

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
UNIDAD ENSENADA

ESCUELA DE INGENIERÍA



**INSTRUMENTACIÓN DE UN CANAL DE OLAS PARA EXPERIMENTACIÓN
CON LA RETRODISPERSIÓN DE MICROONDAS DEBIDA A OLAS
GENERADAS POR VIENTO**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el título de
INGENIERO EN ELECTRÓNICA presenta:

MARCO EFRÉN NAVA VALDEZ

Ensenada, BajaCalifornia; Octubre de 1999.

DEDICATORIA

A mis padres

Nora Alicia Valdez
y
Cuauhtémoc Nava

A mis hermanos

Nora Alejandra y Cuauhtémoc

AGRADECIMIENTOS

Al **M.C. BENJAMÍN H. RAMÍREZ DURÁN** por acesorarme y apoyarme en la realización del presente trabajo.

Al **Dr. FRANCISCO J. OCAMPO TORRES** por darme la oportunidad de participar en un proyecto de investigación en C.I.C.E.S.E.

Al **M.C. CUAUHTÉMOC NAVA B.** por acesorarme en mis dudas de oceanografía, su revisión y consejos para la realización de mi tesis.

Al **Dr. RICARDO VILLAGOMEZ TAMEZ** por adoptarme en su grupo de trabajo y apoyarme en la finalización de esta tesis.

A mis **AMIGOS:**

Ramón Orlando Salaices y Rubén López Villegas por su apoyo y amistad durante el tiempo que transcurrió en terminar nuestros trabajos de tesis.

A mi **FAMILIA**, porque a ellos se debe esto y mucho más.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

UNIDAD ENSENADA

ESCUELA DE INGENIERÍA

TESIS

**INSTRUMENTACIÓN DE UN CANAL DE OLAS PARA EXPERIMENTACIÓN
CON LA RETRODISPERSIÓN DE MICROONDAS DEBIDA A OLAS
GENERADAS POR VIENTO**

que presenta

MARCO EFRÉN NAVA VALDEZ

Aprobado por:



M.C. BENJAMÍN H. RAMÍREZ DURAN



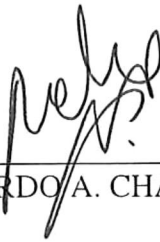
M.C. LEONARDO ACHO ZUPPA



M.C. MIGUEL E. MARTÍNEZ ROSAS



M.C. JUAN DE DIOS SANCHEZ L.



M.C. RICARDO A. CHAVEZ PEREZ

RESUMEN

Se presenta la implementación de instrumentos electrónicos que se requieren en un canal de olas para uso científico en el estudio de la retrodispersión de microondas debida a olas superficiales generadas por viento. En dicho estudio se mide la intensidad de la energía de microondas retrodispersada por la superficie del canal, se mide la altura de las olas superficiales generadoras de la retrodispersión y se obtienen sus espectros de potencia para identificar la relación entre la retrodispersión de microondas y las olas que la genera.

La altura del oleaje generado en la superficie del canal se mide por medio de un sensor capacitivo de óxido de Tantalio. El circuito electrónico propuesto para el uso original de dicho sensor es modificado y analizado para su funcionamiento en la medición de olas superficiales generadas por viento, que tienen alturas desde 1mm a 5mm y componentes espectrales de hasta 20Hz.

Para la obtención del espectro de potencia de la altura de ola se implementa un método de procesamiento digital probado como satisfactorio en oceanografía física, de dicho método se analizan los aspectos más importantes para el procesamiento digital de señales aleatorias y se utilizan diversas técnicas para mejorar el espectro.

Para la medición de la señal de microondas retrodispersada, se implementa un sensor activo y estático de microondas en banda X. Del sensor se obtiene una salida de voltaje en corriente directa proporcional a la energía de la retrodispersión detectada.

La señal obtenida de los instrumentos es registrada digitalmente en un equipo de cómputo, con ayuda de una tarjeta de adquisición digital de datos y un *software* comercial compatible con dicha tarjeta.

ÍNDICE

Página

I	INTRODUCCIÓN	1
I.1	Antecedentes	2
I.2	Objetivo	4
I.3	Objetivos Específicos	4
I.4	Equipo y método	4
I.4.1	Equipo	4
I.4.2	Método	4
II	MEDICIÓN DEL OLEAJE CON UN SENSOR CAPACITIVO	6
II.1	Introducción	6
II.2	Sensor Capacitivo	7
II.3	Electrónica del Instrumento	8
II.3.1	Introducción	8
II.3.2	Funcionamiento del Circuito	9
II.4	Parámetros Importantes	10
II.4.1	Frecuencia del Oscilador	10
II.4.2	Señal de Salida	11
II.4.3	Tiempo de Descarga	12
II.5	Adquisición Digital	13
II.6	Resultados	14
II.6.1	Calibración del Instrumento	14
II.6.2	Linealidad, Histéresis, Intervalo de Operación y Sensibilidad	16
II.6.3	Información Digital	16
III	PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA ALTURA DEL OLEAJE	20
III.1	Introducción	20
III.2	Característica Aleatoria de la Superficie	20
III.3	Análisis de Fourier	21
III.4	Procedimiento	21
III.4.1	Organización de los Datos	21
III.4.2	Eliminación de la Media y Tendencia	22
III.4.3	Aplicación de Ventana	23
III.4.4	Cálculo del PSD	24
III.4.5	Disminución del Error en la Estimación del PSD	25

III.5	Resultados	26
III.5.1	Procedimiento.....	26
III.5.2	Resolución de Frecuencia.....	27
III.5.3	Espectro de Olas Generadas por Viento.....	27
IV	RETRODISPERSIÓN DE MICROONDAS EN LA SUPERFICIE	29
IV.1	Percepción Remota.....	29
IV.2	Retrodispersión de Microondas en la Superficie del Mar	30
IV.2.1	Reflexión Especular	31
IV.2.2	Dispersión por Bragg	31
IV.2.3	Modelo Compuesto	32
IV.3	Procedimiento.....	33
IV.3.1	Introducción	33
IV.3.2	Antecedentes	34
IV.3.3	Experimento	35
IV.4	Resultados	36
IV.4.1	Sensor de Microondas	36
IV.4.2	Canal de Olas	37
IV.4.3	Generador de Viento	37
V	CONCLUSIONES	38
	BIBLIOGRAFÍA	39

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Dispositivo capacitivo para la medición de altura de oleaje.....	6
2 Gráfica de calibración para un sensor capacitivo de Óxido de Tantalio.....	7
3 Diagrama a bloques del sensor.	9
4 Espectro de frecuencia para PWM.	10
5 Espectro de frecuencia esperado para el experimento.	11
6 Descarga del sensor, a)Circuito de carga y descarga y b) Curva de descarga.	13
7 Gráfica de calibración del instrumento.....	14
8 Gráfica de calibración del instrumento con <i>offset</i>	15
9 Serie de datos adquiridos por el sistema.	17
10 Resultados con los ejes en unidades reales.	17
11 Resultados de olas generadas por viento.	18
12 Fragmentos de series de datos adquiridas, a) y b) Datos de olas generadas a diferentes velocidades de viento, c) Datos de olas genradas mecánicamente.	19
13 Series de datos, a) Gráfica de 30.000 muestras y b) Bloque de 1024 muestras.	22
14 Aplicación de la ventana Hanning, a) Ventana Hanning, b) Bloque de datos sin la media y c) Multiplicación en tiempo de la ventana y el bloque de datos sin media.....	23
15 PSD de una serie de 30,000 datos.....	25
16 PSD suavizado por el método de promedio.	26
17 PSD para olas generads con viento.....	27
18 PSD para olas generadas con viento.....	28
19 PSD para olas generadas mecánicamente, a) Escala lineal y b)Escala logarítmica.	28
20 Percepción Remota por satélite.	29
21 Condición para la retrodispersión de Bragg.	32
22 Retrodispersión en el modelo Compuesto.	33
23 Experimento antecedente.....	34
24 Diagrama del experimento.....	35
25 Dispositivo para sensar la retrodispersión de microondas.	35

I INTRODUCCIÓN

La electrónica es una herramienta fundamental para el desarrollo de la ciencia y se involucra prácticamente en toda actividad científica y tecnológica.

Para obtener mediciones de fenómenos físicos del mar, la electrónica juega un papel muy importante. Actualmente, para realizar mediciones sistemáticas y de calidad se requiere contar de recursos humanos con gran experiencia de trabajo en el campo. Alternativamente, con la tecnología de percepción remota se obtiene una mayor versatilidad de operación incluso en situaciones climáticas adversas. Así mismo, con esta tecnología se busca obtener datos más representativos de no sólo uno o varios puntos de medición, sino para toda una área simultáneamente.

Actualmente la percepción remota de microondas ya se realiza desde satélites como una técnica para observar interacciones océano-atmósfera en una perspectiva global: sin embargo, el proceso físico de la retrodispersión de microondas (RDM) debida a olas generadas por viento no está claramente comprendido, ver ref. [1]. La RDM debe ser entendida más ampliamente para poder modelarse correctamente, ya que con dichos modelos se obtienen en la práctica las mediciones de los parámetros físicos deseados.

Debido a que existe un gran interés científico en este campo de estudio, en el CICESE se ha construido un canal de olas generadas con viento en el laboratorio de mecánica de fluidos del Departamento de Oceanografía Física, como parte de las actividades relacionadas a un proyecto de investigación apoyado por el CONACYT para estudiar el fenómeno de la RDM. La instrumentación electrónica y el procesamiento digital de señales, actividades correspondientes a la especialidad de electrónica; son altamente indispensables, por lo que el proyecto lo contempla. La instrumentación requerida consta de dos sensores; el sensor activo de microondas, para obtener información sobre la retrodispersión de microondas y un sensor de nivel de agua, necesario para medir la altura de las olas generadas en la superficie del canal. El sensor de microondas constituye a la parte experimental, con la cual se desea obtener información de las olas al sensar la RDM debida a la superficie, mientras que el sensor de nivel

dará información real de las olas en la superficie. Relacionar los datos obtenidos por ambas partes y concluir sobre dicha relación es un tema que se contemplará en los trabajos subsecuentes.

El presente trabajo describe en detalle los instrumentos de medición, adquisición digital de los datos y su procesamiento. Por este motivo es necesario poseer un conocimiento básico de las características físicas de las olas generadas por viento, de las limitantes propias de la instrumentación y de todo el experimento para determinar apropiadamente los parámetros medibles del fenómeno.

I.1 Antecedentes

El punto de partida para el presente trabajo se basa principalmente en las publicaciones de Ebuchi [1] y Rozenberg [2], mismas que hacen referencia al estudio de la RDM debido a olas generadas por viento en laboratorio. En 1995, Lee [3] diferencia la RDM debida al principio de Bragg con la RDM debida a otras causas, dándole a sus experimentos una perspectiva que espera ayuden a identificar los mecanismos fundamentales de la retrodispersión. En la mayoría de los experimentos realizados se obtienen relaciones de la energía de microondas retrodispersada con parámetros del campo de viento generador de las olas.

En las referencias citadas, el análisis inicia empleando el modelo “de dos escalas”, en el cual para ángulos de incidencia de microondas entre 20° y 60° se supone que la retrodispersión se debe a la resonancia de Bragg. Para este caso la cantidad de energía retrodispersada de microondas es proporcional a la densidad espectral de la componente del número de onda del ola que satisface la ecuación:

$$k_w = 2k_e \cos \theta,$$

donde k_w es el número de onda de ola resonante, k_e es el número de onda de la microonda y θ es el ángulo de incidencia de las microondas con respecto a la superficie.

La longitud de onda de las olas superficiales que satisfacen la ecuación están en el intervalo de 1 a 15 cm, ver ref. [4]. Aún cuando la dispersión de Bragg puede ser el efecto dominante para la retrodispersión, efectos de modulación hidrodinámica la pueden afectar.

