



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Sixto Nicolás Huerta Letelier

Prototipo de laboratorio de un registrador de olas basado en un transceptor de microondas.

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 22 de Mayo de 2018



Prototipo de laboratorio de un registrador de olas basado en un transceptor de microondas.

Sixto Nicolás Huerta Letelier

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Juan Vignolo Barchiesi
Profesor Guía

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Segundo Revisor

Sr. Jorge Mendoza Baeza
Director

Valparaíso, 22 de Mayo de 2018

Doy gracias a todas esas personas que han puesto su grano de arena para poder lograr este objetivo tan importante.

A mis amigos que siempre estuvieron ahí, brindando el apoyo necesario, muchas veces sin darse cuenta lo importante que han sido para mí.

Para Paula, que estuvo presente durante toda mi etapa estudiantil, brindando su consuelo, apoyo incondicional, fuerzas y amor en los momentos que más lo necesite.

A mis padres y hermanos, que han sido un pilar importante en mi formación como persona, dando consejos cuando los necesite, amor y cariño en los momentos que me sentía solo y su apoyo incondicional.

Y por último a mi wely-wely, una persona muy especial que siempre se encuentra en mi mente y corazón.

Muchas gracias.

Agradecimientos

Agradezco a cada persona que ha brindado su apoyo hacia mi persona, mi familia, amigos, profesores, tanto en la etapa de formación como estudiante de colegio, liceo y universidad que todos ellos fueron un pilar esencial.

Gracias a mi familia por no perder nunca la confianza, no dudar de mis capacidades, en brindarme cariño, amor y comprensión en todo momento, por soportarme en los días que lo pase mal, en guiarme es los momentos que lo necesite. Sobre todo, a mi padre y madre, Sixto y María Mercedes, que me permitieron lograr mis sueños apoyándome en todas las decisiones que he tomado, por darme lo más importante que uno puede recibir, el amor hacia un hijo, por enseñarme valores que me hace ser la persona que soy hoy en día.

Existe una persona muy especial que me ha acompañado durante un periodo prolongado, durante la etapa de liceo hasta el día de hoy, que me ha enseñado a amar. Gracias por todos los bellos momentos que me ha hecho pasar, por ayudarme a elegir la carrera que hoy me encuentro, en estar ahí en los momentos de alegría y soledad, por brindarme su cariño, comprensión, tolerancia y paciencia. Gracias por todo Paula Verdugo por ser mi compañera incondicional, siempre te tendré en mi corazón.

A mis profesores en todas las etapas de estudiante, que me dieron las herramientas necesarias para poder enfrentarme en esta nueva etapa que se avecina. A mi profesor guía Juan Vignolo Barchiesi por su paciencia en los momentos que sentía que no podría realizar el proyecto, por su dedicación y vocación en la enseñanza y por nunca dejarme solo durante todo este último proceso.

A mis amigos de infancia, a pesar de la distancia siempre han estado ahí, para recordarme cuales son mis raíces, que siempre puedo contar con ustedes en todo momento, que, a pesar de no hablar por mucho tiempo, la confianza, cariño, siempre se encuentran ahí.

Gracias a todos.

Resumen

Se evaluó la factibilidad técnica de fabricar un registrador de olas marinas basado en un transceptor de microondas de onda continua de bajo costo. El transceptor emite una onda sinusoidal en la banda K y capta la reflexión de la onda en objetos en movimiento, en base al efecto Doppler. En este proyecto el objeto en movimiento es la superficie del mar, como consecuencia del oleaje.

El transceptor utilizado cuenta con tecnología I/Q, es decir, incluye dos mezcladores que multiplican la señal captada por sinusoides desfasadas 90° . Comparando las fases de las salidas de los mezcladores se puede deducir la dirección de movimiento del objeto detectado.

Las salidas de los mezcladores fueron amplificadas, filtradas, convertidas a un formato digital y registradas en un archivo. Posteriormente fueron procesadas mediante algoritmos de DSP desarrollados para el proyecto, y optimizados para microcontroladores de bajo costo. Como las frecuencias de las señales obtenidas son proporcionales a la velocidad con la que cambia la altura del mar, el algoritmo las mide y las integra, para determinar la altura instantánea de la ola.

Se realizaron pruebas en laboratorio simulando una ola mediante el movimiento vertical del sensor sobre una plancha metálica que tiene un coeficiente de reflexión similar al del agua de mar. Los resultados obtenidos mostraron una excelente concordancia entre el movimiento del sensor y la onda reconstruida.

Palabras claves: Medición olas marinas, sensor de microondas, efecto Doppler, tecnología I/Q, procesamiento digital de señales, reflexión de microondas.

Abstract

The technical feasibility of manufacturing a marine wave recorder based on a low cost continuous wave microwave transceiver was evaluated. The transceiver emits a sine wave in the K band and captures the reflection of the wave in moving objects, based on the Doppler effect. In this project, the object in motion is the surface of the sea, as a consequence of the waves.

The transceiver uses I / Q technology, that is, it includes two mixers that multiply the signal captured by sinusoids offset 90 °. By comparing the phases of the outputs of the mixers it is possible to deduce the direction of movement of the detected object.

The outputs of the mixers were amplified, filtered, converted to a digital format and recorded in a file. Subsequently, they were processed using DSP algorithms developed for the project, and optimized for low-cost micro-controllers. As the frequencies of the signals obtained are proportional to the speed at which the sea height changes, the algorithm measures and integrates them to determine the instantaneous height of the wave.

Laboratory tests were performed simulating a wave by the vertical movement of the sensor on a metal plate that has a reflection coefficient similar to that of seawater. The results obtained showed an excellent concordance between the movement of the sensor and the reconstructed wave.

Key words: Measurement of marine waves, microwave sensor, Doppler effect, I / Q technology, digital signal processing, microwave reflection.

Índice general

Introducción.....	3
Objetivos generales.....	5
Objetivos específicos	5
1 Olas Marinas.....	6
1.1 Características físicas de las olas marinas.	7
1.2 Conclusión.....	8
2 Transceptor microondas de onda continua K-LC2	9
2.1 Características del transceptor K-LC2.	10
2.1.1 Ancho del haz.....	12
2.2 Microondas.....	15
2.2.1 Propagación de la microonda en agua marina.	15
2.3 Efecto Doppler.	16
2.3.1 Frecuencia Doppler, velocidad y dirección.	17
2.4 Conclusión.....	18
3 Prueba de evaluación de la reflexión de las microondas	20
3.1 Señal de salida del Transceptor K-LC2.	20
3.2 Procedimiento.....	21
3.2.1 Valores de los elementos del circuito.	22
3.2.2 Medición de amplitud de la señal de salida I/Q.	22
3.3 Conclusión del capítulo.....	25
4 Comprobación del algoritmo de procesamiento digital de señales	26
4.1 Simulación de la señal de salida del sensor K-LC2.	26
4.1.1 Obtención señal de los canales I y Q.....	27
4.1.2 Transformada de Fourier de Tiempo Reducido, STFT.	29
4.1.3 Determinar dirección del movimiento de la partícula.	31
4.1.4 Detección de la Velocidad de la partícula y Amplitud de la ola marina.	31
4.2 Conclusión del capítulo.....	33
5 Procesamiento y análisis señal Doppler	34

5.1 Capturar la señal producida.....	34
5.2 Prueba realizada.....	35
5.3 Criterios a utilizar para los códigos empleados.....	37
5.4 Obtención de la frecuencia Doppler.	37
5.4.1 Fast Fourier Transform (FFT).....	38
5.4.2 Cruce por cero.	40
5.4.3 Comparación de resultados.	42
5.4.4 Conclusión.	43
5.5 Evolución del código empleado y resultado obtenido.	44
5.5.1 Primer código: Recrear efecto Doppler.	44
5.5.2 Segundo código: Ola recreada con señal real.	45
5.5.3 Tercer código: Ola recreada en tiempo real	47
5.5.4 Funcionamiento buffer circular triple.....	49
5.5.5 Cálculo en punto flotante.	50
5.6 Conclusión del capítulo.....	51
6 Discusión y conclusiones.....	53
Glosario	55
Bibliografía	60
A Código empleado para simular efecto Doppler.....	61
A.1 Algoritmo utilizado para creación señal Dopple.	61
A.2 Algoritmo utilizado para adquisición de datos.	62
A.3 Algoritmo utilizado para obtener frecuencia Doppler y vector de dirección.	62
A.4 Obtención de la ola recreada.	64
B Segundo código empleado utilizando señal real del sensor.	65
B.1 Código empleado para obtener la ola recreada.	65
C Tercer código empleado para tiempo real.	69
C.1 Código empleado para obtener la ola recreada en tiempo real.	69

Introducción

El proyecto a realizar se centrará en evaluar la factibilidad técnica de fabricar un registrador de olas marinas basado en un transceptor de microonda continua de bajo costo. Para ello es necesario conocer las características de las olas marinas, como los tipos de ondas presentes en los océanos (las marea, ondas capilares, las provocadas por terremotos o volcanes, ondas de gravedad) y las fuerzas que las generan (fuerzas perturbadoras y de restitución). Se estudiará las características del transceptor de microondas que se encuentra disponible en las dependencias del Laboratorio de Sistemas Electrónicos e Instrumentación (KLC2). Se explicará de forma general el efecto Doppler y las microondas para entender de mejor manera el funcionamiento de registrador de olas.

El estudio del oleaje es de gran importancia para muchas materias, como lo es el área científica que estudia la dinámica de las olas marinas junto a su mecanismo de propagación y características principales (periodo, altura, energía de propagación, etc.); por otro lado se encuentra la parte práctica, que se enfoca principalmente en los campos de la ingeniería, tanto civil como naval, ayudando a la toma de decisiones para la gestión costera, diseñar diques, crear estructuras como el rompe olas, creación de borde costero, diseñar embarcaciones de grandes dimensiones, estructura de los barcos, obtención de energías renovables, etc. Es por ello la necesidad de entender en primera instancia el funcionamiento de las olas marinas, conocer sus características y con ello saber lo que se va a estar midiendo.

Para la medición de las olas marinas existen una variedad de productos comerciales con características específicas que son elegidos dependiendo del contexto ambiental el cual se encontrarán funcionando, algunos deben ser colocados sobre la superficie marina como hay otros que deben estar sumergidos. Existen dispositivos que ocupan sensores capacitivos, inductivos, de microondas, ultra sonido, de presión, mecánico, entre otros. El sensor a ocupar para el proyecto es de un trabajo realizado anteriormente en la Escuela de Ingeniería Eléctrica [1]. El dispositivo es un transductor de microondas de onda continua de bajo costo llamado “K-LC2” proveniente de una empresa suiza, que está diseñado para detectar el movimiento y rapidez de un objeto, gracias al efecto Doppler; cuenta con tecnología I/Q, que permite saber el sentido de desplazamiento (si se acerca o se aleja). Con ello se pretende ocuparlo para la medición y recreación de la ola marina.

En la Escuela se han desarrollado diferentes dispositivos de medición de olaje, pero ninguno con la tecnología del transductor antes mencionado. El módulo K-LC2 cuenta con dos antenas, una de transmisión que permite emitir una señal de microondas de aproximadamente 24 [GHz] de forma continua, que al momento de interceptar un objeto en movimiento crea un eco (efecto Doppler) el cual es detectado por su antena receptora; además contiene dos mezcladores que multiplican la señal capturada con una senoide desfasada en 90° permitiendo posteriormente deducir la dirección del movimiento detectado.

La señal de salida del dispositivo utilizado tiene magnitud que va entre los microvolts a milivolts y opera en un rango de frecuencia entre 0 a 50 [MHz]. Para que la información proporcionada por el sensor no se mezcle con ruido eléctrico y pueda ser detectada por un sistema de adquisición de datos, fue necesario implementar un amplificador de alta ganancia junto con un filtro pasa banda. La información adquirida es almacenada en un archivo para que posteriormente pueda ser analizada por un procesamiento digital de señales.

Antes de realizar las pruebas pertinentes, se recreará la señal producida por el transceptor de microondas mediante algoritmos de simulación que posteriormente serán procesados por códigos de procesamiento digital de señales creados para el proyecto, con la finalidad de verificar el buen funcionamiento de este. Una vez comprobado que los algoritmos funcionan se realizarán las pruebas donde se recreará la forma de la ola marina mediante movimientos del sensor de forma vertical sobre una superficie que recreará la ola marina.

El dispositivo se montará sobre el mar, es por ello que se realizará una evaluación de la reflexión de las microondas sobre el agua marina. El ensayo se realizará en el laboratorio con la ayuda de una batea llenada con agua salada que sea lo suficientemente grande para recrear las características de la superficie el agua marina. Durante el experimento se deberá comparar el coeficiente de reflexión de los diferentes agentes que puedan intervenir con la correcta medición (el suelo, la batea de plástico, agua dulce y agua salada), además, se evaluará sustituir la batea con agua marina por una plancha metálica para facilitar las futuras pruebas.

La señal capturada del transceptor tras simular el movimiento de una ola marina, tiene como característica una onda senoidal con frecuencia variable; dicha frecuencia es producida por el efecto Doppler y permite estimar la velocidad con la que varía la altura de la ola para finalmente obtener la forma de la ola.

La señal almacenada se procesará con dos tipos de algoritmos; el primero almacena la información en vectores para ser utilizado en computadores de alto rendimiento, y el segundo trabaja en tiempo real lo que reduce de forma considerable la cantidad de memoria requerida pudiendo ser utilizado por algunos microcontroladores que cumplan ciertas características. Cada código deberá cumplir con una base que permite recrear la ola simulada, como es el filtrado, obtención de la frecuencia Doppler y el desfasaje entre los canales, calcular la velocidad con la que varía la altura de la ola para posteriormente ser integrada y obtener la forma de la ola final.

Para el código en tiempo real se compararán dos formas de obtener la frecuencia predominante de cada instante de tiempo; en primera instancia se evaluará el algoritmo de la FFT, con y sin

ceros agregados, junto al método de la detección de cruces por ceros, comparándolas en resultado y en la cantidad de operaciones matemáticas que se deben realizar en cada una de ellas. Además, se implementará el buffer circular triple para disminuir la cantidad de memoria que se necesitará para almacenar la información que es relevante para obtener un resultado satisfactorio. Por último, se sabrá la cantidad de cálculos de punto flotante necesarios para el programa; toda esta información servirá para que en un futuro se pueda elegir un microcontrolador que cuente con las características necesarias para ser implementado.

Los objetivos del proyecto son:

Objetivos generales

- Evaluar la factibilidad técnica de fabricar un registrador de olas marinas basado en un transceptor de microonda continua.

Objetivos específicos

- Estudiar las características de las olas marinas en los puertos.
- Estudiar las características del transceptor de microondas disponibles en LABSEI.
- Evaluar la reflexión de las microondas en la superficie del mar.
- Diseñar un mecanismo para simular las olas en las dependencias de la PUCV.
- Adquirir y procesar las señales del sensor con las olas simuladas.
- Evaluar el prototipo fabricado.

1 Olas Marinas

El trabajo realizado tiene como finalidad el probar la factibilidad técnica de fabricar un registrador de olas marinas basado en un transceptor de microondas continua, es por ello la necesidad de estudiar y comprender que son las olas marinas, como surgen y saber las características físicas de ellas para luego poder implementar de buena manera el registrador.

Las olas marinas son la sumatoria de ondas que se encuentran en la superficie del mar, producidas por el resultado de la interacción de dos tipos de fuerzas que actúan sobre el mismo océano, la primera es la fuerza perturbadora, que es la responsable de ocasionar movimiento en el agua (Atracción gravitacional de la luna y el sol, viento, tsunami y tormentas) y la segunda es la fuerza de restitución, que permite calmar las olas (Fuerza Coriolis, tensión superficial, gravedad).

En la Figura 1-1 se muestra las ondas y fuerzas que más influyen en el océano. Las ondas más conocidas son [2]:

- *Ondas de marea*, son generadas por el efecto de la gravedad producida por los astros (la luna y el sol). Son ondas bastante predecibles, además de contener poca energía y periodos que oscilan entre las 12 y 24 horas.
- *Ondas capilares* son afectadas principalmente por la tensión superficial del agua, su longitud de onda está en el rango de los centímetros.
- *Ondas provocadas por terremotos o volcanes submarinos* son las que generan tsunamis, los cuales almacenan mucha energía, alta velocidad y de gran periodo lo cual al llegar a la costa puede tener resultados catastrófico.
- *Onda de gravedad* provienen por la gravedad de la tierra y la flotabilidad del agua.

Se aprecia que las ondas de gravedad son las que se encuentran con mayor frecuencia en los océanos por contener mayor cantidad de energía (ver Figura 1-1) producto de la presencia prolongada del viento y el roce producido sobre las moléculas superficiales del agua, dichas ondas marinas pueden ser detectadas a varios kilómetros de distancia.

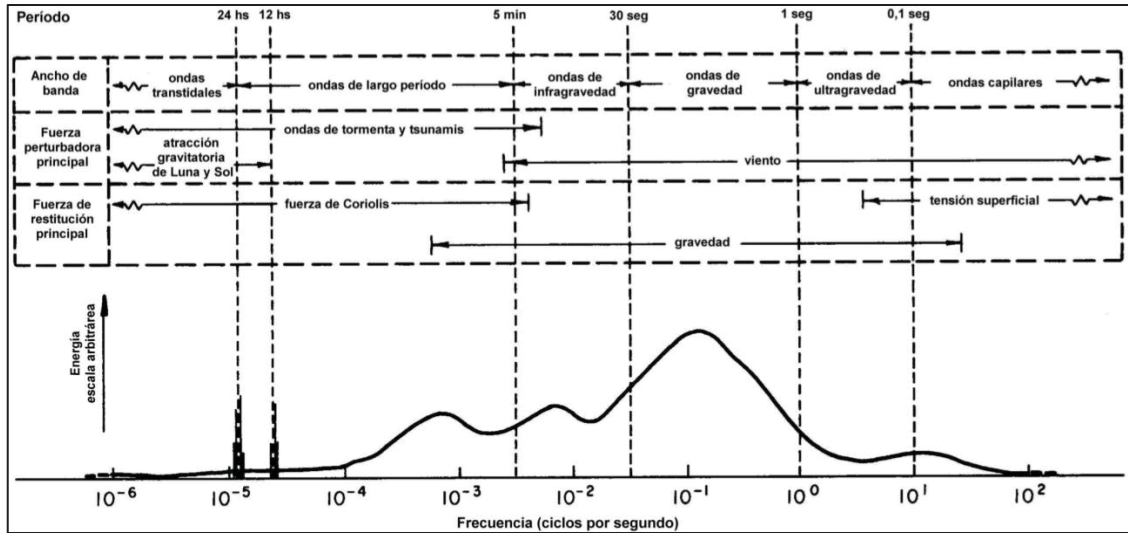


Figura 1-1: Clasificación de ondas marinas junto a las fuerzas que afectan al océano (fuente: <http://www.sroceano.com.ar>).

1.1 Características físicas de las olas marinas.

Los estudios de las olas marinas se dividen en: Olas de aguas profundas, que no se encuentran influenciadas por el fondo marino permitiéndoles moverse de forma independiente a él, y por otro lado son las olas costeras, que, al tener poca profundidad, el fondo altera la forma y el movimiento de las olas [3]. Al ser un prototipo de laboratorio, las olas estudiadas serán en modelación de aguas profundas, ya que su movimiento ondulatorio se asemeja a una onda senoidal ideal que contiene un periodo, una altura máxima que es la cresta y un valle que es el punto más bajo de la ola, con ello permite saber cuál es la información relevante que se debe registrar.

Las características físicas de una onda ideal se ven en la figura 1-2.

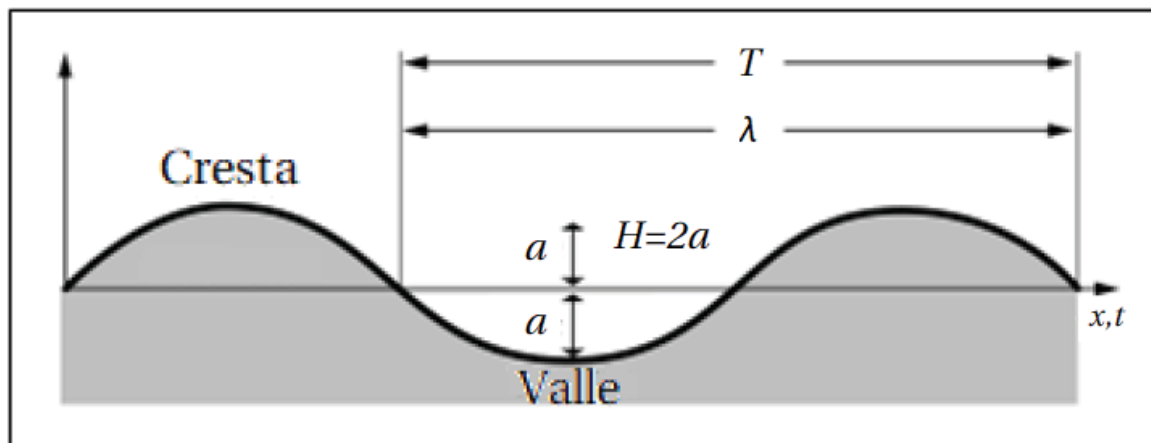


Figura 1-2: Característica física de una onda [2].

λ : Longitud de onda, es la distancia horizontal (en metros) entre dos crestas sucesivas.

T : Período, es el intervalo de tiempo (en segundos) entre el paso de las crestas sucesivas que pasa un punto fijo.

f : Frecuencia, es el número de crestas que pasan un punto fijo en 1 segundo. Normalmente se mide en números por segundo (Hertz) y es el mismo que $1 / T$.

a : Amplitud, es la magnitud del desplazamiento máximo desde el nivel medio del mar. Normalmente se indica en metros.

H : Altura de la ola, es la diferencia en la elevación de la superficie entre la cresta de la ola y la depresión anterior. Para una onda sinusoidal simple $H = 2a$.

c : Velocidad de propagación, es la velocidad a la que se desplaza la onda. Se conoce también como velocidad de onda o velocidad de fase.

1.2 Conclusión.

Al ser un proyecto que tiene como finalidad la medición de las olas marinas, es necesario conocer como nacen y sus características esenciales. El tipo de oleaje y ondas que se quiere registrar, es la que se encuentre con mayor frecuencia, y esta son las ondas de gravedad producida el viento (fuerza perturbadora) junto a la gravedad de la tierra (fuerza de restitución).

Para poder registrar las olas marinas es necesario conocer sus características principales y que variables son indispensables en saber. Al poder ser modeladas por una onda senoidal ideal, las características relevantes que se debe llegar es la obtención de su altura como su periodo que son entre 1 a 30 segundos. Con ello se podrá comprar la onda real versus la recreada por la señal obtenida del sensor de microondas.

2 Transceptor microondas de onda continua K-LC2

En la actualidad existen diferentes formas de medir la altura de una ola, tales como sensores de presión que son colocados en el fondo marino, las boyas que contienen un acelerómetro y junto con el movimiento producido por la oscilación de la ola se puede tener el conocimiento de su altura de ella, el radar que es colocado sobre la superficie marina, envía una señal que al rebotar con la superficie del mar la señal se devuelve y es captado por el dispositivo, con ello permite recrear la ola.

El sensor que se quiere probar para registrar las olas marinas es el transceptor de microonda “K-LC2 Dual Channel Radar Traseceiver” (ver Figura 1-3), es proveniente de la empresa suiza, “RFbeam Microwave GmbH”. Es un módulo de dos canales con haz asimétrico para aplicaciones de corta distancia y de bajo costo. Sus aplicaciones típicas son la detección de movimiento sensibles a la dirección, sistema de seguridad, sistema de medición de velocidad del objeto, sensores industriales [4], algunos ejemplos de uso son la activación de la iluminaria o aparatos electrónicos al detectar la presencia de una persona, alarma de intrusos, alerta de proximidad y velocidad de vehículos, contador, vigilancia de signos vitales de un paciente, medición de niveles de líquidos, monitoreo de tráfico, etc. [4].

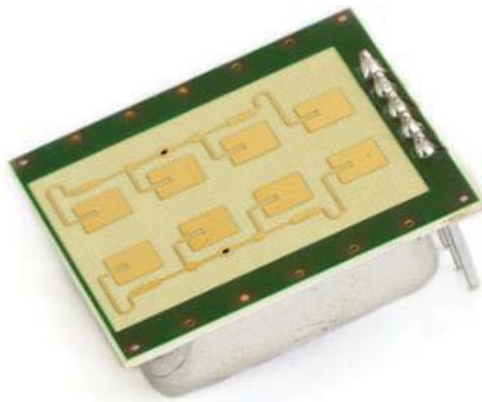


Figura 2-1: Transceptor de radar de doble canal K-LC2 (Fuente: <https://www.rfbeam.ch>).

