

Explorando la física de los rompeolas: un experimento didáctico para comprender la disipación de las olas

EDVATIO PHYSICORVM



ISSN 1870-9095

Alan Arias¹, Antonio Horta-Rangel¹, Jorge Noriega¹, Norma Gutierrez¹,
MH Ramírez²

¹División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez # 77; Zona Centro. C.P. 36000. Guanajuato, Guanajuato. Tel. (473)7320006 ext. 5321.

²Instituto Politécnico Nacional, México.

E-mail: aj.ariasdiosdado@ugto.mx

(Recibido el 30 mayo de 2025, aceptado el 4 de julio de 2025)

Resumen

Este trabajo presenta una experiencia didáctica de laboratorio de Mecánica de Fluidos a nivel universitario como parte de un proyecto propuesto en el curso para analizar físicamente la disipación de la energía del oleaje en su interacción a escala con estructuras rompeolas de geometrías diversas. El experimento se basa en la simulación del comportamiento del oleaje en una canaleta, interactuando con elementos particulares de rompeolas bajo distintos diseños propuestos, para establecer un comparativo en relación con los resultados de las mediciones de la disipación de energía del oleaje en cada caso. El montaje experimental incluye un canal transparente, una tarjeta Arduino, sensores resistivos FC-028 y un generador de olas operado por un motor a pasos NEMA 17, lo que permite controlar la amplitud y frecuencia del oleaje. Se analizaron dos modelos de rompeolas fabricados en acrílico, uno de doble placa plana (DFPT) y otro de doble arco (DAPT), mediante mediciones de altura de la ola antes y después del obstáculo, valorando su capacidad para disipar la energía. Esta actividad y su dinámica realizada permiten explorar conceptos fundamentales en la Física de Fluidos y transferencia de energía, integrando física, ingeniería y tecnología en un entorno educativo STEM.

Palabras clave: Rompeolas, Experimento didáctico, Disipación de las olas.

Abstract

This work presents a didactic fluid mechanics laboratory experience at the university level, developed as part of a course project aimed at physically analyzing wave energy dissipation during its interaction—at scale—with breakwater structures of different geometries. The experiment simulates wave behavior in a flume, where waves interact with specific breakwater elements under different proposed designs, allowing for a comparative analysis based on the measured wave energy dissipation in each case. The experimental setup includes a transparent channel, an Arduino board, FC-028 resistive sensors, and a wave generator operated by a NEMA 17 stepper motor, enabling control over wave amplitude and frequency. Two acrylic breakwater models were analyzed, a double flat plate type (DFPT) and a double arch type (DAPT), through wave height measurements taken before and after the obstacle, assessing each model's capacity to dissipate energy. This activity and its implementation provide an opportunity to explore fundamental concepts in fluid physics and energy transfer, integrating physics, engineering, and technology within a STEM educational framework.

Keywords: Breakwater, Didactic experiment, Wave dissipation.

I. INTRODUCCIÓN

Los rompeolas son estructuras ubicadas en el agua y diseñados para mitigar el impacto de las olas en zonas costeras, protegiendo playas, puertos y otros entornos marinos [1]. Estos elementos desempeñan un papel fundamental en la reducción de la energía de las olas antes de que lleguen a la costa, disipando su fuerza y minimizando el potencial de daño que pueden causar. Desde una perspectiva física, los rompeolas modifican el comportamiento de las olas principalmente mediante tres fenómenos: la reflexión, que devuelve parte de la energía de la ola hacia el punto de origen; la transmisión, en la cual una fracción de la energía logra pasar

a través o por encima de la estructura; y la disipación, que representa la pérdida de energía por turbulencia, fricción o deformación del flujo al interactuar con el rompeolas [2]. La predominancia de uno u otro fenómeno depende tanto del tipo de rompeolas como de las características del oleaje y del entorno. Desde un enfoque STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), la experimentación con estructuras rompeolas brinda a profesores y estudiantes la oportunidad de diseñar y evaluar soluciones que interactúen con el oleaje, utilizando sensores, microcontroladores y software de adquisición de datos. Esta actividad permite aplicar de forma práctica principios de la física que facilitan la comprensión de propiedades generales de las ondas.

