnética X. La banda X es descrita en la página 33. Se listan a continuación las especificaciones proporcionadas por el fabricante del Sensor de movimiento.

- Frecuencia de onda transmitida 10.525 GHz
- Periodo de onda 3 μ s
- Voltaje de alimentación 5 VCD¹
- Consumo de corriente 30 ~ 40 mA
- Voltaje entregado en la terminal IF en el orden de los μ V
- Peso de 8 gramos

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en los microcontroladores ATmega² creada en Italia por Massimo Banzi. *Arduino* (figura 5.1) nació como un proyecto educativo en 2005. Para el desarrollo de la experimentación en los prototipos se empleó *Arduino* UNO para la primera fase y *Arduino* Micro para la segunda. Se listan los tres modelos de *Arduino* empleados:

1. *Arduino* UNO (figura 5.1a)
2. *Arduino* Micro (figura 5.1b)
3. *Arduino* Lilypad Simple Board (figura 5.1c)

(a) *Arduino* UNO(b) *Arduino* Micro(c) *Arduino* LilypadFigura 5.1: Plataformas *Arduino*

¹Voltaje de Corriente Directa

²<http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/megaAVR.aspx>; sitio consultado el 1 de octubre de 2016

Elementos generales para *Arduino*. Los elementos generales de la plataforma *Arduino* son: Entradas y salidas digitales,

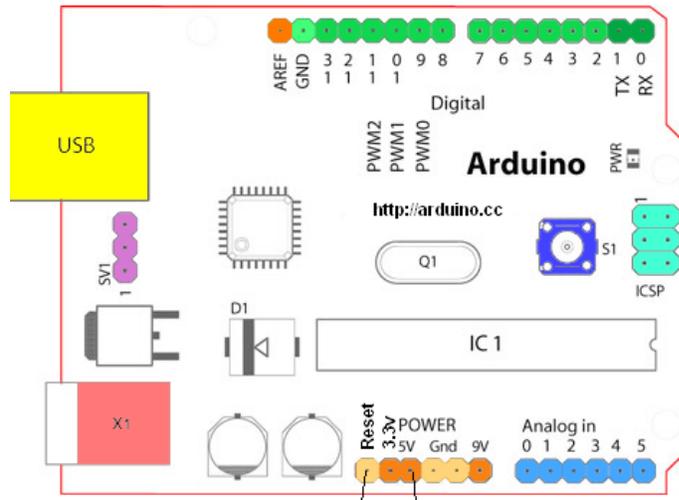


Figura 5.2: Partes de la plataforma *Arduino*

Entradas y salidas digitales. Están situadas en la parte superior de la placa mostrada en la figura 5.2, van del 0 hasta el 13, la última terminal incluye una resistencia interna. La señal digital puede estar o encendida o apagada (LOW o HIGH). Por ejemplo, se utilizan para hacer parpadear un LED¹ o como entrada para interpretar un pulsador. Las terminales 0 y 1 se emplean para cargar el programa en la placa. Las terminales 2 y 3 sirven para realizar manejo de interrupciones.

Salidas analógicas PWM. Las terminales 11, 10, 9, 6, 5 y 3, además de ser salidas o entradas digitales, se denominan salidas PWM² que son salidas digitales que imitan salidas analógicas, modificando la separación entre los diferentes pulsos de la señal. La señal PWM puede proveer valores en el rango 0 – 255. Estas terminales se utilizan, por ejemplo, para variar la intensidad de un LED o hacer funcionar un servo motor.

Entradas analógicas. Las terminales A0, A1, A2, A3, A4 y A5 conforman el grupo *analog in*. Se utilizan para tomar lectura de una señal analógica. Por lo general estas terminales se emplean para: sensores de temperatura, un LDR³, un potenciómetro que permitan un

¹Light Emitting Diode

²Pulse Width Modulation

³Light Detect Resistor

valor variable de 0-VCC, y en nuestro caso para conectar el sensor HB100 después de ser amplificada la señal.

Pines de alimentación Los pines de alimentación son: GND, 5V, 3.3V, Vin, RESET¹ y IOREF². A continuación se describen brevemente.

- GND: Son los pines a tierra de la placa.
- 5V: Por esta terminal la placa suministra 5V
- 3,3V: Por esta terminal la placa suministra 3,3V
- Vin: Voltaje de entrada, terminal X1, por esta terminal se puede alimentar la placa. Es útil para emplear baterías como alimentación de la placa.
- RESET: Por esta terminal se usa para reiniciar el programa cargado en la placa.
- IOREF: Sirve para que la placa reconozca el tipo de alimentación que requieren los *Shields*

Terminales y puertos. La terminal AREF³ sirve para suministrar un voltaje diferente a 5V por las terminales digitales. El conector USB⁴, se usa para: cargar el programa, escribir o leer datos por monitor serial y también, para alimentar la placa de desarrollo.

Presentamos a continuación las características para la plataforma extraídas del sitio web del fabricante⁵ y se muestra el aspecto físico en la figura 5.1.

Arduino UNO

- Microcontrolador ATmega328P.
- Voltaje de operación 5V.
- Voltaje de entrada (recomendado) 7-12V.
- Voltaje de entrada (límites) 6-20V.
- Pines digitales entrada/salida 14 (de las cuales 6 proporcionan salida PWM).
- Pines PWM I/O Pins 6.
- Pines de entrada analógica 6.
- Corriente por pin entrada/salida 20 mA.
- Corriente por pin alimentado con 3.3V 50 mA.
- Memoria Flash 32 KB (ATmega328P) de los cuales 0.5 KB son empleados por el

bootloader.

- SRAM 2 KB (ATmega328P).
- EEPROM 1 KB (ATmega328P).
- Velocidad de reloj 16 MHz.
- Largo 68.6 mm.
- Ancho 53.4 mm.
- Peso 25 g.

Arduino Micro

- Microcontrolador ATmega32U4
- Voltaje de operación 5V
- Voltaje de entrada (recomendado) 7-12V
- Voltaje de entrada (límite) 6-20V
- Pines digitales I/O 20

¹Reinicio

²Input Output Reference

³Amplitude Reference

⁴Universal Serial Bus

⁵<https://www.arduino.cc/> | fecha de acceso: 1 de Octubre de 2016.

- Pines PWM 7
- Pines de entrada analógica 12
- Corriente por pin de entrada/salida 20 mA
- Corriente por pin alimentado con 3.3V 50 mA
- Memoria Flash 32 KB (ATmega32U4) de los cuales 4 KB son empleando por el *bootloader*
- SRAM 2.5 KB (ATmega32U4)
- EEPROM 1 KB (ATmega32U4)
- Velocidad de reloj 16 MHz
- LED empotrado 13
- Largo 48 mm
- Ancho 18 mm

- Peso 13 g

Arduino Lilypad Simple Board

- Microcontrolador ATmega328
- Voltaje de operación 2.7-5.5 V
- Voltaje de entrada 2.7-5.5 V
- Pines digital I/O 9
- Pines PWM 5
- Pines analógicos 4
- Corriente por pin entrada/salida 40 mA
- Memoria Flash 32 KB (de los cuales 2 KB son empleados por el *bootloader*)
- SRAM 2 KB
- EEPROM 1 KB
- Velocidad de reloj 8 MHz

5.1.3

Software empleado

Lenguaje de programación. El lenguaje que se utiliza para el desarrollo y carga de programas en la plataforma *Arduino* es: CPP¹ bajo el estándar POSIX para versión 4.9.2 soportado por el compilador GCC².

Bibliotecas. Hay tres tipos de Bibliotecas³ de *Arduino*: base (core), estándar (standard), y contribuciones (contributed libraries). En esta implementación se emplean las bibliotecas base y estándar para la versión 1.6.5.

Entorno de desarrollo. El IDE⁴ empleado para este trabajo es *Platformio*⁵ versión 1.2.2. Para la creación de la interfaz de visualización para medir la señal en la experimentación, se hace uso de la plataforma *Processing*⁶ versión 3.0.1.

¹C Plus Plus

²The GNU Compiler Collection

³<https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries> | fecha de acceso: 1 de octubre de 2016.

⁴Integrated Development Environment

⁵<http://platformio.org/> | fecha de acceso: 1 de octubre de 2016

⁶Se trata de una plataforma flexible para desarrollar *software* para diseñadores gráficos basado en el bosquejo. Sitio: <https://processing.org> | fecha de acceso: 1 de octubre de 2016

Partimos de la arquitectura descrita en la figura 4.1 del [cuarto](#) capítulo. Para cada módulo se ha implementado el *software* correspondiente, mismo que controla el *hardware* asociado. A continuación se describe la implementación de cada módulo para las dos fases.

Durante esta primera fase se empleó la plataforma *Arduino* UNO, una tablilla de prototipos y los componentes electrónicos necesarios para el montaje del módulo de amplificación, además del sensor HB100. A continuación se explica cada módulo implementado.

1 **Generador dinámico de pulsos.** Para hacer que el HB100 se encuentre en modo de operación de pulso es necesario crear un tren de pulsos y alimentar el sensor con éste. Se puede observar en las figura 4.3 y 4.2 la conexión física y lógica respectivamente.

La plataforma *Arduino* cuenta con una función PWM que genera pulsos con un ciclo de duración controlado por el registro del microcontrolador ATmega correspondiente. El microcontrolador ATmega32U4, ATmega328P y ATmega328 [29] tiene tres temporizadores con registros asociados a ellos. El primer registro controla el contador de programa del microcontrolador, el segundo y tercero controlan la duración del pulso. La plataforma usa los temporizadores para hacer un conteo de tiempo y compara con los registros los valores contados, cuando el conteo es mayor que el registro, la señal es pasada de uno lógico a cero, y para el caso contrario la señal pasa de uno lógico a cero.

CÓDIGO 5.1: Función para la generación de trenes de pulsos

```

1 void setFreq(unsigned long percentage, unsigned long frequency)
2 {
3     TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(COM1B1) ;
4     ICR1 = 16e6 / (frequency * 16);
5     pwm1 = map(percentage, 0, 100, 0, 1023);
6     pwm2 = 1023 - pwm1;
7     float x = float(pwm2);
8     float y = float(pwm1);
9     x = (x * ICR1)/1023;
10    y = (y * ICR1)/1023;
11    OCR1B = int(x);
12    OCR1A = int(y);
13 }

```

Modificando los valores de los registros podemos manipular la frecuencia y duración de ciclo de los pulsos que la plataforma provee en las terminales 9, 10, 11 y 12. La implementación de este módulo modifica dos registros *OCR1A* y *OCR1B* para controlar la frecuencia y ancho de pulso

con salida en las terminales 9 y 10 de la plataforma. Se usa la terminal 7, como se puede observar en la figura 4.3, como retroalimentación para controlar la frecuencia y estabilizarla. La frecuencia es entregada en el siguiente módulo: Transmisor de señal. El código 5.1 es la implementación de este módulo. La implementación realiza un cambio de valores en los registros del temporizador que controla las terminales 9 y 10. Para establecer el valor de frecuencia y duración del ciclo del pulso se calcula el valor proporcional en la escala de 0 a 1023 equivalente a los valores que se desean obtener. La función *void setFreq(unsigned long percentage, unsigned long frequency)* calcula el ciclo de duración para los pulsos y la frecuencia de pulsos que se modulará por el terminal 9 y 10 simultáneamente. La salida atiende al siguiente modelo:

```
fout = f / (2 N\cdot TOP),
donde f = main clock (16MHz),
N = pre-scalar (se pone en 8 para este sistema),
TOP = el valor del registro ICR1.
```

ICR1 puede ser desde 1 hasta 65535 con lo que podemos variar desde la frecuencia 15Hz hasta 1MHz. Para nuestro caso : $ICR1 = f / (2 * 8 * 16000000) = 16e6 / (freq * 16)$ como puede observarse en la línea 4,5,6 del código 5.1. Las líneas 11,12 realizan la asignación a los registros para los valores calculados con la frecuencia y la duración del ciclo de pulso deseados.