2.1 Características del transceptor K-LC2.

Características generales:

- Transceptor I / Q en miniatura de banda K de 24 GHz
- Entrada de FM de barrido de 140MHz
- Antena de parche de 2 x 4
- 2 mezcladores balanceados con 50MHz de ancho de banda
- Excelente capacidad de cancelación de ruido a través de la tecnología I / Q
- Abertura del haz 80 ° / 34 °
- Potencia de salida EIRP de 15dBm
- Superficie de 25x25mm², espesor <6.5mm
- Diseño de bajo costo

Las características eléctricas se muestran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Características eléctricas del módulo K-LC2 [4].

Características	Condiciones / Notas	Valor			Unidad
		Mínimo	Típico	Máximo	
<i>Condiciones de Operación</i>					
Tensión de Alimentación		4,75	5,0	5,25	[V]
Consumo de Corriente	Pin VCO abierto		35	45	[mA]
Voltaje de entrada VCO		-0,5		2,0	[V]
Resistencia Pin VCO			570		[Ω]
<i>Transmisión</i>					
Frecuencia Transmitida	Pin VCO izquierdo abierto, Tamb=-20°C. +60°C	24,050	24,125	24,250	[GHz]
Tiempo de encendido	Hasta que el oscilador esté estable $\Delta f_{TX} < 5\text{MHz}$		1		[μs]
Ancho de haz horizontal			80		[°]
Ancho de haz vertical			34		[°]
<i>Canal de salida I/Q</i>					
Resistencia			50		[Ω]
Rango de frecuencia IF		0		50	[MHz]
Salida Offset voltaje		-200		200	[mV]
Cambio de fase	$f = 1\text{Hz} - 20\text{kHz}$	80	90	100	[°]

El transceptor cuenta con dos antenas, transmisor (Tx) y receptor (Rx). Ambas cuentan con cuatro parches más pequeñas, están conectadas como se aprecia en la Figura 2-1. Además, cuenta con

dos canales de salida (I y Q), que son mezclados por una señal senoidal que hace que se desfasen en 90 grados una respecto a la otra, con ello permite identificar la dirección del movimiento del objeto capturado (ver Figura 2-2) [4].

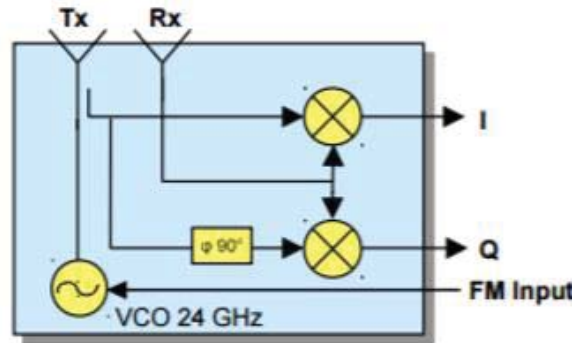


Figura 2-2: Diagrama de Bloque del transceptor de microondas K-LC2 [4].

En la Tabla 2-2 se identifica los pines de configuración del transductor, mientras que la Figura 2-3 muestra la ubicación de los pines en el dispositivo.

Tabla 2-2: Pines de Configuración [4].

Pin	Descripción	Valor Típico
1	Salida IF Q	Carga de 1 [kΩ]
2	VCC	5 VDC
3	Salida IF I	Carga de 1 [kΩ]
4	GND	Tierra
5	VCO	Abierto =f0

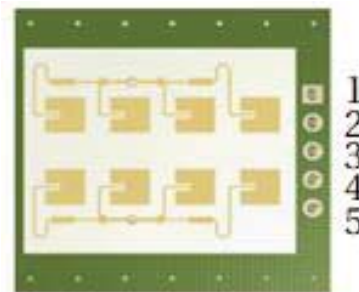


Figura 2-3: Pines de configuración [4].

El haz de la antena varía de acuerdo a la longitud de esta, entre más ancho sea la antena, más estrecha será la radiación emitida (Figura 2-4).

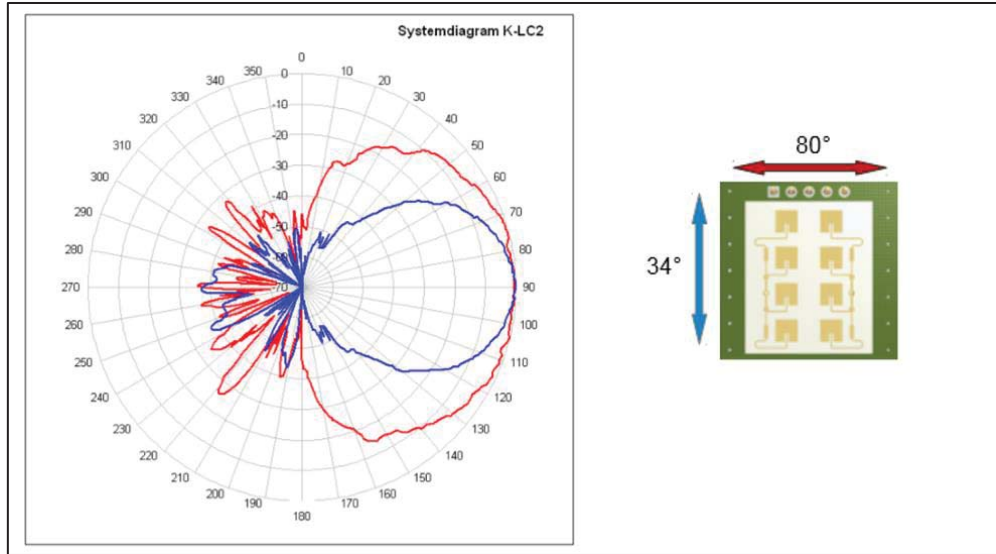


Figura 2-4: Diagrama sistema de antena [4].

2.1.1 Ancho del haz.

El transceptor tiene dos aberturas de haz de valores diferentes, de 34° y otra de 80° , esto es debido a la forma de sus antenas. En la Figura 2-5, muestra una relación aproximada entre la altura que se posiciona el sensor “d” respecto a la superficie abarcada por cada haz de forma independiente (X e Y), se aprecia claramente que, a mayor distancia respecto al suelo, X e Y aumentan su valor.

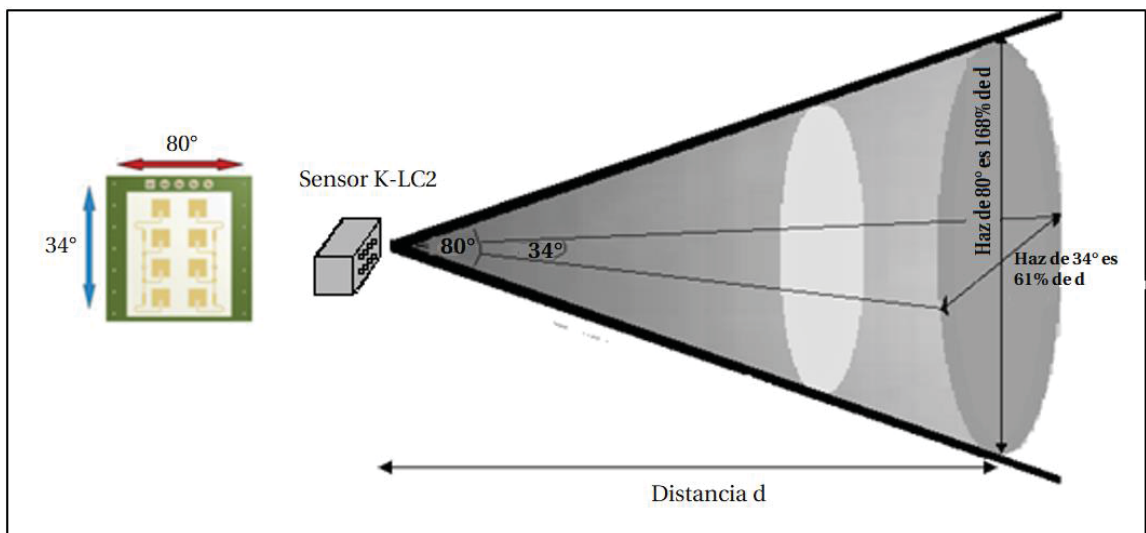


Figura 2-5: Haz de transmisión del Transceptor de microondas K-LC2

Se analizará cada haz de forma independiente, con el objetivo de determinar qué posición es la óptima para medir eficazmente la forma de la ola marina.

Teniendo como referencia la Figura 2-5 y por el teorema de los senos, se tiene que:

Para el Haz de 34°:

$$\frac{\frac{X}{2}}{\sin 17^\circ} = \frac{d}{\sin 73^\circ} \quad (2-1)$$

$$X = 2 \cdot \frac{\sin 17^\circ}{\sin 73^\circ} \cdot d \quad (2-2)$$

Y para el haz de 80°:

$$\frac{\frac{Y}{2}}{\sin 40^\circ} = \frac{d}{\sin 50^\circ} \quad (2-3)$$

$$Y = 2 \cdot \frac{\sin 40^\circ}{\sin 50^\circ} \cdot d \quad (2-4)$$

Por lo tanto, la proporción entre el ancho de cada haz respecto a la altura que se sitúa el transceptor viene dado en la ecuación (2-5).

$$Y = 1,68 \cdot d \quad \text{y} \quad X = 0,61 \cdot d \quad (2-5)$$

Para una distancia d , el ancho del haz de 34° representará un 61% de d y para 80° será 168% de d (ver Figura 2-5), es decir, si el sensor se sitúa a 1 metro de distancia sobre el nivel del mar, la cobertura será de 0,61 metros para el haz de 34°, y 1,68 metros para el haz de 80°, por lo tanto, la orientación en la cual el sensor se posicionará es con el haz de 34° en dirección al movimiento de la ola marina, ya que se puede ubicar a una mayor altura abarcando un menor tramo de la ola.

A partir de la teoría del movimiento de las olas, se puede derivar una expresión que relaciona la velocidad de la onda “ v ”, con la longitud de la ola “ λ ”, fuerza de gravedad “ $g = 9,81 [m/s^2]$ ” y la profundidad del mar “ h ” (ver ecuación (2-6)) [2].

$$v^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot h\right) \quad (2-6)$$

$$\tanh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}} \quad (2-7)$$

Se sabe que la velocidad de propagación de la ola marina viene dada por “ $v = \lambda / T$ ”, entonces, la longitud de onda queda expresada por la ecuación (2-8).

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot h\right) \quad (2-8)$$

Para las olas en aguas profundas que se tomará como referencia, la longitud de onda queda simplificada a la ecuación (2-9) [5].

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (2-9)$$

Los periodos de una ola marina provocada por la fuerza del viento junto con la fuerza de gravedad forman las ondas de gravedad, los que oscilan entre 1 a los 30 segundos [2], siendo de mayor presencia las olas de 5 a 20 segundos [3].

Ocupando las ecuaciones (2-5) y (2-9) respectivamente, se obtienen los valores mostrados en la Tabla 2-3, el cual contiene información sobre la longitud de la onda junto con la distancia que cubre el haz de 34°, dando valores de distancia de la altura “ d ” y periodo “ T ”.

Tabla 2-3: Relación cobertura del haz con la distancia del sensor

Distancia d [m]	Periodo T [s]	Longitud de onda λ [m]	Cobertura haz de 34° [m]
1	1	1,56	0,61
	5	39	
	20	624,52	
	30	1405,18	
2	1	1,56	1,22
	5	39	
	20	624,52	
	30	1405,18	
4	1	1,56	2,44
	5	39	
	20	624,52	
	30	1405,18	
5	1	1,56	3,05
	5	39	
	20	624,52	
	30	1405,18	

Los periodos elegidos en la Tabla 2-3 son convenientes. Demuestran que, al aumentar su valor, la longitud de la onda del mar aumenta, reduciendo el problema presentado anteriormente con el haz del sensor. Con una distancia de 1 metro sobre el nivel del mar y un periodo de 5 segundos, el valor de la longitud de onda es de 39 metros, comparado con el valor obtenido del haz de la antena (0,61 metros) equivale aproximadamente 0,23% del largo de la ola, lo que no producirá problemas. Ahora bien, si se requiere colocar el sensor a mayor distancia (cercano a los 5 metros), se puede medir olas con periodos iguales o superiores a los 5 segundos, ya que representa menos

del 10% del largo de la ola, si se requiere disminuir dicho porcentaje, se debe situar el dispositivo a una menor altura.

2.2 Microondas.

El transceptor “K-LC2” trabaja con microondas, son ondas electromagnéticas que se encuentran entre 1 a 300 [GHz], teniendo longitudes en el rango de milímetros a centímetros. Se supone un período de oscilación entre nanosegundo y picosegundo. En el ambiente existen fenómenos físicos que afectan las, por ejemplo, la reflexión, refracción y la difracción, lo que provoca atenuación y distorsión de la señal [6], es por ello que se debe poner atención en donde se realizarán las pruebas.

Los microondas se subdividen en bandas de frecuencias. Algunas de ellas son la I, G, P, L, S, K, ente otras. El sensor K-LC2 opera con una banda de frecuencia K, que oscila entre 18 a los 26 [GHz] [6].

Las microondas se desplazan de forma diferente de acuerdo al medio en el que se encuentran, para el vacío se propagan a la velocidad de la luz “c” ($3 \cdot 10^8$ [m/s]).

A pesar que el dispositivo trabaja con señales en el orden de los [GHz], las señales de salida donde contiene la frecuencia Doppler se encuentran en el rango de los [Hz] a los [MHz] como se logra ver en las características del transceptor K-LC2 mostrado en la Tabla 2-1.

2.2.1 Propagación de la microonda en agua marina.

La propagación de cualquier onda depende del material en el cual se encuentra, hay algunos materiales que son buenos medios para que la onda se desplace libremente, y en otros, la atenua prácticamente al instante. Es por ello que se verá lo que pasa con la onda electromagnética en el agua marina.

La velocidad de propagación de una onda viene dada por la ecuación (2-10) [6].

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n} \quad (2-10)$$

Donde c es la velocidad de la luz, $3 \cdot 10^8$ [m/s], ϵ_r es la permitividad del medio y μ_r es la permeabilidad magnética del medio y n es el índice de refracción del medio. Las microondas en el vacío se propagan a la velocidad de la luz, pero se verá disminuido si se encuentran en un medio diferente. Para el agua de mar, el índice de refracción varía entre 1.56 a 1.6, es decir, la velocidad será de $1.92 \cdot 10^8$ [m/s] resultando ser un 36% más lento.

La intensidad de una onda electromagnética que llega a un receptor sumergido en el agua marina, disminuye exponencialmente según ecuación de atenuación de una onda en el medio que viene dada por la ecuación (2-11) [6].

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2-11)$$

Donde δ es la profundidad de penetración, un parámetro que disminuye con el valor de la frecuencia de la onda transmitida, según ecuación (2-12) [6].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \tag{2-12}$$

Es por ello que, al aumentar la frecuencia en el orden de los gigahertz, la profundidad de penetración tiende a cero lo que provoca que la intensidad de la onda electromagnética también lo haga. Por lo tanto, el agua de mar actúa como conductor a bajas frecuencias, pero en altas frecuencias se transforma en un material dieléctrico [6]. Es por eso que el sensor debe ir ubicado sobre la superficie marina y no debajo, ya que, si así fuera, el sensor no detectaría ninguna señal en su antena receptora.

2.3 Efecto Doppler.

Los canales de salida del módulo “K-LC2” emiten señales senoidales que varían su frecuencia de acuerdo a la velocidad de movimiento en que se encuentra el objeto que es detectado, dicha frecuencia es provocada por el efecto Doppler.

El efecto Doppler se genera cuando la señal emitida por la antena emisora Tx intercepta con el objeto creando un eco para luego ser detectada por la antena receptora Rx (ver Figura 2-2). Si la frecuencia del eco es mayor a la emitida se concluye que el objeto se está acercando, en cambio si la frecuencia es menor, el objeto se aleja [7], un ejemplo de ello se muestra en la Figura 2-6.

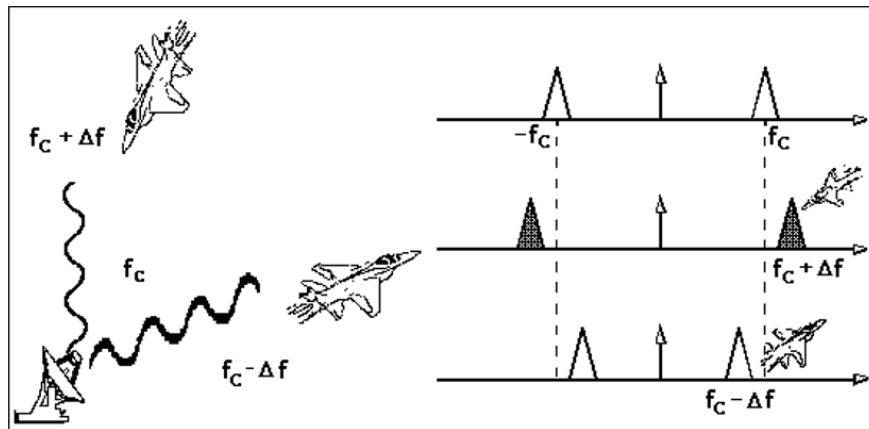


Figura 2-6: Efecto Doppler [7].

Analizando la señal de cada canal de salida de forma independiente, es posible detectar la velocidad en la cual se encuentra el objeto en movimiento, pero no así su dirección, es decir, no se sabrá si el objeto se encuentra acercándose o alejándose con respecto al módulo transceptor de microondas K-LC2.

2.3.1 Frecuencia Doppler, velocidad y dirección.

El sensor cuenta con tecnología I/Q, es decir, tiene dos canales de salida que se están desfasados en 90° , permitiendo recopilar información en dos componentes de forma independiente, los que son alojadas en una señal compleja, dicho desfase permite saber la dirección de movimiento del objeto detectado como muestra en la Figura 2-7, cuando el desfase es positivo (la señal del canal I adelanta a la señal del canal Q) es porque el objeto se encuentra acercándose respecto al sensor, en cambio cuando el desfase es negativo (cuando la señal del canal Q adelanta a la señal del canal I) el objeto se encuentra alejándose.

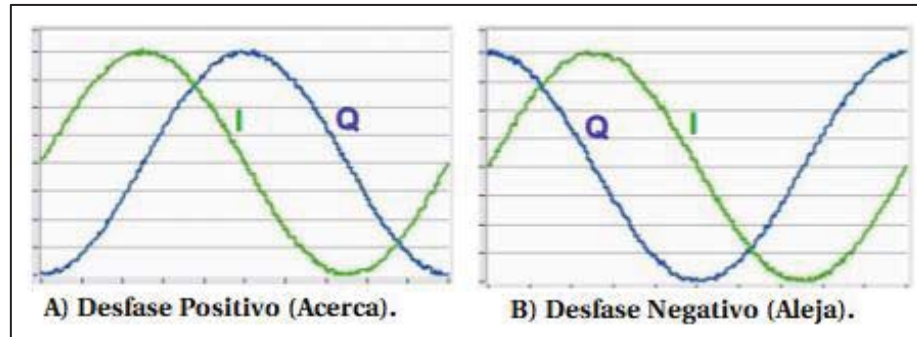


Figura 2-7: Desfasaje entre los canales de salida I/Q.

El sensor al estar posicionado sobre la superficie del mar, el módulo detectará la variación de altura que produce el paso de una ola marina, obteniendo de esta manera información relevante para calcular posteriormente las características de dicha onda. La velocidad con la que una partícula de agua se mueve para completar su trayectoria (ver Figura 2-9). La circunferencia tiene un diámetro " H ", un perímetro igual a " πH " y un periodo " T ", entonces, la velocidad tangencial que tiene dicha partícula será " $(\pi \cdot H) / T$ " (ver Figura 2-8). Se debe comprender que la velocidad de la partícula individual no es igual que hablar sobre la velocidad de propagación de la ola [2].

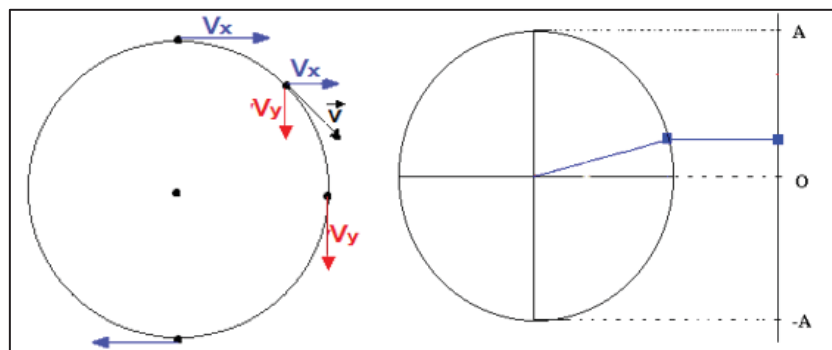


Figura 2-8: Velocidad tangencial de un punto en una circunferencia y posicionamiento de la partícula.

Analizando la Figura 2-8, la velocidad tangencial (\vec{V}) se compone de dos vectores, la velocidad horizontal de la partícula (\vec{V}_x) y la velocidad vertical (\vec{V}_y).

La componente de interés para obtener la frecuencia Doppler (f_d), será \vec{V}_y , ya que es la encargada de mover la partícula de agua hacia arriba y abajo. Entre la cresta y el valle (ver Figura 1-2), la componente \vec{V}_y tendrá un valor igual a cero igual que f_d (ver ecuación (2-8)), es producto del vector al cambiar de sentido. El valor máximo será en el instante en que la partícula que se encuentre en el nivel cero de la ola (ver Figura 2-9).

Para la medición de rapidez, es necesario la ecuación de Doppler (ecuación (2-14)) [1], que relaciona la velocidad vertical de la partícula de agua (\vec{V}_y), la frecuencia transmitida del módulo K-LC2 ($f_t = 24,125$ [GHz]) y la velocidad de propagación de la microonda en el vacío ($c = 3 \cdot 10^8$ [m/s]).

$$f_d = 2 \cdot V \cdot \frac{f_t}{c} \tag{2-13}$$

$$f_d = \frac{160,8 \cdot V}{\left[\frac{m}{s}\right]} \text{ [Hz]} \quad \text{o} \quad f_d = \frac{44,68 \cdot V}{\left[\frac{Km}{H}\right]} \text{ [Hz]} \tag{2-14}$$

Para obtener el rango de frecuencia que variará f_d en el transcurso de una ola, es necesario saber el valor de la velocidad máxima de la partícula que se ve reflejada en la ecuación (2-15).

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{\pi \cdot H}{T} \tag{2-15}$$

Es decir, para una ola de altura de 1 metro con un periodo igual a 10 segundos, la velocidad máxima será de 0.34 [m/s], lo que conlleva a una frecuencia Doppler máxima de 50.5 Hertz.

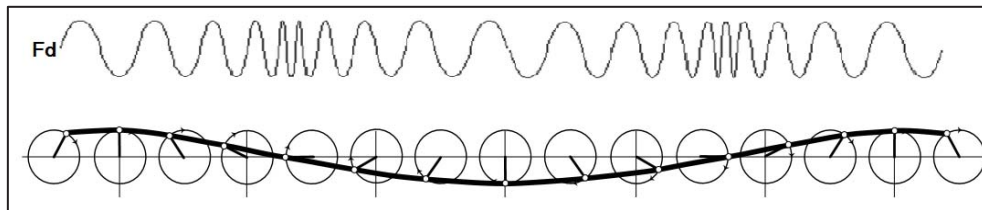


Figura 2-9: Movimiento de una partícula de agua en el transcurso de una onda y forma de la frecuencia de Doppler [2].

2.4 Conclusión.

Se debería tener en consideración en las pruebas futuras, las condiciones ambientales, lo que permitiría reducir todas las interferencias que podrían afectar la lectura del registrador, como lo es la altura que se posicionará el sensor. El dispositivo utilizado es el transductor de microondas de onda continua K-LC2, que permite detectar el movimiento de un objeto junto a su velocidad y dirección, eso es gracias a que cuenta con tecnología I/Q. Al ser un sensor de bajo consumo energético (35 mA) permite ser usado para mediciones de larga duración.

Además, se debe tener en cuenta que las microondas no pueden propagarse libremente bajo el agua marina, ya que se ven atenuadas casi al instante, es por ello que el prototipo será evaluado sobre la superficie del mar, donde la velocidad de propagación es a la velocidad de la luz.