El oleaje es la propagación de ondas mecánicas en la superficie del agua producidas cuando la energía del viento se transfiere al agua, generando un movimiento circular de las partículas en la superficie, caracterizadas por la oscilación periódica de la superficie del líquido, formando crestas y valles que se desplazan horizontalmente [3]. Como se ilustra en la figura 1, los parámetros más importantes para describir una onda son:

- Longitud de onda (λ): Distancia horizontal entre dos crestas o dos valles sucesivos (m).
- Período (T): Es el tiempo (s) entre el paso de dos crestas sucesivas por un mismo punto.
- Amplitud (A): Distancia vertical entre la cresta y el nivel del mar (m).
- Velocidad de Propagación (v): Es la relación entre la longitud de onda y el período (m/s).
- Frecuencia (f): Es el número de veces que la onda se repite en una unidad de tiempo y se mide en Hercios (Hz).

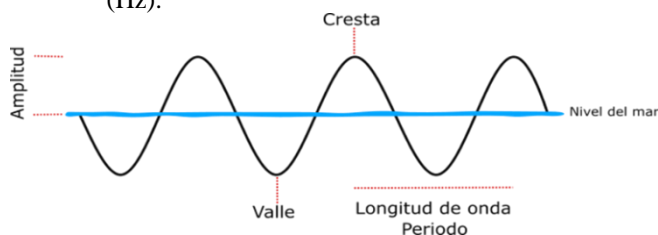


FIGURA 1. Diagrama de las principales propiedades de las ondas.

Periodo y frecuencia están relacionados mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1)$$

Al analizar la interacción entre una ola y una estructura, es útil introducir el concepto de longitud de ola relativa (LR), que permite evaluar la escala del rompeolas respecto al tamaño de la ola. Esta se define como:

$$LR = \frac{\lambda}{W}, \quad (2)$$

donde W representa el ancho del rompeolas. Este parámetro ayuda a predecir cómo se comportará una ola al encontrar un obstáculo: si la estructura es mucho más grande que la longitud de onda se comportará casi como una barrera; en cambio, si la longitud de onda es similar o mayor, fenómenos como la transmisión y la reflexión serán más relevantes. Además de las características antes mencionadas, hay tres coeficientes clave en el estudio de la interacción entre el oleaje y las estructuras rompeolas: reflexión (Kr), transmisión (Kt) y disipación (Kd), los cuales permiten cuantificar cómo se distribuye la energía del oleaje tras impactar con el obstáculo.

La reflexión ocurre cuando una ola choca contra un obstáculo y parte de su energía regresa en sentido contrario. Este coeficiente (Kr) representa la relación entre la altura del oleaje reflejado (Hr) y la altura del oleaje incidente (Hi) [4]. Experimentalmente, la altura de la ola reflejada y la altura de la ola incidente se pueden determinar colocando dos

medidores de altura de ola (#1 y #2 figura 6) para monitorear la elevación de la superficie libre del agua respecto al tiempo y separar las alturas de la ola incidente y reflejada.

$$Kr = \frac{Hr}{Hi}. \quad (3)$$

La transmisión ocurre cuando parte de la energía del oleaje atraviesa el rompeolas, generando una ola reducida al otro lado. Este coeficiente (Kt), se define como la relación entre la altura de la ola transmitida (Ht) y la altura de la ola incidente (Hi). Experimentalmente, la altura de la ola incidente y la altura de la ola transmitida se pueden determinar a partir de las elevaciones de las olas, colocando un medidor de altura de ola (#3 figura 6) en la parte posterior del rompeolas [5].

$$Kt = \frac{Ht}{Hi}. \quad (4)$$

La disipación de energía mediante el uso de un rompeolas se cuantifica usando el coeficiente de disipación (Kd), que indica la fracción de energía del oleaje que se pierde en la interacción con la estructura. Este coeficiente varía entre 0 (sin pérdidas) y 1 (disipación total), y está relacionado con los coeficientes de reflexión (Kr) y transmisión (Kt) por la expresión [6]:

$$Kr^2 + Kd^2 + Kt^2 = 1. \quad (5)$$

II. MÉTODOS Y MATERIALES

El diseño experimental consistió en un generador de olas, sensores de profundidad y dos estructuras rompeolas. Como se puede ver en la figura 2, el generador de olas se construyó con un motor a pasos NEMA 17 acoplado a una placa acrílica de 8.3×28 cm; para su montaje, se diseñaron e imprimieron en 3D los brazos y la base que permiten su rotación. El motor fue controlado mediante un puente H L298 conectado a una tarjeta Arduino Uno.