Las características físicas de los canales de olas en los que efectuaron las mediciones Ebuchi y Rozenberg son diferentes. Sin embargo Ebuchi observó que el intervalo en amplitud para olas superficiales generada por vientos moderados es de 2mm a 30 mm mientras que Rozenberg obtiene olas con frecuencia espectral pico entre 1.51 Hz y 5.47 Hz; las componentes espectrales menos significativas alcanzan una frecuencia máxima de hasta 20Hz.

En [1] y [2] el sensor utilizado para medir la altura de las olas es de tipo capacitivo, de alta sensibilidad, con extrema linealidad, ver ref. [5], y está comprobado ser un sensor adecuado para efectuar la medición de altura de olas superficiales.

La adquisición y procesamiento digital de las señales son usadas en todos los experimentos descritos en las referencias para obtener información en el dominio del tiempo y la frecuencia. La frecuencia de muestreo que usa Rozenberg es de 300Hz para cada instrumento, en series de adquisición de datos de 1 a 2 minutos de duración, utilizando una tarjeta de adquisición de datos comercial con resolución de 12 bits y empleando una PC-486.

El instrumento de microondas utilizado por Ebuchi funciona en la banda X del espectro electromagnético, mientras que Rozenberg utiliza banda Ku. La complejidad y composición del instrumento de microondas es único para cada experimento descrito en las referencias, sin embargo todos los instrumentos son capaces de medir el espectro Doppler y la intensidad de la radiación retrodispersada. Existen experimentos como los realizados por Trizna [6] en el que sólo obtiene información de la intensidad de la señal retrodispersada por la superficie. El tipo de instrumento es determinante para la calidad y el tipo de información que se quiere obtener, ver ref. [2].

I.2 Objetivo

Instrumentar con un sensor activo de microondas y un medidor de altura de oleaje un canal de olas para estudio en laboratorio del fenómeno de la retrodispersión de microondas debida a olas generadas por viento.

I.3 Objetivos Específicos

- a) Medir la altura del oleaje en el canal por medio de un sensor capacitivo.
- b) Implementar un instrumento de microondas en banda X para estimar la intensidad de la energía electromagnética retrodispersada por las olas de viento.
- c) Implementar un método para procesar digitalmente la información adquirida.

I.4 Equipo y método

I.4.1 Equipo

Para la realización del experimento se dispone de equipo de medición como multímetros, osciloscopio y fuentes de alimentación del grupo de electrónica del Departamento de Oceanología. Apoyo técnico sobre dispositivos y mediciones de microondas son accesibles por medio del grupo de dispositivos de alta frecuencia de la División de Física Aplicada. El Laboratorio de Mecánica de Fluidos cuenta con el espacio, el canal de olas y el equipo de cómputo con tarjeta de adquisición de datos y software necesario para adquirir y procesar información digital. Se utilizan componentes electrónicos y de microondas adquiridos con el presupuesto de proyecto. El trabajo en su totalidad es parte del proyecto (El oleaje en regiones costeras, 225080-5-4302-PT), apoyado por CONACYT .

I.4.2 Método

Para lograr los objetivos del presente trabajo, primero se ensambla el canal de olas en el que se realiza el experimento, después se considera efectuar un análisis teórico del fenómeno:

una vez documentado y después de haber obtenido las características físicas necesarias del fenómeno, se buscan los puntos adecuados para colocar e implementar los instrumentos electrónicos de medición en el canal de olas y se procede a efectuar las pruebas de la instrumentación. Una vez que las pruebas han sido realizadas, se procede a adquirir en forma digital las señales obtenidas de la instrumentación para generar archivos en computadora y poder visualizarlos. Para este punto en el desarrollo del trabajo, se realizan pruebas del sistema completo y una vez aprobadas, se procede a la calibración del sistema.

El siguiente paso es implementar un método para llevar acabo el procesamiento digital de la información obtenida de las mediciones, una vez obtenido resultados del procesamiento digital se procede finalmente a analizar los resultados.

II MEDICIÓN DEL OLEAJE CON UN SENSOR CAPACITIVO

II.1 Introducción

La medición de la altura del oleaje proporciona la información necesaria para poder estimar el espectro de frecuencia de la superficie, ver ref. [7]. Para medir adecuadamente algún fenómeno físico, se debe conocer o al menos tener una idea aproximada de lo que se va a medir y contar con un sensor adecuado para efectuar dicha medición.

Aunque el canal de olas utilizado en este experimento es diferente a los utilizados por Ebuchi [1] y Rozenberg [2], ambos experimentos generan olas con viento donde las características físicas de las olas son similares, por lo que se espera que las características de las olas generadas por viento en este experimento sean semejantes. De [1] se obtiene que el intervalo en amplitud de las olas para vientos moderados es de 2mm a 30 mm y de [2] se obtiene que la frecuencia espectral pico de las olas varía de 1.51 Hz a 5.47 Hz; con componentes espectrales menos significativas que se extienden hasta los 20 Hz.

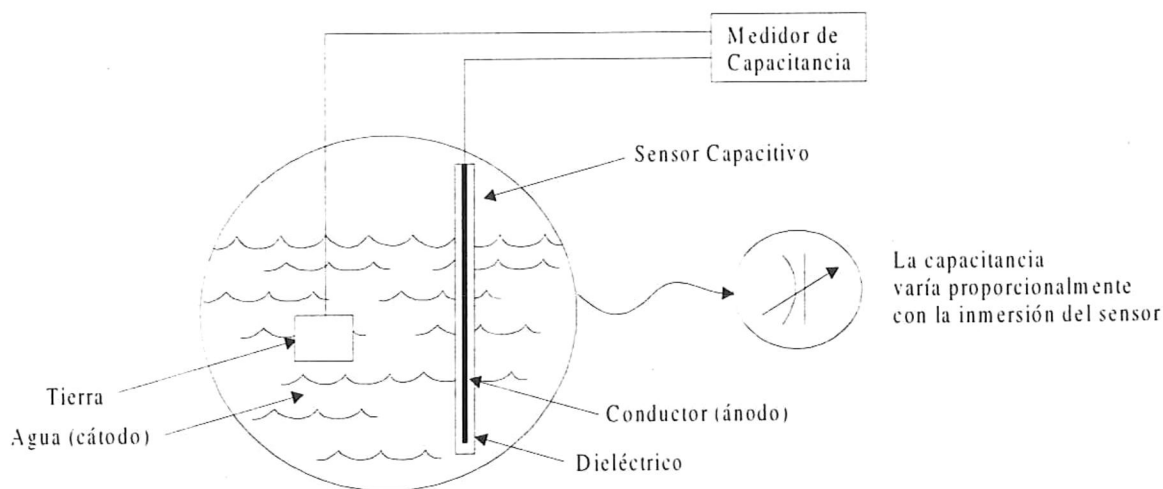


Figura 1 Dispositivo capacitivo para la medición de altura de oleaje.

II.2 Sensor Capacitivo

De los sensores utilizados en la medición del nivel de agua, los sensores capacitivos son los más aptos para la medición de la altura de olas superficiales generadas por viento, las cuales tienen una altura pequeña en comparación con su longitud de onda. Un sensor capacitivo consta de un alambre metálico recubierto por una capa de dieléctrico. El sensor se sumerge en el agua como se muestra en la figura 1, donde la capacitancia del sensor varía proporcionalmente a su inmersión en el agua que es utilizada como plano de tierra.

El sensor capacitivo utilizado fué desarrollado durante los noventa en la Universidad John Hopkins por Rick Chapman y F.M. Monaldo [5]. El sensor capacitivo es un alambre de Tantalio recubierto por una capa de óxido de Tantalio; El Tantalio es un metal. Al formar una capa delgada de óxido de Tantalio (Ta_2O_5) que es un excelente dieléctrico, se obtiene un sensor extremadamente lineal y con una gran sensibilidad, ver la figura 2, obtenida de [5].

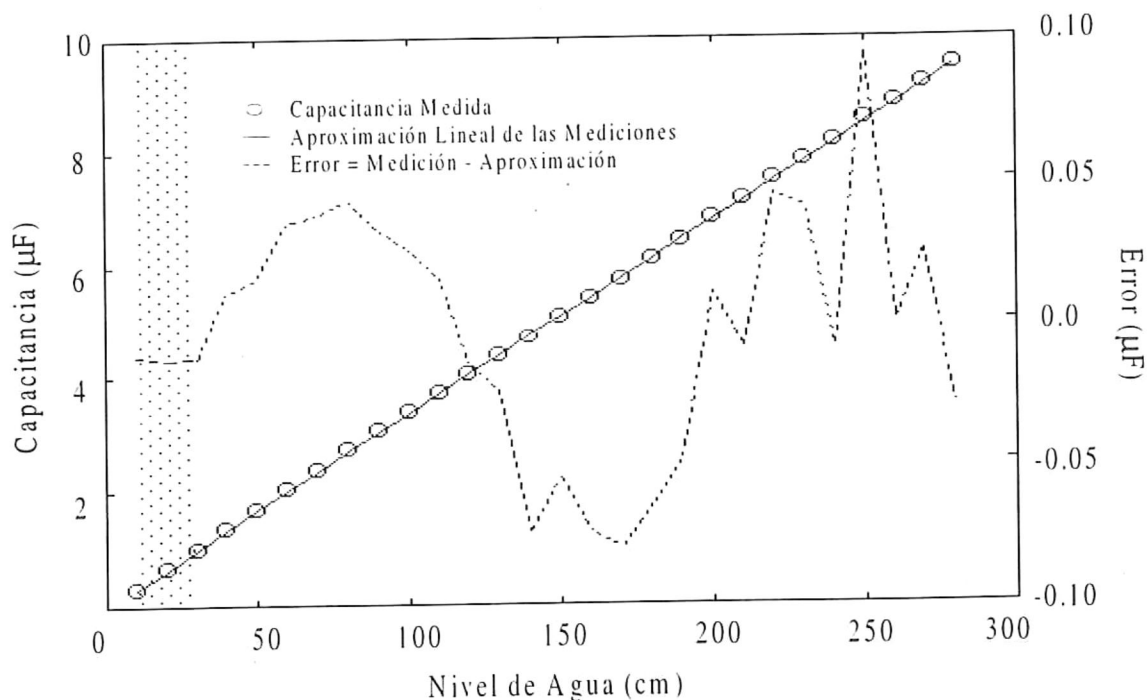


Figura 2 Gráfica de calibración para un sensor capacitivo de Óxido de Tantalio.

En la figura 2 se muestra una ajuste lineal de las capacitancias medidas y el error del ajuste. Aunque el error varía y representa en algunas alturas hasta el 1.6% (para 250cm) de la capacitancia medida, el error no representa problema alguno para nuestro propósito, ya que las mediciones estarán dentro del intervalo sombreado donde el error es casi constante y cercano a cero. El intervalo se debe a que la altura del nivel de agua en el canal de olas es de aproximadamente 25cm y no se esperan alturas de ola mayores a los 3cm.

De [9] se obtienen las siguientes características del sensor:

a) No es sensible a la salinidad del agua. Pruebas realizadas por Chapman no muestran que cambios en la salinidad afecte alguna de las características del sensor.

b) La linealidad está determinada por la uniformidad de la capa del dieléctrico. Debido a que el proceso de oxidación del Tantalio es por electrólisis, la uniformidad es muy buena.

c) El sensor muestra una sensibilidad de 30nF/cm que es 3000 veces mayor a la de otros sensores capacitivos.

II.3 Electrónica del Instrumento

II.3.1 Introducción

El cambio de capacitancia en el alambre se mide por medio de un circuito simple de carga y descarga propuesto en [5], donde el tiempo de descarga de la señal varía proporcionalmente a la inmersión del sensor en el agua. En la figura 3 se muestra el diagrama a bloques del circuito.

El circuito propuesto en [5] es probado como satisfactorio para mediciones de olas con alturas de 1.5m a 3.0m. Por lo que en el presente trabajo se realizan los cambios necesarios al circuito para efectuar mediciones de olas con alturas de entre 2mm y 5mm. A continuación se describen los cambios realizados al circuito y también se analizan los efectos secundarios provocados por dichos cambios en el funcionamiento general del circuito.