El dispositivo crea una señal senoidal que contiene una frecuencia variable, el cual es producto del efecto Doppler, con ello se puede obtener la velocidad de la variación de posición de la superficie marina para luego ser integrada y tener la altura instantánea de la ola pudiendo ser reconstruida.

3 Prueba de evaluación de la reflexión de las microondas

Dicho anteriormente, la onda emitida por la antena emisora Tx del transceptor, al ser interceptado por un objeto, produce un eco que posteriormente es detectado por el receptor Rx, lo que provoca una señal Doppler. El eco variará su intensidad de acuerdo al material que se compone el objeto, por ejemplo, si el objeto es un metal, la señal se reflejará mejor comparado con plumavit. Para poder realizar futuras pruebas en laboratorio que compruebe el buen funcionamiento del circuito, es necesario encontrar un material que tenga un coeficiente de reflexión similar al agua de mar.

3.1 Señal de salida del Transceptor K-LC2.

Las características de la señal de salida del módulo transceptor K-LC2 que muestra la Tabla 2-1, señala que opera con un rango de frecuencia que va desde los 0 [Hz] a los 50 [MHz] y contiene una magnitud de voltaje de salida baja (entre los μV a mV), lo cual lo hace susceptible al ruido blanco, provocando una mala relación de señal ruido “SNR” [4]. Para solucionar el problema mencionado, es necesario incorporar un amplificador de alta ganancia y posicionarlo lo más cerca posible a los pines de los canales de salida I/Q del transceptor, con ello aumenta la magnitud de la señal que contiene la información sin amplificar el ruido proporcionado por los cables que actúan como antena receptora.

Cada canal de salida tendrá su propio amplificador (Figura 3-1), con sus respectivos filtros pasa banda, que permitirá reducir la banda ancha a utilizar limitando el rango que se estime conveniente.

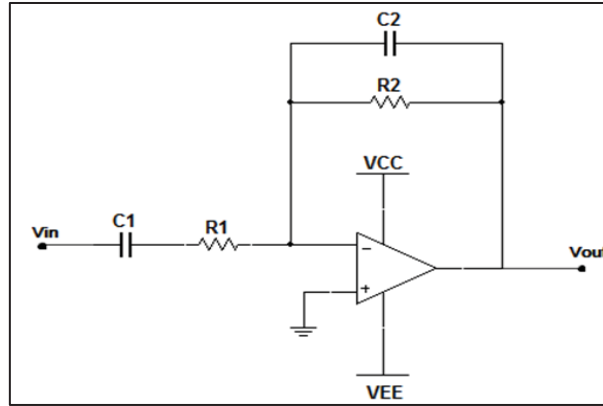


Figura 3-1: Circuito del Amplificador utilizado con filtro pasa banda.

En la Figura 3-1 es un amplificador con ganancia $G = R2/R1$, además cuenta con $C1$ y $R1$ que actúa como filtro pasa alto (FPA) mientras que $C2$ y $R2$ actúa como filtro pasa bajo (FPB).

$$FPA = \frac{1}{(2\pi \cdot C_1 R_1)} \quad y \quad FPB = \frac{1}{(2\pi \cdot C_2 R_2)} \quad (3-1)$$

3.2 Procedimiento.

Los pasos requeridos para establecer una conclusión correcta son:

- Conocer la amplitud y periodo de la onda a medir.
- Obtener el máximo valor de frecuencia Doppler con la ecuación (2-13) para posteriormente establecer los filtros que se aplicarían.
- Obtener los valores de los componentes del circuito mostrado en la Figura 3-1, con las formulas mostrada en (3-1).
- Montar el circuito de la Figura 3-2.
- Medir la amplitud de la señal de salida I/Q en un osciloscopio.
- Obtener conclusión.

Para las pruebas a realizar, se simularán olas de amplitud de 1 metro peak to peak con periodo de 10 segundos. Para esta etapa, no sería necesario que las olas fueran perfectas, ya que solo se quiere medir la reflexión de las microondas en el medio y no en procesar dicha información.

Para obtener el rango de frecuencia Doppler que producirá el circuito empleado, es necesario obtener la velocidad máxima que pueda alcanzar el movimiento que recrea la ola marina, para ello se ocupan las ecuaciones (2-15) y (2-14) respectivamente, obteniendo de ésta manera una frecuencia Doppler máxima de 50.5 [Hz] aproximadamente. Para evitar que se pierda información producto del filtro pasa banda, el filtro se establecerá entre el rango de 1 a 60 [Hz], siendo 1 [Hz] la representación de variación de 2 centímetros entre la distancia del sensor y la superficie del objeto captado, mientras que los 60 [Hz] representa una variación de 1,18 metros aproximadamente.

3.2.1 Valores de los elementos del circuito.

El transceptor de microondas al tener dos canales de salida, necesita dos amplificadores operacionales (AO). El encapsulado que se eligió es el “TL0702cp”, ya que cuenta con esta característica en su interior [8]. Para prevenir que la señal amplificada se sature es que se polariza con ± 12 volts.

Para obtener los valores de los componentes del circuito mostrado en la Figura 3-2, es necesaria la ecuación del FPA y FPB mostrada en la ecuación (3-1), recordar que el filtro pasa banda debe estar entre 1 [Hz] y los 60 [Hz]. Los valores elegidos fueron $R_1 = 1,5$ [k Ω], $C_1 = 100$ [μF], $R_2 = 1,1$ [M Ω] y $C_2 = 2,2$ [nF], obteniendo de esta manera un filtro que se encuentra en el rango de 1 [Hz] a los 65 [Hz], lo que cumple con lo especificado anteriormente.

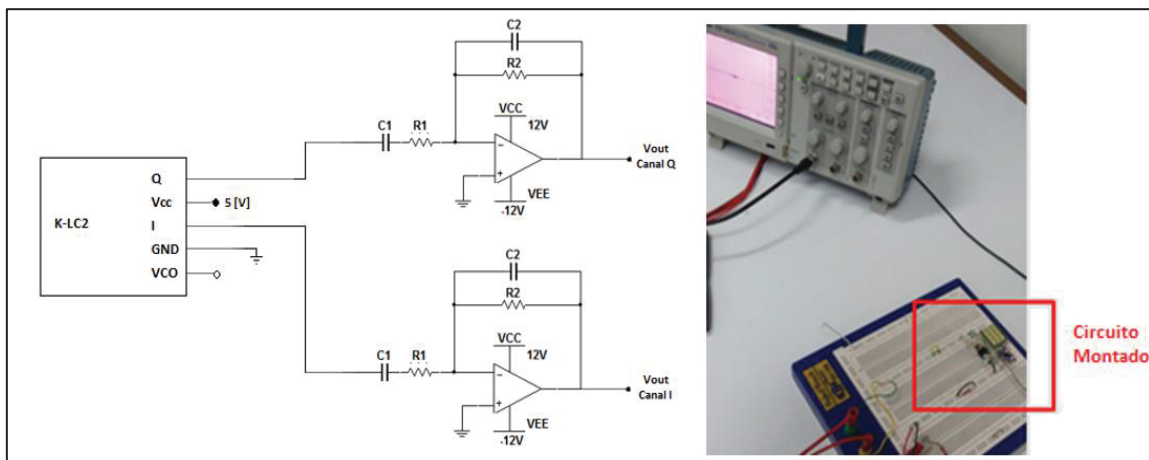


Figura 3-2: Circuito montado con el AO y filtro pasa banda de 1 a 65 [Hz].

3.2.2 Medición de amplitud de la señal de salida I/Q.

El objetivo de realizar la prueba es comprobar la reflexión de las microondas en agua de mar y compararlas con una plancha metálica. El objetivo es comprobar la factibilidad de cambiar dicho medio para facilitar las futuras pruebas realizadas en el laboratorio.

La prueba consiste en mover el circuito montado de forma vertical (arriba y abajo) sobre la superficie de los diferentes objetos que puedan interferir con el resultado, como lo es el suelo, la batea que contendrá el agua, el agua dulce, el agua salada y, por último, la plancha metálica. Se realizan mediciones con un osciloscopio como muestra Figura 3-3.



Figura 3-3: Prueba de reflexión realizada sobre una plancha metálica.

La onda electromagnética emitida por el transceptor tiene una longitud de 1.25 centímetros, es por ello que la batea debe ser lo suficientemente grande, tanto en profundidad como en el área superficial para obtener una reflexión de buena calidad. Las dimensiones de la batea utilizada para almacenar el líquido son: ancho de aproximadamente 33.5 cm, alto de 10 cm y largo de 55.25 cm, teniendo aproximadamente 18.5 litros (Figura 3-4). El agua salada utilizada tiene una proporción de cada 1 litro de agua dulce con 35 gramos de sal marina, es decir, fue necesario 0.65 kilos de sal marina.

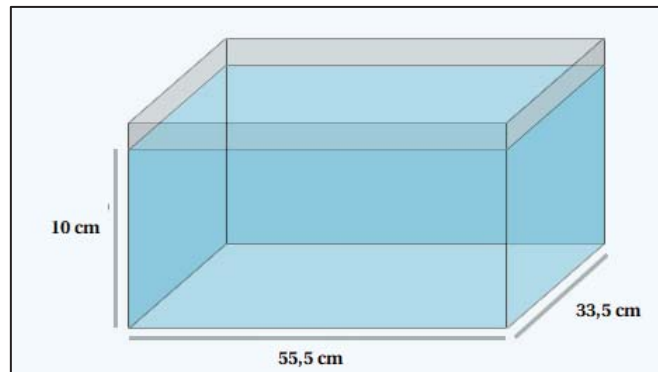


Figura 3-4: Dimensiones de la batea utilizada.

En la Figura 3-5 muestra el resultado de las pruebas realizadas en el “Laboratorio de Sistema Electrónicos e Instrumentación (LABSEI)” para diferentes tipos de materiales. La amplitud de la señal captada por el osciloscopio es directamente proporcional al coeficiente de reflexión del medio utilizado. Se aprecia en la Figura 3-5 a) y b) la reflexión aportada por el suelo y el recipiente vacío es baja comparada con la onda reflejada por el recipiente con líquido. El efecto del agua de mar con el agua dulce es similar, es decir, el prototipo a realizar también puede ser ocupado para el agua dulce.

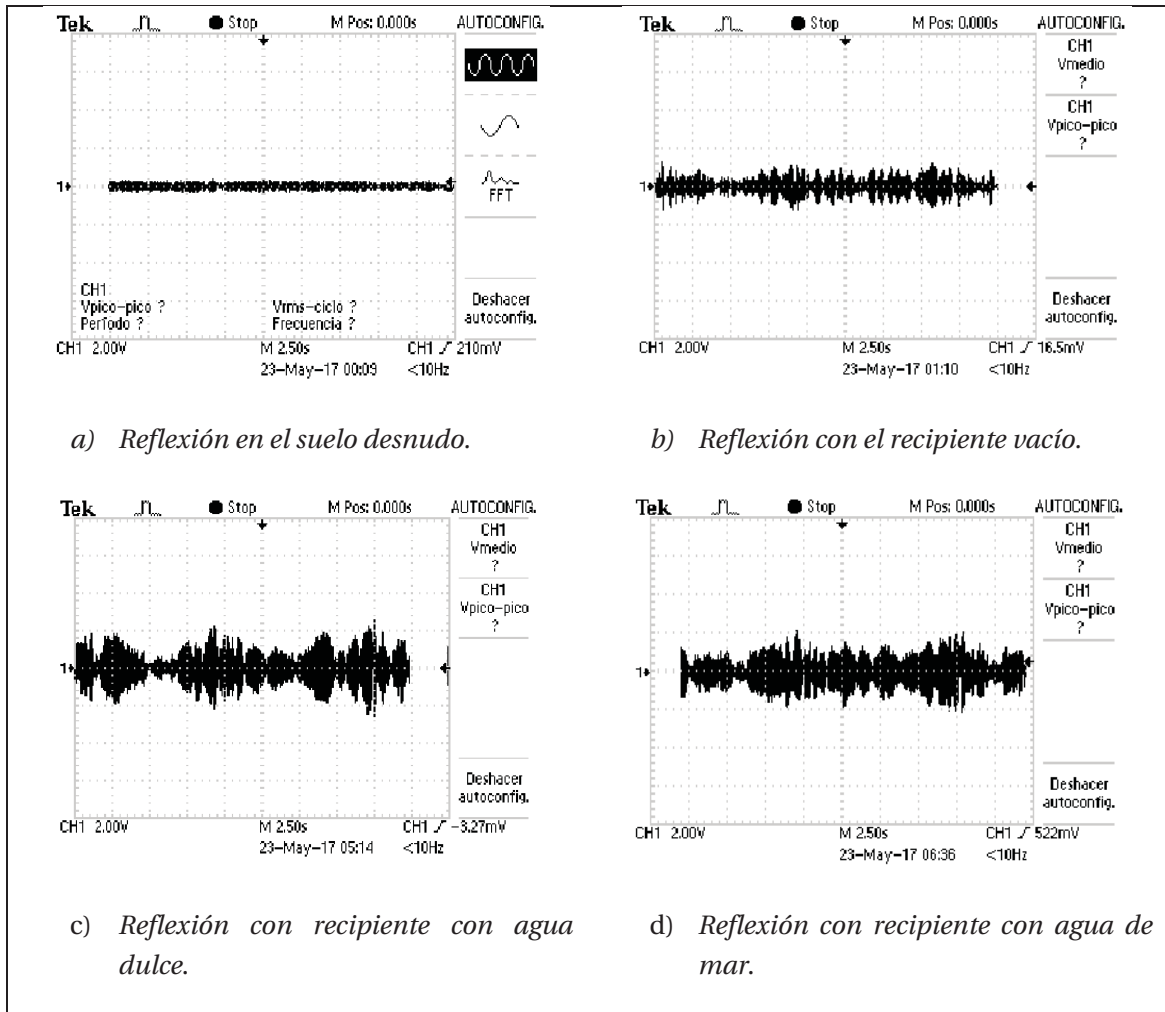


Figura 3-5: Pruebas de reflexión de microondas para diferentes tipos de materiales

En la Figura 3-6 se muestra la amplitud de las señales de reflexión producida para el agua salada y la plancha metálica, dando como resultado un coeficiente de reflexión muy parecidos, a pesar que sean de materiales diferentes.

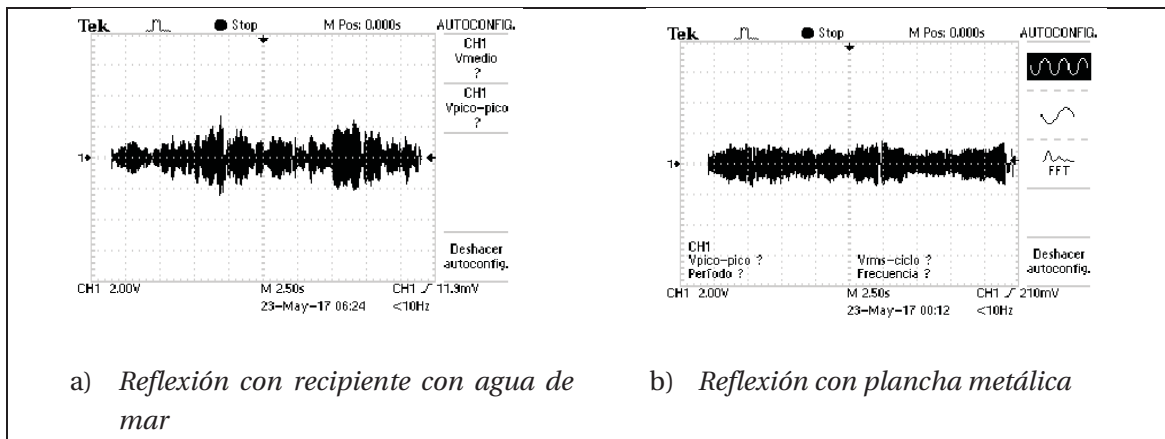


Figura 3-6: Comparación en la reflexión de la microonda entre agua de mar y una plancha metálica.

3.3 Conclusión del capítulo.

Para que se pueda medir una ola marina mediante el transductor K-LC2, es necesario establecer que las microondas emitidas puedan detectar fielmente el movimiento del agua, es por ello que se realizaron las pruebas donde se comprueba que el coeficiente de reflexión del agua marina es suficientemente grande para que el sensor pueda detectar el eco producido por la superficie.

La señal de los canales de salida del transceptor es de una magnitud muy baja, es por ello la necesidad de ocupar amplificadores operacionales, con ganancia del orden de los 1000[-] e implementando filtros pasa banda para eliminar el ruido proveniente del exterior.

Los resultados obtenidos reflejan que el dispositivo puede ser usado tanto para agua salada como agua dulce, ya que presentan un coeficiente de reflexión bastante parecidos. Además, a pesar que la señal reflejada por el agua marina es más variable respecto a la plancha metálica, en general, son bastante parecidas, a pesar que el metal sea mejor conductor. Esto es debido a la diferencia entre el espesor de la plancha comparado con la profundidad de la batea, provocando que las reflexiones de las microondas sean parecidas. Para las mediciones futuras se reemplazará el líquido por la plancha metálica disponible.

4 Comprobación del algoritmo de procesamiento digital de señales

Antes de comenzar a efectuar las pruebas relacionadas con el transceptor de microondas, es necesario establecer el buen funcionamiento del procesamiento digital de la señal utilizado para recrear dicha ola capturada. Es por ello, la necesidad de recrear la señal emitida por Tx como la señal capturada por Rx para posteriormente poder aplicar el algoritmo y comprobar su funcionamiento

4.1 Simulación de la señal de salida del sensor K-LC2.

Para simular la señal de salida del sensor K-LC2 se debe analizar el funcionamiento interno, de esta manera se obtendrá una simulación de acuerdo a la realidad. En la Figura 4-1 se muestra las variables que producen la señal Doppler; “ h ” es la altura que se sitúa el sensor respecto al punto medio de la ola; “ $d(t)$ ” es la variación de distancia producida durante el tiempo que va entre el sensor K-LC2 y la superficie de la ola; “ T ” es el periodo de la ola marina; “ a ” es la amplitud de la ola marina.

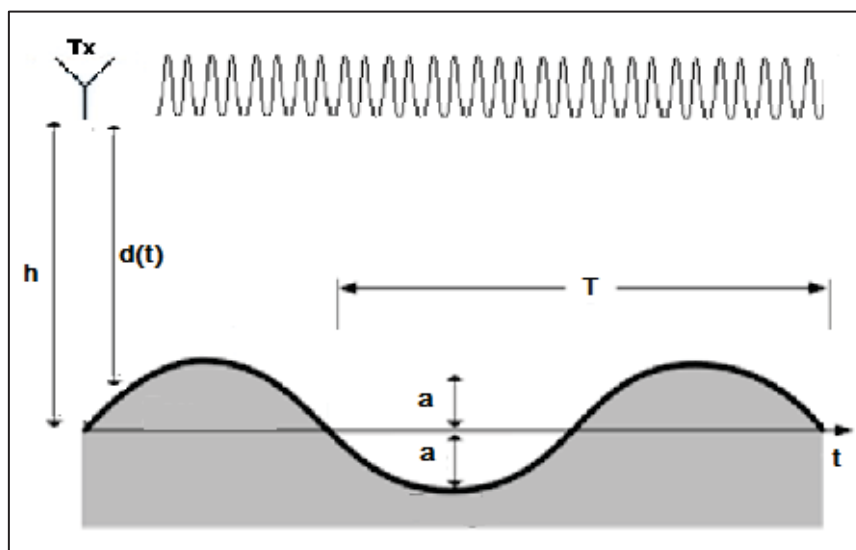


Figura 4-1 Variables que producen la señal Doppler.

La señal emitida por el transceptor es de aproximadamente 24,5 [GHz], como muestra la Tabla 2-1, y estableciendo un tiempo total de medición de 30 segundos, se produce un total de 750 Gigaciclos. Además, si se trabaja con 10 muestras por ciclos, se obtiene un total de 7500 Giga muestras, y si cada muestra se trabaja con 8 bits, se requeriría una computadora con una RAM de 70 Tera-bits para que pueda procesar toda la información, lo que provoca que, en las condiciones actuales, no se pueda efectuar dicha simulación. Es por ello la necesidad de cambiar algunos valores y adaptarlos para la capacidad de las computadoras disponibles.

Ahora bien, lo importante es no cambiar la longitud (λ) de la microonda producida Tx, con ello, cualquier modificación que se requiera implementar no debe alterar dicho valor. Si $\lambda = c / f$, entonces, es posible disminuir el valor de la velocidad de propagación (c) y el valor de la frecuencia transmitida (f) en un factor de 10^6 como muestra la ecuación (4-1).

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ [m/s]}}{24.5 \cdot 10^9 \text{ [Hz]}} = \frac{300 \text{ [m/s]}}{24.5 \cdot 10^3 \text{ [Hz]}} \quad (4-1)$$

Ocupando $f = 24,5$ [kHz] y $c = 300$ [m/s], se verá reducido los 70 Tera-bits necesarios a solo 70 Mega-bits. Con ello las características de la señal Doppler recreada no cambiará respecto a la señal obtenida en la realidad y se verificará el funcionamiento del procesamiento digital de la señal.

4.1.1 Obtención señal de los canales I y Q.

Para recrear la señal Doppler obtenida por los canales de salida del sensor, es necesario las dos etapas mostradas en la Figura 4-2. La 1era Etapa es la encargada de multiplexar la señal transmitida Tx con la señal recibida Rx para producir un desfase de 90° entre los canales I/Q, mientras la 2da Etapa, implementa un filtro pasa bajo IIR de 1er orden para eliminar las frecuencias altas producida en la etapa anterior y, por último, cuenta con una reducción de datos productor de la frecuencia de muestreo utilizando decimación en relación de 1:1000 [muestras/s].

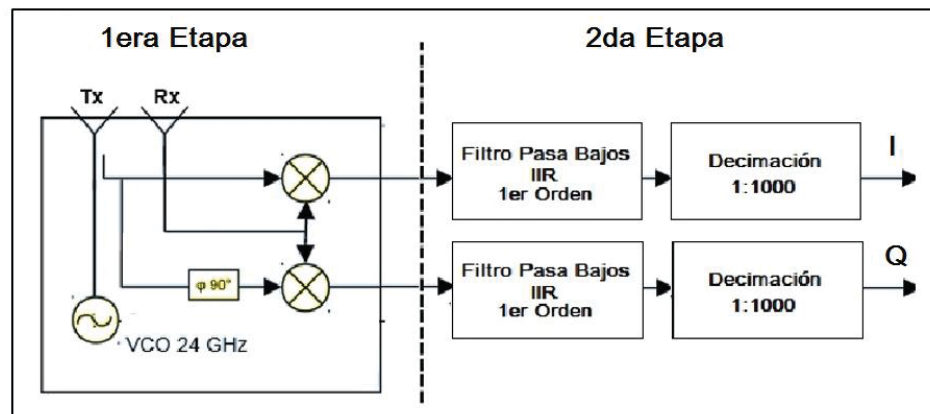


Figura 4-2: Diagrama de bloque en la simulación de las señales I y Q del sensor.

Para la 1era etapa, las señales simuladas de la transmisión Tx y recepción Rx vienen dado en las ecuaciones (4-2) y (4-3).

$$Tx(n) = \sin\left(2\pi \frac{f}{F_s} n\right) \quad (4-2)$$

$$Rx(n) = \sin\left(2\pi \frac{f}{F_s} n - \Delta\phi(n)\right) \quad (4-3)$$

Siendo f la frecuencia transmitida por el sensor el cual será de 24,5 [kHz], F_s , la frecuencia de muestreo que para la 1era Etapa es de 1 [MHz], n , son las muestras y $\Delta\phi$, es la variación del ángulo producido entre Tx y Rx el cual contiene la frecuencia Doppler.

La distancia requerida desde que la señal es emitida para luego ser capturada por el transceptor, es de 2 metros como mínimo como muestra la Figura 4-1, es por ello que la variación del ángulo queda $\Delta\phi(n) = (2 / \lambda) d(n) [\text{ciclos}] = (4\pi f / c) d(n) [\text{rad}]$, siendo $d(n)$ la distancia variable que se encuentra entre la superficie del agua y la antena receptora del módulo, que es mostrada en la ecuación (4-4), reduciendo $\Delta\phi(n)$ a la ecuación (4-5).

$$d(n) = h - a \sin\left(2\pi \frac{f_{ola}}{F_s} n\right) \quad (4-4)$$

$$\Delta\phi(n) = 4\pi \frac{f}{c} [h - a \sin\left(2\pi \frac{f_{ola}}{F_s} n\right)] \quad (4-5)$$

Solo queda utilizar la operación de mezclador complejo [7] para los vectores Tx y Rx como muestra la Figura 4-2, para luego se pueda pasar a la 2da etapa. Al multiplexar dos funciones de seno o coseno de diferentes ángulos, producen una componente en alta frecuencia, la cual es $(\alpha+\beta)$, mientras que la frecuencia Doppler viene dada por el ángulo $(\alpha-\beta)$, como muestran las ecuaciones (4-6), (4-7) y (4-8).