2 **Transmisor de señal**, **3** **Antenas** y **4** **Receptor de señal**. Estos módulos no fueron implementados ya que son parte del *hardware* del HB100.

5 **Amplificador**. Basándonos en las recomendaciones del fabricante como primera fase se montó el circuito de la figura 4.5. Se montó el circuito acondicionador de señal en una placa de prototipos acoplada con el sensor. Se muestra el montaje de la etapa de amplificación en la figura 5.3.

6 **Convertor analógico digital**. Este módulo se encuentra implementado en *software*, mediante un llamado a la función de lectura de señal en una terminal analógica dada de *Arduino: analogRead(A0|...|A5)*, en nuestro caso A0. El microcontrolador invoca al circuito de conversión sobre la señal analógica conectada en las terminales A0, A1, A2, A3, A4 y A5 a valores lógicos de 0 a 1023 acorde con los niveles de voltaje suministrados. En la línea 2 del código 5.2 se puede ver la invocación a la función *analogRead(A0)* que convierte la señal recibida en un valor entero equivalente a un voltaje entre 0 y 5 voltios, la línea 6 realiza una conversión de entero a voltaje para mandarlo por la comunicación serial. También, del mismo código se puede observar un filtro que equivale a la velocidad peatonal, línea 9, expresado en el rango de 0.19 y 1.21 *m/s*.

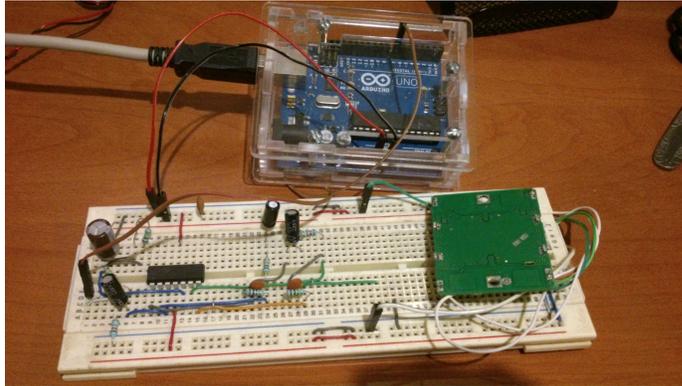


Figura 5.3: Montaje del módulo de amplificación de la señal

CÓDIGO 5.2: Conversión de señal analógica a digital

```
1 float ADC(){
2   int read = analogRead(A0);
3   float speed = readSpeed();
4   Serial.print(read);
5   Serial.print(",");
6   Serial.print(5.0*read/1023);
7   Serial.print(", Vel: ");
8   Serial.print(speed);
9   if(speed >= 0.19 && speed <= 1.21)
10    Serial.print(" |<Vel.Peatonal/>");
11   return speed;
12 }
```

7 Procesador de señal. En este módulo se implementa el muestreo de la señal y su procesamiento para entregarlo al detector. La etapa de muestreo hace uso de la función de cálculo de frecuencia. El cálculo de la frecuencia leída de la terminal A0 se obtiene con la función *readFreqRx()*, la cual es un contador de pulsos por segundo.

El código 5.4 es la implementación de un contador pulsos que hace el cálculo de la frecuencia para un intervalo de tiempo de un segundo.

El código 5.3 es la implementación de la función de muestreo en la que se obtienen valores de frecuencia del sensor y estos son almacenados en un arreglo de 50 valores. En la línea 13 se almacena el valor obtenido en un arreglo de muestras, *sample*.

Las funciones *readFreqRx()* y *readFreqTx()* realizan un conteo de los pulsos de sus entradas (*pinRx* y *pinTx*) para calcular la frecuencia que se almacena en la muestra. La disposición de las conexiones se puede ver en la figura ??.

CÓDIGO 5.3: Muestreo y almacenamiento de las señales recibidas

```
1 void sampling(unsigned int millisecs){
2   digitalWrite(pinLED, HIGH);
3   initSampling();
4   int muestras = 0;
5   t1 = millis();
6   t2 = millis();
7   int c = 0; // indice secuencial para llenar muestreo de freq
8   while ( t2 <= t1 + (millisecs)) {
9     digitalWrite(pinLED, c%2);
10    float f_index = readFreqRx();
11    long v_read = map(analogRead(A0),512,1023,0,1023);
12    int index = int(f_index);
13    sample[c++] = f_index; // Frecuencia
14    muestras ++;
15    t2 = millis();
16    if(c >= _LIM_SAMPLING){
17      break;
18    }
19  }
20  muestras = 0;
21  digitalWrite(pinLED, LOW);
22 }
```

CÓDIGO 5.4: Función para calcular frecuencias de entrada analógica

```
1 float readFreqRx()
2 {
3   // Lectura de periodos entre pulsos
4   dRx_UP = pulseIn(pinRx, HIGH);
5   dRx_DOWN = pulseIn(pinRx, LOW);
6   freqAct_Rx = 1e6/(dRx_UP+dRx_DOWN);
7   if(freqAct_Rx > 1023)
8     freqAct_Rx = 1023;
9   return freqAct_Rx;
10 }
```

8 **Detector.** Este módulo procesa la información de muestreo entregado en forma de arreglo lógico. El producto del muestreo es filtrado para las frecuencias *Doppler* que equivalen al rango de velocidad peatonal, que son de 10 a 200 *Hertz*. El código 5.5 hace uso de un par de funciones *printTimes()* y *printFrecuencias()*, las cuales envían el tiempo en que el pulso es uno lógico y la frecuencia calculada con el contador de pulsos, respectivamente. Derivado del filtrado se obtienen valores que pueden ser interpretados como obstáculos detectados. Los valores dentro del rango del filtro son posibles obstáculos detectados. El resultado de la detección se envía al módulo de comunicación y al módulo de interfaz de usuario. La comunicación con la interfaz de usuario es a través de la función *syncComm()* que implementa la comunicación síncrona con la contraparte escrita para la plataforma *Processing*.

CÓDIGO 5.5: Filtrado para detectar objetos que se aproximen o alejen a velocidad peatonal

```

1 void detector(){
2   int i=0
3   for(;i<_LIM_SAMPLING_ARRAY;i++){r
4     freqAct_Rx = sample[i];
5     if ( freqAct_Rx < 200 && freqAct_Rx > 10) // Filtro de frecuencias ej . 10 < ←
6       freq < 200
7     {
8       printTimes() ;
9       printFrecuencias() ;
10      syncComm();
11    }
12  }

```

9 Interfaz de usuario. Con la finalidad de observar y procesar los retransmite a través de su módulo de comunicación hacia una computadora portátil. Se emplea el puerto serial de la plataforma *Arduino*. En la figura 5.4a se puede observar la interfaz de visualización. La interfaz cuenta con divisiones para el nivel de voltaje de la señal y un recuadro que despliega los valores de frecuencia y voltaje, instantáneamente. La interfaz gráfica cuenta con una rejilla de tiempos a

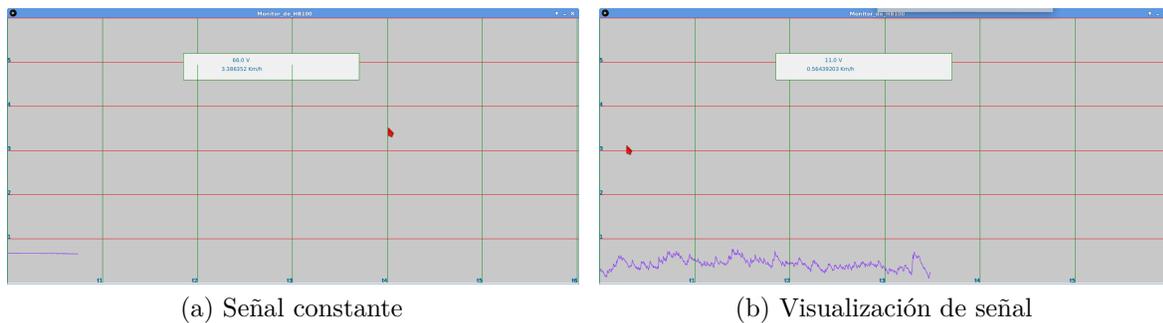


Figura 5.4: Interfaz de visualización para sistema basado en HB100

intervalos de un segundo cada uno. La rejilla está dividida en secciones verticales y horizontales, que sirven de referencia para la lectura visual. En la figura 5.4b se muestra dos ejemplo de captura del visualizador en funcionamiento. Los datos que se visualizan, son las señales tomadas del HB100 en tiempo real para los casos de un espacio sin obstáculos (figura 5.4a) y para un espacio con obstáculos (figura 5.4b).

En los códigos 5.6 y 5.7 son la implementación de la comunicación entre la plataforma *Arduino* y la computadora portátil a través de una conexión serial, respectivamente. A nivel de *software* la comunicación se establece en el primer puerto serial *ttyACM0* que tiene por un lado a

la función *Serial.print()* de *Arduino* escribiendo al flujo del puerto y por el otro lado, la función *port.read()* leyendo lo que se recibe en el puerto serial de la computadora portátil.

CÓDIGO 5.6: Función *setup()* de la interfaz de visualización

```
1 void setup() {
2   size(1300, 600);
3   frameRate(10); // ejecuta 10 cuadros por segundo
4   port = new Serial(this, Serial.list()[0], 9600); // Abre uno el primer puerto
5           // de la lista serial a la velocidad de 9600 bps
6   background(0);
7   Xpos = width+1;
8 }
```

En el caso de *Arduino* se declaran las funciones *setup()* y *loop()*. Para el caso de *Processing* se declaran las funciones *setup()* y *draw()*. Se presenta en el código 5.6 la función *setup()* y en el código 5.7 se encuentra la implementación del ciclo infinito que dibuja la interfaz de gráfica.

