

# Energía de las Olas

La energía del oleaje del mar es enorme y muchas veces se manifiesta por los grandes destrozos que puede producir o por la facilidad de agitar cualquier cuerpo flotante.

Esta gran cantidad de energía se ha tratado de aprovechar desde hace siglos. Por ejemplo, en el siglo XIII los chinos trituraban minerales con molinos accionados por las olas. Leonardo Da Vinci dejó algunos diseños de mecanismos accionados por el oleaje. Actualmente se han incrementado las investigaciones e inversiones para desarrollar generadores de energía.

Mediciones de corta duración pueden situar con alguna precisión la energía de las olas de los 2.500 km de las costas del país entre 12.500 MW y 90.000 MW.

## NOCIONES DE OLAJE

El oleaje es el movimiento de un fluido que ha sufrido una perturbación tratando de restablecer su equilibrio. En el océano la perturbación la produce generalmente el viento, el cual crea inicialmente microrrugosidades sobre la superficie del mar que favorecen la absorción de energía a medida que aumentan de tamaño. Al mismo tiempo estas olas se desplazan en la dirección del viento y continúan viajando por el océano cuando este ha cesado, las olas producidas de esta manera se llaman tren de olas. Olas de gran tamaño pueden viajar grandes distancias desplazándose por el océano con una velocidad igual a la mitad de una ola particular, desapareciendo la del frente y apareciendo otra detrás.

El oleaje puede ser mayor o menor (0.25 a 15 mts) dependiendo de la permanencia del viento en una misma dirección, la intensidad de este, la longitud de la zona donde actúa el viento (flecth) y la profundidad del sitio.

Las ráfagas momentáneas del viento, las trombas (tornados), los huracanes y los movimientos sísmicos pueden también producir olas hasta de 20 metros.

Las olas de marea pueden ser de 0.25 metros en el océano Atlántico y 9 metros en el Pacífico.

Ola promedio: Los datos tomados de las alturas de ola pueden dar la altura promedio  $H_s$  para el tiempo de la medición con la siguiente fórmula:

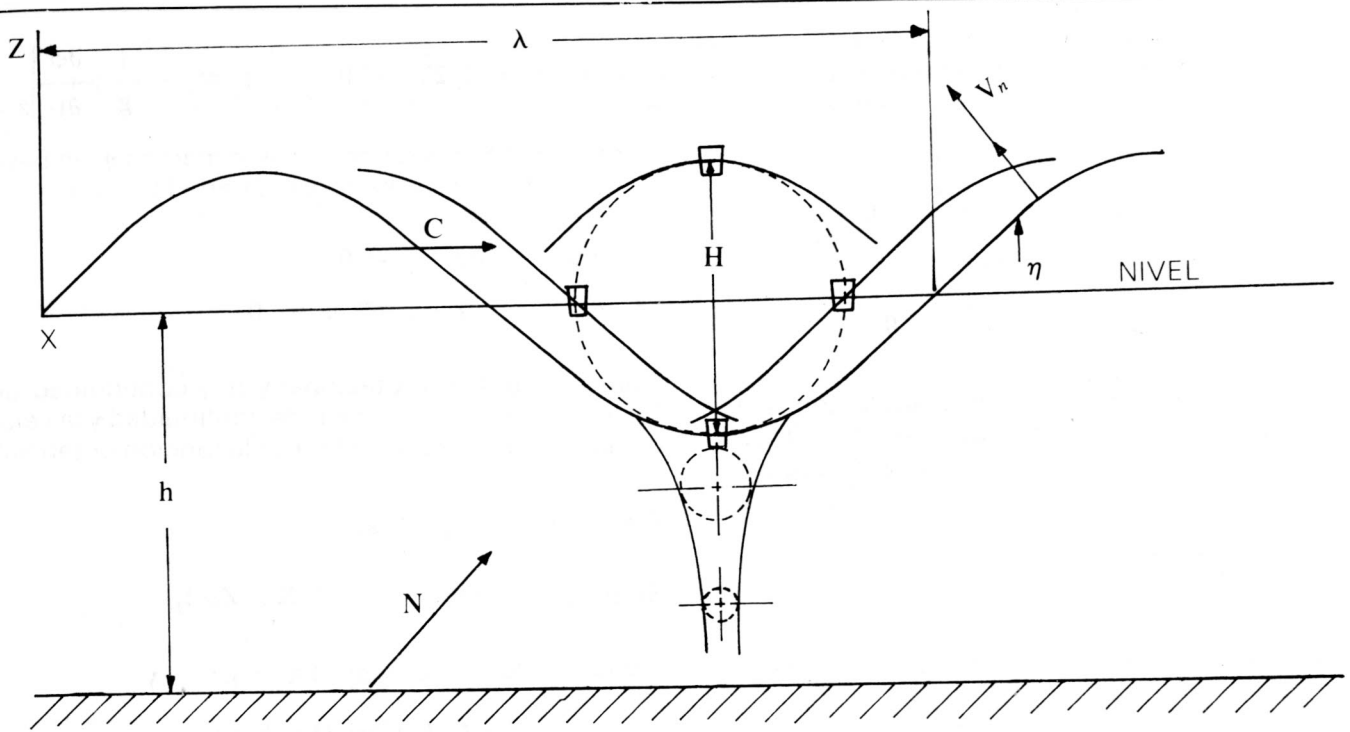


Figura 1

$$E = \frac{2(a_0 - a_1)^2 + (a_0 - a_2)^2 - - - (a_0 - a_n)^2}{n} y$$

$$H_s = 1.77 \sqrt{E}$$

$E$  = parámetro para medir altura  
 $a_0$  = profundidad del sitio  
 $a_1, a_2, a_n$  = alturas sucesivas de las olas  
 ECUACIONES (M. McCormik)\*

\* M. McCormik Ocean Eng. Wave Mech's.