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)] \quad (4-6)$$

$$\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)] \quad (4-7)$$

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) - \cos(\alpha - \beta)] \quad (4-8)$$

Con la presencia de la alta frecuencia, es requerido implementar un filtro pasa bajo, para asegurar que la información que se analizará sea la que contenga la componente de la frecuencia Doppler. La componente de alta frecuencia producida en la realidad tiene una magnitud de 50 [GHz] y para la simulación es en el orden de los 50 [kHz] producto de la modificación explicada anteriormente. Por otro lado, la frecuencia Doppler se encuentra en el orden de los 50 [Hz], es por ello que el filtro pasa bajo se posicionará a los 100 [Hz].

Para representar la tasa de muestreo ocupada en la realidad que será de 1000 muestras por segundo, se necesita implementar la decimación en un factor de 1:1000, es decir, se toma 1 muestra de cada 1000, lo que reduce significativamente la dimensión de los vectores sin perder la información deseada.

En la Figura 4-3 se muestra dos gráficos que contienen extracto de la señal obtenida de los canales I/Q, uno antes de ser filtrado y el siguiente después del proceso de filtrado. Además, se aprecia claramente el desfase producido por el cambio de nivel de agua, antes de los 2,5 segundos, el nivel del agua se eleva y se acerca al sensor, es cuando la señal producida por el canal I adelanta a la señal producida por el canal Q, en cambio después de los 2,5 segundos, el nivel del agua baja y se aleja del sensor.

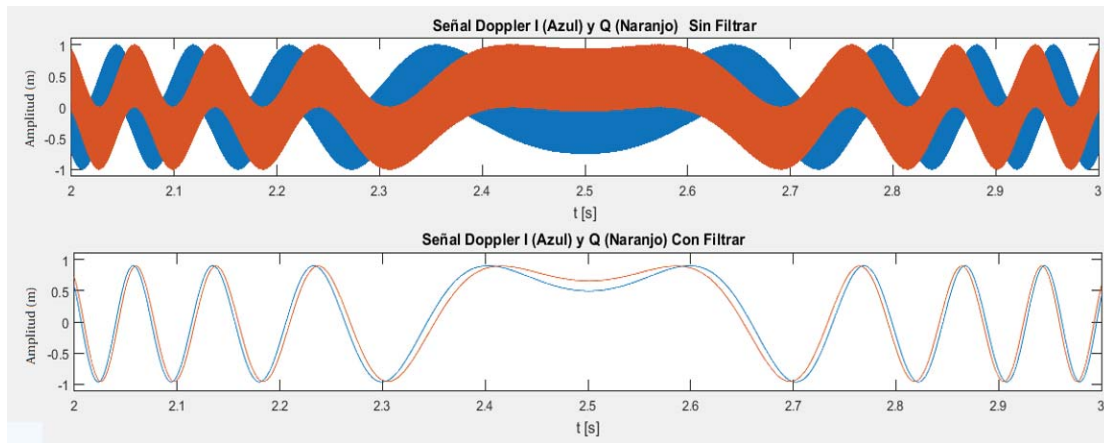


Figura 4-3: Señal salida de los canales I y Q, antes del filtrado y después del filtrado

4.1.2 Transformada de Fourier de Tiempo Reducido, STFT.

Una vez obtenida la señal de salida que se obtendría del transceptor de microondas K-LC2, se empieza con el procesamiento digital de la señal.

Las señales de salida de los canales contienen componentes frecuenciales las cuales varían respecto al tiempo. Es necesario encontrar el valor de la frecuencia predominante en cada instante de tiempo, ya que es la frecuencia que relaciona la velocidad perpendicular que tiene la partícula y posteriormente obtener la amplitud de la ola. Es por ello la necesidad de implementar la STFT.

La STFT se caracteriza en poder encontrar dicha frecuencia predominante en intervalos de tiempo reducido. El proceso que ocupa la STFT es, tomar las muestras de la señal de salida de los canales I o Q, se subdividen en bloques más pequeños de aproximadamente 0,5 segundos, cada bloque tiene un solapamiento del 50% con el bloque aledaño (como muestra la Figura 4-4). A cada segmento es multiplicado por una ventana adecuada para reducir el contenido espurio, por último, se calcula la Transformada rápida de Fourier (FFT).

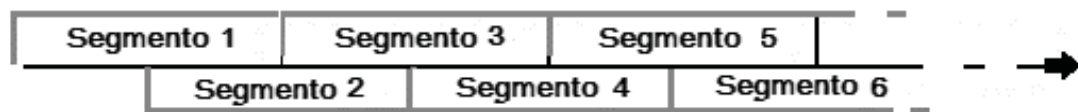


Figura 4-4 Representación de la segmentación producida al implementar STFT.

La FFT crea un vector de frecuencias de un intervalo de tiempo que se encuentra en el segmento analizado, como se ilustra en la Figura 4-5 A). Se aprecia claramente que existe una frecuencia predominante, la cual es de aproximadamente 50 Hertz. En la Figura 4-5 B) muestra las frecuencias calculadas para los segmentos del 1 al 10.

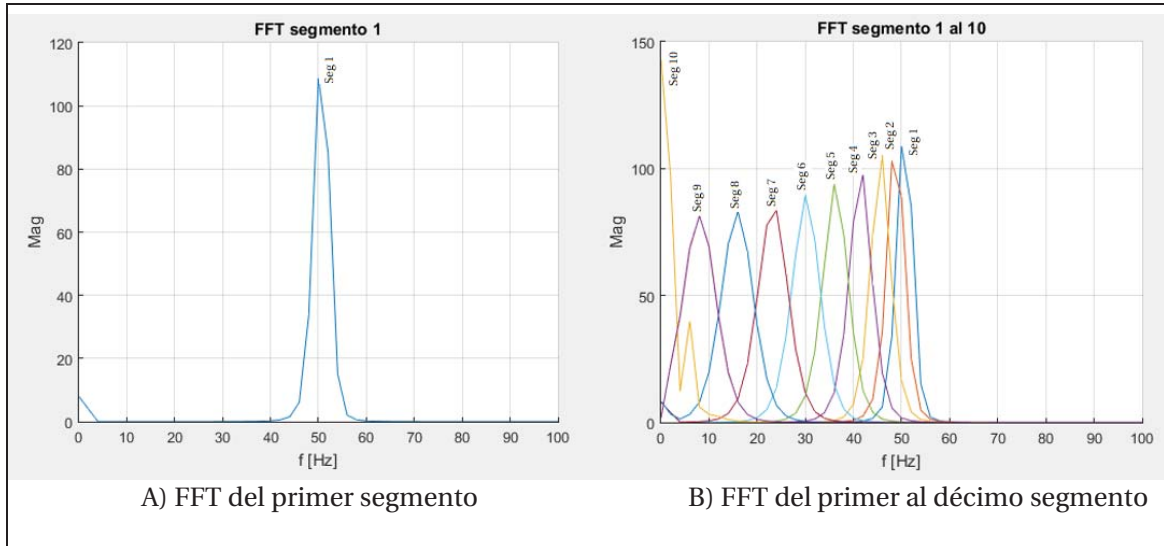


Figura 4-5 Resultado de la Transformada rápida de Fourier (FFT).

Para cada segmento es necesario extraer la frecuencia de mayor magnitud, ya que es la encargada de dar la información necesaria para obtener la velocidad con que la partícula sobre el nivel del mar se encuentra moviendo y posteriormente integrarla pudiendo calcular la variación de altura de dicha ola.

En la Figura 4-6, representa las frecuencias predominantes de cada segmento analizado destacando que los valores aumentan de 0 a 50 [Hz] para posteriormente disminuir a 0 [Hz], repitiéndose de forma constante cada 5 segundos, tiempo que se demora la ola en transcurrir medio ciclo.

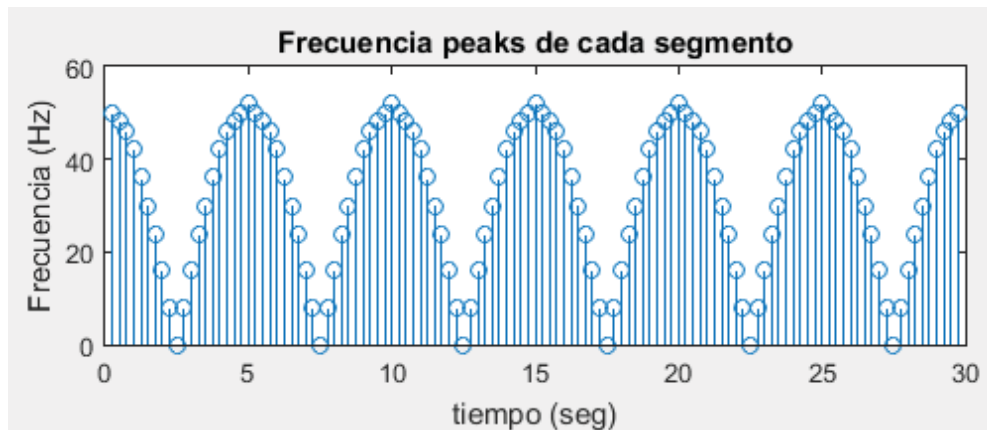


Figura 4-6 Frecuencia Peaks de cada segmento a lo largo de la señal I.

4.1.3 Determinar dirección del movimiento de la partícula.

Una vez obtenido el vector de frecuencias Doppler, se puede obtener la velocidad instantánea con el que se mueve el objeto detectado por el transceptor de microondas, pero no así su direccionamiento (si se encuentra alejando o acercando). Para detectar la dirección del movimiento, se debe identificar el desfase entre los canales I/Q y concluir respecto a lo mostrado en la Figura 2-7 (página 17). Existen dos formas para detectar dicho desfase entre los canales de salida, en primera instancia se encuentra la detección de cruces por ceros de ambos canales y posteriormente se encuentra la “Trasformada discreta de Fourier” o “discrete Fourier transform” (DFT). Por conveniencia, para esta etapa se ocupará la DFT [1].

Una vez obtenido el desfase entre los canales I/Q en cada segmento, se pasa por un algoritmo de decisión que identifica si la partícula está acercándose o alejándose. El fabricante señala que en el instante que el canal I adelanta a Q en aproximadamente en 90° , es porque el objeto se encuentra acercando al sensor, en cambio, cuando el canal I atrasa a Q en aproximadamente -90° , es porque el objeto se encuentra alejando [4]. El criterio de decisión se muestra la Figura 4-7, si el desfase se encuentra en el rango de 45° a los 135° o entre -225° a los -315° se le asigna un valor de 1, en cambio, si el desfase se encuentra en el rango de 225° a los 315° o -45° a los -135° , es asignado con un -1.

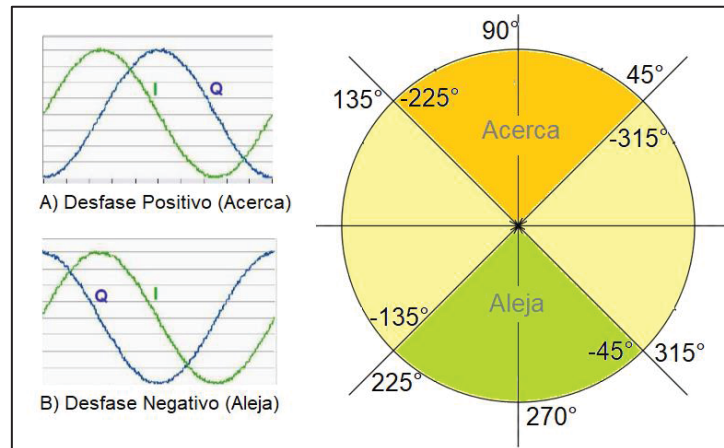


Figura 4-7: Criterio de decisión para el vector de dirección.

4.1.4 Detección de la Velocidad de la partícula y Amplitud de la ola marina.

Para determinar la velocidad de la partícula, hay que recordar la fórmula de la obtención de la frecuencia Doppler (ecuación (4-9)). Donde V , es la velocidad de la partícula, f la frecuencia transmitida por el transmisor Tx, y c la velocidad de transmisión de la microonda respecto al medio [1].

$$F_{Doppler} = 2 \cdot V \cdot \frac{f}{c} \quad (4-9)$$

Es por ello que a cada componente del vector de la frecuencia Doppler será multiplicada por $c/(2 \cdot f)$ para obtener la velocidad absoluta que posteriormente será multiplicada punto a punto por el vector de dirección obtenido anteriormente [2].

Teniendo el vector de velocidad, es necesario integrar dicha secuencia para obtener la amplitud de la ola medida. La forma de integrar la secuencia viene dada por el código ilustrado en el Listado 4-1. Es necesario una sumatoria que toma a todos los componentes del vector velocidad y luego se debe multiplicar por el grosor del área que abarca dicha componente dando el resultado de la forma de la ola mostrada en la Figura 4-8 [2].

Listado 4-1: Obtención de la altura de la ola.

```

1  %Obtención la altura de la ola, integrando el vector de la velocidad
2  pos=1;
3  suma=0;
4  ola(pos)=0;
5  while pos<length(v)
6      pos=pos+1;
7      suma=suma+v(pos-1);           %Sumatoria punto a punto
8      ola(pos)=suma*(3*T/round(length(v))); %se multiplica por el
9  %grosor del área
10 end
11 ola=ola-mean(ola);               %Eliminar valor medio

```

El resultado de todos los pasos antes mencionados viene mostrado en Figura 4-8, se puede identificar que al obtener el vector de la velocidad de la partícula que fue detectada por el transceptor de microondas y ser multiplicada punto a punto por el vector de dirección, se obtiene la velocidad de la partícula con dirección, que posteriormente es integrado para obtener la ola recreada.

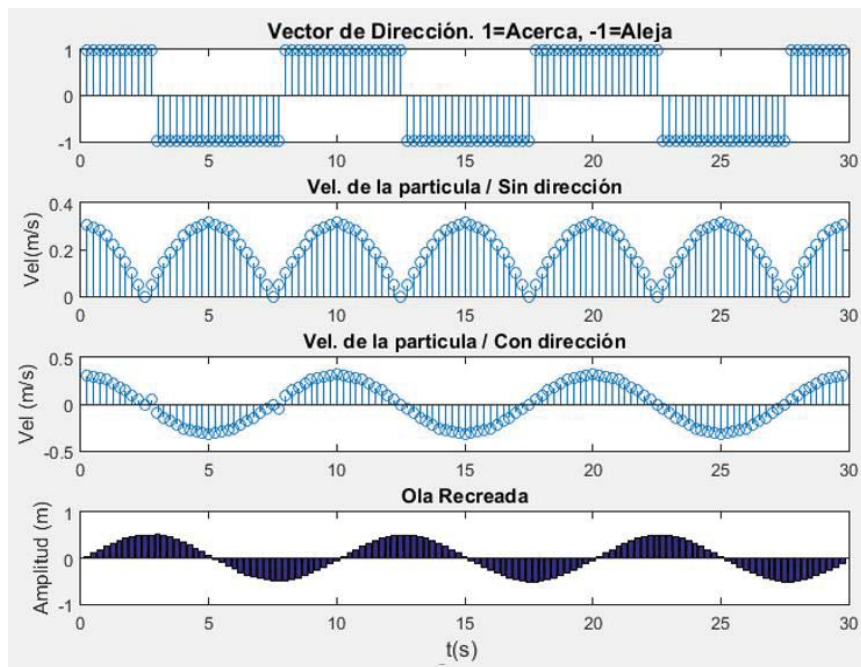


Figura 4-8: Representación del vector de dirección, Velocidad de la partícula y la Ola recreada

Por último, queda comparar ambas formas de olas, la real con la recreada. La ola real tiene como característica el poseer una amplitud (A) de 0,5 metros y un periodo de 10 segundos, es decir, una frecuencia (f) de 0,1 [Hz], y con una frecuencia de muestreo (F_s) de 1000 muestras por segundo (ver ecuación (4-10)).

$$Y = A \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{f}{F_s} \cdot n\right) \quad (4-10)$$

En la Figura 4-9 muestra la comparación punto a punto de la ola real con la ola recreada. Se aprecia que son idénticas, que comparten la misma fase, amplitud, periodo. Con dicho resultado se comprueba que el algoritmo ocupado cumple con lo esperado y solo queda demostrar su funcionamiento con la señal real.

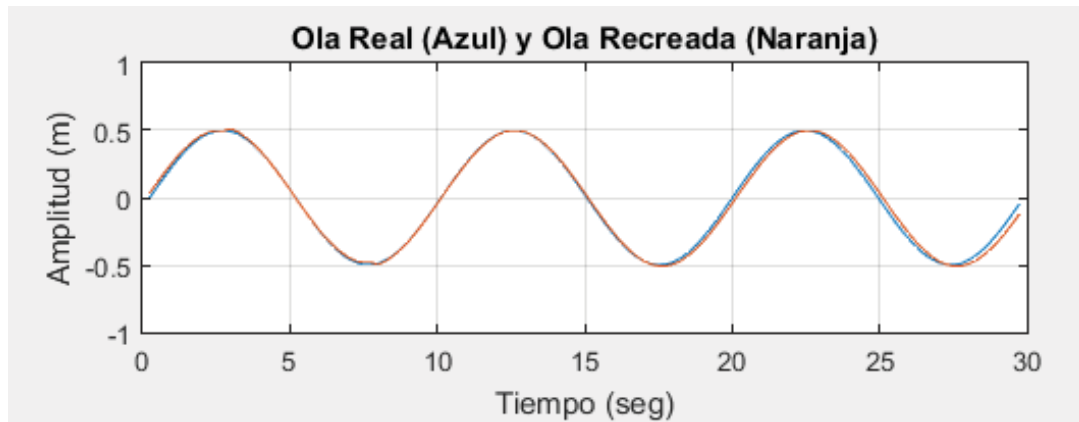


Figura 4-9 Comparación de la Ola real con la recreada.

4.2 Conclusión del capítulo.

El procesamiento digital de señales utilizada para el análisis de la señal producida por el tranceptor dio resultado, dando una ola recreada prácticamente igual a la ola real. Si bien la simulación fue procesada sin el ruido adquirido por la antena receptora Rx, la base del funcionamiento está en lo correcto, y el código da la facilidad de perfeccionarlo si en un futuro existe algún inconveniente.

5 Procesamiento y análisis señal

Doppler

Para obtener las características esenciales de una ola marina, es necesario transformar la señal análoga producida por el transceptor de microondas a una señal digital, para poder ser utilizada en el algoritmo de procesamiento digital de señales (DSP) creado especialmente para el proyecto de investigación, con ello se recreará la forma de la ola que fue simulada. Para esta etapa se trabajará en dos códigos, el primero almacena la información en vectores, y el segundo en tiempo real que reduce de forma considerable la cantidad de memoria requerida.

5.1 Capturar la señal producida.

El mecanismo de captura de la señal producida por el sensor, es mediante el trabajo realizado por un alumno de la Escuela Ingeniería Eléctrica de la PUCV, el cual es un “Sistema de adquisición de datos basado es un microcontrolador “dsPIC” y un microcomputador “Raspberry Pi”” [9]. El equipo utilizado cuenta con dos canales de entrada, cada uno con un circuito de protección que limita el voltaje al rango de 0 a 3.3 volts, el sistema muestrea a 1 [kHz] y cuenta con una resolución de 12 bits, es por ello la necesidad de adaptar la salida del sensor K-LC2. El módulo transceptor tiene un voltaje de salida que rodea los $[\mu\text{V}]$ a $[\text{mV}]$ con valores positivos y negativos, lo que hace que sea susceptible al ruido blanco, provocando una mala relación señal ruido “SNR” y con ello tener un mal resultado.

Para aprovechar óptimamente el rango de resolución que cuenta el sistema de adquisición de datos, es necesario adaptar la salida del sensor de microondas. El circuito montado para cada canal es el mostrado en la Figura 5-1. Tiene como objetivo el amplificar, filtrar y elevar la señal de salida al rango que es requerido. Los componentes $C1$, $C2$, $R1$ y $R2$ actúan como filtro pasa banda que restringe las frecuencias de 1[Hz] a los 66 [Hz], además, tiene una ganancia de $G = 733 [-]$, mientras que la interacción entre los componentes de $R2$ y $R3$ incorporando una componente continua en la salida del amplificador, con ello, la señal de salida queda centrada en 1.65 volts que equivale la mitad del rango disponible por el circuito de adquisición de datos como muestra la Figura 5-4.

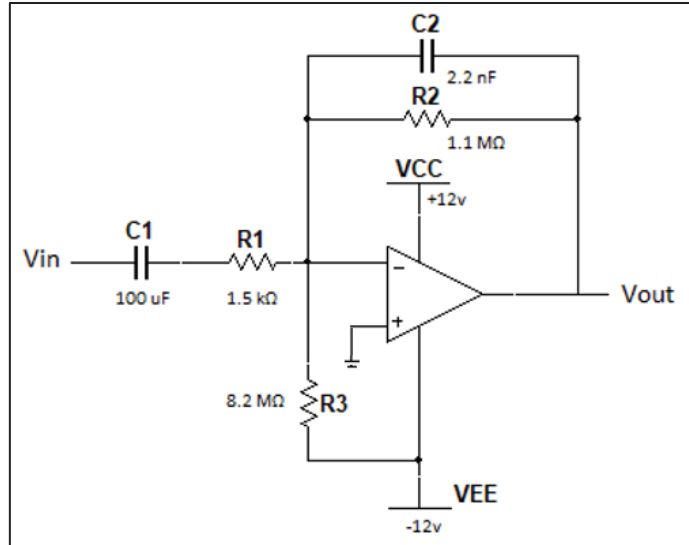


Figura 5-1: Circuito amplificador con salida offset.

5.2 Prueba realizada.

Las pruebas se realizaron en el “Laboratorio de Sistemas Electrónicos e Instrumentación” (LABSEI). La forma en que se realiza el ensayo, fue recrear una ola marina mediante el movimiento de forma ascendente y descendente del sensor contra una plancha metálica, teniendo de fondo una regla de tamaño real (Figura 5-2, imagen izquierda), el movimiento cumple con las características de una ola que contiene un periodo de aproximadamente 10 segundos y una altura peak to peak de 1 metro.

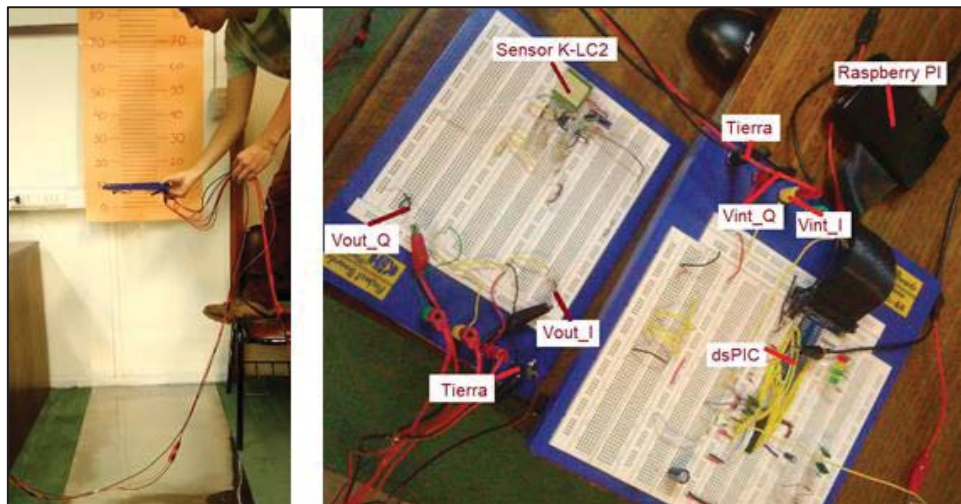


Figura 5-2: Figura izquierda: prueba realizada en laboratorio LABSEI. Figura derecha: conexión entre el sensor K-LC2 y el sistema de adquisición de datos.

En la Figura 5-2 se muestra además los circuitos que fueron utilizados. Por un lado, se encuentra el sensor “K-LC2” con sus dos canales de salidas que fueron conectados a las entradas del circuito de adquisición de datos [9], que fue configurado para muestrear a 1000 muestra por segundos por

cada canal, dicha información es almacenada en el “Raspberry PI” en formato “.txt”. A la hora de conectar ambos circuitos es importante juntar en primera instancia las tierras y luego los canales de salidas con las entradas respectivamente.