CÓDIGO 5.7: Función *draw()* para la interfaz de visualización

```
1 void draw() {
2   drawGrid(6);
3   val = port.read();
4   println("Valor recibido: "+val);
5   float vel = val/19.49;
6   float freq = val;
7   if(freq > fMax){
8     fMax = freq;
9     vMax = vel;
10  }
11  fill(240); rect(400,80,400,60);
12  fill(0, 102, 153); textAlign(RIGHT); text(freq + " V",550,100);
13  textAlign(RIGHT); text(vel + " Km/h",580,120);
14  Ypos = (height - int(val));
15  if (Xpos > width) { // revisa si el la posición llega la final
16                    // del ancho de la rejilla
17    background(0); // Limpiar pantalla
18    Xpos = 0; // inicia nuevo trazo
19    lastXpos= Xpos; // actualización de posición X
20    lastYpos= Ypos; // actualización de posición Y
21    background(200);
22
23  }
24  stroke(127,34,255);
25  strokeWeight(1);
26  line(lastXpos, lastYpos, Xpos, Ypos);
27  lastXpos= Xpos; lastYpos= Ypos;
28  Xpos++; // incremento de la posición horizontal
29 }
```

Se presenta en el código 5.8 la función *drawGrid()* encargada de crear la rejilla para distinguir

los niveles de las señales mostradas en la ventana de visualización. La función *stroke()* establece el color de las líneas, y la función *line()* crea una línea entre dos coordenadas que recibe como parámetros.

CÓDIGO 5.8: Función para crear la rejilla

```
1 void drawGrid(int numLines)
2 {
3     stroke(240,0,0);
4     for(int i =0; i< numLines; i++){
5         line(0,i*100,width-1,i*100);
6         text(numLines-i,8, i*100);
7     }
8     stroke(0,140,0);
9     for(int i =0; i < width/numLines; i++){
10        line(i*(width/numLines), 0, i*(width/numLines), height-1);
11        text("t"+i, i*(width/numLines), height -1);
12    }
13 }
```

10 **Interfaz de comunicación.** Este módulo emplea la comunicación serial para transferir los valores resultantes del procesamiento y detección al puerto serial y se encuentra en todo lugar donde se invoque las función *Serial.print()*, *Serial.println()*, *Serial.write()*, *Serial.read()* y *Serial* principalmente. Por ejemplo, en las líneas de 4 a 8 del código 5.2.

5.2.2

Segunda fase

Durante esta fase se empleó la plataforma *Arduino* Micro y *Arduino* Lilipad, una tablilla de prototipos y se construyó una placa PCB¹ para el montaje del módulo de amplificación, además del sensor HB100. A continuación se explica cada módulo implementado.

1 **Generador dinámico de pulsos.** Como se muestra en la figura 4.2 el generador de pulsos cuadrados es conectado a la alimentación del HB100 para interrumpir la transmisión del radar y con ello mandar trenes de microondas a través de la antena de transmisión Tx.

Este módulo es una extensión del mismo en la primera fase. Se muestra en el código 5.9 la implementación de una función de control para el modo de operación. El modo de operación puede cambiar a través parámetros de *software* entre las opciones: 1) onda continua, 2) modo pulso, 3) alternando entre modo continuo y pulso, y por último, realizando muestreo en cualquiera de los modos anteriores. En el código 5.9 se puede observar en las líneas 16, 17 y de línea 30 a la 34 que la etapa de control corta el suministro energético a una frecuencia PRF de 2 KHz y establece el

¹Printed Circuit Board

ciclo de duración del pulso en 4%. Referente al *hardware*, se implementó el circuito que propone el fabricante en la figura 4.6 de tal forma que el *hardware* es controlado por la función de control y puede cambiar el modo de operación al sensor HB100. Podemos controlar el modo de operación empleando una salida digital de *Arduino*, la cual puede alimentar directamente al sensor en su pin de VCC o puede alimentarlo con un tren de pulsos con la frecuencia y duración de ciclo que se crea conveniente. Con esta implementación le damos flexibilidad a nuestro sistema para manejar varias combinaciones de PRF y duración de ciclo acorde con lo que requiere el experimento. Este control provee la capacidad de adaptación para buscar las frecuencias que nos den un mejor resultado en la detección de obstáculos.

CÓDIGO 5.9: Control de modo

```
1 void modeControl(unsigned short int mode){
2     switch (mode) {
3         case 0: digitalWrite(pinTimer2_2, HIGH);
4                 t0 = millis();
5                 if(VERBOSE)
6                     Serial.println("CW MODE ACTIVATED");
7                 break;
8         case 1: setFreq(percentage_duty, frequency_Tx);
9                 t0 = millis();
10                if(VERBOSE)
11                    Serial.println("Pulse MODE ACTIVATED");
12                break;
13        case 2: t1 = millis();
14                if(t1-t0 > sampling_time)
15                {
16                    t0 = millis();
17                    radarMode = (radarMode+1) % 2;
18                    modeControl(radarMode);
19                }
20                if(VERBOSE)
21                    Serial.println("ALTERNATED (CW/PULSE) MODE ACTIVATED");
22                break;
23        case 3: initSampling();
24                sampling(4);
25                samplingComm();
26                if(VERBOSE)
27                    Serial.println("Sampling MODE ACTIVATED");
28                break;
29    }
30 }
```

Adicional al generador, se creó un sistema de control automático para calibrar la frecuencia y duración del pulso, como se muestra en el código 5.10. Se hace un barrido de frecuencias desde 0 hasta 5Khz y se obtienen la frecuencia mínima a la que el dispositivo recibe señal y la frecuencia máxima. Las frecuencia mínima y máxima son almacenadas en un par de variables. Este ajuste se ejecuta cada vez que se enciende o reinicia la plataforma.

CÓDIGO 5.10: Funciones para calibrar frecuencia Fx y ancho de pulso

```
1 void detectWorkingFreqTx(){
2   for(int delta = 0 ; delta < 5000 ; delta ++){
3     digitalWrite(pinLED, delta%2); // Indicador de procesamiento
4     setFreq(50, delta);
5     readFreqRx();
6     readFreqTx();
7     if(delta < freqTx_min && (dRx_DOWN > 0 || dRx_UP > 0)){
8       freqTx_min = delta;
9     }else if(delta > freqTx_max && freqTx_min > 0 && (dRx_DOWN > 0 || dRx_UP > 0)){
10      freqTx_max = delta;
11    }
12    if(dRx_UP == 0 && dRx_DOWN == 0 && freqTx_max > 0 && freqTx_min > 0)
13      break;
14  }
15  Serial.print("Rango para Freq:");
16  Serial.print(freqTx_min);
17  Serial.print(", ");
18  Serial.print(freqTx_max);
19  Serial.println("]");
20 }
21 }
```

Los módulos [2](#) Transmisor de señal, [3](#) Antenas y [4](#) Receptor de señal no fueron implementados ya que son parte del dispositivo HB100.

[2](#) Transmisor de señal, [3](#) Antenas y [4](#) Receptor de señal. Estos módulos no fueron implementados ya que son parte del *hardware* del HB100.

[5](#) **Amplificador.** En la figura 5.5 se muestra el diseño electrónico para la tarjeta y en la figura 5.6 se muestra la tarjeta *Shield* terminada. Además de realizar la amplificación de la señal, también se le incorporó un filtro electrónico para evitar el ruido producido por la etapa de alimentación eléctrica, así como un comparador. El comparador es para convertir la señal de entrada en pulsos y contar con una señal digital adicionalmente a la señal analógica que entrega la etapa de amplificación. En esta fase se empleo la plataforma *Arduino* Micro para aprovechar el uso de la tablilla de prototipos. Se muestra en la figura 5.7 el montaje sobre la plataforma *Arduino* Micro.

Gracias a la creación de la PCB HB100-Shield, se mejoró el amplificador de la fase anterior y se utilizaron componentes de montaje superficial para la construcción. Con ello las dimensiones del prototipo disminuyeron como se puede observar en la figura 5.7.

Además, se mejoró la precisión debido al uso de amplificadores operacionales de la categoría de instrumentación, OPA2365¹ en lugar de LM324. Aprovechando las mejoras se incorporó un comparador para tener una salida adicional, terminal FOUT como muestra la figura 4.3, con una onda cuadrada digital a partir de la señal recibida en la terminal IF del sensor HB100.

¹<http://www.ti.com/product/opa2365> | fecha de acceso: 1 de febrero de 2016

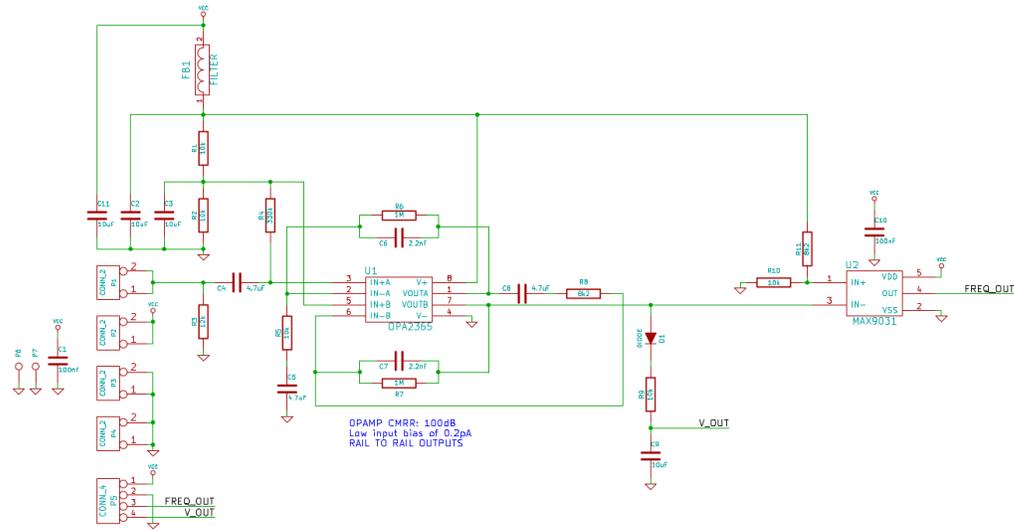


Figura 5.5: Diagrama de diseño para acondicionar la señal del sensor HB100



Figura 5.6: PCB para HB100

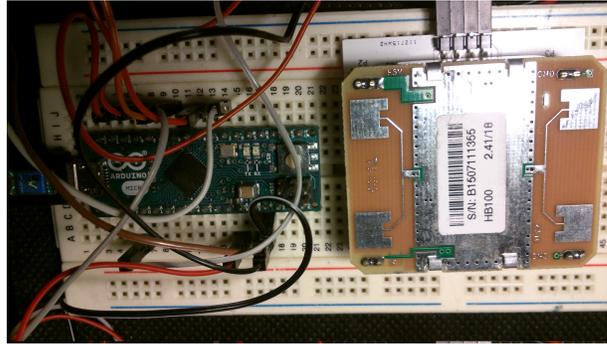


Figura 5.7: Montaje del prototipo en la fase 2

6 Conversor analógico digital. Para la segunda fase se creó una etapa ADC en la tarjeta HB100-Shield que describe el diseño de la figura 5.5, la amplificación entrega la señal en el rango de 2.5 a 5 voltios. La tarjeta de amplificación cuenta con un comparador que recibe la señal del HB100 y toma como umbral 2.5 voltios, de tal manera que cuando una señal sobrepasa este umbral se entrega un uno lógico, de lo contrario se entrega un cero lógico. La etapa creada cuenta a grandes rasgos con una etapa de dos amplificadores operacionales que procesan la señal y un comparador que se alimenta con la salida amplificada. A partir del comparador se obtiene la señal cuadrada que convierte la señal analógica en digital.