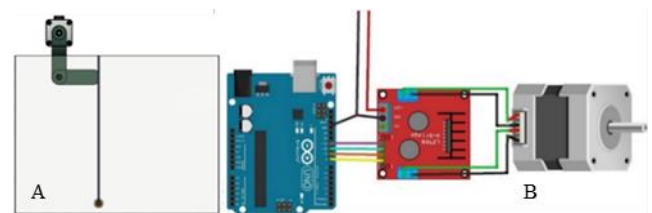


FIGURA 2. A) Esquema del generador de olas, B) diagrama de conexiones.

Para medir la altura de las olas se utilizaron tres sensores resistivos FC-028. Estos sensores operan como un divisor de tensión junto con una resistencia fija, entregando una señal analógica entre 0 y 5 V, dependiendo de la profundidad de inmersión. Para su instalación, los sensores se montaron en un soporte colocado sobre la parte superior del canal, lo que

permitió ajustar manualmente su profundidad durante el proceso de calibración (Figura 3).

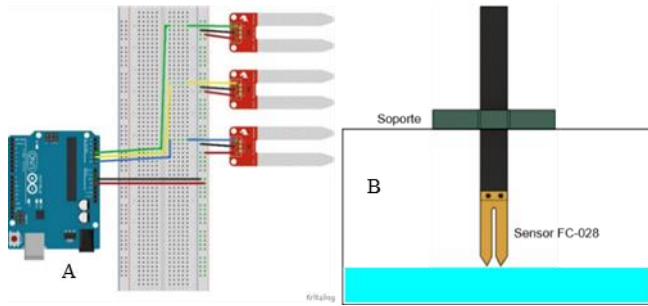


FIGURA 3. A) Esquema de conexiones de los medidores de altura, B) soportes de los medidores de altura.

Para la construcción de los rompeolas se utilizaron placas de acrílico de 3 mm de espesor. El modelo de doble placa plana (DFPT, por sus siglas en inglés) se construyó con dos placas de 8.5 cm \times 4 cm, mientras que el modelo de doble arco (DAPT, por sus siglas en inglés) empleó dos placas de 8.5 cm \times 5 cm con un ángulo de 60° y una longitud de arco de 5 cm. Ambas configuraciones se montaron sobre varillas roscadas de 5/16", fijadas con tuercas, manteniendo una separación constante de 1.5 cm entre placas (figura 4).



FIGURA 4. Modelos rompeolas construidos. A) Rompeolas DAPT, B) rompeolas DFPT.

Para calibrar los sensores FC-028 se registró el voltaje en función de la profundidad de inmersión, generando un gráfico que permitió obtener una curva de ajuste lineal y su correspondiente ecuación. Este procedimiento se llevó a cabo de manera individual para cada uno de los sensores resistivos (figura 5).



FIGURA 5. Calibración de los sensores FC-028.

Para realizar el experimento se utilizó un canal de 5 m de largo, 0.086 m de ancho y 0.3 m de profundidad, llenado hasta una altura de 0.23 m. Sobre el canal se instalaron tres medidores de altura de ola (Figura 6): el medidor #2 se ubicó frente al rompeolas, el medidor #1 delante del medidor #2, y el medidor #3 en la parte posterior del rompeolas. El generador de olas fue controlado mediante una tarjeta Arduino Uno, ajustando la velocidad y el número de pasos del motor para producir olas con diferentes características. Estas se determinaron a partir de las gráficas del acelerómetro lineal de un celular, colocado previamente sobre la superficie libre del agua, utilizando la aplicación Arduino Science Journal (Figura 7).