Durante el desarrollo del experimento se conectó en las entradas del sistema de adquisición de datos un osciloscopio, para identificar y comprar la forma de la onda que fue capturada. En la Figura 5-3 muestra dos señales idénticas que se encuentran desfasadas en aproximadamente 90°

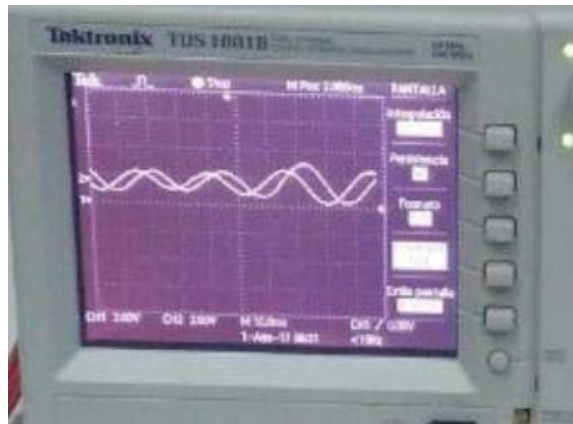


Figura 5-3: Señal captada por el osciloscopio mientras se realizaba la prueba (Efecto Doppler).

En la Figura 5-4 gráfico superior, se muestran 80 segundos de la señal capturada del canal I, mientras que en el gráfico inferior muestra un extracto de las señales I/Q que se asemeja a la vista por él osciloscopio. Se debe mencionar que dicha imagen muestra el efecto Doppler de forma clara, ya que su frecuencia va variando a través del tiempo, además el desfase producido entre los canales de salida se mantiene constante hasta los 6.8 segundos aproximadamente y posteriormente cambia. Ese efecto es producido al momento de cambiar el sentido del movimiento (de arriba a abajo).

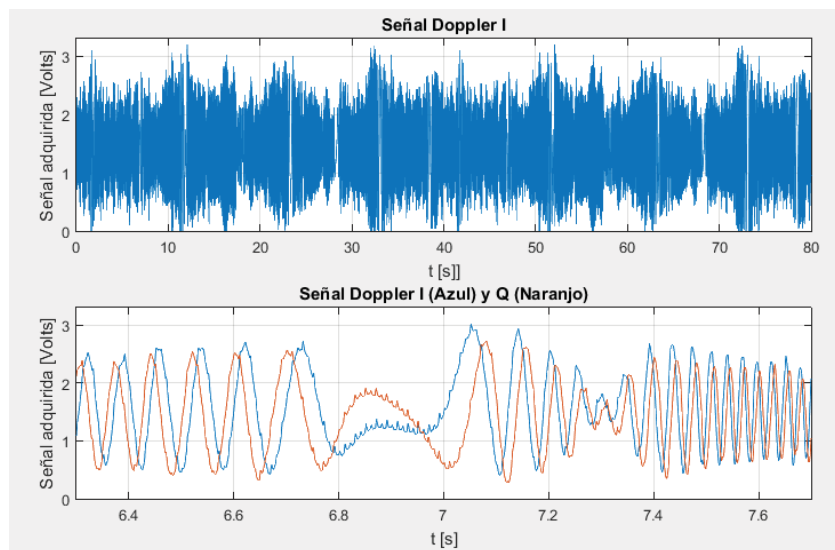


Figura 5-4: Señal Doppler obtenida por el sistema de adquisición de datos.

Una vez capturada la información, solo se debe emplear los algoritmos antes mencionados para recrear la forma de la ola simulada.

5.3 Criterios a utilizar para los códigos empleados.

Los códigos empleados, a pesar de funcionar de forma diferente, deben cumplir con ciertos requerimientos que sirven de base para poder recrear la ola simulada, los que se citan a continuación:

- Filtro pasa bajo, para eliminar las altas frecuencias.
- Establecer el valor de la frecuencia de muestreo.
- Establecer la duración de los segmentos que se utilizarán en el algoritmo DSP para obtener la velocidad y altura en ese instante de tiempo.
- Obtener la frecuencia predominante (frecuencia Doppler) en cada segmento analizado.
- Establecer criterio de desfase entre los canales I/Q, para obtener la dirección del movimiento detectado.
- Obtener la velocidad de la partícula de la frecuencia Doppler para luego integrar y calcular la altura de la ola simulada.
- Graficar la ola recreada.

Luego se aplicó un filtro digital pasa bajo de primer orden de “Respuesta Infinita al Impulso” (IIR) de primer orden cortando a una frecuencia de 50 [Hz] (es el valor máximo que se obtendrá de frecuencia Doppler de acuerdo a las características de la ola simulada) con ello elimina las frecuencias altas y evita el aliasing. Se tomaron segmentos de duración de 0,5 segundos (500 muestras) del canal I con un traslapeo al 50%. En la obtención de la frecuencia fundamental se evaluaron dos mecanismos de detección, por un lado, se encuentra la “Transformada Rápida de Fourier” (FFT) y por otro se encuentra la detección de cruces por ceros. Es necesario detectar el desfase entre los canales I/Q con la ayuda de la “Transformada de Fourier en tiempo discreto” (DTFT) evaluándolo con la frecuencia Doppler antes obtenida [7], y así obtener el vector de direccionamiento. Una vez obtenida la información, se debe calcular la velocidad del movimiento e integrarlo, con ello se tendrá la altura de la ola en ese instante de tiempo. Por último, se aplica un filtro pasa alto en 1 [Hz] para eliminar el error acumulado producido por la integración.

5.4 Obtención de la frecuencia Doppler.

La obtención de la frecuencia Doppler de cada segmento analizado es un proceso altamente importante, ya que cualquier error producido en esta instancia provocaría un resultado final distinto. Eso es debido al calcular la altura de la ola recreada “ $H(t)$ ”, es necesario obtener antes, la velocidad que se mueve el sensor sobre la plancha metálica “ V ” que a su vez necesita el valor de la frecuencia Doppler (ver ecuación (5-1) y (5-2)).

$$f_d = 2 \cdot V \cdot \frac{f_t}{c} \text{ [Hz]} \quad (5-1)$$

$$V = \frac{fd \cdot c}{2 \cdot f_t} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (5-2)$$

$$H(t) = \int_0^t V(\tau) d\tau \quad (5-3)$$

Es preciso recordar que fd es la frecuencia fundamental del segmento analizado (Frecuencia Doppler), f_t , es la frecuencia transmitida por el transceptor (24.5 [GHz]) y, por último, c es la velocidad de propagación de la microonda en el medio ($3 \cdot 10^8$ [m/s]) [2].

A continuación, se describirá el funcionamiento de cada método para obtener la frecuencia Doppler comparando los resultados obtenidos.

5.4.1 Fast Fourier Transform (FFT).

La FFT es un algoritmo matemático capaz de transformar una función que se encuentra en el dominio del tiempo a una función equivalente que se encuentra en el dominio de la frecuencia, con ello se puede saber el espectro que contiene dicha señal y obtener la frecuencia predominante de cada segmento analizado, es decir, obtener la frecuencia Doppler. A pesar que al transcurrir el tiempo la señal producida por el transceptor de microondas varía su frecuencia, al analizar dicha información en tramos más cortos, se puede determinar la frecuencia predominante ya que sería prácticamente un valor constante.

A continuación, se detallará el procedimiento aplicado a cada segmento analizado; Se toma la señal proporcionada por el canal I, se pasa por un filtro pasa bajo para eliminar las altas frecuencias, se aplica una ventana (se utilizó la ventana Hanning) para disminuir el contenido espurio [7] y de esta manera encontrar la frecuencia fundamental.

Los segmentos analizados cuentan con un total de 500 muestras las que fueron muestreadas a 1000 [muestras/s], con ello se puede detectar variaciones de 2 [Hz], si se quiere disminuir este valor, es necesario emplear una técnica que consiste en agregar ceros a la secuencia, con ello mejora la densidad del espectro pero no así su resolución [7]. Una vez agregados los ceros, los segmentos aumentan a un total de 2048 muestras cada uno, lo que permite detectar variaciones de aproximadamente 0,48 [Hz]. Posteriormente se aplica la FFT el cual entrega un vector que contiene valores complejos que contiene el espectro de la secuencia (ver Figura 5-5). Por último se crean el vector de magnitud y el vector de rango de frecuencia para poder encontrar la frecuencia predominante.

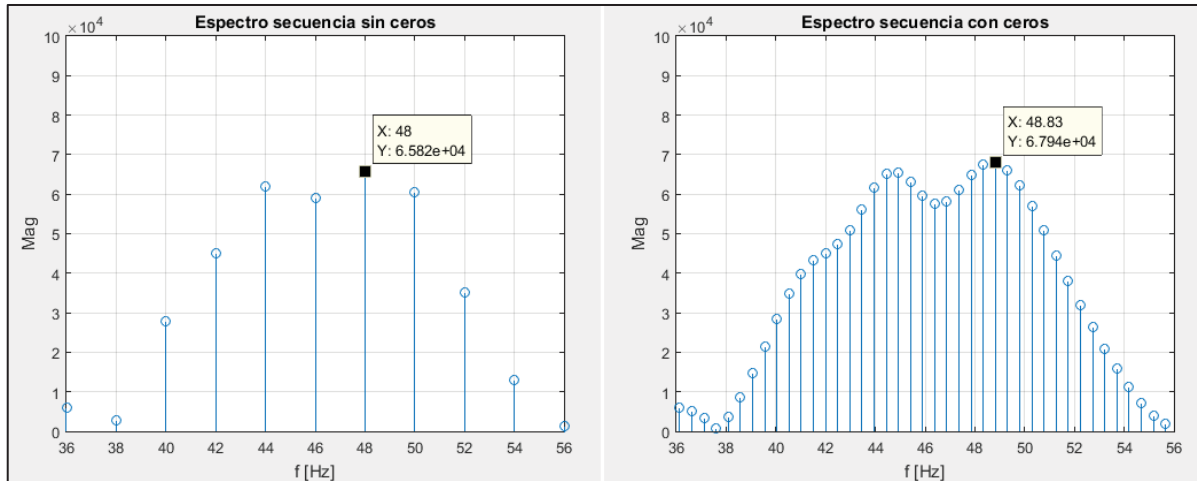


Figura 5-5: Espectro de la secuencia analizada con $N = 500$ (Imagen de la izquierda) y $N = 2048$ (Imagen de la derecha) el cual se agregó ceros.

En la Figura 5-5 se muestran el resultado del espectro obtenido al aplicar la FFT en un determinado segmento que fue analizado. En el caso de no agregar ceros, se obtiene que la frecuencia fundamental es de 48 [Hz], pero queda la incertidumbre de lo que pasa entre los 48 y 50 [Hz], en cambio, al aumentar la densidad del espectro con 2048 muestras, la frecuencia Doppler del segmento queda en 48,83 [Hz].

El resultado obtenido al recrear la ola simulada entre agregar ceros o no, se muestra en la Figura 5-6. Se aprecia que el resultado no varía mucho y el aumentar la densidad del espectro solo hace aumentar la cantidad de operaciones matemáticas.

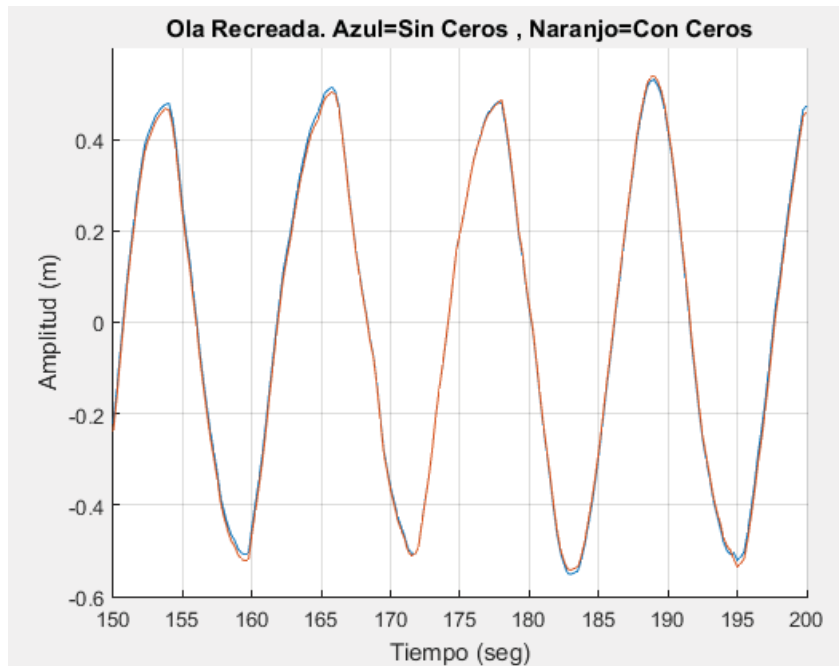


Figura 5-6: Ola recreada ocupando FFT con y sin ceros agregados.

Por otro lado, se tiene que la cantidad de multiplicaciones complejas requeridas para calcular la FFT viene dado por la ecuación (5-4) (recordar que el número de muestras N es 500 y da un total de 4483 operaciones). Cada multiplicación compleja, se requiere 4 multiplicaciones reales y 2 sumas, por ello es que, el sistema debe realizar 17932 multiplicaciones reales y 8966 sumas.

$$N \cdot \log_2(N) \tag{5-4}$$

5.4.2 Cruce por cero.

A continuación, se explicará el funcionamiento del código empleado para detectar los cruces por ceros de la señal captada. Al igual que el método FFT, se tiene un vector “Ix” (segmento del Canal I) que pasa por un filtro pasa bajo para eliminar el ruido en altas frecuencias. Posteriormente se realiza un procesamiento lógico detallado en el Listado 5-1.

Listado 5-1 Detectar Frecuencia por Cruce por cero de cada segmento.

```

1  % Inicializa valores iniciales.
2  PosIn= 0;
3  ciclo = -0.5;
4  nn = 0;
5  % Detecta y Cuenta los cruces por cero.
6  while nn <= length(Ix) - 1;
7      nn = nn + 1;
8      if nn < length(Ix)
9          if Ix(nn) * Ix(nn+1) < 0 || Ix(nn) == 0;
10             ciclo = ciclo + 0.5;
11             if PosIn == 0;
12                 PosIn = nn;
13             end
14             if PosIn ~= 0;
15                 PosFi = nn;
16                 nn = nn + 3;
17             end
18         end
19     end
20 end
21 % Obtiene la frecuencia del segmento.
22 NN = ( PosFi - PosIn );           % Muestras utilizadas.
23 Tiempo = NN / 1000;
24 fr(1,g)= ciclo / Tiempo;         % Vector Frecuencia Doppler por Segmento.

```

En el código mostrando en el Listado 5-1. Se empieza declarando las variables a ocupar siendo “ciclo” la encargada de contar los cruces por ceros producidos durante todo el segmento analizado, el valor inicial es de -0,5, ya que el primer cruce producido representa el inicio del conteo. El mecanismo de detectar los cruces por ceros se describe a continuación; se entra en un loop que permite analizar el segmento muestra por muestra, en primera instancia se toma el primer valor (n) y se verifica si es igual a cero, si es así, existe cruce por cero, si no, se debe multiplicar por la muestra (n+1), si el resultado resulta un número negativo, existe el cruce por cero, si no, se sigue con la siguiente muestra y se repite los pasos antes mencionados.

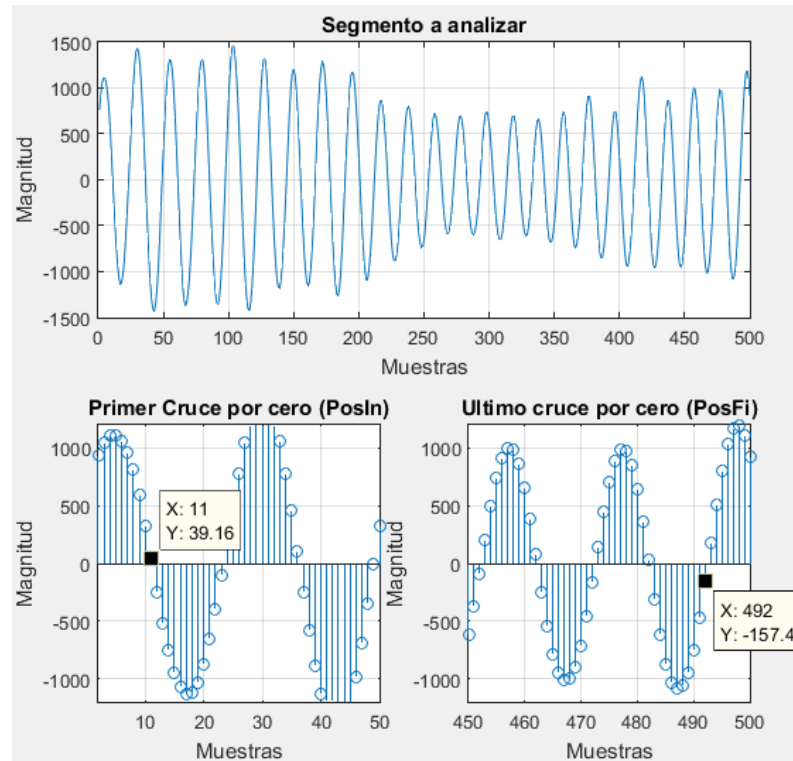


Figura 5-7 Ilustración de detección cruce por cero.

Una vez detectado el primer cruce por cero, la posición de la muestra es almacenada en “*PosIn*”, mientras que el ultimo cruce es guardada en “*PosFi*”. Tomando como referencia la Figura 5-7, se logra apreciar que el segmento analizado cuenta con 500 muestras en total, pero los datos ocupados para obtener los ciclos son de 481 muestras ($PosFi - PosIn = 492 - 11 = 481$), logrando obtener un total de 22,5 ciclos. Ahora bien, para obtener la frecuencia fundamental es necesario utilizar las ecuaciones (5-5) y (5-6), lo que da un valor de 46,78 [Hz] que es cercano a lo obtenido por la FFT (48,5 [Hz]).

$$Tiempo = \frac{Muestras\ Utilizadas}{Frecuencia\ de\ Muestreo} \quad (5-5)$$

$$Frecuencia\ Fundamental = \frac{Ciclos}{Tiempo} \quad (5-6)$$

El código empleado cuenta con un bloqueo saltando tres muestras que sirve para evitar la detección de un nuevo cruce por cero que sea producido por el ruido.

Analizando el código, se concluye que no existen multiplicaciones complejas en el análisis de cruce por cero y, comparado con las operaciones matemáticas que se realizan en el análisis de la FFT, se ve reducido la cantidad de cálculos efectuados en el análisis, con ello se demuestra que es un procesamiento más rápido y recomendable al momento de querer utilizar un algoritmo que sea necesario obtener el resultado en tiempo real.

5.4.3 Comparación de resultados.

Para las operaciones matemáticas, se puede apreciar en la Tabla 5-1 que el algoritmo empleado por la FFT, requiere más cálculos que el utilizado por el cruce por cero.

Tabla 5-1 Operaciones matemáticas por segmento analizado.

Operador Matemático	FFT	Cruce por cero
	Sin Ceros	
+	8966	1500
-	-	1
*	17932	-
/	-	2

Anteriormente se mostró que, para un segmento determinado, los valores obtenidos mediante la FFT y la detección de cruce por cero dan valores similares. Dando como resultado que los códigos empleados funcionan de forma correcta.

En las Figura 5-8 y Figura 5-9 muestran los resultados obtenidos tanto en el vector de frecuencias Doppler como en la ola recreada, y en los dos casos se aprecia que se comportan de forma muy parecidas.

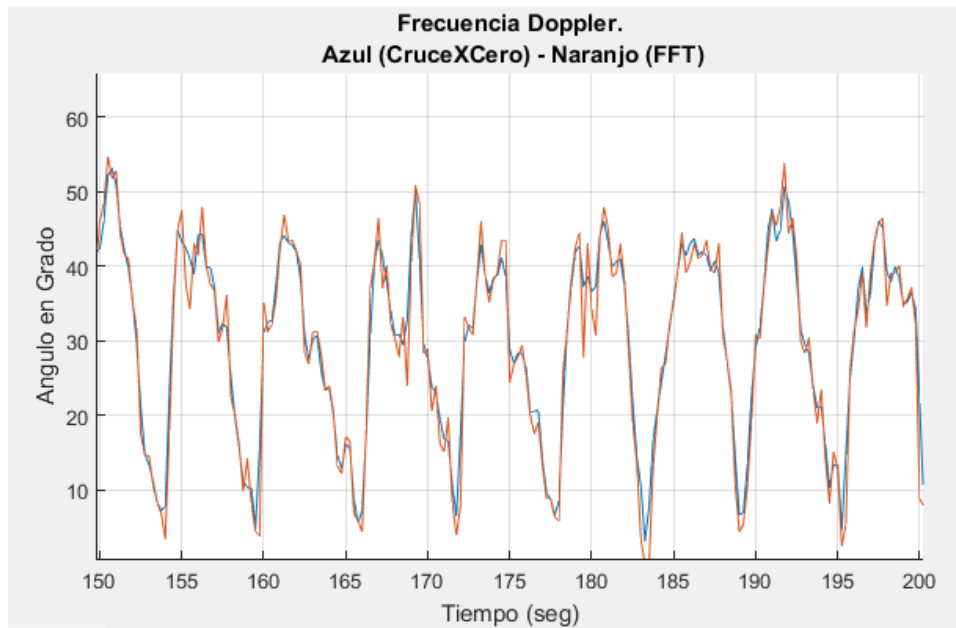


Figura 5-8 Extracto vector frecuencia Doppler obtenida mediante Cruce por cero (Azul) y FFT (Naranja).

En la Figura 5-8 se muestra la frecuencia fundamental obtenida por el algoritmo de la FFT y el método utilizado de cruces por cero, ambos muestran un resultado similar que dan valores donde oscilan entre 0 a 50 [Hz]. Se ve claramente que el método ocupado por la FFT, da valores más dispersos comparados con el cruce por cero. Es producto por la suposición dicha anteriormente de asumir que la frecuencia Doppler es constante en cada segmento, pero en la realidad se sabe que no es así. A pesar de tomar tramos de corta duración, igual presenta pequeños cambios de frecuencia provocando que la FFT se pueda equivocar, en cambio el cruce por cero, solo toma los ciclos detectados y la cantidad de muestras utilizadas para obtener la frecuencia predominante, y el resultado arroja un valor intermedio de toda la variación producida en ese instante de tiempo.

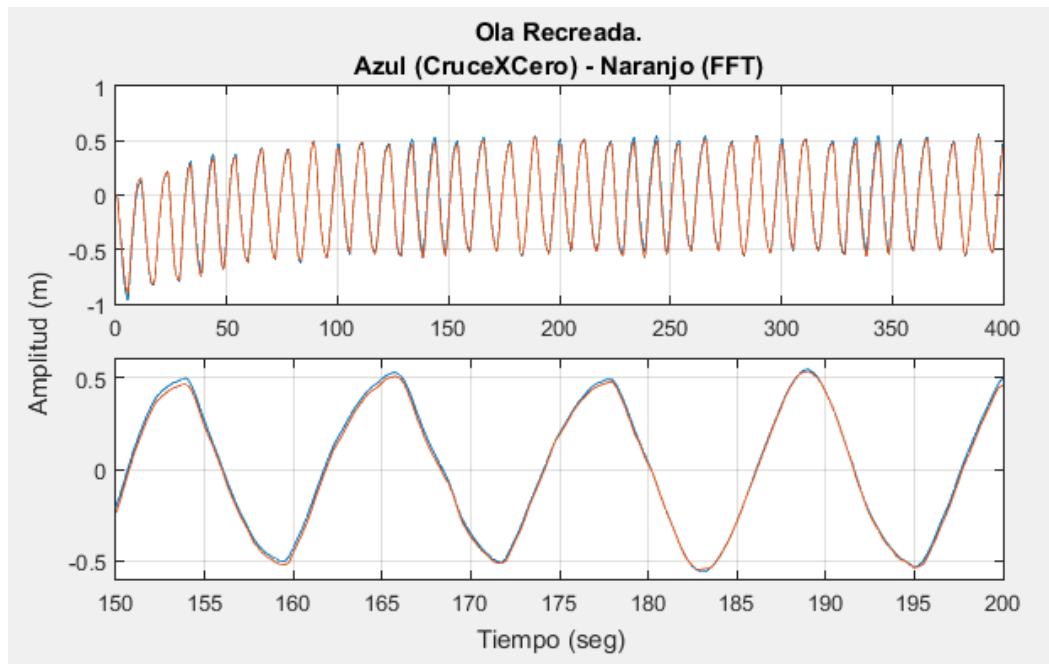


Figura 5-9 Comparación de la Olea Recreada mediante Cruce por cero (Azul) y FFT (Naranja).