7 Procesador de señal. Se extendió la arquitectura de la fase 1 detallando el bloque de Procesamiento. Se crearon 4 bloques que forman, a su vez, al bloque de Procesamiento de la arquitectura de la Fase 1. Se puede observar en la figura 4.7 los bloques: a) Muestreo de señal, b) Cancelador de ruido. c) Integrador y d) Monitor de umbral.

CÓDIGO 5.11: Muestreo de frecuencias para la fase 2

```

1 void samplingWithCanceller(int period, int dutyCycle, int pin, int sample_array←
   []){
2   for(int i=0; i< _LIM_SAMPLING_ARRAY/3; i++) // rutina para estabilizar las
3     noiseCanceller(period,dutyCycle, pin); // lecturas
4   for(int i=0; i< _LIM_SAMPLING_ARRAY; i++)
5     sample_array[i] = noiseCanceller(period,dutyCycle, pin);
6 }

```

A continuación detallaremos la implementación de los submódulos que conforman el Procesador de señal.

a) Muestreo de señal. En este módulo se obtienen las muestras de la señal recibida, 50 valores, y se almacenan en un arreglo lógico para ser procesadas por el siguiente módulo. la implementación del muestreo de la señal es heredado del módulo de Procesador de señal

de la primera fase. En el código 5.11 la función *samplingWithCanceller()* toma 50 muestras, acorde con la tasa de *Nyquist*, y se almacena en el arreglo, *sample*. Para obtener los valores que se almacenan en el arreglo de muestreo se hace uso de la función *noiseCanceller()*. La función *noiseCanceller()* se describe en el módulo siguiente.

b **Cancelador de ruido.** En este módulo (5.12) se emplea la técnica de cancelación de ruido, puede ser consultada en el **segundo** capítulo, a partir del envío de dos pulsos consecutivos (código 5.13) y su diferenciación para atenuar y poder discriminar las señales de interferencia que tienen una probabilidad uniformemente distribuida en el espectro de señales recibida por el sistema. El resultado de la cancelación se almacena en un arreglo lógico de 50 valores enteros. La función de envío de pulsos implementada en el código 5.13, envía dos pulsos por la antena Tx del sensor HB100, lo anterior se logra desconectando la alimentación del sensor y conectándola nuevamente después de un periodo de tiempo que concuerda con la frecuencia y la duración del ciclo de pulso deseada.

CÓDIGO 5.12: Cancelador de ruido como función auxiliar de *samplingWithCanceller*

```

1  int noiseCanceller(unsigned int period, unsigned int percentage){
2      int v0, v1;
3      v0 = sendPulse(period, percentage, pinTimer2_2);
4      v1 = sendPulse(period, percentage, pinTimer2_2);
5      if(v1-v0 < 0)
6          return 0;
7      return v1-v0;
8  }
```

CÓDIGO 5.13: Función de envío de dos pulso consecutivos

```

1  int sendPulse(unsigned int period, unsigned int percentage, unsigned int pin←
    ){
2      unsigned int delayUP = period*percentage/100;
3      unsigned int delayDOWN = period - delayUP ;
4      digitalWrite(pin, LOW);
5      delayMicroseconds(delayUP);
6      int response = analogRead(pin);
7      digitalWrite(pin, HIGH);
8      delayMicroseconds(delayDOWN);
9      digitalWrite(pin, LOW);
10     return response;
11 }
```

d **Integrador.** Este módulo implementa, a partir de un tamaño de ventana de valores en un arreglo, el promedio de los valores vecinos que fueron tomados como muestra en la etapa de cancelación de ruido. El resultado de la integración se almacena en un arreglo para el siguiente módulo. El código 5.14 muestra la función *integrator()* en las líneas 18 a 21 y de 1 a 16 la función auxiliar *cfar()* la cual recibe el arreglo y los valores de ventana

para realizar la integración. La función `integrator()` almacena, en el arreglo `sample_array`, el valor promedio proporcionado por la función `cfar()`.

CÓDIGO 5.14: Integrador

```
1  int cfar(int window, int value, int index){
2  float halfWindow = window/2;
3  int iLow;
4  int iUp;
5  int sum = 0;
6  if(index - halfWindow < 0)
7      iLow = 0;
8  else
9      iLow = index - halfWindow;
10 if(index + halfWindow >= _LIM_SAMPLING_ARRAY)
11     iUp = _LIM_SAMPLING_ARRAY - 1;
12 else
13     iUp = index + halfWindow;
14 for( int i= iLow; i< iUp; i++)
15     sum += sample[i];
16 return sum/(iUp-iLow);
17 }
18 void integrator(int sample_array[], int neighbors){
19     for(int i = 0; i < _LIM_SAMPLING_ARRAY; i++)
20         sample_array[i] = cfar(neighbors, sample_array[i], i);
21 }
```

d **Monitor de umbral.** Este módulo implementa la comparación de las lecturas integradas, con un valor de umbral que cambia acorde con los valores para cada muestra. Como se muestra en el código 5.15, el resultado de este proceso es un conteo de los valores que son mayores al umbral. Dependiendo del valor del contador y en función del valor de probabilidad de detección deseado, se obtiene un valor binario de decisión, para informar al siguiente módulo si existe detección de un obstáculo. Cuando los valores son mayores que el umbral se cuenta una posible detección de obstáculo.

CÓDIGO 5.15: Detector de umbral

```
1  int detect(float threshold, int sample_array[]){
2  int counter = 0;
3  for( int i=0; i < _LIM_SAMPLING_ARRAY; i++)
4      if(threshold < sample_array[i])
5          counter ++;
6  return counter;
7  }
```

8 **Detector.** Este módulo procesa la información del muestreo entregado en forma de arreglo: `sample_array`. En el código 5.16, se hace un conteo de los valores que sobrepasaron

el umbral de detección y se regresa dicho valor. La idea de esta función es proporcionar un porcentaje de detección en un momento dado, es decir, por muestra.

CÓDIGO 5.16: Función de alarma en el módulo detector

```
1 int detect(float threshold, int sample_array[]){
2     int counter = 0;
3     for( int i=0; i < _LIM_SAMPLING_ARRAY; i++)
4         if(threshold < sample_array[i])
5             counter ++;
6     return counter;
7 }
```

9 Interfaz de usuario. Este módulo transmite los resultados al usuario mediante sonido, se cuenta con una bocina que emite tonos como respuesta a la detección. El sonido está definido por las notas de la escala de música, si los obstáculos tiene una mayor velocidad de aproximación la respuesta sonora tiende a los notas más agudas. La implementación se muestra en el código 5.17.

La función *alarm()* hace uso de la función *soundFeedback()*. La primera determina si generar un tono en la bocina a partir de un nivel que establecemos en la función para la detección, este nivel es la probabilidad de detección que se explicó en el **segundo** capítulo en la sección de probabilidad de detección. La segunda función, es la responsable de generar frecuencias audibles para mover el cono de la bocina y generar sonido. Se puede observar en la figura 4.3 la señal resultante de los módulos anteriores se conecta con la bocina perteneciente a la plataforma *Arduino Lilipad*.

8 Interfaz de comunicación. Este módulo emplea la comunicación serial para transferir los valores resultantes del procesamiento y detección al puerto serial. La transmisión es en código ASCII¹. En el código 5.18 se observa la implementación de un protocolo simple de comunicación para desplegar la información en la computadora personal. La función espera a que el visualizador esté disponible y conectado, luego de ello, transmite un valor de voltaje, espera que le conteste de recibido el cliente, cuando se informa que se recibió la señal, transmite la señal de frecuencia y espera la respuesta de entrega del cliente, cuando recibe la respuesta se repite el proceso. La comunicación es consumida por el visualizador sobre *Processing*. transmitidas se van alternando los valores recibidos del sensor entre voltaje y frecuencia *Doppler*.

¹American Standard Code for Information Interchange

CÓDIGO 5.17: Retroalimentación sonora para el usuario

```
1  const float A   = 880; const float AS  = 932; const float B   = 988;
2  const float C   = 1047; const float CS = 1109; const float D   = 1175;
3  const float DS  = 1245; const float E   = 1319; const float F   = 1397;
4  const float FS  = 1480; const float G   = 1568; const float GS  = 1661;
5  float notes[12] = { A,AS,B,C,CS,D,DS,E,F,G,GS}; // Notas musicales
6  void alarm(int detection, int percentage, int sound){
7      Serial.print(" | ");
8      Serial.print(100*(float)detection/_LIM_SAMPLING_ARRAY);
9      if(100*(float)detection/_LIM_SAMPLING_ARRAY > percentage){
10         Serial.println(" <Alarm/>");
11         if(sound == 1)
12             for(int i=0; i<1023; i+=512)
13                 sounFeedback(map(detection, 0, _LIM_SAMPLING_ARRAY, 0,11));
14     }
15 }
16 void sounFeedback(int input){
17     int noteDuration = 1000 / 4;
18     tone(pinSpeaker, notes[map (input, 0, 1023 , 0, 11)],noteDuration);
19     int pauseBetweenNotes = noteDuration * 1.30;
20     delay(pauseBetweenNotes/3);
21     noTone(pinSpeaker);
22 }
```

CÓDIGO 5.18: Comunicación serial

```
1  unsigned short int r=0,v=0,f =0; // Estado de variables de comunicación serial.
2  const char READY   = '0'; const char VOLT_REQ = '1'; const char FREQ_REQ = '2';
3  const char VOLT_SND = '3'; const char FREQ_SND = '4'; const char SHIFT   = '5';
4  char response;
5  void syncComm(){
6      if(Serial.available() > 0){
7          response = Serial.read();
8          switch (response) {
9              case READY : r = 1;
10                 break;
11                 case VOLT_REQ: if(r){Serial.println('1'); v = 1; f = 0;}
12                    break;
13                 case FREQ_REQ: if(r){ Serial.println('2'); v = 0; f = 1;}
14                    break;
15                 case VOLT_SND: if(r && v && !f){printRawVoltage(); r = 0;}
16                    break;
17                 case FREQ_SND: if(r && !v && f){printRawFrequencies(0, 180); r = 0;}
18                    break;
19                 case SHIFT: v = (v+1)%2; f = (f+1)%2;
20                    break;
21             }
22         response = ' ';
23     }
24 }
```

Una vez concluida la implementación de todos los módulos antes expuestos, el sistema se cargó en la plataforma *Arduino Lilipad Simple Board*.

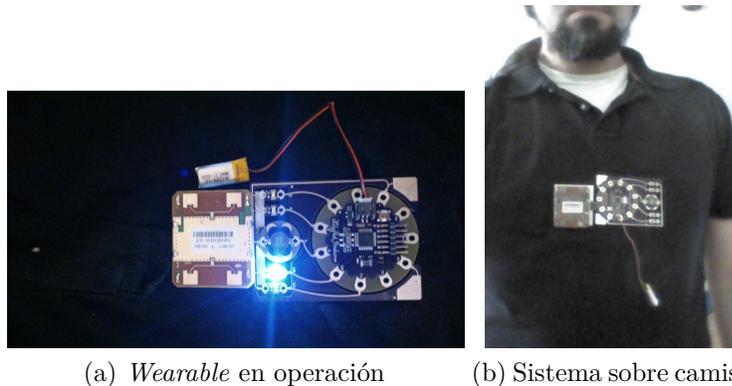


Figura 5.8: Sistema *wearable* para detección de obstáculos

La plataforma *Arduino Lilipad* está especialmente diseñada para el desarrollo de aplicaciones móviles o *wearables*, cuenta con una batería de litio recargable y las conexiones son hechas con hilo conductor que se emplea para fijarlo a prendas de vestir como se puede apreciar en la figura 5.8b, en la figura 5.8a se muestra la plataforma con el sensor en operación.