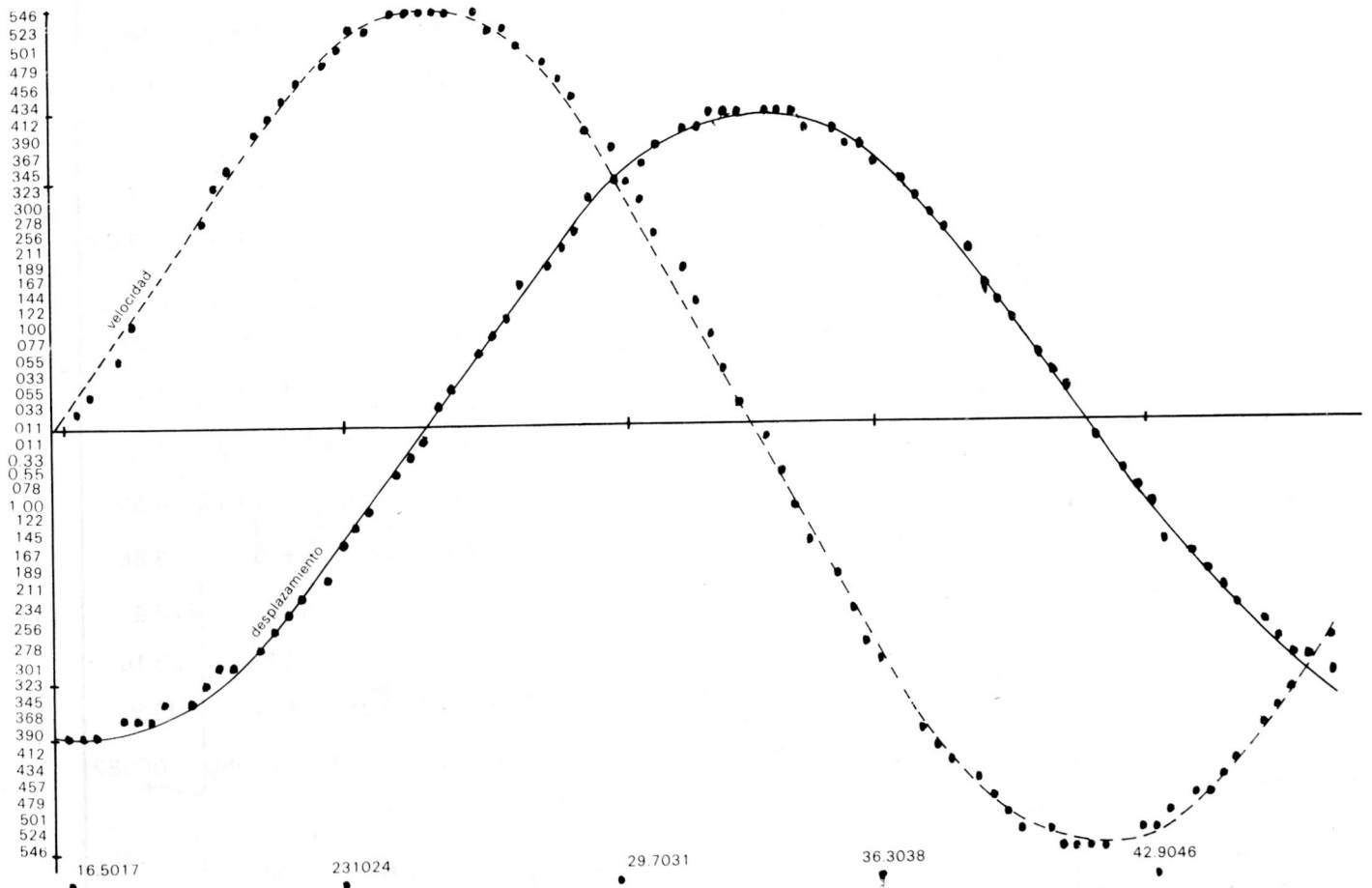


Figura 2.

La velocidad de una partícula en la superficie se expresa por su potencial velocidad  $\nabla \Phi$  del cual se pueden derivar las siguientes expresiones:

$$V \Big|_{z=\eta} = \nabla \Phi \Big|_{z=\eta} = \frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_{z=\eta} \quad y$$

$$V \Big|_{z=\eta} = \frac{\partial n}{\partial t} \mathbf{k} = \frac{\partial z}{\partial t} \Big|_{z=0} \mathbf{k}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2}V^2 = 0 \quad \therefore \eta = - \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=\eta}$$

Condición dinámica lineal; si eliminamos  $\eta$  en base a las condiciones anteriores (2) en (1)

$$(1) \left[ \frac{\partial^2 \phi}{g \partial t^2} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] \Big|_{z=\eta} \approx 0$$

cuando  $\eta$  es muy pequeño comparado con  $\lambda$  y se establece la condición cinemática en  $Z = 0$ . En el fondo las partículas no se mueven hacia abajo:

$$V \cdot N = \frac{\partial \phi}{\partial N} = 0$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{Laplace})$$

Solución de forma  $\phi = X_{(x)} Z_{(z)} T_{(t)}$

En la superficie libre la presión manométrica es cero, luego la ecuación de Bernoulli será:

Donde  $X_{(x)} = C_2 \text{Senh}(kx + \beta) \quad y$

$$Z_{(z)} = C_1 \text{Cosh}(kz + \alpha)$$

TABLA 5 - 1

Caso	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Período (seg)	4.6	5.0	6.0	5.40	4.6	5.40	5.9	4.8	4.0
Altura de ola/2 (mts)	0.4	0.95	0.3	1.25	0.4	1.25	0.95	0.3	0.25
Longitud de ola (mts)	33	39	56.1	45.48	33	45.48	54.29	35.9	19
Energía de ola (kgm/seg x mt)	147.8	906	108	1694	147.8	1694	1069	86.75	50.2
Diámetro tubería (pulgada)	2.5	2.5	3.0	2.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0
Diámetro bomba (pulgada)	17.3	17.30	17.30	17.3	17.3	17.3	17.3	30.0	17.3
Caudal gal/min	35.0	83.81	18.35	104.1	36.8	112	74.98	89.04	13.08
Pérdidas por fricción mts	2802	11902	1006.8	17153	1154	7063	3608	4803	
Presión máxima Kg/m <sup>2</sup>	28180	28827	28061	29217	28180	29217	28599	28809	28093
Fuerza máxima Kg	4273	4371.7	4255	4430	4273	4430	4337	13138	4260
Volumen mínimo cámara aliv. m <sup>3</sup>	0.097	0.23	0.07	0.3	0.09	0.3	0.229	0.22	0.06
Volumen flotador m <sup>3</sup>	4.6	4.7	4.57	4.76	4.59	4.76	4.66	14.12	4.69
Diámetro flotador mt.	3.82	3.87	3.81	3.89	3.82	3.89	3.85	6.7	3.86
Peso del flotador Kg	459.5	470	457	476	459.5	476	466	1412	572.4
Potencia Kg/seg	62.22	152	32.45	191.6	65.50	206	135	161.6	23.16
Eficiencia %	11	4	7.8	2.9	11.6	3.13	3.28	27.7	11.9
Caudal característico m <sup>3</sup> /sec	0.0022	0.0058	0.00115	0.006	0.0022	0.007	0.0047	0.0056	0.0082
Diámetro placa mt	22.79	27.59	31.0	21.6	23	21.6	19.8		
Potencia wtt.	610	1490	318	1872	642	2019	1323	1584	

Llegando finalmente a

$$\frac{1}{T} \frac{d^2T}{dt^2} + kg \tanh(kh) = 0$$

$$\frac{1}{T} \frac{d^2T}{dt^2} + W^2 = 0 \text{ Si } W^2 = k_g \tanh(kh)$$

También de (2)

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \left| \begin{array}{l} A = \text{coeficiente de amplitud} \\ \frac{WA}{G} \cosh(kh) \sin(kx) \cos(wt) \\ Z = 0 \\ = a \sin kx \cos(wt) \text{ fórmula usada en ingeniería.} \end{array} \right.$$

Velocidad vertical:

$$W = \frac{agh}{\omega} \frac{\text{Senh}(kz + kh)}{\cos kh} \sin(kx - wt)$$

Desplazamiento según Stokes y representa más realmente una ola:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - wt) + \frac{H^2 \pi}{4 \cdot 2\lambda} \frac{\cosh(kh)}{\text{sen}^3(kh)}$$

$$[ 2 + \cosh(2kh) ] \cos(2kx - 2wt)$$

Velocidad de la ola

$$C = \frac{dx}{dt} = \frac{w}{t} = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

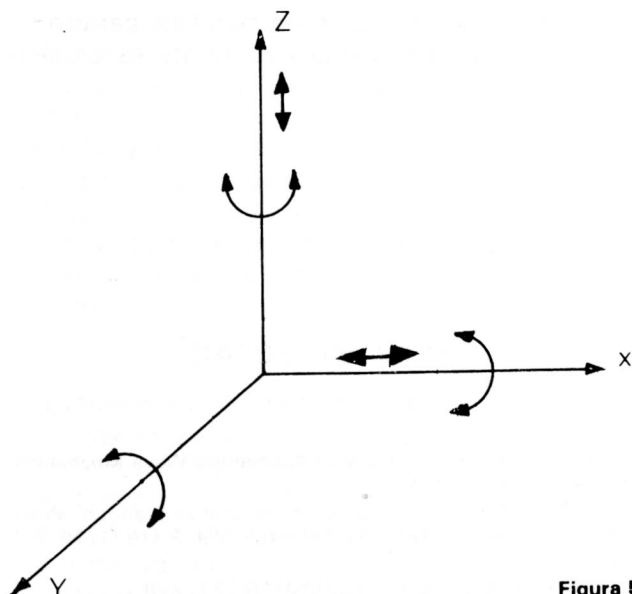


Figura 5

figuras 2 y 3 tabla con resultados de la simulación. Una partícula de agua cuando pasa la ola describe una trayectoria circular completa si está en un mar de profundidad de  $\lambda/2$  y será más o menos elíptica a medida que disminuye la profundidad. Se puede demostrar esto estudiando la trayectoria seguida por un corcho o flotador. Figura 1. Este movimiento se puede descomponer en ascenso, descenso y cabeceo. Otros movimientos que se pueden producir son: deslizamiento lateral, deslizamiento hacia atrás, giro o rollo sobre el eje x y deslizamiento sobre el eje y. Figura 5.