II.3.2 Funcionamiento del Circuito

Un circuito oscilador proporciona una señal cuadrada (a) de 0 a 5V de 200Hz con un ciclo de trabajo del 50%, la cual se encarga de excitar al circuito de carga y descarga provocando la señal de respuesta (b). La respuesta de carga y descarga "b" entra a un circuito comparador para obtener una señal (c) modulada en amplitud de pulsos (PWM) que se integra por un filtro paso bajas de tercer orden con una frecuencia de corte de 20Hz, la integración resulta en una conversión de la variación del ancho de los pulsos en una señal (d) cuya amplitud es proporcional a la inmersión del sensor en el agua.

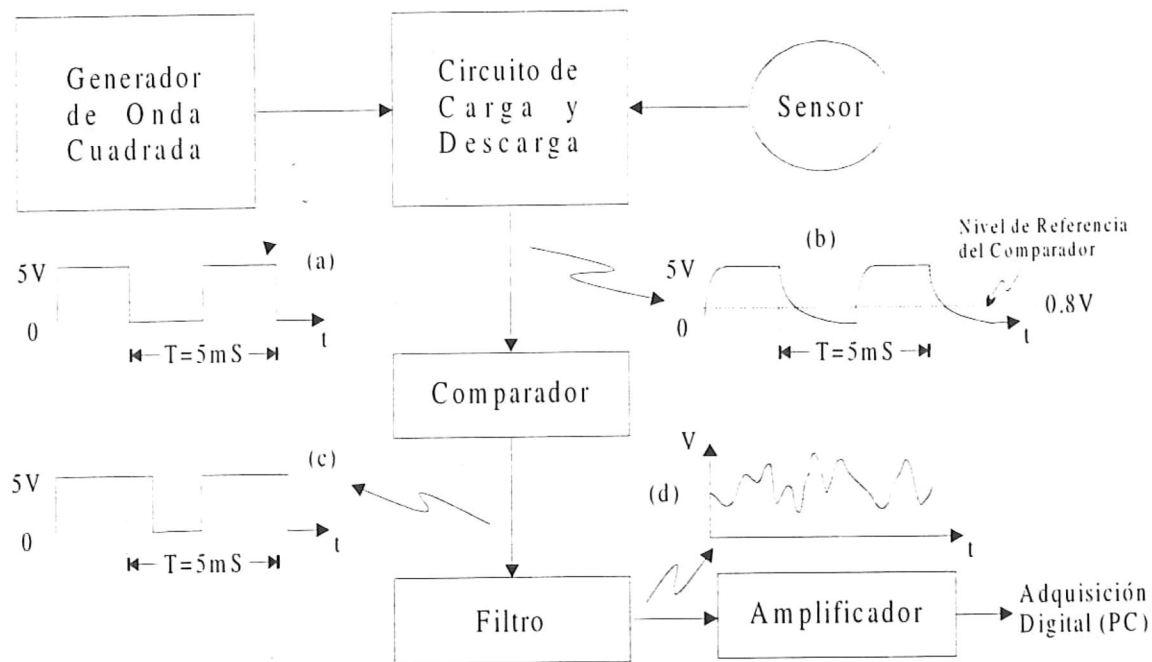


Figura 3 Diagrama a bloques del sensor.

De [5] se obtiene un circuito con el cual funciona el sensor capacitivo, por lo que se utiliza como circuito base para el experimento. El circuito tiene cálculos para obtener mediciones de olas con alturas de hasta 2m y en sus resultados presenta datos que tienen una

frecuencia espectral pico de 0.2Hz, la cual es menor al intervalo de frecuencia esprado de 1.51Hz a 5.47Hz. Estas características no son las apropiadas para el experimento, por lo que a continuación se hace un análisis de las características mas importantes que se consideran para que el circuito tenga un adecuado funcionamiento dentro de los parámetros esperados en el experimento.

II.4 Parámetros Importantes

II.4.1 Frecuencia del Oscilador.

El proceso en el que el circuito convierte el tiempo de descarga de la señal “b” a “c” es un proceso de modulación, el cual modifica el ancho de los pulsos de la señal “c”. Este tipo de modulación se conoce como modulación de ancho de pulsos y genera un espectro en frecuencia como el de la figura 4, ver ref. [10]. (suponiendo que se está muestreando una señal senoidal de frecuencia $f_{\max}$ con una señal de muestreo de frecuencia f_s).

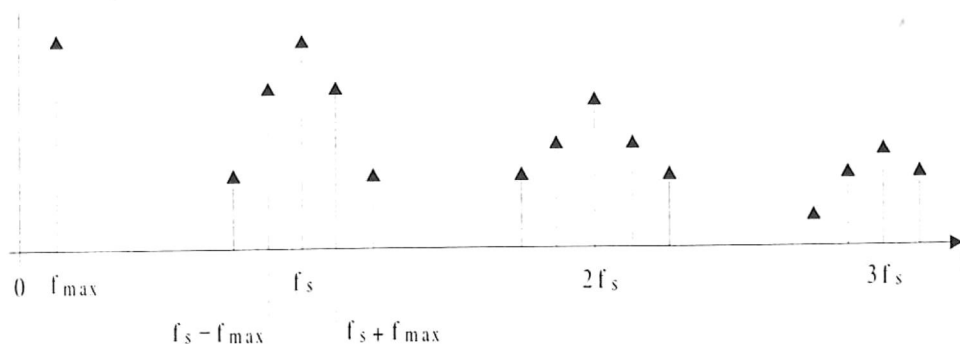


Figura 4 Espectro de frecuencia para PWM.

En el diagrama de la figura 3, la señal de muestreo es la señal “a”. Lo que provoca que se module el ancho de los pulsos de “c” es el tiempo de descarga del sensor, el cual es proporcional a la altura del nivel de agua. Así que de manera indirecta la altura del agua modula la señal “c”. Por lo que la frecuencia máxima de oscilación en la altura de las olas (que por el momento consideraremos cuasi senoidales) se asimila como $f_{\max}$.

espectro en frecuencia de las mediciones tomadas por el instrumento, se debe esperar una componente de corriente directa, esta cuestión se discute en el siguiente capítulo.

II.4.3 Tiempo de Descarga

Debido a la disminución del periodo de la señal del oscilador y que el tiempo de descarga del capacitor es mayor que 2.5ms, que es el máximo tiempo de descarga que otorga la señal de excitación de 200Hz, ocasiona la saturación en la señal de salida del sensor. Esto da lugar al cálculo de un valor de R que permita descargar al capacitor en un tiempo menor a 2.5ms.

La siguiente ecuación, obtenida de [11], modela el voltaje de descarga de un circuito RC:

$$v(t) = Ae^{-t/RC}, \quad (1)$$

donde para nuestro experimento $A=5V$ (voltaje del capacitor en el instante en que inicia su descarga), C es la capacitancia del sensor a una altura determinada y R es el valor de resistencia del circuito (ver figura 6 (a)).

Despejando la ecuación 1 obtenemos:

$$t = RC(\ln A - \ln v(t)) \quad y \quad (2)$$

$$R = t / C(\ln A - \ln v(t)). \quad (3)$$

Donde en la ecuación 3 $v(t)$ es el valor al que queremos que llegue la ecuación 1 en el instante de tiempo t .

Sustituyendo en la ecuación 3 los parámetros $A=5V$ $t=2.5ms$, $v(t)=0.8V$ (voltaje de referencia del comparador) y $C=0.5\mu F$ que se obtiene de la figura 2 a una altura de 25cm, se obtiene un valor aproximado de $R=1.3K\Omega$.

En la figura 6(a) se muestra el circuito de carga/descarga y en 6(b) la curva de descarga de la ecuación 1 con los valores de $A=5V$, $C=0.5\mu F$ y $R=1.3K\Omega$.

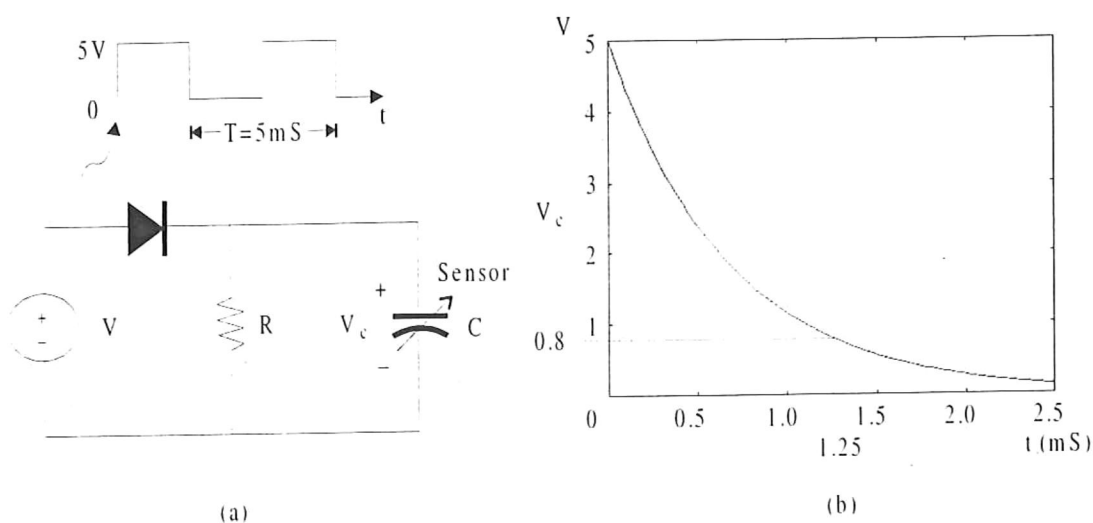


Figura 6 Descarga del sensor, a)Circuito de carga y descarga y b) Curva de descarga.

II.5 Adquisición Digital

Para registrar de manera digital la salida del instrumento, se utilizó una tarjeta de adquisición de datos modelo PCL-818HD con una resolución de 12 bits, manejada por un *software* comercial compatible con dicha tarjeta, tanto la tarjeta como el *software* están integrados en una PC-486.

El muestreo de la señal de salida del instrumento se efectúa con una frecuencia de 200Hz utilizando la escala de entrada de la tarjeta de 0 a 1.25V, proporcionando una sensibilidad de 0.0003 V/bit. Los datos se almacenan en series de 150 seg.

II.6 Resultados

II.6.1 Calibración del Instrumento

En la figura 7, se muestran las lecturas de voltaje a la salida del instrumento para alturas de nivel de agua dentro del canal de olas desde los 10mm a los 30mm.

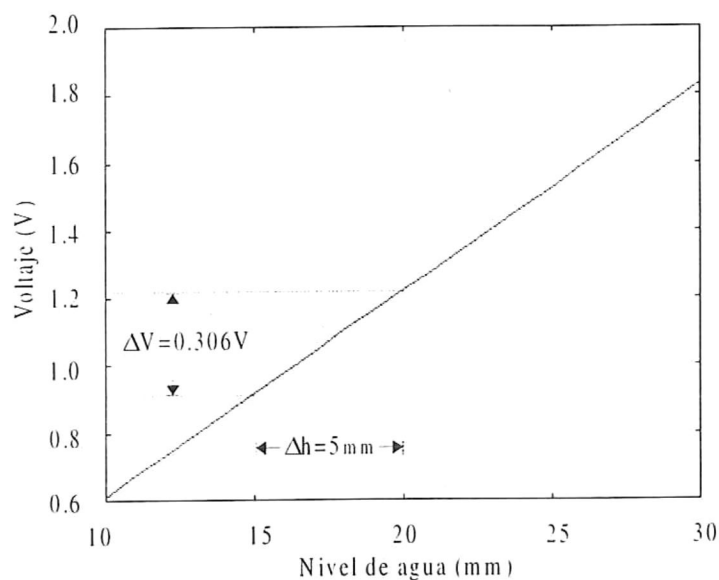


Figura 7 Gráfica de calibración del instrumento.