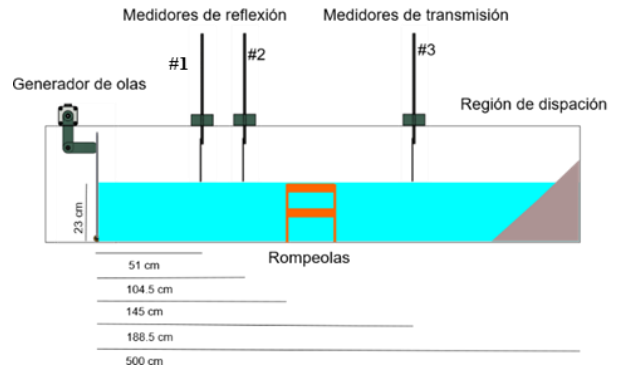


FIGURA 6. Ubicación de los medidores de altura.



FIGURA 7. A) Celular sobre la superficie libre del agua, B) lecturas del acelerómetro lineal del celular.

Las lecturas de los medidores de altura se tomaron de manera simultánea para registrar el desplazamiento de la superficie libre del agua. Estas lecturas se grafican en Excel a intervalos de 100 milisegundos utilizando la interfaz del sistema Parallax Data Acquisition System (figura 8).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	25/05/2023	02:26:09 p. m.	Medidor 1	Medidor 2	Medidor 3	PLX-DAQ for Excel "Version 2" by Net "Dev"		
2	25/05/2023	02:26:09 p. m.				PLX-DAQ	v2.7 (DEBUG VERSION 1)	
3	25/05/2023	02:26:09 p. m.	1013	9015	285	Settings	Custom Checkbox 1	
4	25/05/2023	02:26:09 p. m.	892	9011	285	Ports: 5	Custom Checkbox 2	
5	25/05/2023	02:26:09 p. m.	991	915	285	Reset on Connect	Custom Checkbox 3	
6	25/05/2023	02:26:09 p. m.	1021	1019	285	Connect	Clear Columns	
7	25/05/2023	02:26:09 p. m.	913	917	285	Passes logging	Display direct debug >>	
8	25/05/2023	02:26:10 p. m.	965	998	285	Sheet name to port to: (reload after renaming)	Simple Data	
9	25/05/2023	02:26:10 p. m.	1010	1011	285	Controller Messages:	PLX-DAQ Status	
10	25/05/2023	02:26:10 p. m.	855	860	285	Do not move this window around while logging!	That might crash Excel!	
11	25/05/2023	02:26:10 p. m.	1014	1008	285			
12	25/05/2023	02:26:10 p. m.	1020	1011	285			
13	25/05/2023	02:26:10 p. m.	860	918	285			
14	25/05/2023	02:26:10 p. m.	1010	1014	285			
15	25/05/2023	02:26:10 p. m.	984	905	285			
16	25/05/2023	02:26:10 p. m.	950	872	285			
17	25/05/2023	02:26:11 p. m.	1021	1018	285			
18	25/05/2023	02:26:11 p. m.	968	934	285			
19	25/05/2023	02:26:11 p. m.	882	970	285			

FIGURA 8. Lecturas simultáneas de los 3 medidores de altura.

II. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la calibración de los tres medidores de altura (Figura 9). Los gráficos muestran la relación entre el voltaje medido por los sensores y la altura de la ola. A partir de estos datos, se determinaron las funciones de ajuste correspondientes, obteniéndose ecuaciones que describen con precisión la relación entre ambas variables. En todos los casos, los ajustes presentan un coeficiente de correlación $R^2 > 0.99$, lo que indica una excelente correlación entre las variables.

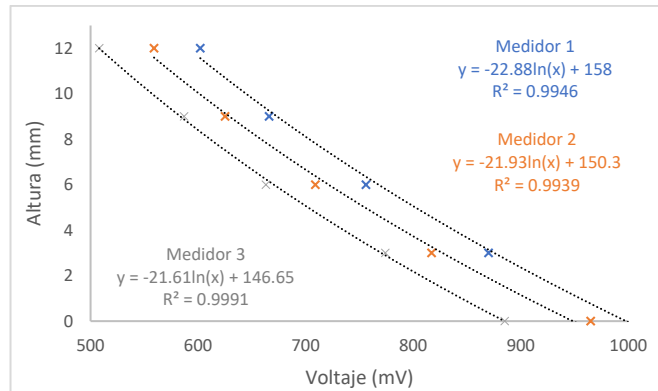


FIGURA 9. Calibración de los medidores de altura.