El sistema *wearable* para la detección de obstáculos (figura 5.8) montado en la plataforma *Arduino Lilipad* cuenta con la portabilidad suficiente para hacer uso del sistema en ambientes no controlados. El sistema cuenta con una batería que proporciona una autonomía de aproximadamente 2 horas, sin embargo se puede usar con baterías de teléfonos inteligentes y tendría una autonomía de más de 8 horas.

En la dirección web <http://computacion.cs.cinvestav.mx/~gmonroy/tlachia/> se encuentra disponible el código fuente que implementa la arquitectura lógica de este sistema.

Pruebas

CONTENIDO

6.1	Escenarios de pruebas	93
6.2	Plataforma de pruebas	94
6.3	Análisis de resultados	95
6.3.1	Pruebas para la primera fase	95
6.3.2	Pruebas para la segunda fase	99

Para la realización de las pruebas se plantearon tres escenarios para las dos fases de la implementación. A continuación describimos los escenarios.

6.1 Escenarios de pruebas

Para probar la funcionalidad del prototipo se dirige el dispositivo hacia un espacio que se encuentra libre de obstáculos, otro espacio totalmente cerrado a una distancia aproximada de 8 metros y el mismo espacio con una apertura de 2 metros. Se presentan tres escenarios a continuación.

- 1) **Escenario sin obstáculos.** Espacio con pocos obstáculos o sin ellos. En esta prueba se plantea observar las posibles fallas del sistema debido al ruido presente en el ambiente. En la figura 6.1 se plantea este escenario como prueba de control para contrastar con los otros escenarios.
- 2) **Entrada o salida por una puerta.** Teniendo materiales con reflexión en contraste con un espacio libre de obstáculos se pretende observar los resultados de dirigir el dispositivo en tres direcciones como se muestra en la figura 6.2.
- 3) **Espacio circundado con paredes.** Patio cerrado por rectángulo de paredes como muestra la figura 6.3. Se pretende observar la respuesta en magnitud de reflexión de las ondas

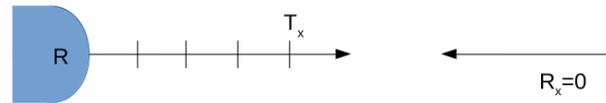


Figura 6.1: Escenario de prueba sin obstáculos

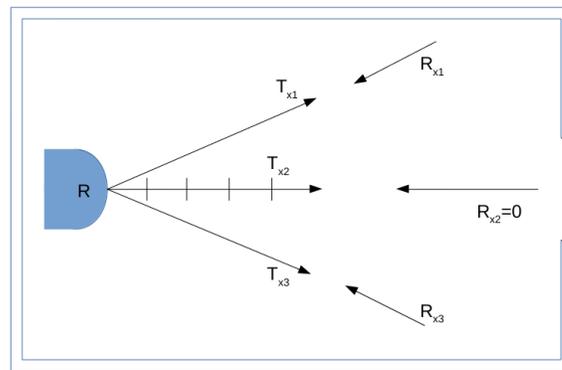


Figura 6.2: Escenario de prueba con entrada

en un espacio cerrado por paredes que reflejan la señal transmitida.

6.2 Plataforma de pruebas

Para recolectar la información de las pruebas con los prototipos del sistema se empleó un equipo portátil con las siguientes características:

- Procesador Intel Core i5 a 2.4 MHz
- 8 Gbytes de memoria RAM
- Sistema operativo Debian GNU/Linux 8.6 (jessie)
- Versión de kernel 3.16.0-4-amd64
- USB 2.0 y 3.0

Para las pruebas se utilizaron dos prototipos:

Prototipo primera fase. Se usó el sistema de detección de obstáculos montado sobre la plataforma *Arduino* UNO conectada al puerto serial con una computadora portátil de las

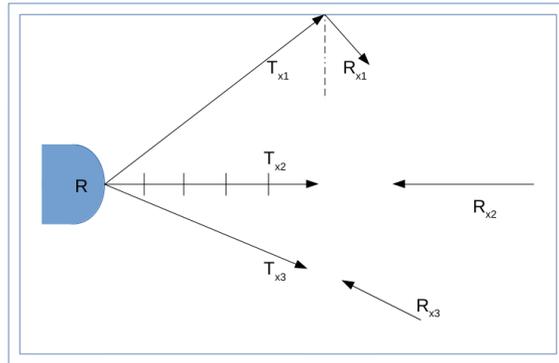


Figura 6.3: Escenario de prueba sin obstáculos

características especificadas en el párrafo anterior.

Prototipo segunda fase. Se usó el sistema de detección de obstáculos montado sobre la plataforma *Arduino* Micro conectada al puerto serial con una computadora portátil.

6.3 Análisis de resultados

Las pruebas consisten en barrer de izquierda a derecha el escenario correspondiente y recolectar la información para ser analizada posteriormente. Se muestra parte de uno de los archivos en la figura 6.4, cada línea contiene 50 valores y cada valor se encuentra entre 0 y 1023. Los valores se interpretan en la escala de 0 a 5 voltios y son equivalentes a la intensidad de la señal Rx de retorno de la microonda emitida. Para cada escenario se tomaron 100 o más líneas o muestras. En la primera línea se almacena la velocidad de transmisión de datos serial. En el caso del ejemplo la velocidad es de 230400 bps.

6.3.1 Pruebas para la primera fase

En cada uno de los escenarios se recolectaron los datos en archivos para posteriormente analizar la información visualmente. Las gráficas que se presentan tienen 50 elementos en el eje del tiempo, y tienen 1023 valores posibles en el eje de las Rx; estos valores significan la intensidad de regreso de la señal. Los valores en el eje de Rx son equivalentes a voltios en el rango de 0 a 5. Para cada gráfica se tomaron 3 muestras al azar de las 100 posibles por escenario, y se graficaron juntas. Cada línea de valores la denominamos muestra. Cada muestra observa la tasa de muestreo de *Nyquist* descrita en el marco teórico de este trabajo de tesis.

```

1 1230400
2 161,105,172,23,20,11,11,12,13,14,103,9,50,530,20,34,21,72,227,58,72,10,43,71,142,14,36,23,47,224,25,13,140,336,108,8,11,156,11,128,34,22,55,104,29,43,41,69,381,0,°M
3 83,78,10,10,9,8,14,35,11,20,31,17,22,21,25,21,10,13,47,17,56,92,101,71,47,15,41,25,32,94,34,111,32,137,49,39,37,65,57,61,34,22,55,104,29,43,41,69,381,0,°M
4 80,70,54,43,44,40,38,45,47,52,36,45,43,30,50,36,35,33,59,42,43,41,59,49,24,198,58,78,73,127,46,158,61,124,66,58,59,57,67,63,89,52,57,41,50,40,65,30,32,0,°M
5 28,24,20,50,28,30,113,48,50,57,78,47,12,36,128,18,32,23,18,18,10,82,21,134,19,10,29,22,72,187,31,37,19,13,32,475,87,19,116,102,60,62,52,43,16,46,30,108,33,0,°M
6 41,32,41,87,76,43,56,51,17,23,43,25,51,27,457,38,325,37,82,159,18,156,11,14,12,28,110,67,18,108,146,25,133,63,109,13,70,207,106,13,12,23,78,102,103,63,10,130,30,0,°M
7 17,10,67,80,18,32,15,154,59,30,29,119,16,234,41,121,21,11,72,196,79,154,46,26,21,20,9,60,20,33,33,28,60,12,22,201,63,25,165,488,23,14,102,104,9,70,102,95,16,0,°M
8 10,23,41,42,105,68,41,23,62,40,73,25,28,580,103,28,59,435,63,29,71,70,24,93,15,201,100,176,16,49,43,220,43,179,15,49,70,59,31,40,151,45,122,113,9,12,69,19,45,0,°M
9 34,31,63,277,112,36,56,29,49,63,12,38,14,20,215,50,64,19,36,61,9,223,18,16,14,17,48,46,86,37,52,186,159,39,50,202,20,16,29,82,290,74,17,59,33,17,99,20,390,0,°M
10 29,43,23,155,86,64,19,9,73,23,93,41,60,9,24,42,39,12,23,23,122,32,24,18,42,29,119,34,302,85,34,52,221,155,11,21,24,31,56,54,56,338,25,80,37,159,36,18,22,0,°M
11 31,42,32,16,61,28,7,136,52,14,168,38,99,17,118,166,44,141,26,70,14,78,33,22,28,20,55,38,42,72,141,67,52,55,75,39,50,35,29,31,57,56,59,55,32,11,62,99,102,0,°M
12 15,56,38,38,81,27,88,69,70,10,95,15,62,18,25,229,18,17,30,224,61,72,20,26,26,288,14,29,41,41,93,20,108,48,21,16,22,27,31,464,15,15,12,35,35,20,61,166,42,0,°M
13 17,51,31,36,73,158,48,65,107,45,69,40,42,50,47,43,85,173,45,38,61,65,29,23,42,28,52,44,50,97,169,25,105,67,72,109,16,221,90,62,20,101,54,30,113,131,151,104,28,0,°M
14 34,32,53,19,21,32,46,23,133,13,127,50,157,39,95,17,30,50,19,36,34,32,378,12,223,38,9,15,556,96,136,17,58,147,51,113,24,31,12,243,18,248,110,36,777,50,75,121,15,0,°M
15 23,103,40,22,28,39,30,47,54,51,62,42,38,31,44,41,43,55,34,27,55,82,40,49,60,47,70,34,34,29,55,31,93,53,125,48,23,27,23,27,82,31,13,158,24,18,97,28,41,0,°M
16 28,324,76,56,20,36,33,15,72,38,19,13,55,30,53,24,117,80,64,36,87,16,62,37,38,166,52,56,64,50,357,341,19,22,28,19,41,24,21,11,19,22,25,25,20,15,39,18,41,0,°M
17 27,38,43,52,28,21,122,137,21,33,15,24,51,51,19,31,37,30,23,22,24,46,16,26,86,44,138,22,22,10,124,48,28,66,200,71,37,22,98,20,89,29,53,10,106,13,76,21,20,0,°M
18 148,81,30,10,19,43,184,54,14,130,32,13,10,7,18,46,48,14,141,77,74,62,24,158,17,50,76,36,296,14,44,168,26,44,58,34,58,77,26,10,44,109,116,21,61,28,76,21,20,0,°M
19 22,9,22,12,22,96,17,29,60,31,29,45,29,96,12,171,16,116,13,76,18,66,92,497,44,40,73,122,119,14,26,37,24,9,158,17,67,9,23,10,44,109,116,21,61,28,76,21,20,0,°M
20 70,11,19,17,11,10,96,51,29,7,61,128,84,108,38,32,305,15,24,115,19,18,56,215,162,17,116,37,29,30,120,143,13,13,49,219,19,14,30,87,649,10,10,21,61,28,76,21,20,0,°M
21 10,43,185,12,15,14,38,9,63,16,73,40,12,14,11,47,112,433,14,31,96,26,10,107,10,13,37,15,42,19,15,66,10,16,10,219,19,14,30,87,649,10,10,21,61,28,76,21,20,0,°M
22 25,11,73,30,10,40,96,11,37,10,12,39,13,83,100,45,10,28,12,178,17,38,17,211,13,9,92,27,38,86,25,39,78,41,19,28,25,28,24,87,649,10,10,21,61,28,76,21,20,0,°M
23 50,29,22,13,18,68,41,51,54,65,46,40,63,61,45,22,37,86,33,50,72,39,62,52,55,194,58,67,63,60,62,45,47,79,56,92,70,110,58,55,41,55,89,36,753,24,29,26,77,0,°M
24 15,110,14,13,14,59,21,71,40,14,14,23,10,10,65,54,15,19,78,279,16,31,10,51,17,88,14,16,14,22,365,88,92,25,142,13,21,106,58,55,41,55,89,36,753,24,29,26,77,0,°M
25 197,33,12,25,11,13,21,61,28,61,10,13,48,14,78,10,66,47,40,41,23,55,150,60,13,48,20,18,270,85,44,322,20,216,231,10,101,60,88,34,23,39,18,22,142,32,29,26,77,0,°M
26 90,37,10,76,9,196,46,14,175,27,94,149,10,35,20,10,9,30,9,105,15,19,101,10,95,41,129,12,95,40,36,15,17,17,18,10,16,23,15,34,23,39,18,22,142,32,29,26,77,0,°M
27 83,39,27,66,12,18,58,27,24,40,85,137,34,16,27,24,27,18,39,42,119,16,12,34,14,492,14,20,22,61,64,30,23,17,34,115,12,19,10,22,22,178,18,22,142,32,29,26,77,0,°M
28 12,10,12,42,15,24,10,65,24,10,36,154,34,10,28,14,10,14,78,15,10,48,28,65,19,66,89,9,22,20,12,117,33,29,115,12,19,10,22,22,178,18,22,142,32,29,26,77,0,°M
29 45,10,30,56,33,96,10,133,15,154,19,17,12,10,27,12,39,19,32,13,50,78,162,547,114,64,27,85,96,18,65,478,14,21,136,23,58,9,12,26,12,178,18,22,142,32,29,26,77,0,°M
30 35,24,10,153,17,18,29,29,15,69,26,19,65,44,59,52,21,73,83,43,50,30,91,193,27,29,169,19,20,89,30,18,50,20,14,10,61,10,12,26,12,178,18,22,142,32,29,26,77,0,°M
31 20,26,62,20,9,12,16,39,106,10,42,32,16,18,32,100,39,16,155,41,73,77,294,12,166,90,15,28,49,20,16,21,68,15,28,19,54,36,12,12,178,18,22,142,32,29,26,77,0,°M
32 23,9,334,25,32,7,19,138,9,62,82,88,112,210,33,80,19,78,22,52,13,20,39,22,43,13,23,73,32,30,12,25,27,15,65,411,59,42,99,99,15,178,18,22,142,32,29,26,77,0,°M
33 57,11,17,18,10,414,20,84,168,25,50,17,16,265,60,52,210,13,75,48,17,118,18,62,48,53,176,23,10,84,21,40,36,32,57,36,31,110,22,69,49,73,45,22,142,32,29,26,77,0,°M
34 62,71,9,242,9,141,9,32,23,95,10,86,35,21,45,35,10,26,18,38,59,73,14,12,82,50,82,33,10,23,21,132,369,9,239,335,21,16,20,33,13,95,503,46,58,105,29,26,77,0,°M
35 19,15,110,9,149,151,40,36,65,20,14,61,21,20,13,36,98,27,21,12,23,54,137,14,106,21,55,11,18,28,12,16,51,35,9,52,20,16,20,33,13,95,503,46,58,105,29,26,77,0,°M
36 10,248,86,47,28,24,37,11,183,18,15,12,26,22,79,66,10,17,29,60,24,23,191,10,40,68,19,88,16,35,112,39,10,92,15,10,9,16,20,33,13,95,503,46,58,105,29,26,77,0,°M