De esta gráfica se obtiene la relación k , que relaciona el voltaje de salida con la altura del nivel de agua

$$k = \Delta h / \Delta V.$$

Sustituyendo los valores obtenidos de la figura 7, se obtiene que

$$k = 5 \text{ mm} / 0.306 \text{ V}$$

$$k = 1.634 \text{ cm/V.}$$

Con esta relación, se puede convertir el voltaje del instrumento a altura de nivel de agua (en cm) al multiplicar el voltaje obtenido del instrumento por el valor calculado de k .

Por ejemplo un voltaje de 0.8V representaría una altura h de

$$h=k(0.8V)$$

$$h=(1.634\text{cm/V})0.8V$$

$$h=1.307\text{cm.}$$

Debido a que el intervalo de entrada de la tarjeta de adquisición digital de datos es de 0 a 1.25V, la salida del instrumento se modificó con un voltaje de *offset*, para que la altura de 25cm ocasione en la salida del sensor un voltaje de 0.32V, en la figura 8 se muestra la gráfica del voltaje de salida del sensor con el *offset* modificado.

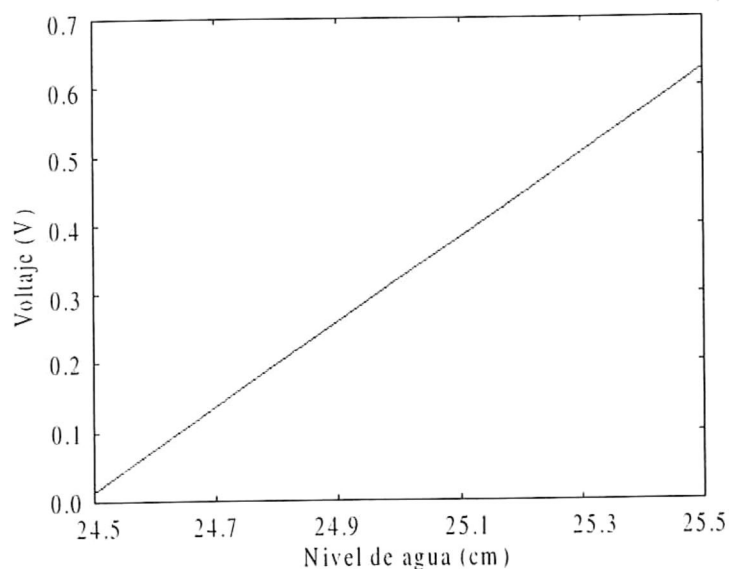


Figura 8 Gráfica de calibración del instrumento con *offset*.

La diferencia entre la figura 9 y la figura 8, es que en la figura 9 el voltaje está dentro del intervalo permitido por la tarjeta de adquisición de datos (0 a 1.25V), sin embargo la relación $k=16.34\text{cm/V}$ de la gráfica 8 se mantiene.

II.6.2 Linealidad, Histéresis, Intervalo de Operación y Sensibilidad

De la figura 9 se puede observar que el sensor tiene una alta linealidad y prácticamente no tiene histéresis, los resultados mostrados en la figura 8 son prácticamente los mismos con mediciones realizadas desde los 10cm hasta los 30cm, que las tomadas de los 30cm a los 10cm.

El intervalo de operación del sistema completo (instrumento y sistema de adquisición digital de datos) es limitado por el sistema de adquisición digital, donde alturas menores cercanas a los 20cm provocarían una salida menor a 0V (ver figura 9), por lo que se considera que 20cm es la menor altura de nivel de agua a la cual el sistema opera adecuadamente. El límite superior es obtenido de la figura 2, en la cual se observa que hasta alturas de 30cm el error es muy pequeño, pero para alturas mayores se debe considerar que tanto afectaría la salida del sensor, por lo que la operación del sistema se limita a alturas menores de 30cm.

Para la sensibilidad del sistema se toma en cuenta que la tarjeta de adquisición de datos cuenta con una resolución de 12bits (4096 niveles) en un intervalo de 0 a 1.25V. Considerando que un incremento de 1.25V representado altura de nivel es $k(1.25V)=2.05\text{cm}$, se encuentra una sensibilidad de $2.05\text{cm} / 2^{12} = 0.005\text{mm/nivel digital}$.

II.6.3 Información Digital

En la figura 9 se muestran los resultados de la adquisición digital de datos del instrumento, para mediciones de olas generadas con diferentes velocidades de viento. La figura 9 muestra un fragmento de la serie de datos adquiridos al generar olas mecánicamente en el canal, esto con el propósito de verificar el funcionamiento del instrumento. La información se grafica en volts contra número de muestra, que es la forma en la cual se obtiene directamente del sistema de adquisición digital de datos. En éstas gráficas, las escalas no están modificadas para presentarse en altura de ola (cm) contra tiempo (s).

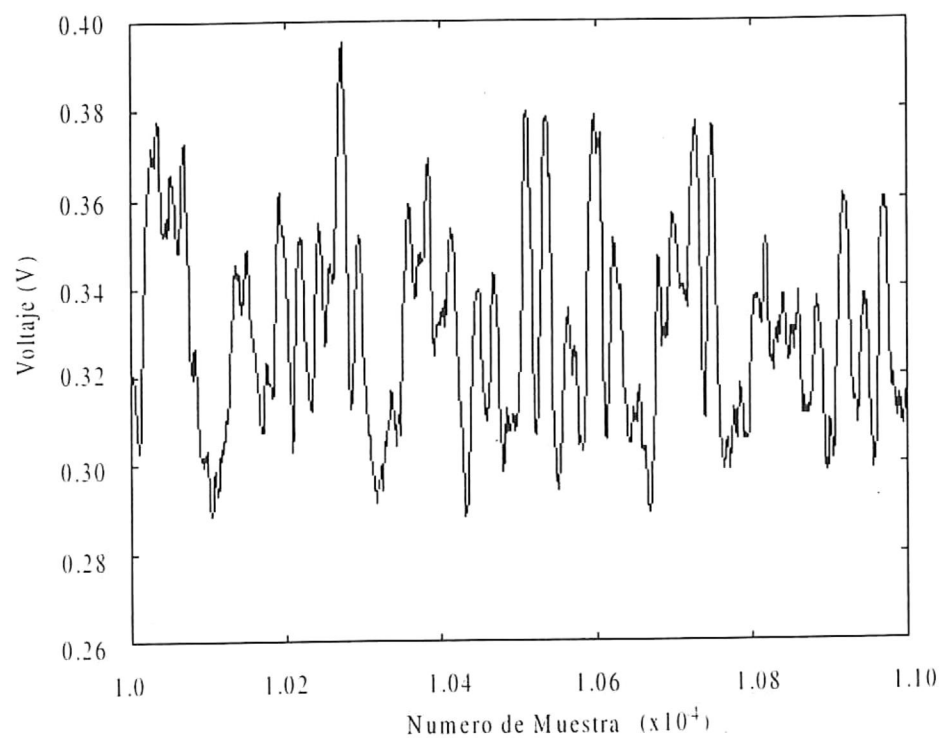


Figura 9 Serie de datos adquiridos por el sistema.

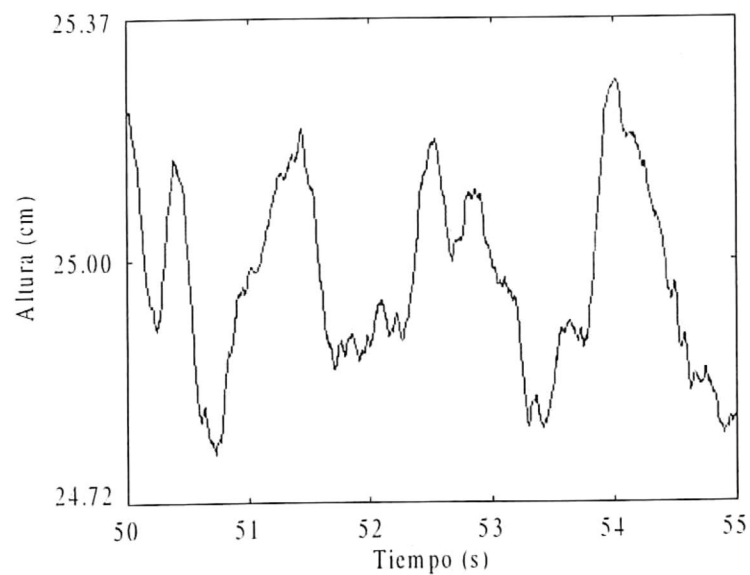


Figura 10 Resultados con los ejes en unidades reales.

En la figura 10 se presentan datos de la misma serie que se grafica en la figura 9, pero con los ejes transformados al dominio de altura de nivel de agua (cm) y del tiempo (s). En la figura 11 se muestra un fragmento de una serie de datos adquiridos para olas generadas por viento.

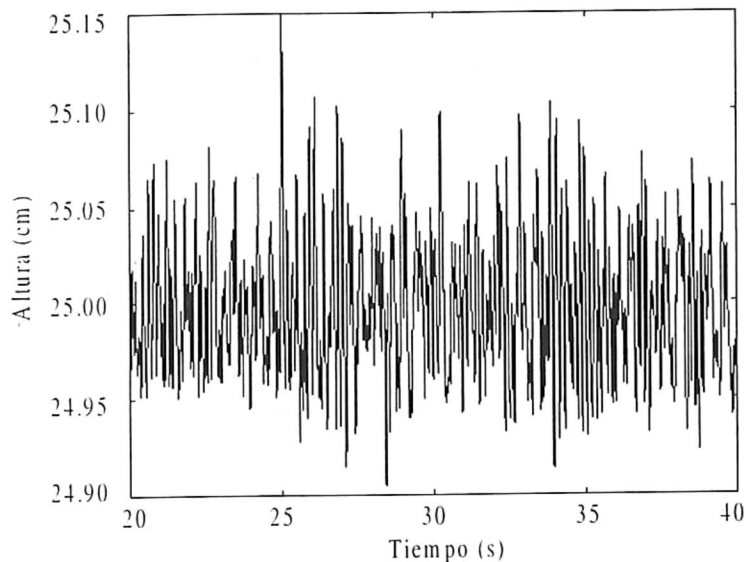


Figura 11 Resultados de olas generadas por viento.

La figura 12 muestra porciones de las series de datos adquiridas de olas generadas por viento para diferentes intensidades (ver figura 12(a) y figura 12(b)) y también una parte de la serie de datos adquirida de olas generadas mecánicamente, dicha serie mostrada en la figura 9.

En la figura 12(a) se nota que la altura de las olas es de aproximadamente 1mm, mientras que en 12(b), mayor número de olas tienen una amplitud alrededor de los 2mm aproximadamente. La diferencia notada de 12(a) y 12(b) es debido a la intensidad de viento con la que se generan dichas olas. En 12(b) la velocidad del viento es mayor que en 12(a).

En 12(c) la amplitud se aproxima a los 4mm, dicha altura es notablemente mayor que las de 12(a) y 12(b), pero es información de una serie de datos de olas generadas mecánicamente, útil sólo para fines comparativos.