5.4.4 Conclusión.

A pesar de presentar pequeñas diferencias en los valores de frecuencias (ver Figura 5-9) las formas de las olas recreadas son muy similares. Se puede ver claramente que la altura promedio es de 1 metro peak to peak, con un periodo aproximado de 10 segundos.

El resultado obtenido es satisfactorio, ya que se puede reemplazar el algoritmo FFT por la detección de cruce por cero sin deteriorar el resultado, con este cambio ayuda a disminuir la cantidad de operaciones matemáticas requeridas quedando al alcance para ser implementado en algún microcontrolador.

5.5 Evolución del código empleado y resultado obtenido.

Durante el transcurso del proyecto, se ha ido modificando el código empleado para recrear la ola obtenida por el transceptor K-LC2. En primera instancia tiene como objetivo, verificar el correcto funcionamiento del DSP teniendo que recrear el efecto Doppler que es captado por el transductor de microondas, para posteriormente recrear la ola. El segundo código tiene como objetivo el adaptar el algoritmo anterior para ser utilizado en una señal real, que fue capturada y almacenada gracias a un sistema de adquisición de datos y, por último, el tercer código empleado tiene como finalidad el poder obtener la ola recreada en tiempo real.

5.5.1 Primer código: Recrear efecto Doppler.

El primer código empleado tuvo como objetivo, verificar el correcto funcionamiento del DSP recreando el efecto Doppler que capta el transductor junto a la ola que fue simulada, como muestra la Figura 5-10. Los detalles del funcionamiento se encuentran descritos en la página 26.

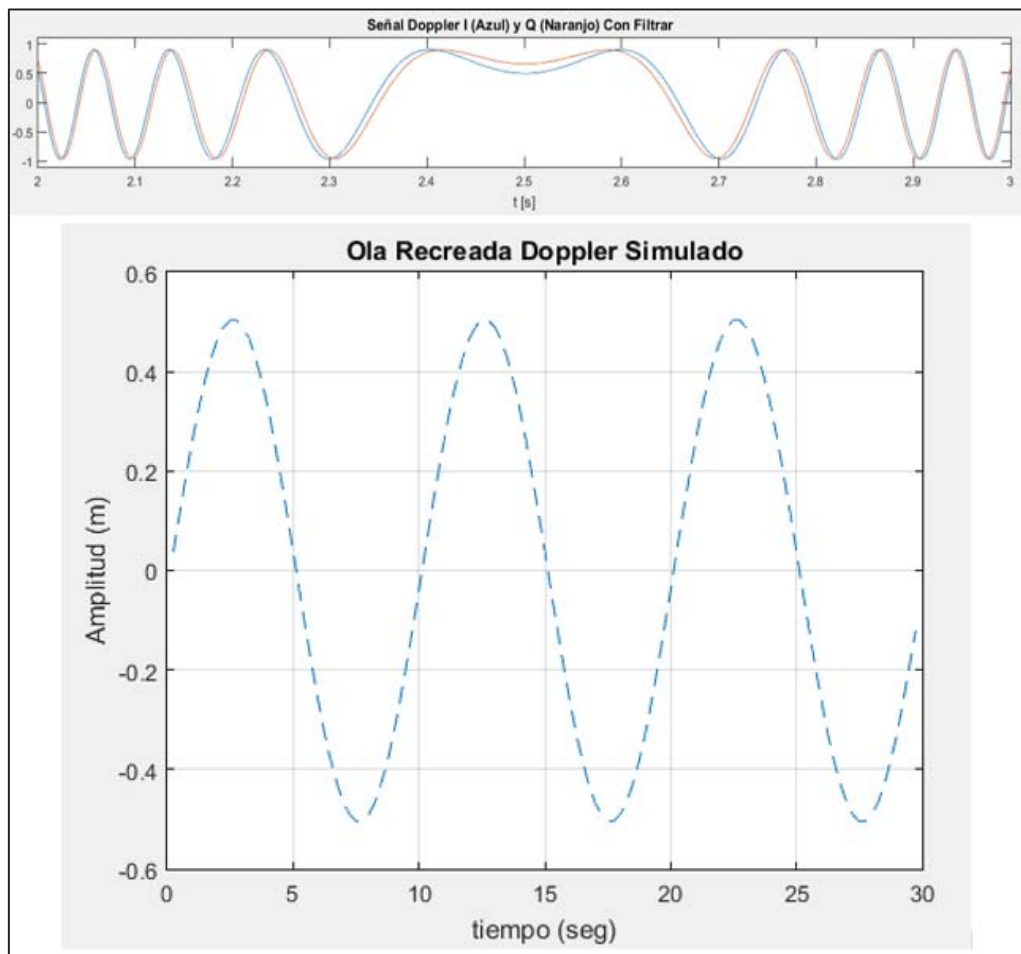


Figura 5-10: Ola recreada mediante simulación del efecto Doppler.

5.5.2 Segundo código: Ola recreada con señal real.

El segundo código empleado tiene como objetivo, adaptar el algoritmo anterior para ser usado en la señal real que fue captada por el sistema de adquisición de datos. El mecanismo de funcionamiento utilizado es, almacenar la información de cada etapa de DSP en vectores, para posteriormente ser procesados dando como resultado la forma de la ola, como muestra Figura 5-11. En dicha figura, muestra además un extracto de la forma de la señal capturada del transductor de microondas destacando el desfasaje entre los canales que indican la dirección del movimiento.

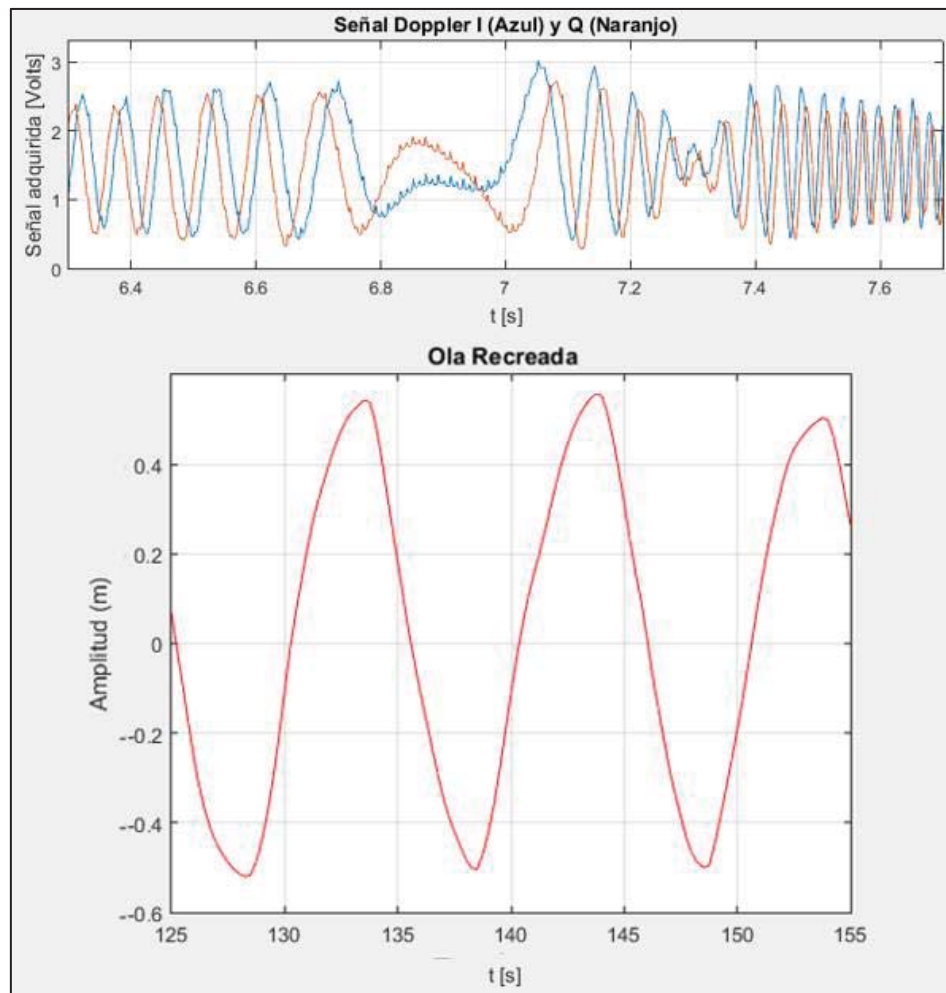


Figura 5-11: Ola recreada trabajando almacenando información en vectores.

Una vez adquirida la señal Doppler proporcionada por los canales I/Q del módulo transceptor de microondas, la información es procesada por el algoritmo mostrado en la Figura 5-12 que detalla las etapas que debe pasar dicha información para dar como resultado la ola recreada.

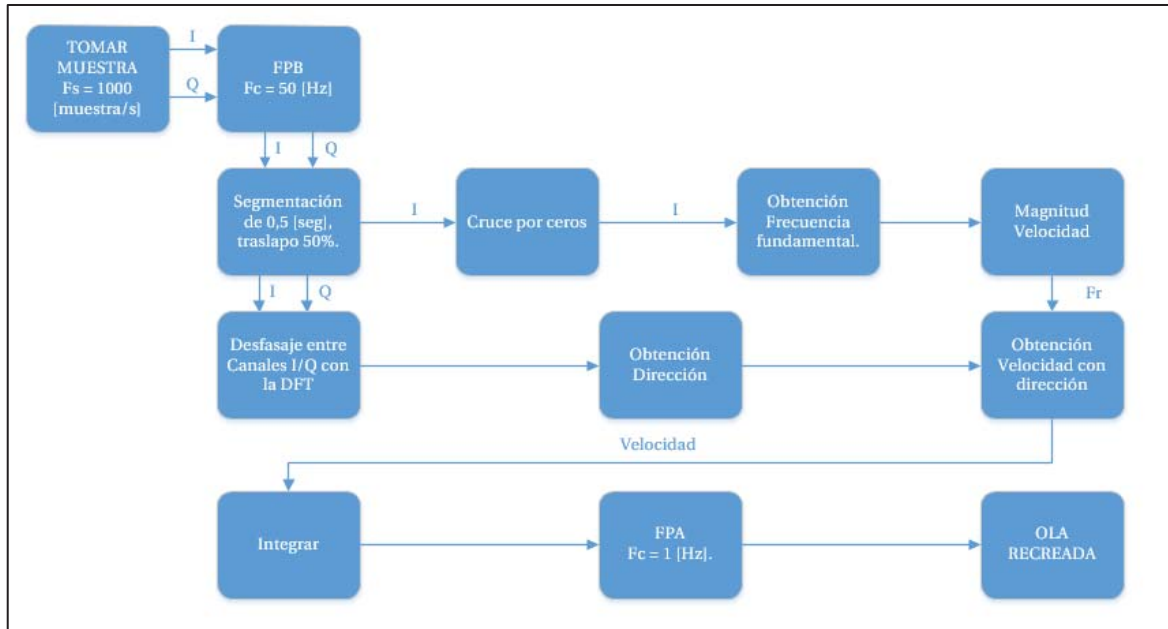


Figura 5-12: Diagrama de flujo para procesamiento digital de señal para obtención de la ola recreada.

En la Figura 5-13 muestra el desfase entre los canales I/Q junto al resultado del vector de direccionamiento de cada segmento analizado. En los instantes que el desfase se encuentra cercano a los 90° o los -270° significa que el sensor se encuentra acercando a la plancha, en cambio, cuando el desfase se encuentra en -90° o 270° el sensor se está alejando de la plancha metálica.

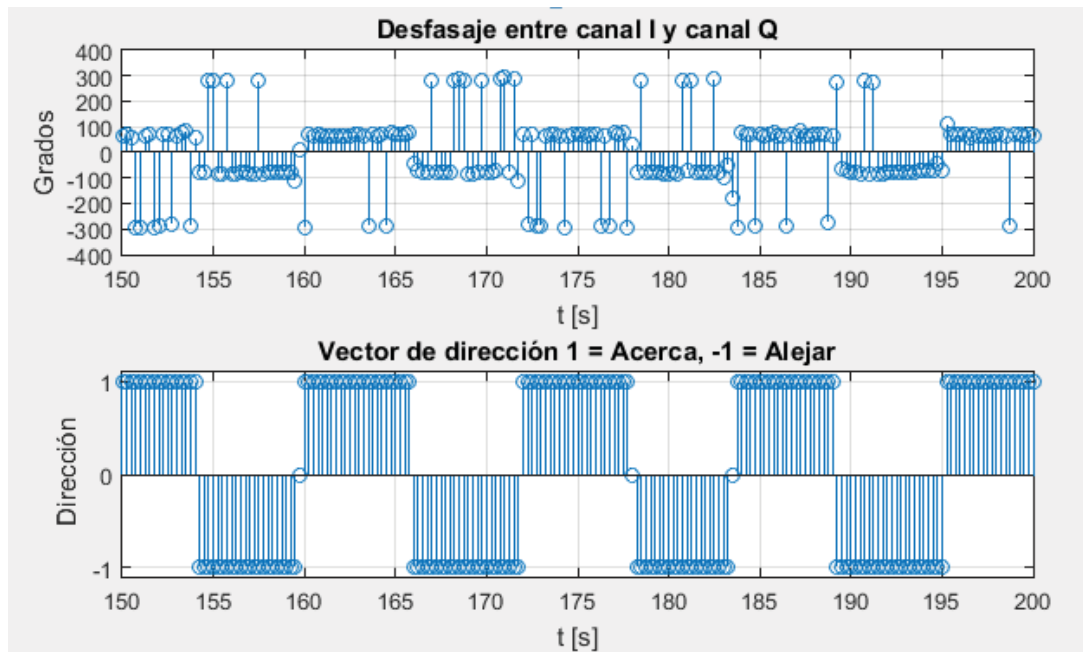


Figura 5-13: Desfase entre los canales I/Q junto a su vector de direccionamiento.

Ya teniendo el vector de dirección, se multiplica con el vector de la magnitud para obtener la velocidad instantánea con la que se mueve el módulo K-LC2 sobre la plancha metálica.

El correcto resultado obtenido por el segundo código se demuestra con las características principales que contiene la ola recreada (ver Figura 5-11), periodo de 10 segundos y una altura peak to peak 1 metros aproximadamente. Ahora bien, a pesar que el algoritmo funciona correctamente, se adquiere un nuevo problema, el cual consiste en el momento que se quiere procesar la información durante un tiempo prolongado y en tiempo real, ya que, por el mecanismo de funcionamiento del actual código, es necesario en primera instancia, tener bastante memoria de almacenamiento y, además, el resultado obtenido no es de forma instantánea. Es por ello de la creación del tercer código empleado que permite obtener el resultado en tiempo real ocupando poca memoria de almacenamiento y con ello poder ser implementado en algún microcontrolador.

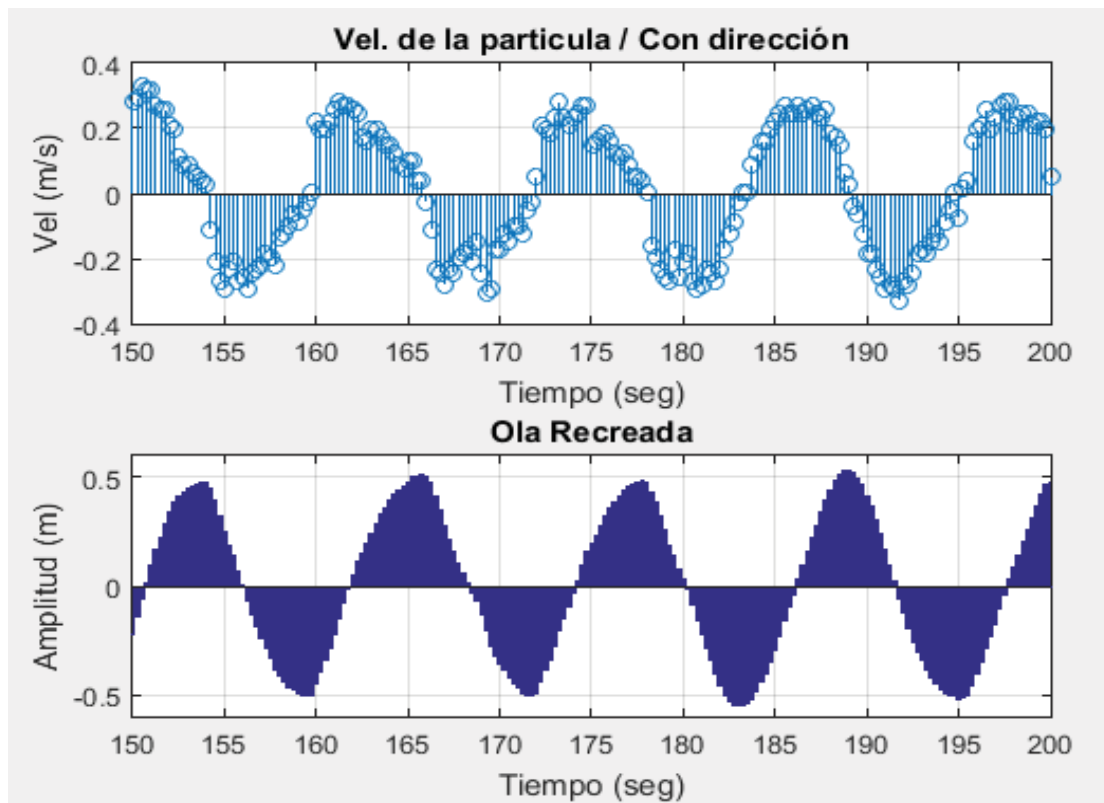


Figura 5-14: Velocidad de la partícula y amplitud de la ola simulada del segundo código.

5.5.3 Tercer código: Ola recreada en tiempo real

Para recordar un poco las características que debe tener el código, es necesario recordar el trabajo realizado. De la señal capturada del módulo K-LC2, se toman segmentos de 0,5 segundos para ser procesados y de ahí, detectar la frecuencia Doppler, una vez adquirida esta información se calcula la velocidad de la partícula junto con su direccionamiento con el objetivo de obtener la altura de

la ola. Al estar trabajando con segmentos de duración de 0.5 segundos (equivalente 500 muestras por canal) y con un traslapo al 50%, se obtiene la forma de onda mostrada en la Figura 5-15.

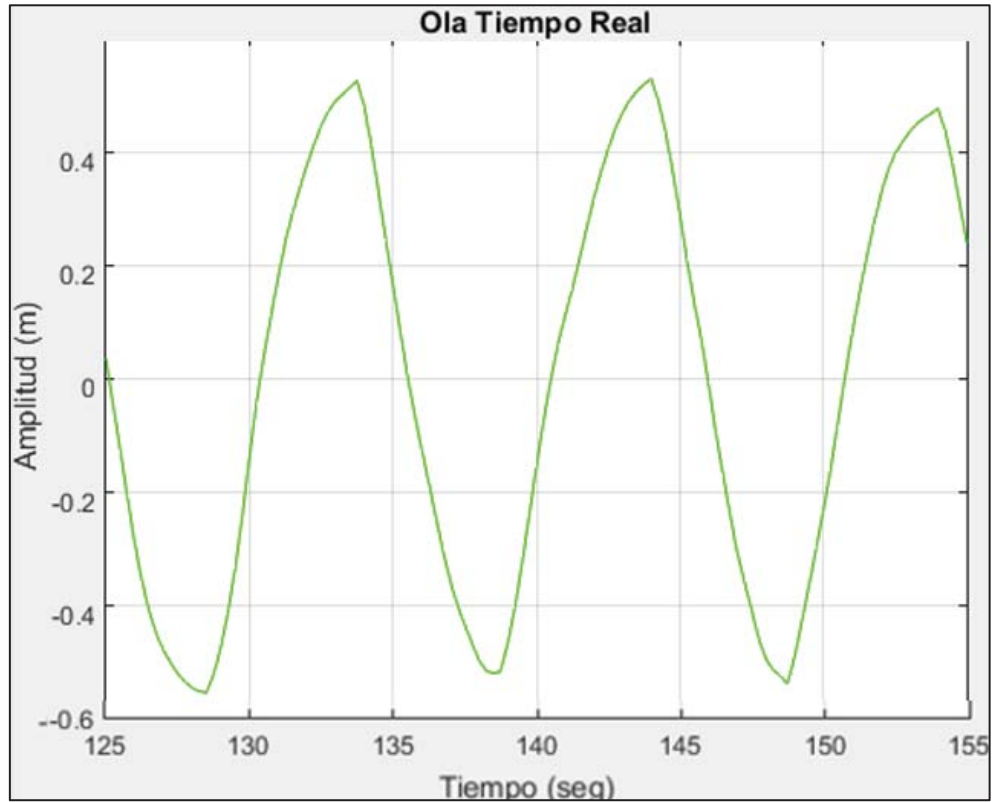


Figura 5-15: Ola recreada en tiempo real

Citado anteriormente, el tercer código tiene como característica principal, dar resultados de forma instantánea, además necesita poca memoria de almacenamiento durante el procesamiento de la señal ya que una vez utilizada las muestras obtenidas son sobrescritas con información nueva como se explicará más adelante. Con estas mejoras, permite el funcionamiento del dispositivo por un periodo largo de tiempo sin la necesidad de estar preocupado que la memoria se llene. El funcionamiento viene descrito en el diagrama mostrado en la Figura 5-16. En él se muestra la existencia de dos etapas, el primero tiene la función de tomar la muestra, almacenar los datos de ambos canales en un buffer y detectar los cruces por ceros (posteriormente servirá para obtener la frecuencia fundamental). Durante la segunda etapa, se leen las últimas 1000 muestras almacenadas en los buffers restantes para encontrar el desfase entre los canales ocupando “Transformada de Fourier en Tiempo Discreto” (DTFT), encontrando el direccionamiento de la partícula (saber si la altura de la ola se encuentra subiendo o bajando) para finalmente obtener la altura de la ola recreada [7], se destaca que mientras la información es procesada, las nuevas muestras obtenidas se encuentran guardando en otro buffer, con ello se elimina la posibilidad de perder información durante el procesamiento digital de la señal.

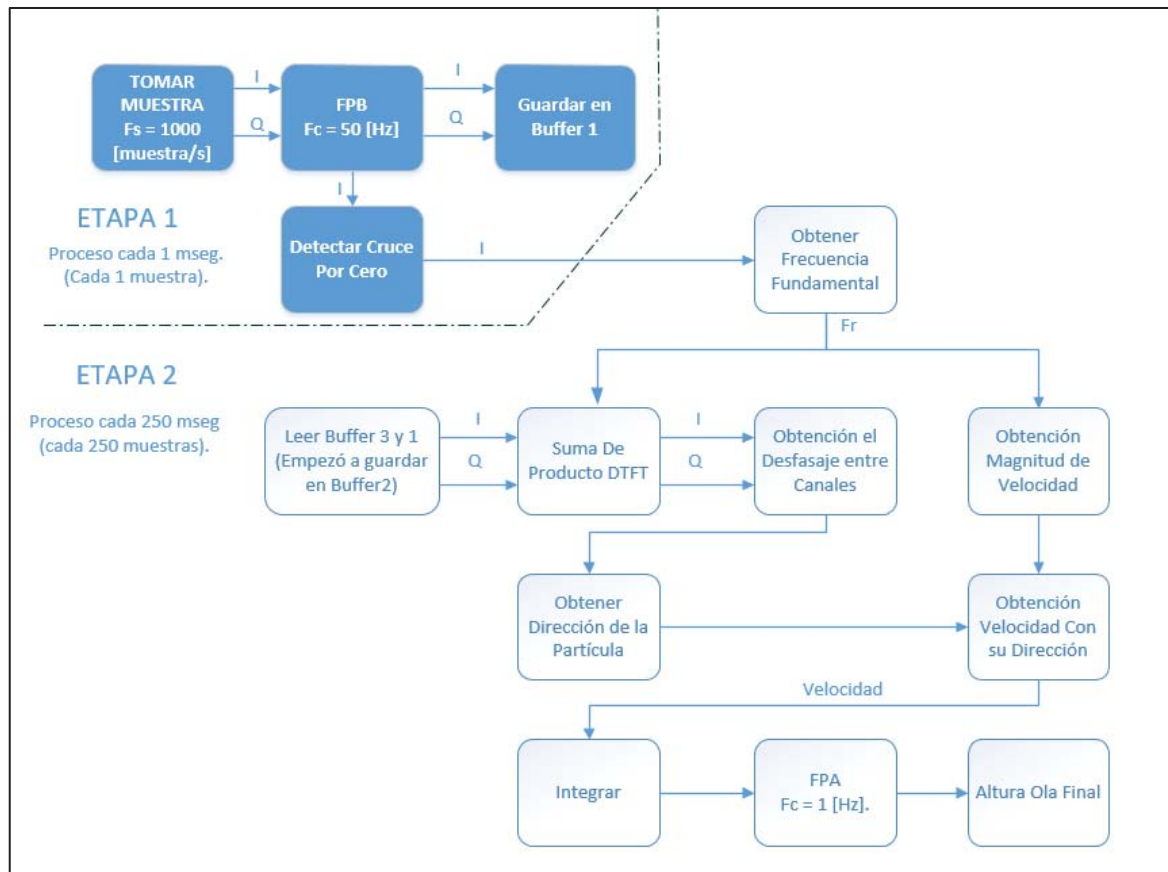


Figura 5-16: Diagrama de bloque del funcionamiento del código tres.