Un mecanismo accionado por el oleaje puede ser diseñado para aprovechar uno de estos movimientos, generalmente los de levantamiento y descenso, o los de adelante y atrás.

**TANQUES DE PRUEBA**

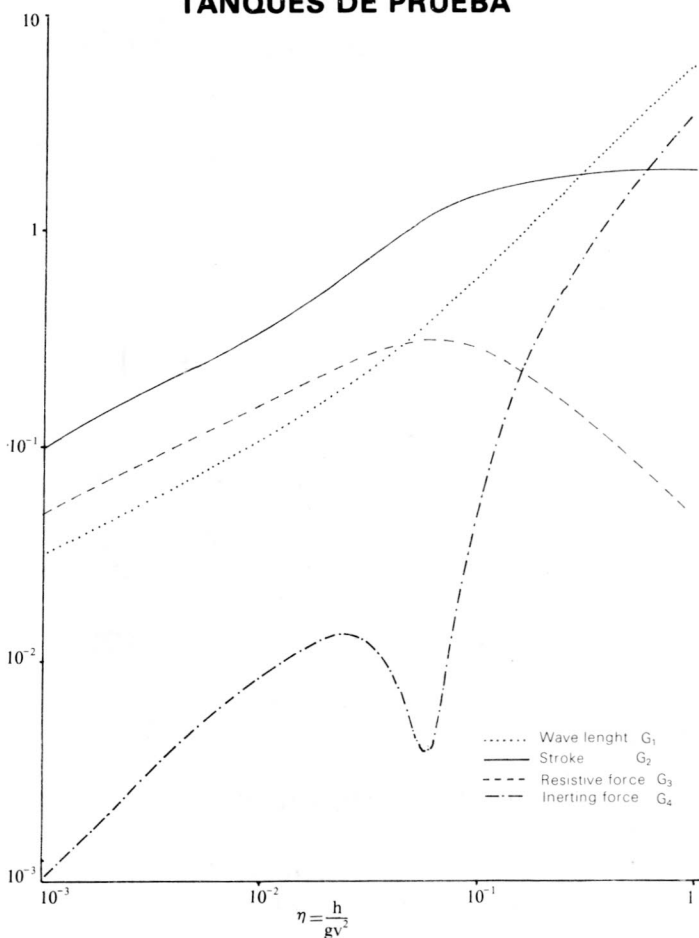


FIGURA 6.

Las características de las olas producidas en un tanque de pruebas, se pueden conocer con la ayuda de las curvas de Gilbert y Thompson para los parámetros adimensionales  $G_1(\eta)$ ,  $G_2(\eta)$ ,  $G_3(\eta)$  y  $\eta$