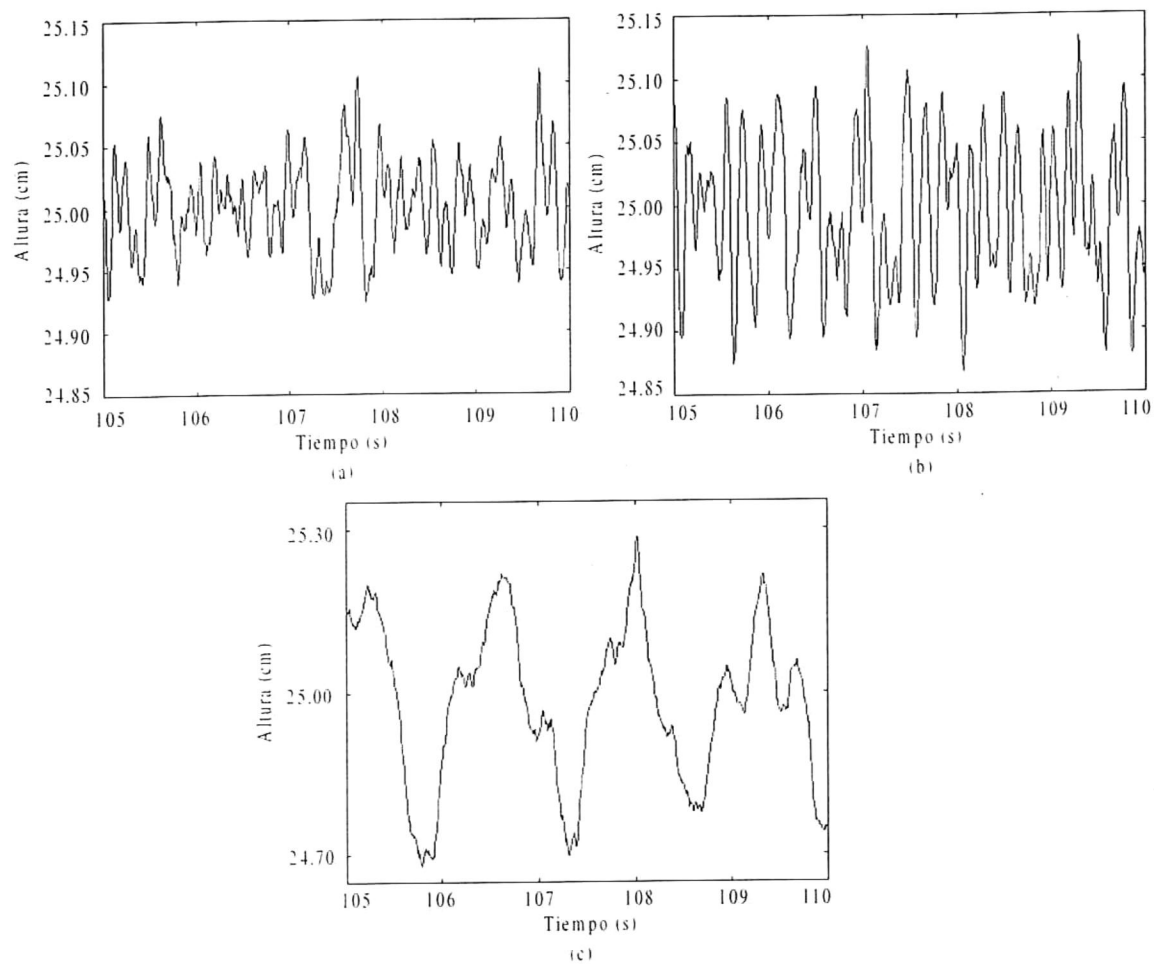


Figura 12 Fragmentos de series de datos adquiridas. a) y b) Datos de olas generadas a diferentes velocidades de viento. c) Datos de olas generadas mecánicamente.

III PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA ALTURA DEL OLEAJE

III.1 Introducción

Medir el nivel de la superficie del agua con respecto al tiempo en un punto dado, como se muestra en los resultados del capítulo dos, no es información suficiente de la cual se pueda obtener parámetros característicos de las olas generadas por viento, por lo que se aplica un análisis, que examina la serie de datos temporales para poder obtener su contenido en frecuencia, la cual es información de mayor interés.

El presente capítulo trata sobre cómo obtener el espectro en frecuencia de la información temporal adquirida por el procedimiento descrito en el capítulo dos. Para dicho propósito, se toma como base bibliográfica la publicación de Kinsman [7] dedicado al análisis de datos en oceanografía física y la de Emery [13] que trata sobre olas de viento.

III.2 Característica Aleatoria de la Superficie

Si se observa a simple vista la superficie del mar o el reflejo que produce de la luz del sol, parece una superficie muy compleja, pero es sencillo asociar a ella uno o más movimientos oscilatorios dominantes acompañados de variaciones aleatorias significativas y a veces no tanto. Este comentario es necesario para empezar a visualizar el fenómeno como un fenómeno aleatorio con cierto comportamiento periódico dominante.

El principio en el que se basa la obtención del espectro de frecuencia (ver ref. [13]), es en considerar el fenómeno como un proceso aleatorio. Comenzando por comprender que el proceso está representado por una serie de datos infinitos aleatorios y que existe la imposibilidad de medir y registrar una serie infinita de datos. De la serie infinita solo se obtienen mediciones y registros de pequeñas "partes" de la serie. Lo que se hace con estas pequeñas partes es promediarlas para llevar a cabo su análisis. Para que el análisis de estas pequeñas partes sea válido para el resto de la serie infinita, ésta se debe considerar estacionaria (ver ref. [7]), para así

poder esperar que las características obtenidas del promedio de las “partes” sean características representativas de toda la serie.

Considerando las suposiciones sobre las características de la serie infinita, es entonces suficiente contar con mediciones y registros de series finitas de información para su análisis y así obtener resultados que representen de manera general las características dominantes del fenómeno.

III.3 Análisis de Fourier

El objetivo principal de analizar la serie de datos en el dominio de la frecuencia es poder separar oscilaciones periódicas de oscilaciones aperiódicas o variaciones aleatorias y conocer la forma del espectro en frecuencia, ver ref. [13].

Utilizando el análisis de Fourier es posible representar a una función periódica por medio de una suma de senos y cosenos de amplitud y frecuencia diferentes, ver ref. [14], de [13] se obtiene que dicha capacidad se extiende a señales discretas. Aunque el fenómeno de olas generadas por viento en laboratorio sea un proceso aleatorio, se justifica el uso del análisis de Fourier porque, para obtener el espectro de potencia (PSD) de una señal aleatoria discreta se aplica el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) a las muestras discretas de la señal aleatoria, ver ref. [13].

III.4 Procedimiento

Para la obtención del espectro en frecuencia de la series de datos se efectua el procedimiento obtenido de [13], que se describe a continuación.

III.4.1 Organización de los Datos

En la PC se guardan archivos de 30KB, que pertenecen a una serie de datos muestreada a 200Hz con duración de 150s y una frecuencia de muestreo de 200Hz. En la figura 13(a), se muestra la serie de datos perteneciente al muestreo original. Estos datos se divididen en bloques

de 1024 datos, en donde 1024 es una potencia de dos, lo que es un requisito para calcular la FFT, ver ref. [16]. En la figura 13(b) se muestra un bloque de 1024 datos obtenido de la serie mostrada en la figura 13(a); este bloque se muestra con la media eliminada.

La división de la serie original en pequeños bloques es parte del proceso para obtener un espectro más liso, este aspecto se trata en el último tema del procedimiento.

III.4.2 Eliminación de la Media y Tendencia

De [13] se obtiene que la tendencia y la media de los datos se elimina para evitar la distorsión de las componentes espectrales de baja frecuencia.

En la figura 13 (a) no se observa que la serie tenga tendencia alguna, por lo que solo se procede a la eliminar la media. En la figura 13(b) se muestra un bloque de datos $y_k(n)'$ con la media eliminada según la formula

$$y_k(n)' = y_k(n) - \underline{y(n)}$$

donde $y_k(n)$ es un bloque de 1024 datos sin eliminar la media y $\underline{y(n)}$ es la media de cada bloque.

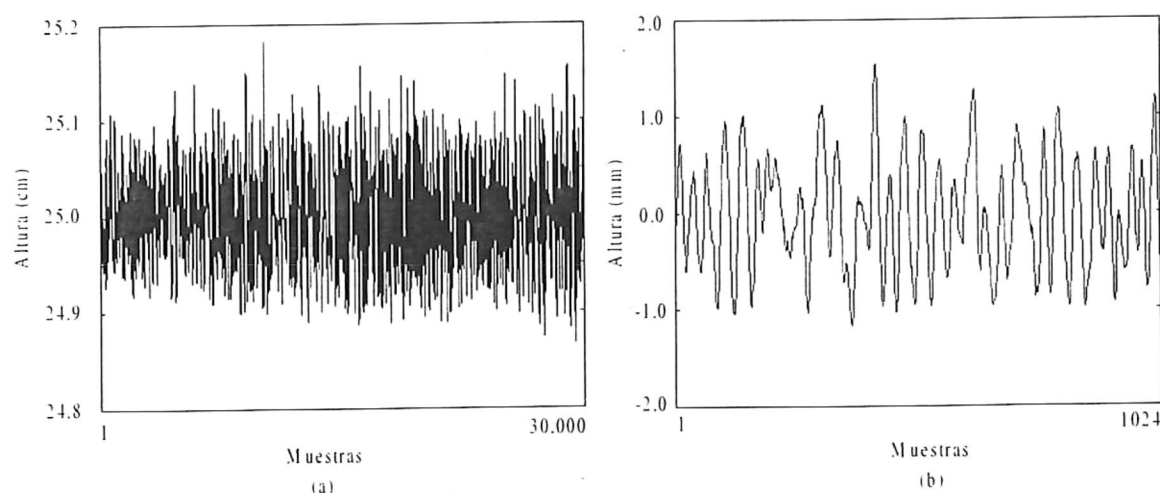


Figura 13 Series de datos. a) Gráfica de 30,000 muestras y b) Bloque de 1024 muestras.

III.4.3 Aplicación de Ventana

El proceso de obtener una serie finita truncada de datos (en bloques), tiene como consecuencia el efecto de aplicar una ventana rectangular a la serie original de datos, generando el fenómeno de Gibbs (ver ref. [14]) que ocasiona la distorsión del espectro en frecuencia, independientemente de la información que se tenga en la serie truncada, ver ref. [13].

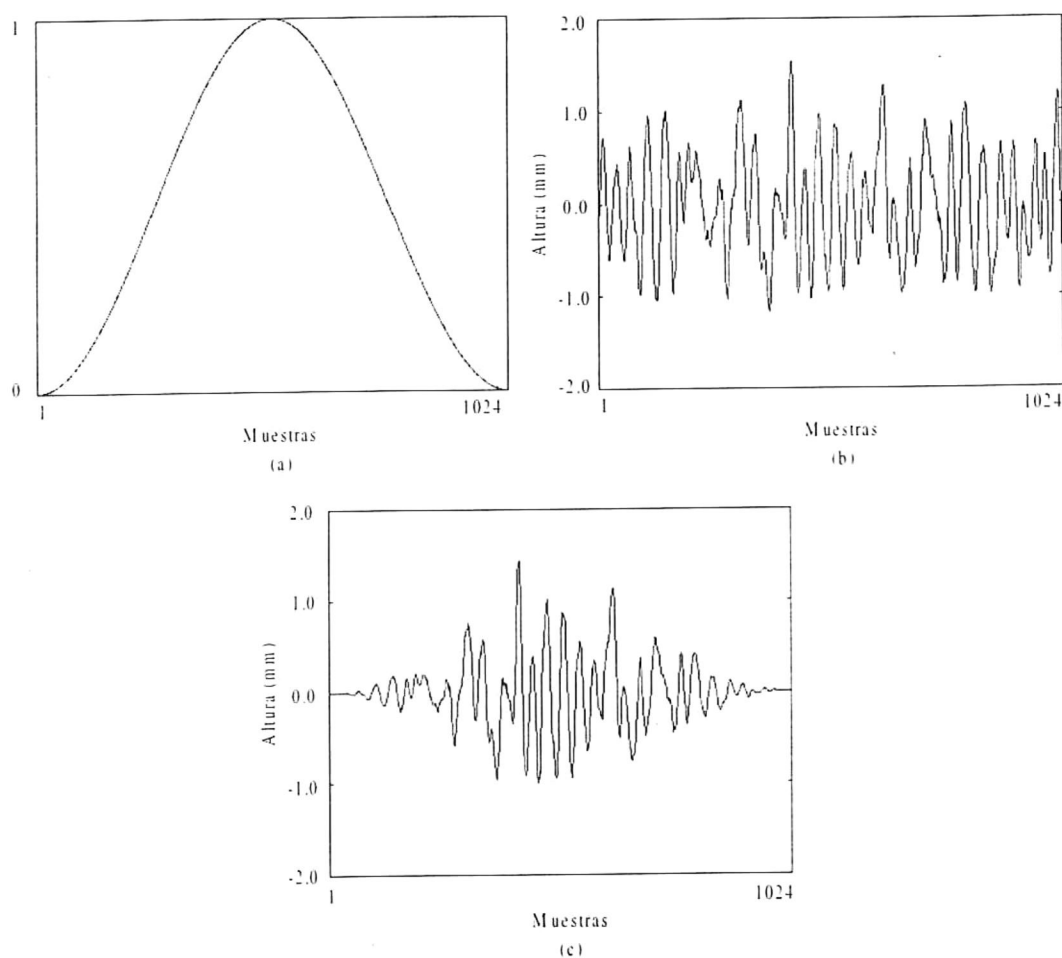


Figura 14 Aplicación de la ventana Hanning, a) Ventana Hanning, b) Bloque de datos sin la media y c) Multiplicación en tiempo de la ventana y el bloque de datos sin media.