```

Figura 6.4: Archivo ejemplo de datos en la prueba del escenario 1 en la fase 2

Escenario 1 - espacio libre. En esta prueba los valores, en términos generales, se comportaron acorde con lo esperado; es decir, se esperaban señales con comportamiento de ruido. El comportamiento de ruido es similar al comportamiento de una variable aleatoria, y es justamente lo que se muestra en esta prueba. Se obtuvieron lecturas con comportamiento aleatorio ya que no se hizo un procesamiento adecuado de la interferencia en la primera fase. Se muestra en la figura 6.5 que el sistema recoge señales con valores que parecen aleatorios.

Para la muestra 1, en la escala de 0 a 1023 equivalente al rango de 0 a 5 voltios, tenemos valores máximos equivalentes a 2.5 voltios. Una explicación de esto, es el gran número de señales que se encuentran en el medio y que producen los diferentes tipos de interferencia, como se explicó en el marco teórico.

En la muestra 2, el comportamiento es más uniforme; sin embargo, se tiene también un pico en la lectura 50 de aproximadamente 2.3 voltios. En la muestra 3, el valor máximo es de 1 voltio. En términos generales, se observa que el sistema es afectado por la interferencia propia del ambiente. En esta fase la detección de obstáculos es en gran medida por apreciación de los patrones, semejante a los primeros sistemas de radar, podemos decir que en el pico de la muestra 1 en azul, en la toma 14, se identifica un obstáculo debido a la diferencia de intensidad de la señal que regresa; sin embargo, en las muestras 2 y 3 los valores difieren, lo que nos dice que se trata de señales aleatorias.

Escenario 2 - espacio parcialmente cerrado. En esta prueba el resultado que se espera es el de tener un par de incrementos en la intensidad de la señal de retorno, Rx. Los incrementos nos indican que existen objetos que reflejan las microondas con mayor intensidad. Se espera que existan dos crestas y un valle en las muestras, si el experimento es consistente debería observarse un patrón en las muestras.

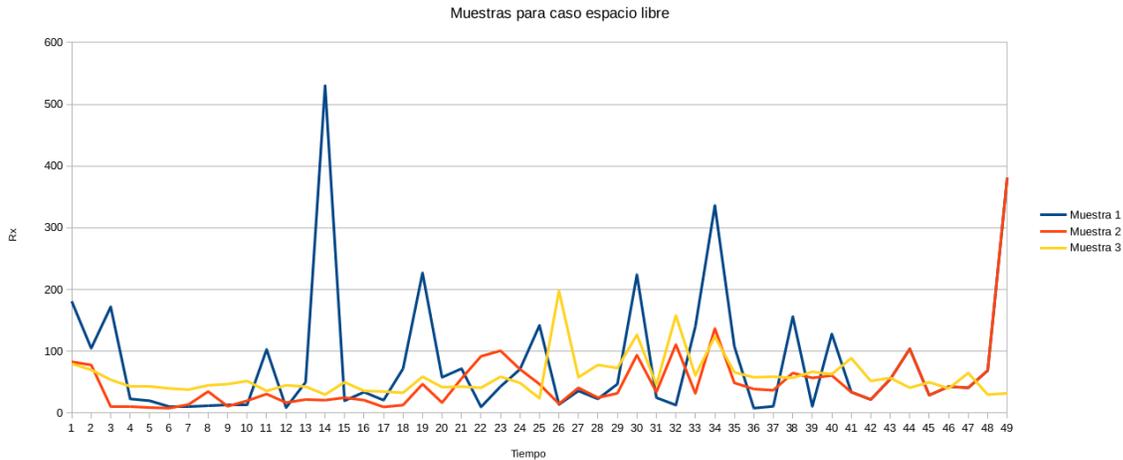


Figura 6.5: Tres muestras caso de espacio libre fase 1

Las lecturas para las tres muestras, figura 6.6, indican un incremento de la intensidad de la señal, seguido de un decremento; para luego, nuevamente incrementar la intensidad. Lo anterior sucede para las tres señales de manera consistente; es decir, las tres señales cualitativamente incrementan, decrementan e incrementan significativamente.

En las tres muestras se observa un hueco, o decremento, entre la lectura 16 a la 30; es decir, valores menos intensos que los demás, lo que da indicios de los bordes de la apertura en el espacio cerrado. De las tres muestras, la segunda muestra de manera evidente que las ondas regresan con mayor intensidad que en el caso de la muestra 1, la cual no se puede decir con seguridad que tiene un segundo incremento significativo.

Escenario 3 - espacio cerrado. En el escenario de espacio cerrado, se esperan señales que den indicio de que se reflejan con uniformidad las microondas en las paredes del espacio cerrado. La figura 6.7 muestra que existen valores distribuidos uniformemente, la mayoría de los valores son equivalentes a un voltio. En la señal existen diversos picos para cada muestra que nos dan indicio de las señales que se superponen, cuando las ondas rebotan en las esquinas del espacio de prueba.

Los picos mostrados en la figura 6.7, no nos proporcionan la certeza de que se trata de un obstáculo, ya que no se dan de manera consistente; es decir, no ocurren en las tres muestras en tiempos similares. Esta prueba, de manera similar que la prueba de espacio libre, nos indica que la implementación de la primera fase del sistema es insuficiente para tener resultados significativos.