A partir de los datos obtenidos con el acelerómetro lineal del celular, registrados mediante la aplicación Arduino Science Journal, se construyó una gráfica de aceleración lineal en función del tiempo (Figura 10), se omitieron los valores negativos de aceleración debido a que no son relevantes para determinar las crestas de la onda. Dado que la ola generada presenta un comportamiento periódico, se seleccionó un intervalo de 1.18 segundos para analizar una oscilación completa. El periodo de la onda (T) se determinó como el tiempo transcurrido entre dos crestas sucesivas, obteniéndose un valor de $T = 0.32$ s.

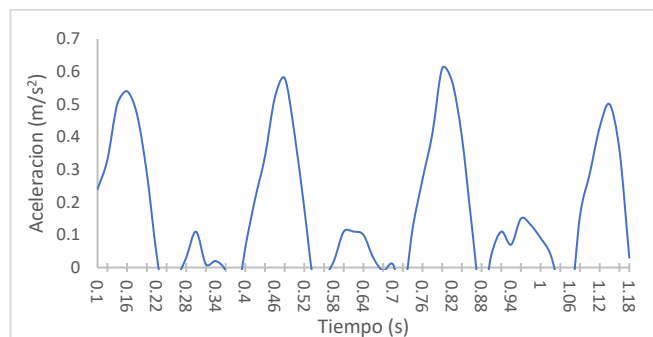


FIGURA 10. Gráfico de aceleración lineal respecto al tiempo.

Para determinar la longitud de onda, se midió la distancia entre dos crestas sucesivas, obteniéndose una longitud de onda $L = 0.188$ m. A partir de los resultados anteriores se construyó la tabla I, que agrupa los parámetros utilizados para evaluar el efecto de disipación de los rompeolas construidos.

TABLA I. Parámetros para la evaluación de las estructuras rompeolas.

Parámetro	Medida
Ancho del canal (m)	0.086
Largo del canal (m)	5
Altura del agua (m)	0.23
Ancho del rompeolas (m)	0.085
Longitud de onda (m)	0.188
Amplitud (m)	0.0025
Periodo (s)	0.32
Frecuencia (Hz)	3.12
Longitud de onda relativa	2.11

En los siguientes gráficos (figura 11 - 12), se presentan los resultados de las mediciones del desplazamiento de la superficie libre del agua respecto al tiempo para los dos tipos de rompeolas utilizados.

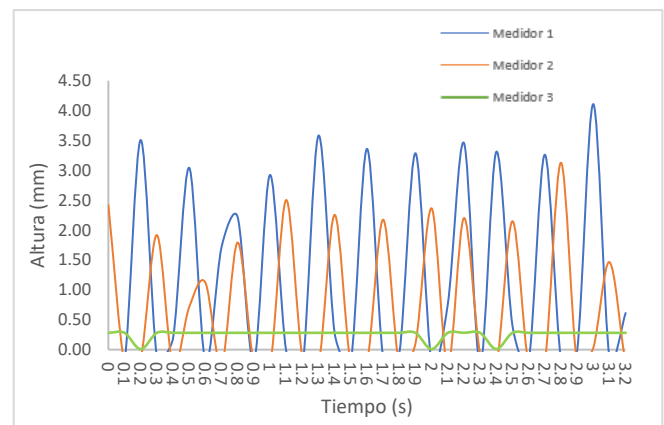


FIGURA 11. Gráfico de la altura de la ola respecto al tiempo para el rompeolas DFPT.