El obtener un registro finito de una serie infinita, equivale a una multiplicación de la señal $y(n)$ y una ventana rectangular en el dominio del tiempo; en el dominio de la frecuencia esta operación es una convolución de sus espectros, donde el espectro de la ventana rectangular es una función $\text{sinc}(x)$, la cual tiene grandes lóbulos laterales que ocasionan la transferencia de energía de las componentes menores a las mayores y viceversa al convolucionar sus espectros, ver ref. [13].

Para reducir el fenómeno de Gibbs (ver ref. [13]), se multiplica cada bloque de datos con una ventana Hanning (ver figura 14(a)) de igual número de muestras que el bloque de datos, debido a que el espectro de la ventana Hanning tiene lóbulos laterales menores que la función $\text{sinc}(x)$, la transferencia de energía es menor y la distorsión del espectro se disminuye. En la figura 14(c) se muestra un bloque de datos después de aplicarle en el dominio del tiempo la ventana Hanning a un bloque de datos sin media, mostrado en la figura 14(b).

III.4.4 Cálculo del PSD

El espectro de potencia de una señal aleatoria discreta $y(n)$ está definida como la transformada discreta de Fourier de su función de autocorrelación (ver ref. [15]). El espectro de potencia ó el espectro de densidad de potencia (PSD) describe como se distribuye la potencia de la señal en el espectro de frecuencia.

Una aproximación del espectro de potencia para una señal aleatoria discreta se muestra en la ecuación obtenida de [15]

$$S_{xx}(\omega) = (1/N) |X_N(\omega)|^2$$

Donde $X_N(\omega)$ es la transformada discreta de Fourier (TDF) de una serie discreta con N datos; el cálculo de la TDF se computa eficientemente utilizando un algoritmo que calcule la FFT.

En la figura 15 se presenta el PSD de la serie mostrada en la figura 13(a). Esta aproximación del espectro puede ser suavizado al aplicarle alguna técnica adecuada.

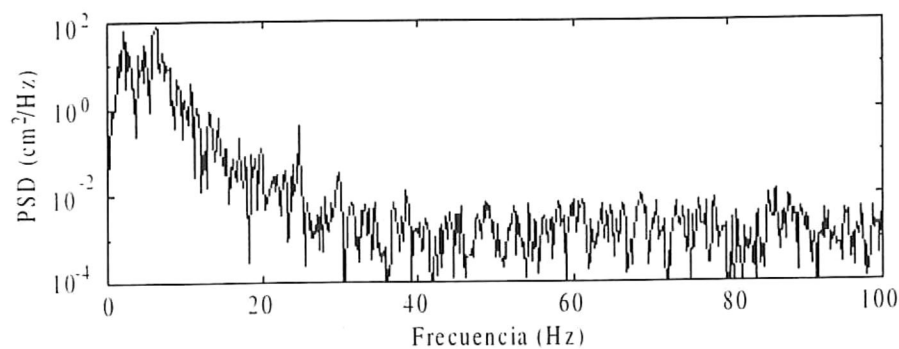


Figura 15 PSD de una serie de 30,000 datos.

III.4.5 Disminución del Error en la Estimación del PSD

Una forma sencilla para suavisar el espectro es el método de promedio, que consta en dividir la muestra en bloques contiguos, calcular el espectro ordinario a cada bloque y finalmente promediarlos.

De [13] se obtiene que los bloques en que se divide la muestra pueden ser bloques traslapados y no contiguos como se había mencionado, este traslape se hace necesario cuando se ha aplicado una ventana a cada bloque antes de calcular su espectro.

La siguiente gráfica muestra la aproximación de la PSD suavizada utilizando el método de promedio.

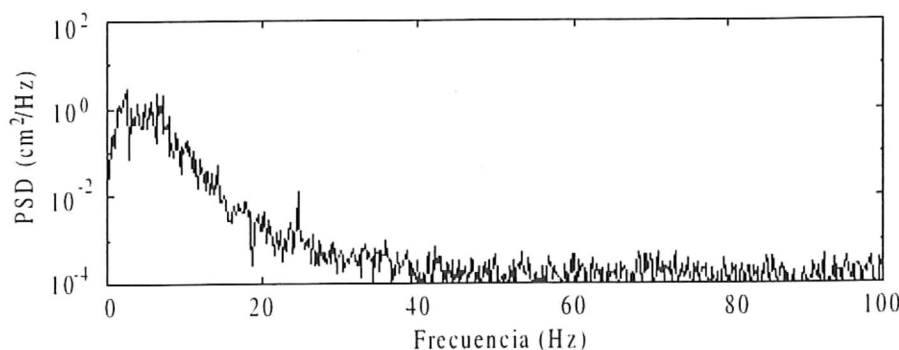


Figura 16 PSD suavizado por el método de promedio.

El objetivo de promediar el espectro no es "ver" una disminución de los picos apreciables en el PSD, si no que se desea distinguir los picos significativos de los que tienden a aparecer y desaparecer del PSD calculado para cada bloque.

El dividir la serie original y promediar la PSD de cada bloque para obtener un promedio de todos los bloques disminuye la resolución de frecuencia del PSD promedio, pero mejora la confiabilidad de cada pico, por lo que se hace necesario en algunos casos considerar esta desventaja.

III.5 Resultados

III.5.1 Procedimiento

De las figuras 15 y 16 donde se muestran los espectros de potencia sin suavisar y suavizado repectivamente, se observa una mejora notoria del espectro suavizado al no suavizado con respecto a la disminución de picos no representativos en el PSD.

Debido a la mejora del espectro suavizado, se utiliza el método de promedio, dividiendo los bloques en segmentos de 1024 datos con un traslape del 50% y aplicando la ventana Hanning a cada bloque de datos se calcula el PSD aproximado de las diferentes series de muestras obtenidas en el capítulo dos, donde las muestras estan tomadas con una frecuencia de 200Hz.

III.5.2 Resolución de Frecuencia

De [13] se obtiene que la resolución de frecuencia (Δf) del espectro está dado por:

$$\Delta f = 1/N\Delta t,$$

donde N es el número de datos en la serie con ventana rectangular y Δt es el intervalo de tiempo entre las muestras. Para ventanas no rectangulares se estima que la resolución máxima puede ser calculada por

$$\Delta f_{\max} = 2/N\Delta t.$$

Para obtener la resolución de las aproximaciones de los espectros que se presentan a continuación, se calcula $\Delta f_{\max}$ para series de datos con $N=1024$ y $\Delta t=0.005s$

$$\Delta f_{\max} = 2/(1024*0.005s)$$

$$\Delta f_{\max} = 0.4Hz.$$

III.5.3 Espectro de Olas Generadas por Viento

En la figura 17 se muestra el espectro para la serie de muestras de olas generadas con menor intensidad de viento, mientras que en la figura 18 se muestra el espectro para las olas generadas con mayor intensidad de viento.

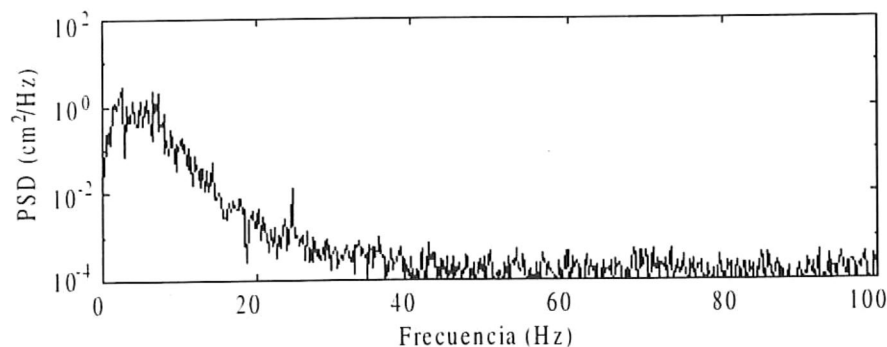


Figura 17 PSD para olas generads con viento.

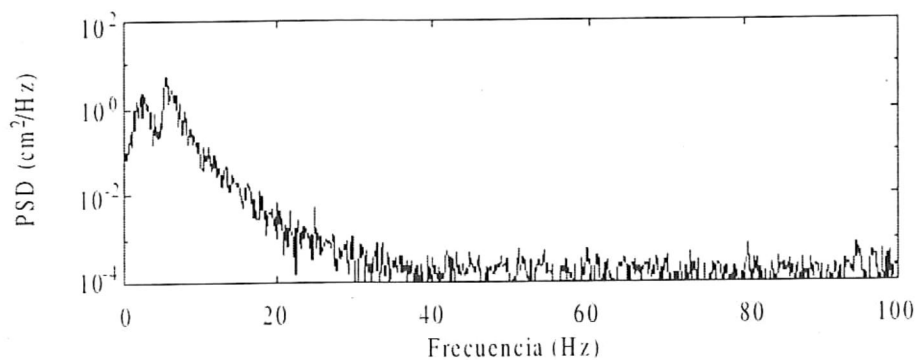


Figura 18 PSD para olas generadas con viento.

En la figura 19 se muestra el espectro para la serie de datos de olas generadas mecánicamente.

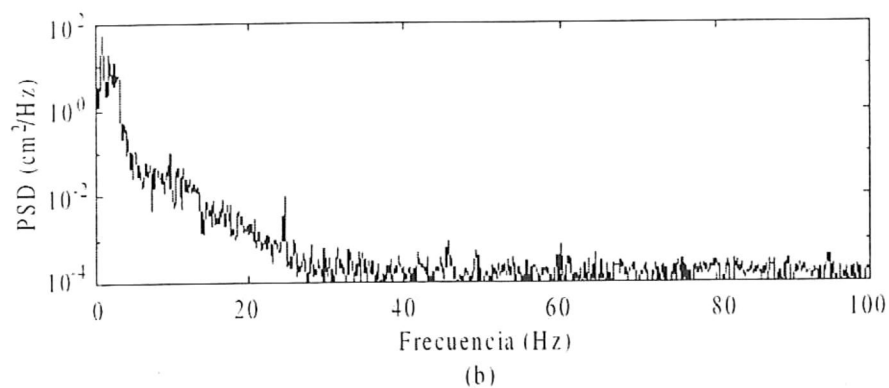
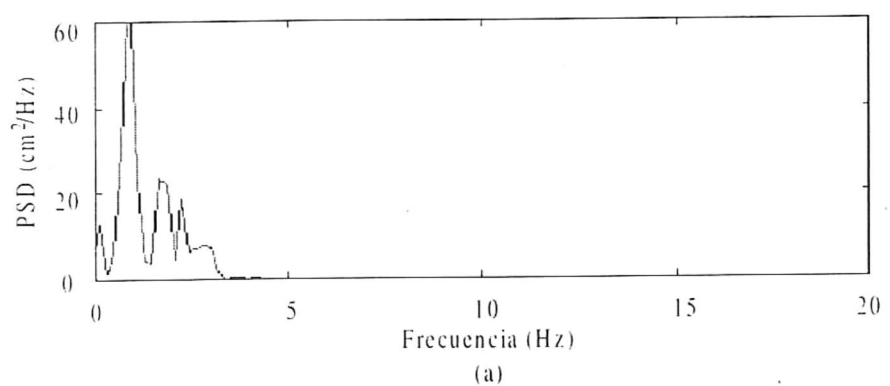


Figura 19 PSD para olas generadas mecánicamente. a) Escala lineal y b) Escala logarítmica.