5.5.4 Funcionamiento buffer circular triple.

Para entender a fondo el funcionamiento del código empleado, es necesario comprender el funcionamiento del Buffer circular triple y la utilidad que presenta para el proyecto.

El sistema puede perder datos y dar un resultado erróneo, ya que se encuentra adquiriendo datos a una alta velocidad (1000 [muestras/s]) y paralelamente debe procesar la información que fue almacenada anteriormente para obtener la altura instantánea de la ola. Como solución se encuentra el Buffers circular triple, básicamente se crean tres bloques de almacenamiento de datos, (500 muestras cada uno, que permiten almacenar 250 muestras del canal I y del canal Q), los cuales son transferidos al buffer vía DMA (Acceso directo a la memoria). Cuando el buffer es llenado el programa es notificado mediante interrupción o polling para que pueda procesar dicha información. Mientras el programa procesa los datos guardados, las nuevas muestras se van almacenando en el siguiente buffer. Se debe tener cuidado con el tiempo que tarda el programa en procesar la información, ya que debe ser menor al tiempo empleado en llenar el buffer anterior para evitar pérdida de datos que son importantes para obtener el resultado final.

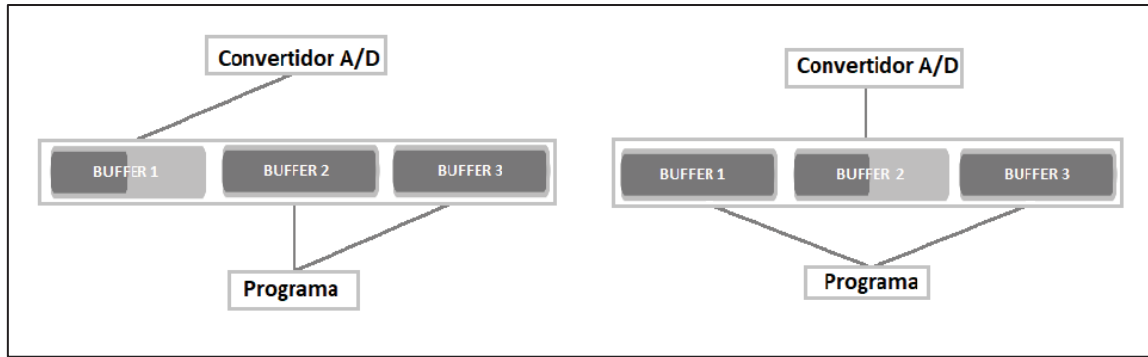


Figura 5-17: Buffers circular triple.

En la Figura 5-17 se muestra el funcionamiento del buffers circular triple, mientras el buffer 1 se encuentra en proceso de llenado, el programa procesa la información que fue almacenada anteriormente en los buffers 2 y 3 (recordar que cada buffer almacena 250 muestras de cada canal), cuando el buffer 1 es completado, el programa ya debió haber terminado con los cálculos ya que se empezará a sobrescribir el buffer 2, y el programa empezará a procesar la información que se encuentra en los buffers 3 y 1 respectivamente. Con ello, permite no perder la información, ocupar poca memoria y tener resultados en tiempo real.

5.5.5 Cálculo en punto flotante.

Un punto relevante al querer elegir algún microcontrolador que pueda ser implementado en este proyecto, es necesario tener en cuenta la cantidad de cálculos de punto flotante que requiere el programa, con ello permite estimar el tiempo que se demorará dicho microcontrolador en procesar toda la información y con ello prevenir que se pierda información.

El diagrama de bloque mostrado en la Figura 5-16 muestra las etapas que tiene el programa utilizado, se aprecia que se divide en dos (en la primera se ven los procesos necesarios que tiene al adquirir cada nueva muestra y en la segunda se ven los procesos que requiere para procesar la información y obtener un resultado final). Es por ello que, se analizará de forma separada cada etapa.

Durante la etapa 1, la frecuencia de muestreo es de 1000 [m/s] por cada canal, es decir, cada 500 microsegundo recibe un dato, primero del canal I y luego del canal Q, teniendo que procesar toda la información en un tiempo menor al indicado, si no es así, se perderán datos. En la Tabla 5-2 muestra la cantidad total de cálculos necesarios en punto flotante.

Tabla 5-2: Total de cálculos en punto flotante para etapa 1.

Operador	TOTAL
+	4
-	2
·	4

Durante la etapa 2, el tiempo de procesamiento debe ser más rápido que el llenado del buffer, si no es así, nuevamente se perdería información que es importante al momento de querer obtener la forma de la ola recreada. Cada buffer concentra 500 muestras (250 muestras por canal), y cada muestra llega a 0,5 milisegundos, el tiempo necesario para que el buffer sea llenado es de 250 milisegundos lo que limita el tiempo empleado por el programa para poder procesar toda la información. Los procesos que se encuentran funcionando para este tiempo son los siguientes; la lectura de los buffers a utilizar, calcular la fase de cada canal para posteriormente encontrar el desfase entre ellos, obtener la frecuencia fundamental del segmento, con ello obtener la velocidad de la partícula y finalmente tener la altura instantánea de la ola medida. La Tabla 5-3 muestra la cantidad de cálculos necesarios en punto flotante que requiere esta etapa.

Tabla 5-3: Total de cálculos en punto flotante para etapa 2.

Operador	Total
+	2507
-	1003
·	4008
/	2001
Seno o coseno	1002

5.6 Conclusión del capítulo.

En la Figura 5-18 se aprecia claramente que los resultados de los tres códigos empleados se asemejan y comparten las mismas características, un periodo de aproximadamente 10 segundos con una altura peak to peak de 1 metro. Recordar que el primer código sirve como referencia ya que se recrea la señal Doppler que se obtendría del módulo transceptor K-LC2, mientras los códigos 2 y 3 vienen de la señal capturada del sensor K-LC2 por el dispositivo de adquisición de datos [9].

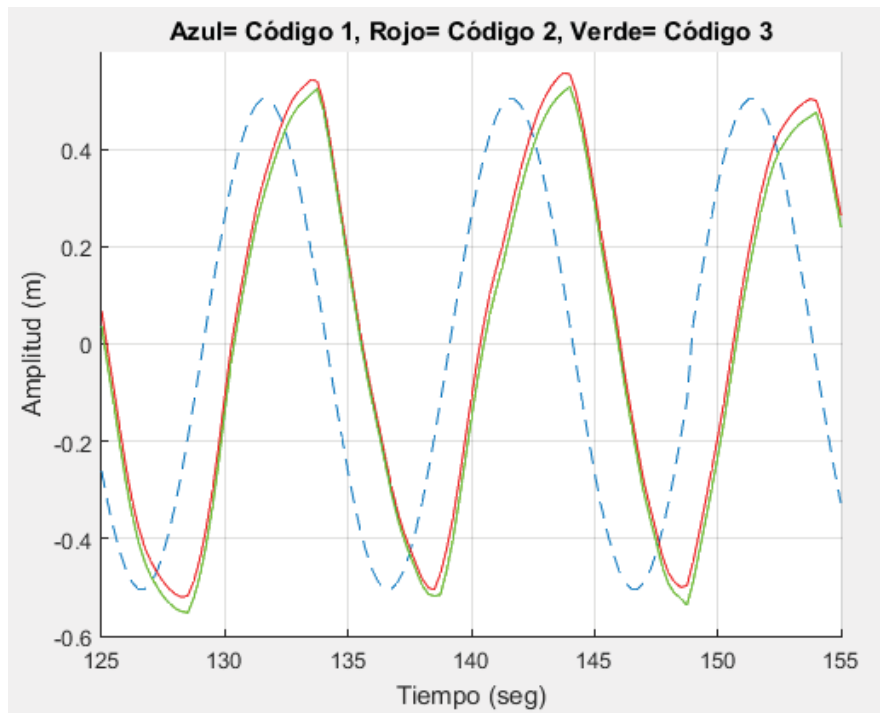


Figura 5-18: Comparación de resultados de los tres códigos empleados.

Si se quiere implementar el proyecto en algún microcontrolador, se debe tener cuidado con las características que tenga, ya que debe poseer DMA, y debe cumplir con la velocidad de procesamiento indicada anteriormente.

6 Discusión y conclusiones.

El estudio de las olas marinas dio como resultado el conocimiento necesario requerido para saber las características esenciales que las forman, como lo son las fuerzas que actúan sobre ellas, que para el estudio fueron las fuerzas de gravedad junto a la fuerza del viento. Estas ondas son las que se encuentran con mayor frecuencia en el océano y contienen periodos que oscilan entre 1 a 30 segundos.

El transceptor de microondas tiene la capacidad de registrar el efecto Doppler generado por la velocidad de variación de la altura de la superficie marina que realiza el paso de una ola, y gracias a su tecnología I/Q permite saber su direccionamiento junto con las características esenciales de la ola marina, como lo es su altura, forma y periodo.

Para verificar el correcto funcionamiento del procesamiento digital de señales y que pueda reconstruir la ola marina mediante la señal proporcionada por el transceptor de microondas, es que se realizó una simulación del funcionamiento del sensor, recreando la señal Doppler proporcionada por los canales I/Q con sus respectivos desfases, dando como resultado, una onda senoidal con amplitud constante y frecuencia variable. Con esta información se evaluaron las diferentes etapas del algoritmo utilizado (filtro pasa bajo, obtención de la frecuencia Doppler junto a la velocidad ascendente y descendente de la ola, para posteriormente obtener la altura instantánea recreando la forma de la ola marina).

Una vez verificado el funcionamiento del algoritmo a utilizar, es que se debió comprobar que la señal de microondas del sensor K-LC2 pueda detectar la variación producida por el agua marina, para lo cual se realizaron pruebas de reflexión dando resultados de acuerdo a lo esperado. Al comprobar el coeficiente de reflexión entre el agua salada, agua dulce y una plancha metálica, dieron resultados bastante parecidos, con ello, el proyecto puede ser utilizado tanto en la medición de olas marinas como para implementación para agua dulce, por ejemplo, alarma de detección de variaciones de volumen de agua de un embalse que es producido por abertura de sus puertas. Para las pruebas realizadas se reemplazó el agua por una plancha metálica.

En el proyecto se desarrollaron dos tipos de códigos que se utilizaron para procesar las señales obtenidas por el transceptor de microondas que fueron capturadas por el sistema de adquisición de datos realizado por un alumno de la Escuela de Ingeniería Eléctrica [9]. Ambos algoritmos

dieron resultados de acuerdo a lo esperado como se muestra en la Figura 5-18 donde demuestran tres tipos de ondas, la ideal, y las dos recreadas por los algoritmos implementados.

Como conclusión, a pesar que las tres ondas no son 100% iguales, el error proporcionado entre ellas es ínfimo, considerando que las olas simuladas se realizaron a pulso. Los resultados obtenidos por ambos códigos son aceptables y demuestran que el sensor puede ser implementado como un registrador de olas marinas ya que la ola recreada tiene las características del movimiento capturado, como lo es la altura 1 metro peak to peak y su periodo de aproximadamente 10 segundos.

El proyecto se puede seguir desarrollando para trabajos futuros, implementándolo en algún microcontrolador de bajo costo y pudiendo medir olas reales. Como sugerencia se tiene el canal de pruebas de la “Escuela de Arquitectura y Diseño” de la PUCV. Donde se podrían realizar las pruebas pertinentes.

Glosario

.txt		Archivo informático con estructura series de líneas de texto.
Algoritmo		Conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permite hacer un cálculo y hallar la solución de un tipo de problemas.
Aliasing		Efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se muestrean digitalmente.
Altura de la ola	H	Diferencia de altura entre una cresta y un valle
Altura Peak to Peak		Es la altura de la ola
Amplificador Operacional	AO	Es un dispositivo amplificador electrónico de alta ganancia acoplado en corriente continua que tiene dos entradas y una salida.
Amplitud	a	Mitad de la altura de la ola
Antena Emisora	Tx	Transforma energía eléctrica en ondas electromagnéticas las cuales son emitidas al espacio libre.
Antena receptora	Rx	Transforma ondas electromagnéticas en energía eléctrico.
Atenuación		Perdida de potencia de una señal al transitar por un medio de transmisión
Banda K	K	Segmento del espectro electromagnéticos en el rango de frecuencia de microondas comprendida entre 18 a 27 [GHz]
Bandas de frecuencias		Intervalo de frecuencia del espectro electromagnéticos asignado a diferentes usos dentro de las radiocomunicaciones.

Bits	Unidad mínima de información, que puede ser cero o uno.
Buffer	Memoria de almacenamiento temporal de información que permite transferir los datos entre unidades funcionales con características de transferencia diferentes.
Canales	Medio de salida de la señal proporcionada por el transductor de microondas K-LC2.
Código	Líneas de texto con pasos que debe seguir la computadora para ejecutar dicho programa.
Coefficiente de reflexión	Describe la amplitud o intensidad de una onda reflejada respecto a la onda incidente.
Cresta	La parte más alta de una ola
Cruce por cero	Método utilizado para detectar la frecuencia de una onda senoidal ideal.
Decimación	Reducir la cantidad de muestras en un factor determinado.
Desfase	La diferencia de fase entre dos ondas
DFT	Transformada de Fourier discreta o Discrete Fourier Transform
Diámetro	Distancia de una línea recta que une dos puntos de una circunferencia pasando por su centro.
Dieléctrico	Aislante o mal conductor del calor o la electricidad.
Difracción	Fenómeno por el cual se produce una desviación de las ondas que pasan por un medio diferente
DSP	Procesamiento digital de señales o Digital Signal Processor.
DTFT	Transformada de Fourier en tiempo discreto o Discrete-time Fourier Transform.
Efecto Doppler	Aumento o disminución de la frecuencia de una onda sonora cuando la fuente que la produce y la persona que la capta se alejan la una de la otra o se aproximan la una a la otra.
Espectro	Conjunto de ondas electromagnéticas, ordenadas según su frecuencia

FFT		Transformada rápida de Fourier o Fast Fourier Transform.
Filtro Pasa Alto	FPA	Filtros que dejan pasar aquellas frecuencias que están sobre una determinada frecuencia.
Filtro Pasa Bajo	FPB	Filtro que deja pasar aquellas frecuencias que están bajo de una determinada frecuencia.
Filtro Pasa Banda		Filtro que deja pasar aquellas frecuencias que están entre dos determinadas frecuencias.
Frecuencia	f	Número de vibraciones, ondas o ciclos de un fenómeno periódico realizados en una unidad de tiempo determinada.
Frecuencia de muestreo	f_s	número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta, durante el proceso necesario para convertirla de analógica en digital.
Frecuencia Doppler	fd	Es la frecuencia producida por el efecto Doppler.
Fuerza de gravedad	g	Fuerza de atracción que la Tierra u otro cuerpo celeste ejerce sobre los cuerpos que están cerca o sobre él.
Ganancia	G	Amplificar una señal.
Haz		Parámetro de radiación, ligado al diagrama de radiación de una antena.
Hertz	Hz	Unidad de frecuencia del Sistema Internacional, de símbolo Hz , que equivale a la frecuencia de un fenómeno periódico cuyo período es 1 segundo.
IIR		Respuesta infinita al impulso o Infinite Impulse Response.
Integrar		Determinar mediante cálculo integral una función de la que solo se conoce la expresión diferencial.
K-LC2		Sensor transceptor de microondas de onda continua utilizado en el proyecto.
LABSEI		Laboratorio de señales e instrumentación perteneciente a la escuela de ingeniería eléctrica de la PUCV.
Longitud de onda	λ	Distancia entre dos crestas se le denomina longitud de onda

Loop		bucle o ciclo. Sentencia que ejecuta repetidas veces un trozo de código, hasta que la condición asignada a dicho bucle deja de cumplirse.
Onda senoidal		Curva que representa gráficamente la función seno y también a dicha función en sí. Es una curva que describe una oscilación repetitiva y suave.
Ondas		Perturbación que se propaga desde el punto en que se produjo hacia el medio que rodea ese punto.
Periodo	T	Tiempo transcurrido entre dos puntos equivalentes de la onda.
Pines		Terminal o patilla de cada uno de los contactos metálicos de un conector o de un componente fabricado de un material conductor de la electricidad.
PUCV		Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
Raspberry PI		Computador de placa reducida, computador de placa única o computador de placa simple (SBC) de bajo costo desarrollado en Reino Unido.
Reflexión		Cambio de dirección o de sentido de una onda electromagnética cuando se le interpone un obstáculo.
Refracción		Cambio de dirección de una onda electromagnética cuando pasa por un medio a otro de distinta densidad.
Ruido		Conjunto de señales extrañas y no deseadas que surgen en un sistema de comunicación o en cualquier transmisión de sonido, debido a interferencias, a defectos de los dispositivos, etc.
Señal Análoga		Tipo de señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético; que es representable por una función matemática continua en la que es variable su amplitud y periodo (representando un dato de información) en función del tiempo.
Señal Digital		Tipo de señal en que cada signo que codifica el contenido de la misma puede ser analizado en término de algunas magnitudes que representan valores discretos, en lugar de valores dentro de un cierto rango.

SNR	Relación señal/ruido o Signal to noise ratio.
STFT	Transformada de Fourier de Tiempo Reducido o Short-time Fourier transform.
Tecnología I/Q	Tecnología implementada en el sensor que permite detectar la dirección de movimiento del objeto capturado gracias a sus dos canales de salida que se encuentran desfasado en 90°.
Transceptor	Dispositivo que cuenta con un transmisor y un receptor que comparten parte de la circuitería o se encuentran dentro de la misma caja
Valle	Parte más profunda de la depresión entre dos olas consecutivas
Velocidad de propagación	Movimiento ondulatorio se propaga con una velocidad que depende de las características del medio
Velocidad Tangencial	O velocidad angular, es la velocidad tangente a la trayectoria que resulta el producto vectorial del vector Velocidad angular por el vector posición referido a un punto.
Ventana	Funciones matemáticas usadas con frecuencia en el análisis y el procesamiento de señales para evitar las discontinuidades al principio y al final de los bloques analizados.
Ventana Hanning	Un tipo de ventana aplicada para el análisis y procesamiento de señales.
Voltaje	Potencial eléctrico, expresado en voltios.

Bibliografía

- [1] A. Manni G y J. Vignolo B, «Estudio de factibilidad técnica de medición de rapidez, dirección y distancia con un traseptor de microondas de onda continua,» 2017.
- [2] World Meteorological Organization, «Guide To Wave Analysis And Forecasting», second ed., W. 702, Ed., 1998.
- [3] Pontificia Universidad Católica de Chile, «Curso Geografía del Mar,» [En línea]. Available: http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/. [Último acceso: 22 05 2017].
- [4] RFbeam, «RFbeam Microwave GmbH,» [En línea]. Available: <https://www.rfbeam.ch/>. [Último acceso: 24 4 2017].
- [5] Facultad De Náutica De Barcelona, UPC, «Teoría de Olas,» Barcelona, España.
- [6] Universidad de Cordoba, UCO, «Ondas Electromagnéticas. Conceptos Básicos,» España.
- [7] J. Vignolo Barchiesi, Introducción al Procesamiento Digital de Señales, Valparaiso, 2008.
- [8] Texas Instruments, «Data Sheet TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers,» 2015.
- [9] D. Zumaeta y J. Vignolo, «Sistema de adquisición de datos basado en un microcontrolador dsPIC y un microcomputador Raspberry Pi,» 2017.

A Código empleado para simular efecto Doppler

En los siguientes códigos, se utilizaron para recrear la señal producida y capturada por el transductor de microondas K-LC2, junto a la simulación del efecto Doppler, con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del DSP.

A.1 Algoritmo utilizado para creación señal Dopple.

Listado A.1-1: Creación señal Doppler producida por sensor K-LC2.

```
1 %Valores para Funciones
2 f= 24.5*10^3; % Frecuencia Tx reducida 24.5(KHz)
3 h= 1; % Altura objeto con Tx 1(m)
4 c= 300; % Velocidad de la luz reducida 300(m/s)
5 Fs=1000000; % Frecuencia de muestreo 1 (Mhz).
6 T=10; % Periodo de la ola, 10 segundos.
7
8 %Caracteristicas ola
9 fol= 1/T; % Frecuencia ola 1 0.1(hz)
10 al = 0.5; % Amplitud ola 0.5(m)
11
12 %Formulas
13 l=c/f; % Lamda, longitud de Tx (m)
14 n= 0:1/Fs:3*T; % Muestras a 1MHz.
15 ola=al*sin(2*pi*fol*n);
16 d= h-ola; % Variación distancia entre ola y antena (m)
17 o=(4*pi*f/c)*d; % Variación del angulo Rx (rad)
18
19 %Señales Tx e Rx.
20 b=2*pi*(f)*n; % Angulo de Tx. (rad)
21 Txi=sin(b);
22 Txq=sin(b-pi/2);
23 Rx=sin(b+o);
24
25 %Salida de los canales I y Q
26 I= Txi.*Rx; Q= Txq.*Rx;
27 R=[I' Q'];
28
29 %Grafico freceuncia doopler
30 close
31 subplot(411),plot(n,I); grid; title('canal I');
32 subplot(412),plot(n,R); grid;
33 title('Señal Doppler I (Azul) y Q (Naranja)');
34 xlabel('t [s]'); axis([2 3 -1.1 1.1]);grid;
35 subplot(413), plot(n,I); grid; title('ZOOM');axis ([2.3 2.5 -1 1]);
36 subplot(414), plot(n,R); grid;
37 title('aleja');axis ([2.5 3 -1 1]);
```

A.2 Algoritmo utilizado para adquisición de datos.

Listado A.2-1 : Simulación en filtrado y señal captada por el sistema de adquisición de datos.

```

1  % Datos
2  fc = [100] ;      % Frecuencia de corte en [Hz]
3  Fs = 1000;      % Frec. de muestreo en [Hz]
4  N = 1;          % Orden del filtro
5  f1 = 0;         % frec. mínima para el cálculo de la respuesta de frecuencia
6  f2 = 500;      % frec. máxima para el cálculo de la respuesta de frecuencia
7  m1 = 1e-2;     % límite inferior del gráfico de magnitud
8  n = 0:1/Fs:3*T; % Muestras a 1000 Hz.
9
10 % Filtro pasa bajo IIR a 50Hz de primer orden
11 yi=0;
12 yq=0;
13 fc=fc/Fs;      % Frecuencia de corte para filtro IIR en (c/m)
14 a=exp(-2*pi*fc); % Constante Filtro IIR
15
16 % Diseño del filtro
17 for nn=2:length(I);
18     yi(nn)=(1-a)*I(nn)+a*yi(nn-1);
19     yq(nn)=(1-a)*Q(nn)+a*yq(nn-1);
20 end
21
22 %Decimacion
23 yq = yq(1 : 1000 : length(yq)); % Decimación
24 yq = yq - mean(yq); % elimina componente continua
25 yi = yi(1 : 1000 : length(yi)); % Decimación
26 yi = yi - mean(yi); % elimina componente continua
27
28 %Vector I y Q juntos
29 r = [yi' yq'];
30
31 % Grafica la señal filtrada
32 x = 1:1:length(i);
33 close
34 plot(x/1000,r); grid; title('Señal Doppler I (Azul) y Q (Naranja)');
35 xlabel('t [s]'); ylabel('Salida IIR');
36 axis([2 3 -1.1 1.1]);
37 grid;
38
39 % Graba r(n)
40 save 'r.txt' r -ascii

```

A.3 Algoritmo utilizado para obtener frecuencia Doppler y vector de dirección.

Listado A.3-1: Obtención de la frecuencia Doppler y vector de dirección.

```

1  clc; clear;
2  % Leer y cargar datos de I y Q.
3  load 'r.txt';
4  I=r(:,1);
5  Q=r(:,2);
6
7  % Datos
8  T=10;          % Periodo Ola
9  Fs=1000;      % Frecuencia de Muestreo
10 Dt = 1/Fs;
11 n= 0:1/Fs:3*T;
12
13 % Definir datos para posterior analisis
14 ze=2^8;       % Ceros a aumentar
15 ts=0.5;       % Segundos a analizar 0.5 seg.