$$G_1(\eta) = \frac{h}{\lambda} \quad \eta = \frac{h}{gt^2}$$

$$G_2(\eta) = \frac{a}{s}$$

$$G_3(\eta) = \frac{F_r}{E}$$

$$E = \gamma hs$$

T seg	h cm	$\lambda \times 10^{-1}$	$G_1(\eta)$	$G_2(\eta)$	$G_3(\eta)$	E (gr/cm)	Fr (gr/cm)	Pa dinas	a cm	$\lambda$ cm	S cm	V cm/seg
0.5	9	0.367	0.27	0.8	0.28	9	2.52	15.83	0.8	32.14	1	70
0.5	10	0.408	0.28	0.9	0.30	10.5	3.15	20.78	0.945	35.71	1.05	74.63
0.5	12	0.49	0.35	1.2	0.33	13.8	4.55	32.87	1.38	34.28	1.15	73.12
	13.5	0.55	0.37	1.25	0.33	18.22	6.0	50.29	1.68	36.48	1.35	75.43
	14	0.57	0.38	1.28	0.33	21	6.93	65.31	1.92	36.84	1.5	75.8
	16	0.65	0.4	1.30	0.33	27.2	8.97	95.81	2.21	40	1.7	78.9
0.75	16	0.29	0.21	0.7	0.26	27.2	7.07	50.34	1.19	76.2	1.7	109.0
1.0	16	0.16	0.20	0.65	0.25	27.2	6.8	36.31	1.1	80	1.7	111.7

FIGURA 7. Esta tabla resume los resultados en la operación del tanque.

h = profundidad del tanque  
 = longitud de ola  
 a = altura media de ola  
 s = desplazamiento máximo de la placa medido sobre la superficie.

$$G_1 = \frac{h}{\lambda} \quad G_2 = \frac{a}{s} \quad G_3 = \frac{F_r}{E}$$

$$E = \gamma hs$$

$$P_a = \frac{\pi s}{t} F_r \quad P_a = \frac{\pi s}{t} F_r$$

$$V = \sqrt{\frac{\lambda g}{2\pi}}$$

Fr = fuerza ejercida por el agua sobre la placa  
 E = parámetro para evaluar Fr  
 = potencia promedio por unidad de fuente  
 V = velocidad de avance de la ola

**ENSAYOS REALIZADOS EN EL TANQUE**

Se evalúa el tanque comparando las características de las olas generadas con las predichas en el gráfico 6 y los resultados se aprecian en la figura 7.

**CONCLUSIONES**

1. Controlando el movimiento horizontal de una boya, se consigue una operación efectiva de una bomba elástica fija a la boya y al fondo del mar,

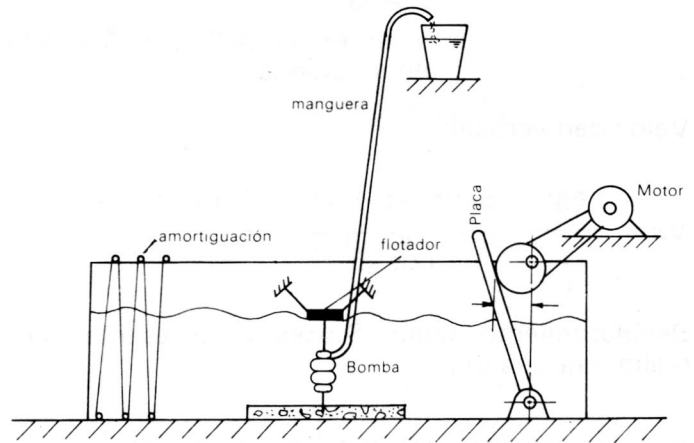


FIGURA 8.

- permitiendo el bombeo de agua a un tanque de almacenamiento elevado.
2. El agua así almacenada puede: a) operar una planta convencional de energía eléctrica, b) alimentar un destilador solar de agua de mar.
  3. Si el sistema toma el agua de la desembocadura de un río, se podría alimentar un acueducto.
  4. El sistema debe diseñarse diferente de acuerdo con la profundidad del sitio.
  5. Se debe realizar más trabajo en este campo con el fin de evaluar exhaustivamente estos sistemas.

**Bibliografía**

1. Ocean Energy Systems. U.S. Department of Energy Paper DOE/ET 0118 Washington, 1974.
2. H. I. Sargeant. Wave heights expressed in engineering terminology Ocean Wave Measuring and analysis. Proc. Int. Symposium, New Orleans, Sept. 1974.
3. Michael E. McCormick. Ocean Engineering Wave Mechanics. John Wiley Sons 1973.
4. G. Gilbert y otros. Design curves for regular and random. Wave generators. Jour of Hydraulic Research. Vol. 9 (1971) Nº 2 P. 164-196.
5. F.J.P. Clarke. Wave Technology UNITAR CF7/XVII