IV RETRODISPERSIÓN DE MICROONDAS EN LA SUPERFICIE

IV.1 Percepción Remota

La percepción remota por satélite es una técnica de gran importancia para mediciones oceanográficas en las que se requiere de una perspectiva global o regional. La percepción remota utilizando satélite (ver figura 20) radia una señal electromagnética dirigida a la superficie del océano, el haz de la antena ilumina cierta área de la superficie del mar, dicho haz sigue una trayectoria que en determinado tiempo le permite recorrer toda la superficie del globo. Del área iluminada por el haz de la antena del satélite se sensa la energía electromagnética que la superficie del mar dispersa en dirección al satélite. La forma de sensar y analizar la energía dispersada por la superficie depende totalmente del fenómeno que se desea estudiar.

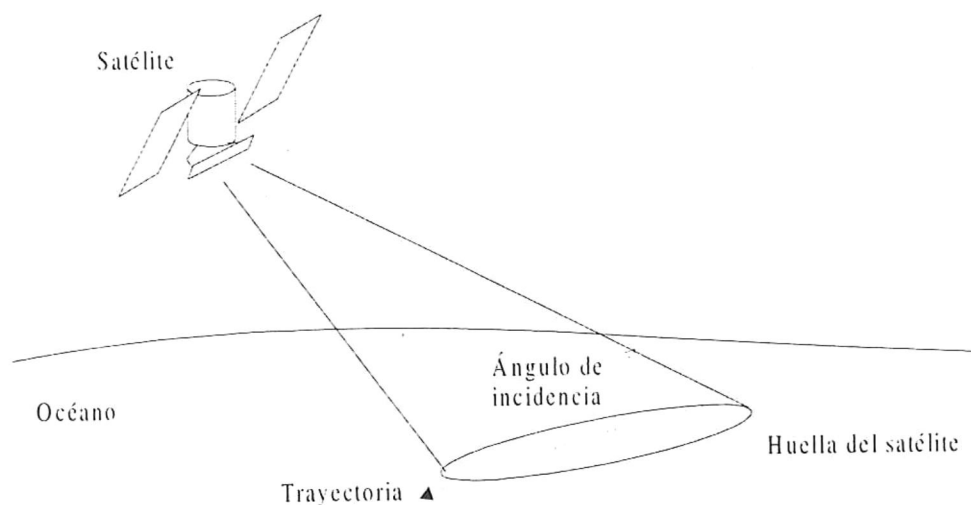


Figura 20 Percepción Remota por satélite.

Con la técnica de percepción remota se pueden obtener mediciones de la altura del nivel del mar en una región y consecuentemente de todo el planeta. Utilizando Radars de Apertura Sintética (SAR) se pueden obtener imágenes de la energía dispersada por un área de la superficie del mar, dependiendo del tipo de procesamiento digital aplicado a las imágenes se

puede obtener información sobre las interacciones océano-atmósfera sobre el área iluminada tales como dirección y velocidad del viento, derrames de aceites y petróleo, detección de barcos, detección de movimiento de las placas de hielo en regiones polares, etc.

El procesamiento digital aplicado a las imágenes o la información obtenida por algún tipo de percepción remota siempre trata de mejorar sus resultados y esto se logra modelando y comprendiendo de la mejor manera el principio físico del fenómeno que se desea estudiar.

IV.2 Retrodispersión de Microondas en la Superficie del Mar

Cuando las ondas electromagnéticas inciden en la superficie de algún material, parte de la energía es reflejada y parte transmitida. La incidencia de ondas electromagnéticas en una superficie plana presenta la menor dificultad para obtener los coeficientes de reflexión y transmisión de dichas ondas electromagnéticas. Pero en superficies reales, como la superficie del mar, las dificultades aumentan al intentar obtener un modelo matemático que describa el fenómeno de la reflexión y transmisión de las ondas electromagnéticas en dicha superficie.

Al observar el campo de la energía electromagnética dispersada desde un punto de vista lejano al área iluminada en la superficie, se puede considerar que el campo observado es la suma de los campos coherentes radiados individualmente de todas las pequeñas áreas elementales que están distribuidas en el área de superficie iluminada por la energía electromagnética. Las fórmulas matemáticas finales que describen la dispersión de las microondas debida a la superficie del mar se obtienen por medio de un proceso muy complejo. Los resultados mismos no son perfectos y las ecuaciones que se obtienen son útiles pero incompletas (ver ref. [20]), por esta razón la mayoría de los trabajos realizados en el área de la retrodispersión de microondas en la superficie del mar han sido enfocados a obtener relaciones empíricas entre la retrodispersión de microondas y los parámetros del campo de viento local generador de las olas, ver ref. [1].

Cuando una señal de ondas electromagnéticas ilumina una pequeña área de la superficie del mar, la energía recibida por el sistema de detección del instrumento es la energía electromagnética retrodispersada por la superficie, donde se asume que la energía que se

dispersa en la superficie del mar es debida a las pequeñas olas que se generan sobre olas más grandes. Donde diversos fenómenos físicos modulan a las olas pequeñas y por lo tanto se afecta directamente la energía retrodispersada por la superficie. La explicación de las causas que generan la dispersión de microondas en la superficie del mar son dadas básicamente por los modelos dominantes: El modelo de reflexión especular, el modelo de dispersión de Bragg y el modelo compuesto.

IV.2.1 Reflexión Especular

Para el caso en el cual la curvatura de las olas del mar es mucho mayor que la longitud de onda de la radiación electromagnética, las olas en la superficie del mar se comportan como si fueran pequeños planos tangenciales a la superficie que están colocados en los diversos puntos de la superficie, estos pequeños planos provocan que parte de las ondas del campo electromagnético incidente sean reflejadas por la superficie en dirección a la antena de recepción del satélite (ver figura 22). Esta situación se hace aún más notoria cuando las ondas electromagnéticas tienen una longitud de onda pequeña en comparación a las olas del mar y los ángulos de incidencia de la radiación sobre la superficie son pequeños, ver ref. [20].

IV.2.2 Dispersión por Bragg

En el caso en que la longitud de onda de las ondas electromagnéticas son largas en comparación con las olas del mar y la altura de las olas en la superficie es lo suficientemente pequeña, de tal manera que se pueda considerar a la superficie como ligeramente rugosa, entonces el principal mecanismo que contribuye a la retrodispersión de energía electromagnética en la superficie del mar se debe a olas que se propagan en la misma dirección que la incidencia de las ondas electromagnéticas radiadas y que tengan una longitud de onda λ_B que satisfaga la ecuación:

$$\lambda_B = 2\lambda \sin\theta$$

donde λ es la longitud de onda de la onda electromagnética y θ es el ángulo de incidencia de la radiación, ver figura 21. Este modelo es válido cuando el ángulo de incidencia cumple la siguiente condición: $20^\circ < \theta < 60^\circ$, ver ref. [1].

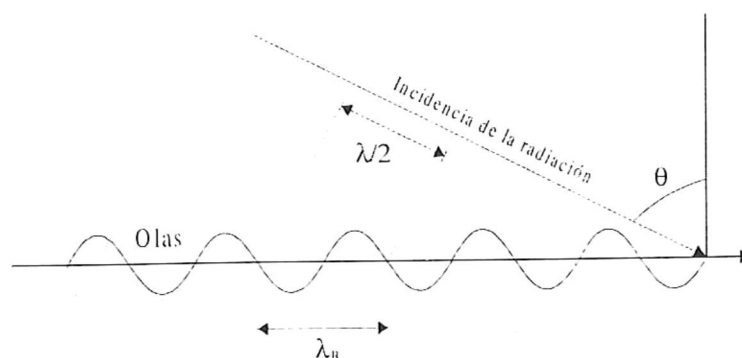


Figura 21 Condición para la retrodispersión de Bragg.

IV.2.3 Modelo Compuesto

En los modelos descritos hasta el momento se considera modelar de manera sencilla la retrodispersión de energía electromagnética debida a la superficie del mar, sin embargo al considerar la superficie real del mar, en la cual la condición de ola que cumple con el modelo de reflexión especular (olas largas) y la que cumple con el modelo de Bragg (olas pequeñas) difícilmente se presentan por separado bajo las condiciones naturales en las que se encuentra el mar.

Un intento de unir la contribución de retrodispersión del modelo de reflexión especular y la del modelo de Bragg, es el modelo de dos escalas o compuesto. En este modelo se asume que el mar dispersa la energía electromagnética debido a un gran número de pequeñas zonas ligeramente rugosas que cumplen con la condición de resonancia de Bragg, las cuales son inclinadas y trasladadas por las olas más grandes, ver figura 22.



Figura 22 Retrodispersión en el modelo Compuesto.

Una forma de interpretar el funcionamiento del modelo es considerar que el espectro de las olas pequeñas responsables de la dispersión de Bragg difiere para diversas posiciones en la ola larga (ver figura 22). Esto sucede por fenómenos aerodinámicos o hidrodinámicos como las interacciones de las olas largas con las pequeñas. Los cambios en el espectro de las olas pequeñas y los cambios en la pendiente de la superficie también afectan la retrodispersión de la energía electromagnética incidente en la superficie.

IV.3 Procedimiento

IV.3.1 Introducción

De las diversas causas que generan retrodispersión de energía electromagnética en la superficie del mar, el experimento se enfoca en medir en laboratorio la retrodispersión de energía electromagnética de microondas a 10GHz, debida a olas pequeñas generadas con viento en la superficie y con ángulos de incidencia pequeños ($20^\circ < \theta < 60^\circ$) según la teoría de la dispersión de Bragg. Estudios en ésta área no solo repercuten en la teoría de interpretación de la información obtenida por la percepción remota por satélite. También se aplican en radar, donde se registra la energía reflejada por objetos que se interponen en el patrón de radiación de su antena con el fin de detectar objetos sobre la superficie del mar, que en diversas situaciones de oleaje la superficie del mar refleja gran parte de la energía radiada por el radar, dicho reflejo

interfiere con el de los objetos que se desean detectar, haciendo su detección confusa o nula. El reflejo de la superficie se debe en gran parte por dispersión de Bragg, ya que los ángulos de incidencia del haz del radar están dentro del intervalo para el cual se cumple esta teoría.

Del experimento se pretende obtener la relación empírica de la retrodispersión de microondas con el ángulo de incidencia y la longitud de onda de las olas generadas por viento.

IV.3.2 Antecedentes

Un experimento previo al propuesto en este trabajo y obtenido de [21], se muestra en la figura 23. Donde se radia energía electromagnética en la banda X desde un punto y en otro se detecta la señal reflejada por las olas en la superficie generadas mecánicamente.

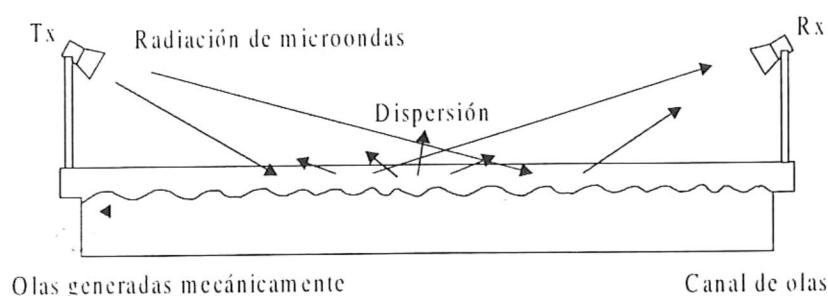


Figura 23 Experimento antecedente.