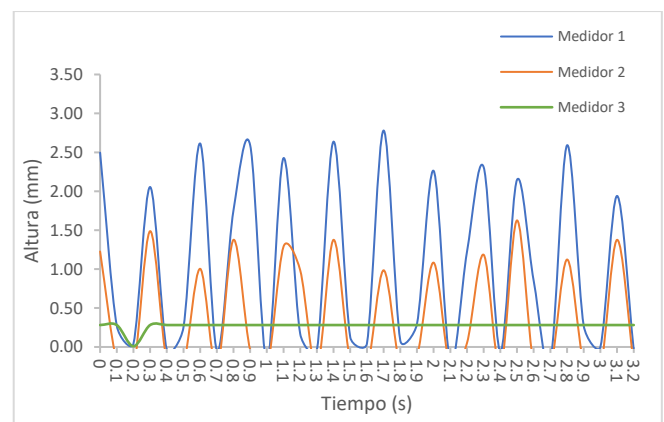


FIGURA 12. Gráfico de la altura de la ola respecto al tiempo para el rompeolas DAPT.

Para obtener los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación de los rompeolas en el intervalo de los gráficos (figura 11 y figura 12), se utilizaron las ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente. Los valores de los coeficientes fueron promediados y se determinó su incertidumbre, como se muestra en la tabla II.

TABLA II. Comparativa de los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación de los rompeolas.

Rompeolas	Kr	Kt	Kd
DAPT	0.53 ± 0.13	0.12 ± 0.01	0.82 ± 0.09
DFPT	0.65 ± 0.19	0.09 ± 0.02	0.71 ± 0.19

IV. CONCLUSIONES

El experimento realizado permitió evaluar la disipación de energía de dos diseños de rompeolas a escala, analizando los coeficientes de reflexión (Kr), transmisión (Kt) y disipación de energía (Kd) en condiciones controladas. Los resultados obtenidos muestran que el modelo de doble arco (DAPT) presentó una mayor capacidad de disipación de energía, con un incremento del 15.5 % en comparación con el modelo de doble placa plana (DFPT). Por su parte, el modelo DFPT reflejó una mayor proporción de la energía incidente, alcanzando un valor aproximadamente 22.6 % superior al DAPT. La transmisión de energía fue comparable en ambos casos, con valores cercanos entre sí y dentro del margen de error. La implementación de este experimento en el laboratorio puede facilitar la comprensión de fenómenos físicos complejos mediante la observación, la medición y la interpretación de datos.

AGRADECIMIENTOS

Dr. Gilberto Carreño Aguilera

Director de la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, por su respaldo institucional y las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo.

Mtro. Roberto Díaz Cuesta

Director del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Guanajuato, por su valioso apoyo en la

gestión de recursos que hicieron posible la adquisición de los componentes electrónicos necesarios para este proyecto.

Mtro. Francisco Ramírez Navarro

Encargado del Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la División de Ingenierías, Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato, por su apoyo y colaboración para la realización de este experimento.

REFERENCIAS

- [1] Burcharth, H. F. *et al.*, Innovative Engineering Solutions and Best Practices to Mitigate Coastal Risk, en *Coastal Risk Management in a Changing Climate*, Elsevier, (2015), pp. 55-170. doi: 10.1016/B978-0-12-397310-8.00003-8.
- [2] Elsheikh, A. K., Mostafa, Y. E. & Mohamed, M. M., *A comparative study between some different types of permeable breakwaters according to wave energy dissipation*, Ain Shams Engineering Journal **13**, 101646 (2022), doi: 10.1016/j.asej.2021.11.015.
- [3] N. O. and A. A. US Department of Commerce, *Why does the ocean have waves?* Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/wavesinocean.html>
- [4] J. del Valle *et al.*, *Evaluación del coeficiente de reflexión en diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en S*, Tecnología y ciencias del agua **10**, 128-152 (2019), doi: 10.24850/j-tyca-2019-02-05.
- [5] Li, X. *et al.*, *Numerical study of the wave dissipation performance of two plate-type open breakwaters based on the Navier–Stokes equations*, J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. **43**, 196 (2021), doi: 10.1007/s40430-021-02889-7.
- [6] Muttray, M., Oumeraci, H., Zimmermann, C. & Partenscky, H.W., *Wave energy dissipation on and in rubble mound structures*, Coastal Engineering Proceedings **23**, 23 (1992), doi: 10.9753/icce.v23.%p.