```

```

16 seg=round(ts*Fs); % Cantidad de muestras por segmento
17 tr=seg/2; % Traslado del 50%
18 tras=0; %
19 nseg=floor((length(I)/seg)*2-1); %Declarar cantidad de segmentos.
20 F=0;
21 P=0;
22
23 for g=1:nseg;
24 %Segmento a analizar
25 nu=1;
26 for nu=1:seg;
27 Ix (nu)= I(nu+tras);
28 Qx (nu)= Q(nu+tras);
29 end
30 tras=tras+tr;
31
32 %Obtención de la frecuencia fundamental del segmento
33 N = length(Ix);
34 Ix1 = Ix.*hanning(N)'; % Multiplica secuencia ventana.
35 Ix1 = [Ix1 zeros(1, ze-N)]; % Aumenta N a valor zeros
36 [X] = fft(Ix1); % Aplica la fft al vector Ix1
37
38 % Genera vector de la magnitud y la frecuencia
39 M = abs(X(1 : N/2)); % Calcula magnitud para frec positivas
40 k = [0 : round(N/Fs) : 100]; % Crea rango de frecuencias
41 f = k / (N*Dt);
42
43 %Encontrar la posición de la frecuencia peak del segmento
44 nu=1; % Inicializa posición.
45 while nu<=length(M);
46 if M(1,nu)==max(M) % Compara mag de la frec con el MAX.
47 lugar=nu; % Guarda la posición de la frecuencia MAX.
48 nu=length(M);
49 end
50 nu=nu+1;
51 end
52 frec(1,g)=f(1,lugar); %Crea vector con frecuencias peak.
53
54 % Aplica DFT solo a la componente k obtenida
55 nn = (1:1:seg); %Genera vector que da valores a coseno y seno
56 coseno = cos(2*pi*lugar*nn/seg);
57 seno = sin(2*pi*lugar*nn/seg);
58 Re=0; Im=0; %Inicializa valores
59
60 %Aplica DFT para componenete k
61 for nn=0:1:seg-1
62 Re = Re + Ix(nn+1)*coseno(nn+1);
63 Im = Im + Ix(nn+1)*seno(nn+1);
64 end
65 Iz =Re-i*Im; %Forma valor de componente k canal I
66
67 Re=0;Im=0; %Inicializa valores
68 for nn=0:1:seg-1
69 Re=Re + Qx(nn+1)*coseno(nn+1);
70 Im=Im + Qx(nn+1)*seno(nn+1);
71 end
72 Qz=Re-i*Im; %Forma valor de componenete k canal Q
73
74 % Calculo de fase en grados de la componente k en I/Q.
75 aI=atan2(imag(Iz),real(Iz))*180/pi;
76 aQ=atan2(imag(Qz),real(Qz))*180/pi;
77
78 %La siguiente cadena de if transforma los ángulos a positivos
79 if (aQ < 0)
80 aQ = 360 + aQ;
81 end
82 if (aI<0)
83 aI= aI + 360;
84 end
85
86 fasI(g)=aI; % Almacena fase del segmento para la componente k

```

```

87     fasQ(g)=aQ;      % Almacena fase del segmento para la componente k
88     difas(g)=-fasI(g)+fasQ(g); %Almacena diferencia fase
89 end
90
91 % Obtener vector de dirección.
92 for nn=1:1:length(difas);
93     C=0;
94     %Entra en sentencia si el objeto se aleja
95     if difas(nn)> 0
96         w(1,nn)=-1;           %aleja
97     end
98     if difas(nn) < 0
99         w(1,nn)=1;           %acerca
100    end
101    if difas(nn) == 0
102        w(1,nn) = 0;
103    end
104 end
105
106 % Graba vector de frecuencia(n) y dirección (n)
107 save 'frec.txt' frec -ascii
108 save 'dir.txt' w -ascii
109

```

A.4 Obtención de la ola recreada.

Listado A.4-1: Obtención de la velocidad de variación de la altura de la ola junto a la recreación de la ola marina.

```

1  %Obtención Velocidad de subida de la partícula
2  f= 24.5*10^3;      %frecuencia Tx reducida (hz)
3  c= 300;           %velocidad de la luz reducida (m/s)
4  v=frec*c/(2*f);   %Vector valor absoluto de la velocidad de la partícula
5  x = 1:1:length(v);
6
7  subplot 411; stem(x,w);
8  ylabel('Dirección');
9  title('Dirección de la partícula. 1=Acerca -1=Aleja');
10
11 subplot 412; stem(x/4,v);
12 ylabel('Vel(m/s)');
13 title('Vel. de la partícula / Sin dirección');
14
15 %Vector Velocidad partícula
16 v=v.*w;
17 subplot 413;stem(x/4,v);
18 ylabel('Vel (m/s)');
19 title('Vel. de la partícula / Con dirección');
20
21 %Obtención la altura de la ola, integrando el vector de la velocidad
22 pos=1;
23 suma=0;
24 Olal(pos)=0;
25 while pos<length(v)
26     pos=pos+1;
27     suma=suma+v(pos-1);           % Sumatoria punto a punto
28     Olal(pos)=suma*(3*T/round(length(v)));
29 end
30 Olal=Olal-mean(Olal);           % Eliminar valor medio
31
32 subplot 414; bar(x/4,Olal);
33 ylabel('Amplitud (m)');
34 title('Ola Recreada');

```

B Segundo código empleado utilizando señal real del sensor.

Para el segundo código empleado tiene como características el verificar el algoritmo DSP para señales reales proporcionadas por las pruebas realizadas con el módulo transceptor de microondas K-LC2.

B.1 Código empleado para obtener la ola recreada.

Listado B.1-1: Segundo código empleado para recrear ola simulada.

```
1  clc; clear; close
2
3  %Carga Muestras de cada canal
4  load 'V02muestras_c1_100seg_141542.txt'; %Carga datos Canal I
5  I=V02muestras_c1_100seg_141542(1:100001); %Guarda datos del Canal I a
6  variable I
7  I(1)=[]; %Elimina la primera muestra
8  I=[I;I];
9  I=[I;I];
10 I=I-mean(I); %Eliminar la componente continua
11
12 load 'V02muestras_c2_100seg_141542.txt'; %Carga datos Canal Q
13 Q=V02muestras_c2_100seg_141542(1:100001); %Guarda datos del Canal Q a
14 variable Q
15 Q(1)=[]; %Elimina la primera muestra
16 Q=[Q;Q];
17 Q=[Q;Q];
18 Q=Q-mean(Q); %Eliminar la componente continua
19
20 %Definir Datos
21 Fs=1000; % Frecuencia de Muestreo
22 fc=50; % Frecuencia de corte FPB (Hz)
23 Fc=1; % Frecuencia de corte FPA (Hz)
24 fx=24.5*10^9; % Frecuencia Tx del sensor (hz)
25 c= 3*10^8; % Velocidad de la luz (m/s)
26 ts=0.5; % Tiempo de los segmento 0.5 seg.
27 seg=round(ts*Fs); % Posición de la muestra a los 0.5 seg
28 tr=seg/2; % Traslado del 50%
29 n= 0:1/Fs:length(I);
30 suma=0;
31 olaRec=0;
32
33 %Filtro pasa bajo IIR a 50Hz de primer orden
34 Ix=0;
35 Qx=0;
36 fc=fc/Fs; % Frecuencia de corte para filtro IIR.
37 a=exp(-2*pi*fc);
```

B Segundo código empleado utilizando señal real del sensor.

```

38
39 %Filtro Pasa Alto IIR a 0.05Hz de primer Orden
40 OlaFinal=0;
41 Fc=Fc/Fs; % Frecuencia de corte para filtro IIR.
42 A=exp(-2*pi*Fc);
43
44 % Definir datos para posterior analisis
45 tras=0; % Inicio del siguiente segmento
46 nseg=floor((length(I)/seg)*2-1); % Cantidad de segmentos a analizar.
47
48 % Inicializa proceso de analisis por segmento
49 for g=1:nseg;
50 %Segmento a analizar
51 nu=1;
52 for nu=1:seg; %Extracción del segmento
53 yi(nu)= I(nu+tras);
54 yq(nu)= Q(nu+tras);
55 end
56 tras=tras+tr; %Mueve al siguiente segmento.
57
58 %Filtro Pasa Bajo del segmento
59 for nn=2:length(yi);
60 Ix(nn)=(1-a)*yi(nn)+a*Ix(nn-1);
61 Qx(nn)=(1-a)*yq(nn)+a*Qx(nn-1);
62 end
63
64 %Obtención de la frecuencia fundamental del segmento
65 N = length(Ix);
66 Ix1 = Ix.*hanning(N)'; % Multiplica la secuencia por la ventana.
67 Ix1 = [Ix1 zeros(1,2048-N)];
68 [X] = fft(Ix1); % Aplica la fft al vector Ix1
69
70 % Genera vector de la magnitud y la frecuencia
71 Dt = 1 / Fs;
72 N = length(Ix1);
73 M = abs(X(1 : N/2)); % Calcula magnitud para frecuencias positivas
74 k1 = round(0 / (Fs/N));
75 k2 = round(200 / (Fs/N));
76 k = [k1 : 1 : k2]; % Crea rango de frecuencias
77 f = k / (N*Dt);
78
79 %Encontrar la posicion de la frecuencia peak del segmento
80 nu=1; % Inicializa posición para comprar las magnitudes
81 % para las frecuencias positivas.
82 while nu<=length(M);
83 if M(1,nu)==max(M) % Compara cada mag de la frecuencia con el MAX.
84 lugar=nu; % Guarda la posición de la frecuencia MAX.
85 nu=length(M);
86 end
87 nu=nu+1;
88 end
89 frec(1,g)=f(1,lugar); %Crea vector con frecuencias peak.
90
91 % Aplica DFT solo a la componente k obtenida
92 nn = (0:1:N-1); %Genera vector que da valores a coseno y seno
93
94 % Genera vector de coseno y seno para componente k.
95 coseno = cos(2*pi*lugar*nn/N);
96 seno = sin(2*pi*lugar*nn/N);
97
98 %Aplica DFT para componenete k
99 ReI=0; ImI=0; %Inicializa valores
100 for nn=0:1:seg-1
101 ReI = ReI + Ix(nn+1)*coseno(nn+1);
102 ImI = ImI + Ix(nn+1)*seno(nn+1);
103 end
104 ReQ=0; ImQ=0; %Inicializa valores
105 for nn=0:1:seg-1
106 ReQ=ReQ + Qx(nn+1)*coseno(nn+1);
107 ImQ=ImQ + Qx(nn+1)*seno(nn+1);
108 end

```


B Segundo código empleado utilizando señal real del sensor.

```
109
110 %calcula la fase en grados de la componente k en I y Q
111 aI=atan2(ImI,ReI)*180/pi;
112 aQ=atan2(ImQ,ReQ)*180/pi;
113
114 %La siguiente cadena de if transforma los ángulos a positivos
115 if (aQ < 0)
116     aQ = 360 + aQ;
117 end
118 if (aI < 0)
119     aI = aI + 360;
120 end
121
122 % Almacena fase del segmento I/Q para componente k.
123 fI(g)=aI;
124 fQ(g)=aQ;
125
126 % Crea vector de diferencia de fase entre canales I/Q.
127 fase(g)=fI(g)-fQ(g);
128
129 %Clasifica la direccion de la particula.
130 L=0; %Variable condicional
131 %Entra en sentencia si el objeto se acerca si se encuentra en la
132 %vecindad de los 90 o -270 Grados
133 if or(and(fase(g)>45,fase(g)<135),and(fase(g)<-225,fase(g)>-315))
134     w(1,g)=-1; %Acerca
135     L=1;
136 end
137 %Entra en sentencia si el objeto se aleja si se encuentra en la
138 %vecindad de los -90 o 270 Grados
139 if or(and(fase(g)<-45,fase(g)>-135),and(fase(g)>225,fase(g)<315))
140     w(1,g)=1; %Aleja
141     L=1;
142 end
143 % Si la fase se encuentra cerca de los 0, +-180 o +-360 grados,
144 % entonces se deja en cero la muestra.
145 if L==0
146     w(1,g) = 0;
147 end
148
149 %Obtención Velocidad de la particula Sin dirección
150 v(g)= freq(g)*c/(2*fx); %Ecuación de velocidad por Doppler.
151
152 %Obtención Velocidad de la particula Con Dirección
153 vd(g)= v(g)*w(g); %Vector velocidad por vector dirección
154 end
155
156 %Ploteo del vector de dirección corregido, 1=acerca y -1=aleja
157 close
158 x=1:1:length(w);
159 subplot 411; stem(x/4,w);
160 xlabel('Tiempo (seg)');
161 title('Vector de Dirección');
162
163 %Obtención Velocidad de subida de la particula
164 %Vector valor absoluto de la velocidad de la particula sin Dirección
165 subplot 412; stem(x/4,v);
166 ylabel('Vel(m/s)'); xlabel('Tiempo (seg)');
167 title('Vel. de la particula / Sin dirección'); grid
168
169 %Vector valor absoluto de la velocidad de la particula con Dirección
170 subplot 413;stem(x/4,vd);
171 ylabel('Vel (m/s)');xlabel('Tiempo (seg)');
172 title('Vel. de la particula / Con dirección');
173 axis([150 200 -.4 .4]);grid
174
175 %Obtención la altura de la ola, integrando el vector de la velocidad
176 pos=1;
177
178 while pos<=length(v)
179     suma=suma+vd(pos); %Sumatoria punto a punto
```

B Segundo código empleado utilizando señal real del sensor.

```
180 %Se obtiene el area rectangular entre una muestra y la siguiente
181 olaRec(pos)=suma*(length(I)/(Fs*round(length(v))));
182 pos=pos+1;
183 end
184
185 % Filtro Pasa Alto IIR para eliminar la componente media.
186 for nn=2:length(olaRec);
187   OlaFinal(nn)=(1+A)/2*(olaRec(nn)-olaRec(nn-1))+A*OlaFinal(nn-1);
188 end
189
190 %Grafica de la ola recreada
191 subplot 414;
192 bar(x/4,OlaFinal);
193 ylabel('Amplitud (m)');xlabel('Tiempo (seg)');
194 title('Ola Recreada');
195 axis([150 200 -.6 0.6]); grid
```

C Tercer código empleado para tiempo real.

Este algoritmo tiene como finalidad el recrear la ola marina en tiempo real con la característica de ocupar poca memoria de almacenamiento para poder ser implementado en un microchip. Se debe mencionar que se ocuparon las mismas muestras que el algoritmo anterior, pero para este caso se van tomando por cada iteración una muestra por canal, simulando que es en tiempo real.

C.1 Código empleado para obtener la ola recreada en tiempo real.

Listado C.1-1: Algoritmo empleado para obtener ola recreada en tiempo real.

```
1  clc; clear; close;
2
3  %Carga Muestras de cada canal
4  load 'V02muestras_c1_100seg_141542.txt'; %Carga datos Canal I
5  I=V02muestras_c1_100seg_141542(1:100001); %Guarda datos del Canal I
6  I(1)=[]; %Elimina la primera muestra
7  I=[I;I]; %Repite la muestra al doble
8  I=[I;I]; %Repite la muestra al cuadruple
9  I=I-mean(I); %Eliminar la componente continua
10
11 load 'V02muestras_c2_100seg_141542.txt'; %Carga datos Canal Q
12 Q=V02muestras_c2_100seg_141542(1:100001); %Guarda datos del Canal Q
13 Q(1)=[]; %Elimina la primera muestra
14 Q=[Q;Q]; %Repite la muestra al doble
15 Q=[Q;Q]; %Repite la muestra al cuadruple
16 Q=Q-mean(Q); %Eliminar la componente continua
17
18 %Definir Datos
19 Fs= 1000; % Frecuencia de Muestreo
20 Ds= 1/Fs;
21 fc= 50; % Frecuencia de corte FPB (Hz)
22 Fc= 1; % Frecuencia de corte FPA (Hz)
23 fx= 24.5*10^9; % Frecuencia Tx del sensor (hz)
24 c= 3*10^8; % Velocidad de la luz (m/s)
25 ts= 0.5; % Tiempo del segmento a analizar (0.5seg)
26 seg= round(ts*Fs); % Indica la muestra cada 0.5 seg.
27 tr= seg/2; % Traslado del 50%
28
29 %Filtro pasa bajo IIR a 50Hz de primer orden
30 Ipas= 0;
31 Qpas= 0;
32 fc= fc/Fs; % Frecuencia de corte para filtro IIR en (c/m)
33 a= exp(-2*pi*fc); % Constante Filtro IIR
34
35 %Filtro Pasa Alto IIR a 1Hz de primer Orden
```

C Tercer código empleado para tiempo real.

```
36 Fc= Fc/Fs; % Frecuencia de corte para filtro IIR en (c/m)
37 A= exp(-2*pi*Fc); % Constante Filtro IIR.
38
39 % Definir datos para posterior analisis
40 suma= 0; % Valor Inicial para obtener la forma de la ola final.
41 olarecreada= 0; % Valor Inicial Vector Ola Final SIN FPB.
42 olafinal= 0; % Valor Inicial Vector Ola Final CON FPB.
43 tras= 0; % Inicio del siguiente segmento
44 segmento= 1; % Avisar cuando pasa un segmento
45 olaRan=0;
46
47 % Iniciar Variables para obtención de la frecuencia
48 PosIn= 0;
49 PosFi= 0;
50 ciclo= -0.5; % Valor inicial para cuenta de ciclos.
51 PosInAn= 0;
52 Muestras= seg; % Valor inicial de Muestras por segmentos.
53 cicloAn=0;
54
55 % Iniciar Variables para obtención IDFT
56 k= 0;
57 ReI= 0; ImI= 0; ReQ= 0; ImQ= 0; %Inicializa valores
58 Nfr=1;
59 Tr2=1;
60
61 % Obtener valores constantes.
62 angle= 2*pi/seg;
63 ctevel= c/(2*fx);
64 AngFase= 180/pi;
65 tsm= ts/2;
66 A2= ((1+A)/2);
67
68 %Declaración Variables Buffer
69 Buff1= zeros(250,2);
70 Buff2= zeros(250,2);
71 Buff3= zeros(250,2);
72 Bn1= 1;
73 Bn2= 1;
74 Bn3= 251;
75 Inicio= 1;
76 paso=0;
77
78 %Borrar junto con los vectores de ayuda
79 muestra= 1;
80
81 for g= 1:length(I)
82 %Sacando informacion del vector
83 yi= I(g);
84 yq= Q(g);
85
86 %FPB
87 Iact= (1-a)*yi + a*Ipas;
88 Qact= (1-a)*yq + a*Qpas;
89
90 % Buffer 3
91 if Inicio==3;
92 Bn1= 1;
93 Buff3(Bn3,1)= Iact;
94 Buff3(Bn3,2)= Qact;
95 if Bn3==250;
96 Inicio=1;
97 paso=1 ;
98 end
99 Bn3= Bn3+1;
100 end
101 % Buffer 2
102 if Inicio==2;
103 Bn3= 1;
104 Buff2(Bn2,1)= Iact;
105 Buff2(Bn2,2)= Qact;
106 if Bn2==250;
```

```

107     Inicio=3;
108     end
109     Bn2= Bn2+1;
110 end
111 % Buffer 1
112 if Inicio==1 && paso==0;
113     Bn2= 1;
114     Buff1(Bn1,1)= Iact;
115     Buff1(Bn1,2)= Qact;
116     if Bn1==250;
117         Inicio=2;
118     end
119     Bn1= Bn1+1;
120 end
121 paso= 0;
122
123 % Obtención de la frecuencia fundamental del segmento
124 if Iact*Ipas<0;
125     ciclo= ciclo + 0.5; % Cuenta los medios ciclos.
126     if PosIn == 0; % Posición inicial del ciclo a analizar.
127         PosIn= g;
128     end
129     if PosIn~=0; % Posición final del ciclo a analizar.
130         PosFi= g;
131     end
132 end
133
134 % Analisis de cada trama
135 if (segmento>=tr)
136     segmento= 0;
137
138     % Obtencion la frec fundamental
139     CicloSeg= cicloAn + ciclo + .5;
140     Muestras= PosFi - PosInAn;
141     Tiempo= Muestras * Ds;
142     fr= CicloSeg / Tiempo;
143     k= CicloSeg;
144
145     %Inicializar valores Frec Fundamental
146     PosInAn= PosIn; % Mover indicador de la pos inicial
147     PosIn= 0; % Detectar nuevamente la pos inicial
148     cicloAn= ciclo; % Guardar el ciclo del tramo
149     ciclo= -.5;
150
151     % Leer el vector de los buffer disponible
152     for nnn=1:seg;
153         if Nfr==251 && Tr2==1;
154             Nfr=1;
155             Tr2=2;
156         end
157         % Leer Buff 1
158         if (Inicio~=2 && Bn1==1 && Tr2==1)|| (Inicio==3 && Tr2==2);
159             IA= Buff1(Nfr,1);
160             QA= Buff1(Nfr,2);
161         end
162         % Leer Buff 2
163         if (Inicio~=3 && Bn2==1 && Tr2==1)|| (Inicio==1 && Tr2==2);
164             IA= Buff2(Nfr,1);
165             QA= Buff2(Nfr,2);
166         end
167         % Leer Buff 3
168         if (Inicio~=1 && Bn3==1 && Tr2==1)|| (Inicio==2 && Tr2==2);
169             IA= Buff3(Nfr,1);
170             QA= Buff3(Nfr,2);
171         end
172         Nfr=Nfr+1;
173
174         % Generar vector de seno/coseno para componente k
175         cosenoB= cos(angle*k*(nnn-1));
176         senoB = sin(angle*k*(nnn-1));
177

```

```

178
179         ReI= ReI + IA*cosenoB;           % Sumatoria parte Re I
180         ImI= ImI + IA*senoB;           % Sumatoria parte Im I
181         ReQ= ReQ + QA*cosenoB;       % Sumatoria parte Re Q
182         ImQ= ImQ + QA*senoB;       % Sumatoria parte Im Q
183     end
184     Tr2=1;
185     Nfr=1;
186
187     % Calcula la fase en grados de la componente k en I y Q
188     aI= atan2(ImI,ReI)*AngFase;
189     aQ= atan2(ImQ,ReQ)*AngFase;
190
191     % Inicializar Valores DFT
192     ReI= 0; ImI= 0; ReQ= 0; ImQ= 0;
193
194     % La siguiente cadena de if transforma los ángulos a positivos
195     if (aQ < 0)
196         aQ= 360 + aQ;
197     end
198     if (aI < 0)
199         aI= aI + 360;
200     end
201
202     % Almacena fase del segmento I/Q para la componente k.
203     fI= aI;
204     fQ= aQ;
205
206     % Crea vector de diferencia de fase entre canal I y Q
207     FA= fI - fQ;
208
209     % Clasifica la direccion de la particula.
210     L= 0;           % Variable condicional
211
212     % Entra en sentencia si el objeto se acerca y se encuentra en
213     % la vecindad de los 90 o -270 Grados
214     if or(and(FA>45,FA<135), and(FA<-225, FA>-315))
215         D= -1;           % Acerca
216         L= 1;
217     end
218
219     % Entra en sentencia si el objeto se aleja si se encuentra en
220     % la vecindad de los -90 o 270 Grados
221     if or(and(FA<-45,FA>-135), and(FA>225, FA<315))
222         D= 1;           % Aleja
223         L= 1;
224     end
225
226     % Si la fase se encuentra cerca de los 0, +-180 o +-360 grados,
227     % entonces se deja en cero la muestra.
228     if L==0
229         D= 0;           % Se ignora la muestra.
230     end
231
232     % Obtención Velocidad de la particula Sin dirección
233     v= fr*ctevel;     % Ecuación de velocidad por Doppler.
234
235     % Obtención Velocidad de la particula Con Dirección
236     vd= v*D;         % Velocidad por dirección
237
238     % Obtención la altura de la ola.
239     suma= suma + vd;
240     olarecreada= suma*tsm; % Se obtiene el área rectangular
241
242     % FPA
243     olafinal= A2*(olarecreada-olaRan)+A*olafinal;
244     olaRan= olarecreada;
245
246     % Graficar la ola en tiempo real.
247     hold on
248     stem(muestra,olafinal);

```

C Tercer código empleado para tiempo real.

```
249     ylabel('Amplitud (m)');xlabel('Tiempo (seg)');
250     title('Ola Recreada');
251     pause(0.5);
252
253     muestra= muestra+1;
254     end
255
256     segmento= segmento+1;
257     Ipas= Iact;
258     Qpas= Qact;
259     end
```