Como resultado de las pruebas para la primera fase, podemos decir que el sistema construido no es suficientemente útil para saber si se tienen obstáculos en la dirección a la que el sistema

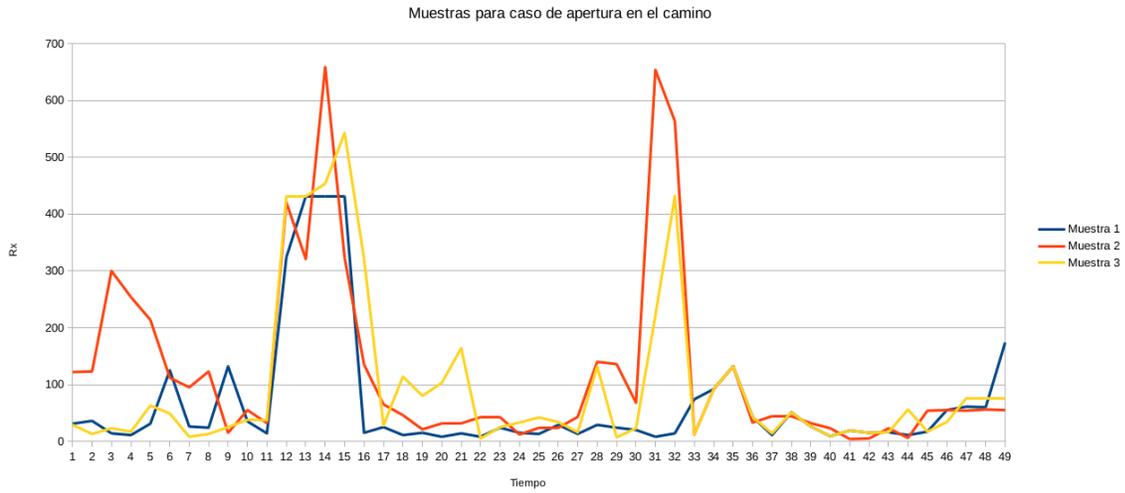


Figura 6.6: Tres muestras caso de apertura en el camino fase 1

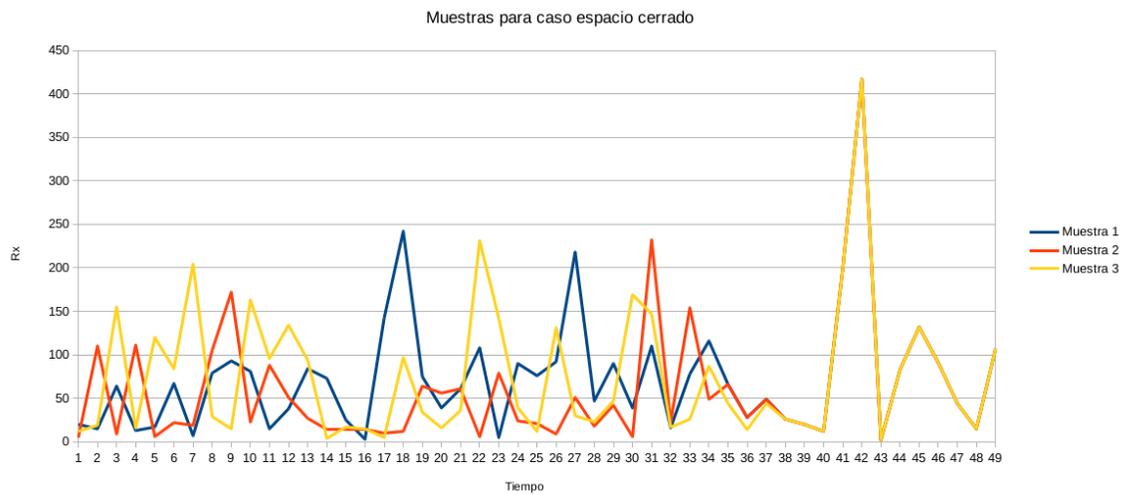


Figura 6.7: Tres muestras caso de espacio cerrado fase 1

apunta. Debido a estas pruebas se mejoró esencialmente el módulo Procesador de señal para la segunda fase del sistema, como se ha descrito en el capítulo de desarrollo.

6.3.2

Pruebas para la segunda fase

Para esta fase se recolectó la información procesada por el sistema de detección de obstáculos para cada escenario, y se tomaron valores para ser analizados. En este caso cada muestra pasó por el proceso de ser muestreada, integrada, pasada por el umbral, y se calculó en función de una probabilidad de falsa detección que establecimos en 10%. Se estableció la probabilidad de falsa alarma luego de ensayar con varios valores en el sistema. El sistema avisa si se detecta o no un obstáculo a través de una señal sonora; sin embargo, si conectamos la computadora portátil al puerto serial de la plataforma, somos capaces de almacenar los datos procesados. Los datos que se obtuvieron para cada escenario fueron analizados y se mostrarán a continuación.

El umbral es determinado para cada muestra de manera dinámica, basados en la técnica CFAR para MTI que se explicó en el marco teórico. Las gráficas muestran, en el eje del tiempo, la muestra de 1 a 50, y en el eje de intensidad un valor que es el producto del proceso MTI que indica la intensidad de la señal. El SNR se ha hecho grande producto de la integración antes mencionada, lo cual hace posible la detección sin ambigüedad.

Para los casos de la segunda fase, la técnica con la que se detectan los obstáculos está basada en un umbral. Recordemos que el umbral es un valor que se toma como referencia para comparar los valores y establecer si se detecta un obstáculo. El umbral se calcula para cada 50 lecturas, las cuales conforman una muestra; las señales que cruzan este umbral son consideradas como un obstáculo que se detectó. Sin embargo, debido a la propia técnica y a los fenómenos físicos asociados a las microondas, como la interferencia, existe una probabilidad de falsa alarma y una probabilidad de detección.

Para estas pruebas se espera que cuando un valor sobrepase el valor umbral, se declare que se tiene un obstáculo en la dirección de detección con un 10% de probabilidad de que sea una falsa alarma.

Escenario 1 - espacio libre. Se espera que ningún valor sobrepase el umbral ya que no se tienen obstáculos en la dirección del sistema; sin embargo, se tiene una tolerancia dada por la probabilidad de falsa alarma. También se esperan cinco falsas alarmas. En la figura 6.8 se muestran diez detecciones de un total de 50, esto hace un porcentaje de 20% de detección de falsa alarma. El sistema establece un umbral de 12 para esta muestra. El resultado que se espera es que menos del 10% de valores sobrepasen el umbral; sin embargo, el resultado se interpreta como que se detectaron diez obstáculos, aunque varios de ellos son falsas alarmas, lo sabemos por la PDF de falsa alarma a la que ajustamos nuestro sistema. Podemos observar también que se tienen dos regiones sobre el umbral y una debajo, que se muestran con una elipse punteada.

Las elipses subrayan los máximos y mínimos de las regiones observadas. Para esta prueba se duplicaron las falsas alarmas esperadas, se esperaban cinco y se tuvieron 10.

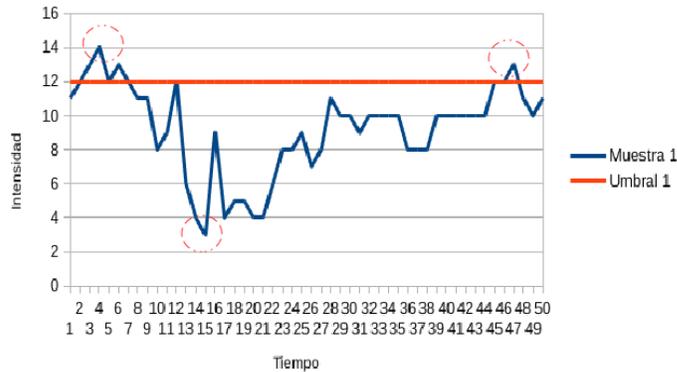


Figura 6.8: Muestra en escenario de espacio libre

Escenario 2 - espacio parcialmente cerrado. Se espera que se tengan valores por encima del valor umbral para por lo menos un par de regiones; para luego, tener una región de valores menores al valor umbral entre las dos regiones anteriores. En la figura 6.9 se muestra la detección de 31 obstáculos, y se puede ver que 19 valores no sobrepasan el umbral. 3 elipses punteadas destacan en la figura, las regiones que se esperaba obtener: una región donde se detectan obstáculos, seguida de una donde no se detectan y por último, una región de detección de obstáculos. Lo anterior lo podemos interpretar como una apertura que se encuentra entre las lecturas de 8 a 20. Para determinar cuantas de las detecciones son falsas, solo podemos echar mano de la probabilidad y ella nos dice que cinco de esos valores pueden ser falsas alarmas, pero no se sabe cuales.

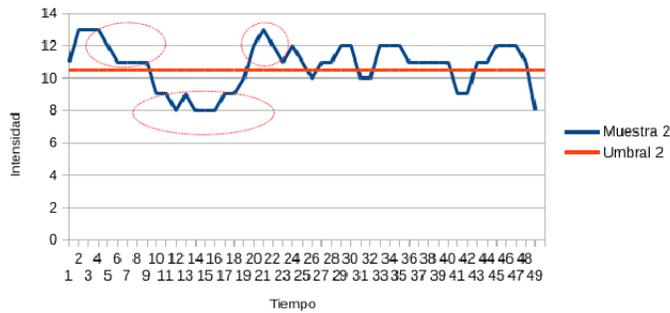


Figura 6.9: Muestra en escenario parcialmente cerrado

Escenario 3 - espacio cerrado. Se espera tener cuarenta y cinco valores por encima del valor umbral. En la figura 6.10 se observa que se detectaron 34 obstáculos de los 45 esperados. El porcentaje de falsa alarma nos indica que 32% de los 50 valores no se detectó como un obstáculo, se esperaba que 10% fueran valores equivocados; por lo tanto, se tiene un 22% de falsos negativos en este caso. El error se puede atribuir al fenómeno de interferencia destructiva de ondas, ocasionada por la superposición de ondas. Se identifican tres regiones con una elipse punteada, las cuales no sobrepasaron el valor umbral.

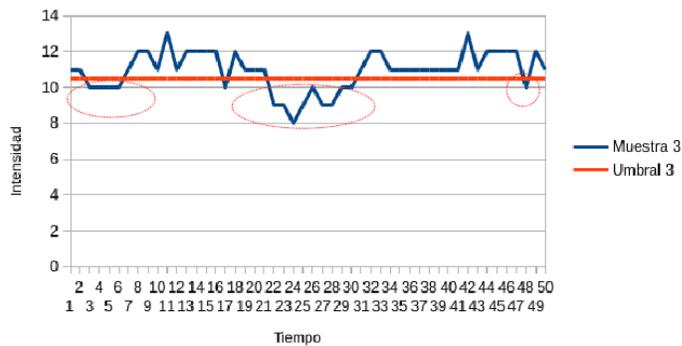


Figura 6.10: Muestra en escenario cerrado

Conclusiones y trabajo futuro

CONTENIDO

7.1	Conclusiones	104
7.2	Trabajo futuro	105

Como se ha descrito en este trabajo se plantea la detección de obstáculos estáticos, dentro de entornos no controlados empleando el efecto *Doppler* bajo un sistema de RADAR. Se propuso una arquitectura de un sistema *wearable* cuyas características permiten la detección de obstáculos usando ondas de radio en la banda electromagnética X.

Se han planteado algunos de los fundamentos que han permitido el diseño y construcción de un sistema *wearable* prototipo. Hemos realizado experimentación suficiente para evaluar la posibilidad de detección de obstáculos. En nuestra revisión del estado del arte tenemos conocimiento de los avances a lo largo de tres décadas de investigación en el campo de ETA que forma parte del cómputo vestible. Dicha revisión nos permitió clasificar en: LIDAR, SONAR, LADAR y RADAR. Por la clasificación confirmamos la pertinencia del presente trabajo que tiene por fin explorar la aproximación RADAR para dar solución al problema de visión asistida de detectar obstáculos en entornos no controlados.

La hipótesis planteada en este trabajo es la siguiente: Si se detectan obstáculos, contornos y objetos en movimiento del entorno usando el efecto *Doppler* entonces se puede anticipar las colisiones, conocer las distancias y dimensiones de los objetos.