La energía reflejada por la superficie es sensada en el receptor por un diodo detector, el cual tiene una salida de voltaje en corriente directa que es proporcional a la potencia recibida por la antena. La señal es detectada por el diodo y registrada digitalmente en un archivo con ayuda de una computadora personal (P.C). La señal registrada en la P.C. no fué procesada digitalmente y la altura de las olas no fué registrada por lo que no se obtuvo información alguna sobre la altura o el espectro de potencia (PSD) de las olas en la superficie o del PSD de la energía reflejada por la superficie. Estos aspectos faltantes para el estudio del fenómeno son considerados en el presente trabajo para poder incluirlos en el estudio del fenómeno de la retrodispersión.

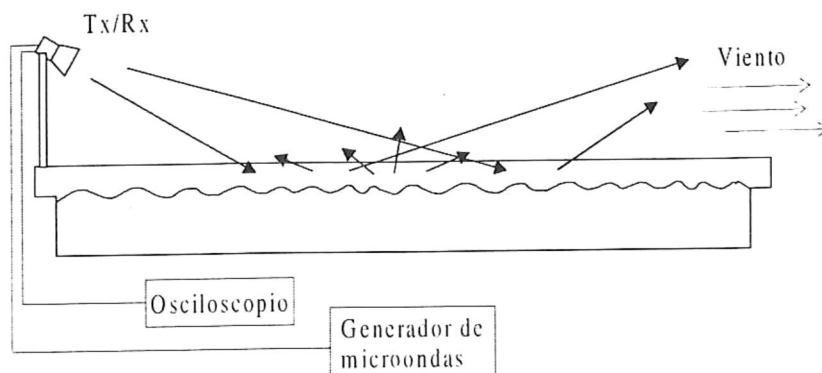


Figura 24 Diagrama del experimento.

IV.3.3 Experimento

El siguiente paso en la evolución del experimento mostrado como antecedente; es el de transmitir y recibir la energía de microondas en el mismo punto, como se muestra en la figura 24. El viento para generar las olas es generado por un ventilador colocado en el extremo del canal de olas, el cual mide 8 pies de largo, 6 pies de ancho y 1 pie de altura.

Para lograr este objetivo se ensambló el dispositivo mostrado en la figura 25, el cual consta de un circulador que permite el flujo de las ondas electromagnéticas del

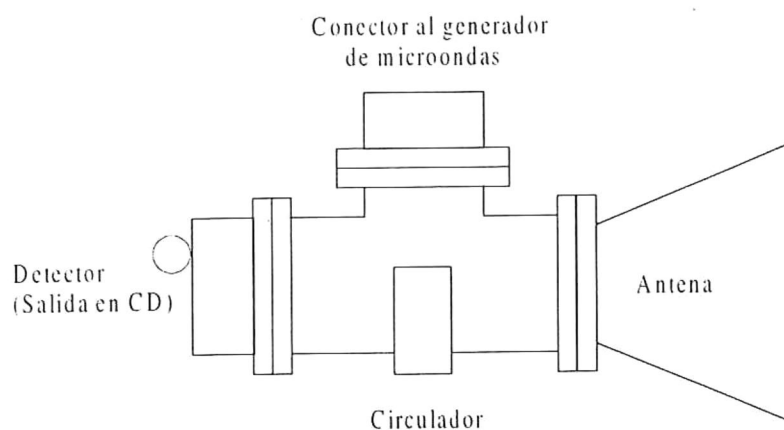


Figura 25 Dispositivo para sensar la retrodispersión de microondas.

puerto que conecta con el generador de microondas al puerto de la antena, para que las microondas sean radiadas. La energía retrodispersada por la superficie entra por la antena y el circulador permite el paso hacia el detector, al mismo tiempo aísla el puerto conectado al detector del puerto conectado al generador, con esto se evita el flujo directo de microondas del generador al detector.

El detector de microondas y la antena son los mismos que los utilizados en el experimento de la referencia [21]. El generador de microondas está sintonizado a 10GHz en modo de transmisión continua y la salida del detector está conectada directamente al osciloscopio por medio de un cable coaxial.

IV.4 Resultados

El experimento mostrado en la figura 25 fué realizado para diversos ángulos de incidencia de las microondas sobre la superficie del canal y con diferentes intensidades de viento generador de olas. Desafortunadamente no se registraron observaciones satisfactorias con las que se pudiera relacionar de alguna manera la señal registrada por el sensor con el fenómeno de retrodispersión de microondas debida a olas generadas por viento. Sin embargo con la experiencia y documentación adquirida se proporciona una serie de modificaciones al experimento con las cuales éste pueda continuar y obtener resultados satisfactorios sobre el fenómeno de la retrodispersión de microondas debida a olas generadas por viento.

IV.4.1 Sensor de Microondas

La complejidad del sistema de radiación y detección de microondas debe ser incrementada drásticamente para poder experimentar con el fenómeno de la retrodispersión de microondas debida a olas generadas por viento en laboratorio. El diseño de dicho instrumento debe tomar como base alguno de los sensores que se utilizan en alguno de los experimentos descritos en las referencias, esta labor implica de recursos humanos con conocimientos especializados en el área de estudio de las altas frecuencias.

Como mínimo el sistema debe ser capaz de medir la frecuencia de corrimiento de la señal radiada debida al efecto Doppler ocasionado al incidir las microondas sobre la superficie en movimiento. De [2] se obtiene la relación

$$F_D = (2C/\lambda_B) \sin \theta = F_B$$

donde F_D es el corrimiento Doppler de las microondas, C y F_B son la velocidad de fase y frecuencia de las olas resonantes de Bragg respectivamente.

Otra característica importante es que la radiación de las microondas sea pulsada, tal como se usa en los radares. Esto permite eliminar información en el dominio del tiempo (ver ref. [2]) de señales que inciden con retardos excesivos de tiempo debido a factores ajenos a la retrodispersión ocasionada por la superficie.

El hecho de que el sistema pueda radiar y recibir en polarización vertical y horizontal, también proporciona datos importantes para el estudio del fenómeno, debido a que existen diferencias en la retrodispersión entre ambas polarizaciones (ver ref. [3]).

IV.4.2 Canal de Olas

El canal de olas debe ser incrementado en su longitud aproximadamente a 15m (ver ref. [1]), esto debido a que en el caso de utilizar un dispositivo que transmita en modo continuo, donde para ángulos de incidencia pequeños la huella del radar se extiende a lo largo de la superficie del canal. En el caso de ser un radar pulsado, el área iluminada debe estar lo suficientemente lejos de la antena para que el tiempo que tarde en ir y regresar la radiación sea suficiente, tal que permita al conmutador apagar el generador de microondas para evitar la interferencia de la señal del transmisor con la reflejada por la superficie.

IV.4.3 Generador de Viento

En [1] obtienen resultados satisfactorios para el análisis de la retrodispersión para velocidades de viento de hasta 14.1m/s, por lo que se debe incrementar la capacidad de generar viento y también medir su velocidad.

V CONCLUSIONES

Para realizar los instrumentos e implementar los procesos digitales necesarios para el estudio de la RDM debido a la superficie del mar y para comprender plenamente los modelos de retrodispersión de microondas por la superficie del mar, son necesarios algunos conocimientos adicionales a la electrónica, especialmente sobre olas en la superficie del mar generadas por viento, tales conocimientos incluyen la generación y rompimiento de olas, propagación de olas y algunos principios hidrodinámicos de interacción de olas largas con cortas.

El presente trabajo muestra que el instrumento implementado para medir la altura de olas generadas por viento funciona apropiadamente, su resolución y frecuencia de muestreo son adecuadas. Dicho instrumento cuenta con características adicionales, con las que sus aplicaciones se pueden expandir y desarrollar en el área de medición de nivel del mar.

El procesamiento digital aplicado a las mediciones de la altura de las olas obtiene resultados en los cuales se puede distinguir entre los diversos tipos de olas, por lo que consiguientes refinamientos en algunos de sus aspectos pueden mejorar notoriamente sus resultados, tal es el caso del incremento en el número de muestras registradas y condiciones de experimentación más estables y prolongadas. El uso de programas comerciales de procesamiento digital son adecuados para la obtención del PSD.

Aunque el sensor de microondas no presenta resultados favorables para el experimento, se mencionan las características con que dicho instrumento debe contar para el estudio formal de la retrodispersión de microondas. Su desarrollo no es trivial o sencillo, por lo que se recomienda el uso de personal especializado en el área de microondas.

En general, el proyecto puede realizarse plenamente al contar con el personal adecuado en su desarrollo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ebuchi Naoto, "Physical Processes of Microwave Backscattering From Laboratory Wind Wave Surfaces". Journal of Geophysical Research, VOL. 98, 1993, NO C8, pp. 14,669-14,681.
- [2] Rozenberg Anatol D. "Laboratory Study of Polarized Scattering by Surface Waves at Grazing Incidence: Part I-Wind Waves". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, VOL. 33, 1995, pp. 1037-1046.
- [3] Lee P.H. "X band microwave backscattering from ocean waves". Journal of Geophysical Research, VOL. 100, 1995, NO. C2, pp. 2,591-2,611.
- [4] Long David G. "Dependence of the Normalized Radar Cross Section of Water Waves on Bragg Wavelength-Wind Speed Sensitivity". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, VOL. 34, 1996, pp. 656-666.
- [5] Chapman Rick, Monaldo F.M. "A Novel Wave Height Sensor". The Johns Hopkins University . Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, February 1995.
- [6] Trizna Dennis B. "Ultra-wideband radar studies of steep crested waves with scanning laser measurements of wave slope profiles". Dynamics of Atmospheres and Oceans, VOL. 20, 1993, pp 33-53.
- [7] Kinsman Blair "Wind Waves: their generation and propagation on the ocean surface". Dover Publicatons, Inc. 1984.
- [8] Lathi B. P. "Introducción a la Teoría y Sistemas de Comunicación". Primera Edición, 1990 Editorial LIMUSA.
- [9] Stremmler F. G. "Introducción a los Sistemas de Comunicación". Tercera Edición, 1993 por Addison-Wesley Iberamericana.
- [10] "Electronics Engineers Handbook". Tercera Edición, 1982, McGraw-Hill.

- [11] Hayt William H., Kemmerly J. "Análisis de Circuitos en Ingeniería", Quinta Edición, Tercera Edición en Español, 1993, McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V.
- [12] Gardner Julian W. "Microsensors, Principles and Application", Primera Edición, 1996, John Wiley & Sons.
- [13] Emery William "Data Analysis Methods in Physical Oceanography", Primera Edición 1998 Pergamon.
- [14] Hsu H. P. "Análisis de Fourier", Primera Edición en Español, 1987, Addison-Wealey Iberoamericana.
- [15] Sophocles Orfanidis J. "Introduction to Signal Procesing", 1996 Prentice-Hall.
- [16] Brigham E. Oran "The Fast Fourier Transform", 1974 Prentice-Hall.
- [17] Peebels P.Z, "Probability, Random Variables end Random Signal Principles", 1987 McGraw-Hill.
- [18] Bendat J. S., A. G. Piersol "Random Data: Analysis and Measurament Procedures", Second Edition, 1986 Wiley-Interscience.
- [19] West James C. "The Modulation of a Radar Signal from the Ocean Surface due to Slope and Hydrodynamic Effects". Journal of Geophysical Research, VOL. 95, NO. C9, pp. 16,291-16,297.
- [20] Apel J. R. "Principles of Ocean Physics", International Geophysics Series Vol. 38. Academic Press 1987.
- [21] Felix Arredondo Luis H. "Radar Estático de Microondas en Banda X para el Análisis en un Canal de Olas: Diseño de una tarjeta de adquisición de datos". UABC 1996.