Resultado de las pruebas afirmamos que se puede detectar obstáculos empleando el efecto *Doppler*. Como ya se ha expuesto, los sistemas de RADAR se encuentran en estrecha relación con el efecto *Doppler* y, en general el efecto *Doppler* se encuentra asociado con todo fenómeno que implique la propagación de ondas. La detección que fue probada está basada en una probabilidad de detección empleando un umbral dinámico que se autoajusta en cada muestra tomada en tiempo real. La probabilidad de detección que fijamos en el sistema es de aproximadamente 90%, no obstante las falsas alarmas, que en principio deberían estar dentro del 10% alcanzan alrededor de 30% en el escenario donde hay muchos obstáculos. Sabemos, a partir de la literatura de sistemas de RADAR que existen diversas técnicas y sistemas con tres funcionalidades: Búsqueda o Detección, Rastreo e Imagen. Además, los sistemas pueden ser coherentes o no-coherentes, los sistemas coherentes proporcionan información de frecuencia y fase, mientras los sistemas no-coherentes solo nos proporcionan la señal de la cual podemos obtener la frecuencia al procesarla. Por lo tanto, si es posible construir un sistema que nos permita conocer las distancias y dimensiones de objetos, estos sistemas existen en la milicia, el reto es adaptarlos hacia el campo de la ETA. Nuestras pruebas permiten anticipar colisiones pero como ya se expuso se tiene una posibilidad de falso positivo o falsa alarma.

Al principio de este trabajo, se pensó en emplear la técnica de ecolocalización para determinar la distancia. La técnica de ecolocalización consiste en calcular la distancia a partir del tiempo que tarda la señal en chocar con un obstáculo, y luego ser reflejada hacia el sensor. Con la ecolocalización no se logró obtener la distancia a la que se encuentran los obstáculos porque el sensor que empleamos es un dispositivo de radar no coherente; es decir, no proporciona información sobre la fase entre las señales transmitida y recibida. La fase, en un dispositivo de radar coherente, es útil para calcular la distancia en base al desplazamiento en la fase de las señales transmitida y recibida. Además, si realizamos un cálculo a partir del modelo $T = \frac{R}{2C}$ para determinar el tiempo de retorno de la señal, a una distancia de 15 metros, se obtiene como resultado que el periodo de la señal es de 25×10^{-9} segundos. El periodo es el tiempo que le toma a la señal viajar en el medio, ser reflejada y llegar al sensor; entonces, la velocidad de procesamiento que requerimos en el procesador de señal es del orden de los Ghz (1×10^9) y nuestra plataforma opera con un reloj del orden de los MHz (1×10^6); por lo tanto, no fue posible realizar el cálculo de la distancia empleando la técnica de ecolocalización.

En la primera fase de desarrollo se empleo el análisis *Doppler* de las ondas rebotadas por los objetivos, sin embargo estas ondas se componen con interferencia (ruido térmico, etc) que

genera un gran número de señales indeseadas que dan como resultado falsos positivos en la detección de obstáculos.

Posteriormente, en la segunda fase, se revisaron técnicas para la detección de objetivos en la literatura y después de discriminar algunas se vio que considerando las limitantes del hardware con el que se contó para este trabajo, lo mejor fue modificar a nivel software el funcionamiento del dispositivo tipo radar para que fuese capaz de detectar la presencia de objetos en el camino hacia el cual apunta las antenas del radar. Se revisó la literatura y se encontró que existe un tipo de RADAR llamado MTI el cual nos sirvió de base para la arquitectura propuesta. Se reportan a continuación las pruebas realizadas con la implementación en el prototipo final.

En resumen, a partir de los resultados del sistema para la detección de obstáculos basado en un dispositivo de RADAR creado en este trabajo, tenemos que:

- Se puede detectar objetos empleando varias técnicas, de acuerdo a la función que deseamos que nuestro sistema tenga, se tiene una mayor eficacia en la detección o búsqueda de objetivos.
- Los sistemas para detectar obstáculos emplean el efecto *Doppler* como parte esencial en la detección, principalmente para determinar si los objetos se acercan o alejan del sistema.
- Los sistemas basados en efecto *Doppler* en especial con microondas son susceptibles de interferencia, sin embargo, se puede disminuir sustancialmente la misma, empleando técnicas para aumentar el SNR como la cancelación de ruido con la técnica MTI.
- En este trabajo no se pudo determinar la distancia a la que se encuentran los obstáculos.
- Es viable mejorar la probabilidad de detección con la que cuenta el sistema que es de aproximadamente 70%.

7.2

Trabajo futuro

Para un futuro se puede estudiar a fondo los sistemas coherentes que atienden la funcionalidad de búsqueda y detección para sistemas de RADAR. También se puede explorar la creación de sistemas empleando dispositivos diseñados bajo la tecnología de FPGA¹. Otra posibilidad para el estudio del efecto *Doppler* en la detección de obstáculos es realizarlo con ondas sonoras y comparar los resultados con los obtenidos en ondas de radio. Se puede explorar el uso de redes de sensores de efecto *Doppler* a diferentes frecuencias de operación para evaluar si presentan una mejora en la certidumbre de la detección.

¹Field Programmable Gate Array

Acrónimos y términos técnicos

ADC	Analogic Digital Converted	35
AREF	Amplitude Reference	74
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	89
CFAR	Constant False Alarm Ratio	41
CPP	C Plus Plus	75
DAC	Digital Analogic Converted	35
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	45
EOA	Electronic Orientation Aids	44
ETA	Electronic Travel Aids	44
FOUT	Frequency Out	65
FPGA	Field Programmable Gate Array	105
GCC	The GNU Compiler Collection	75
GND	Ground Terminal	65
GPS	Global Position System	45
IDE	Integrated Development Environment	75
IF	Intermediate Frequency	63
IOREF	Input Output Reference	74
LADAR	Laser Detection and Ranging	18
LDR	Light Detect Resistor	73
LED	Light Emitting Diode	73
LIDAR	Light Imaging Detection and Ranging	18
MTI	Moving Target Indicator	41
OTH	Over The Horizon	30
PCB	Printed Circuit Board	82
PDF	Probability Density Function	42
PLO	Position Locator Devices	44
PRF	Pulse Repetition Frequency	27
PWM	Pulse Width Modulation	73

RADAR	Radio Detection and Ranging	18
RESET	Reinicio	74
SNR	Signal to Noise Ratio	43
SONAR	Sound Navigation and Ranging	18
STAP	Space-Time Adaptive Processing	41
UHF	Ultra High Frequency	
USB	Universal Serial Bus	74
VCC	Voltage at the Common Collector	62
VCD	Voltaje de Corriente Directa	72
VOUT	Voltage Out	65

Bibliografía

- [1] D. Dakopoulos and N. G. Bourbakis, “Wearable obstacle avoidance electronic travel aids for blind: a survey,” *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. 40, no. 1, pp. 25–35, 2010.
- [2] M. R. Virkler and S. Elayadath, *Pedestrian speed-flow-density relationships*, 1994, no. HS-042 012.
- [3] R. Resnick, D. Halliday, and K. S. Krane, *Física.*, 1993.
- [4] D. K. Cheng, *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Pearson Educación, 1998.
- [5] “The american heritage® science dictionary,” Oct 2016. [Online]. Available: <http://www.dictionary.com/browse/electromagnetic--waves>
- [6] D. White, “Johann christian doppler and his effect—a brief history,” *Ultrasound in medicine & biology*, vol. 8, no. 6, pp. 583–591, 1982.
- [7] C. Doppler and F. Studnička, *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*, 1903.
- [8] M. Billinghamurst and T. Starner, “Wearable devices: new ways to manage information,” *Computer*, vol. 32, no. 1, pp. 57–64, Jan 1999.
- [9] V. Chen, *The micro-Doppler effect in radar*. Artech House, 2011.
- [10] C. Wolff, “Radar basis site,” <http://www.radartutorial.eu/druck/index.en.html>, 2016 (accessed August 11, 2016).
- [11] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, *Principles of modern radar*. Citeseer, 2010.
- [12] J. R. Higgins, *Sampling theory in Fourier and signal analysis: foundations*. Oxford University Press on Demand, 1996.
- [13] M. Weiser, “The computer for the 21st century,” *Scientific american*, vol. 265, no. 3, pp. 94–104, 1991.
- [14] J. R. Altimir, “Inteligencia ambiental, grupo 20,” <http://www.cs.upc.edu/~bejar/ia/material/trabajos/Inteligencia%20Ambiental.pdf>, 2015 (accessed August 11, 2016).
- [15] J. A. Corrales Ramón, F. Torres Medina, and F. A. Candelas Herías, “Tecnologías en la inteligencia ambiental,” 2006.

- [16] A. Discant, A. Rogozan, C. Rusu, and A. Bensrhair, "Sensors for obstacle detection-a survey," in *Electronics Technology, 30th International Spring Seminar on*. IEEE, 2007, pp. 100–105.
- [17] A. Riener and H. Hartl, "Personal radar: a self-governed support system to enhance environmental perception," in *Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group Conference on People and Computers*. British Computer Society, 2012, pp. 147–156.
- [18] J. Faria, S. Lopes, H. Fernandes, P. Martins, and J. Barroso, "Electronic white cane for blind people navigation assistance," in *World Automation Congress (WAC), 2010*. IEEE, 2010, pp. 1–7.
- [19] E. B. Kaiser and M. Lawo, "Wearable navigation system for the visually impaired and blind people," in *Computer and Information Science (ICIS), 2012 IEEE/ACIS 11th International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 230–233.
- [20] T. Ifukube, T. Sasaki, and C. Peng, "A blind mobility aid modeled after echolocation of bats," *IEEE Transactions on biomedical engineering*, vol. 38, no. 5, pp. 461–465, 1991.
- [21] S. Shoval, I. Ulrich, and J. Borenstein, "Navbelt and the guide-cane [obstacle-avoidance systems for the blind and visually impaired]," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 10, no. 1, pp. 9–20, 2003.
- [22] D. Aguerrevere, M. Choudhury, and A. Barreto, "Portable 3d sound/sonar navigation system for blind individuals," in *Proceedings of the Second Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, 2004*, pp. 2–4.
- [23] S. Cardin, D. Thalmann, and F. Vexo, "A wearable system for mobility improvement of visually impaired people," *The Visual Computer*, vol. 23, no. 2, pp. 109–118, 2007.
- [24] P. B. Meijer, "An experimental system for auditory image representations," *IEEE Transactions on biomedical engineering*, vol. 39, no. 2, pp. 112–121, 1992.
- [25] J. Zelek, R. Audette, J. Balthazaar, and C. Dunk, "A stereo-vision system for the visually impaired," *University of Guelph*, vol. 1999, 1999.
- [26] J. L. González-Mora, A. Rodríguez-Hernandez, L. Rodríguez-Ramos, L. Díaz-Saco, and N. Sosa, "Development of a new space perception system for blind people, based on the creation of a virtual acoustic space," in *International Work-Conference on Artificial Neural Networks*. Springer, 1999, pp. 321–330.
- [27] A. Hub, J. Diepstraten, and T. Ertl, "Design and development of an indoor navigation and object identification system for the blind," in *ACM SIGACCESS Accessibility and Computing*, no. 77-78. ACM, 2004, pp. 147–152.

- [28] N. Bernini, M. Bertozzi, L. Castangia, M. Patander, and M. Sabbatelli, "Real-time obstacle detection using stereo vision for autonomous ground vehicles: A survey," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 873–878.
- [29] Arduino, "Arduino site: Micro specs," <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMicro>, 2016 (accessed August 11, 2016).