

Capítulo 12.- Predicción del estado de la mar

12.1.- La mar de viento.

Como se ha dicho con anterioridad, cuando el viento sopla sobre una extensión marítima, *zona generadora*, se produce un oleaje denominado **mar de viento**.

Para que se produzca mar de viento es necesario que este tenga dirección y fuerza aproximadamente constantes, en cuyo caso las olas se propagan en la misma dirección que los vientos. Este hecho induce a pensar que el océano puede ser dividido en diversas zonas generadoras correspondientes a lugares en que los vientos posean una dirección y velocidad regulares y periódicas.

Las características del oleaje, altura **H** y periodo **T**, dependen de varios factores. En primer lugar de la velocidad del viento, **W**, de la extensión lineal que posea la zona generadora (**fetch o alcance**), **F**, y de la **persistencia** del viento, **t**, que es el tiempo en que el viento ha estado soplando con la misma dirección y velocidad. Es decir,

$$H=H(W, F, t) \quad T=T(W, F, t)$$

Cuando el viento comienza a soplar sobre una zona generadora, el oleaje se inicia, aumentando su altura gradualmente hasta alcanzar un estado de la mar equilibrado, es decir, un equilibrio energético que hace que, para esa velocidad y con ese alcance, no aumente el estado de la mar aunque el viento continúe soplando. Se dice entonces que la **mar está plenamente desarrollada**, y al tiempo necesario para alcanzar ese estado se le llama **persistencia mínima**, **t_m**.

Cuando la mar se encuentra plenamente desarrollada, las dos magnitudes anteriores son independientes del tiempo, y podemos escribir,

$$H=H(F, W) \quad T=T(F, W)$$

Observemos, por otra parte, que cuanto mayor sea la velocidad del viento (para un fetch dado), más tiempo se requiere para alcanzar la mar plenamente desarrollada. Además, este estado de la mar no se alcanza simultáneamente en toda la zona generadora. La condición de equilibrio energético se va propagando, por así expresarlo, hasta cubrir la totalidad del fetch, cuando ha transcurrido la persistencia mínima, **t_m**.

De ello se deduce que, para tiempos mayores ($t > t_m$), el factor que limita el estado de la mar es el **fetch**, $H=H(W, F)$. En la figura 12.1 se muestra la representación gráfica de alturas de las olas como función del viento y del fetch. Las primeras expresadas en grados de la escala Beaufort, y el segundo en millas.

(a) $H=f(W, F)$

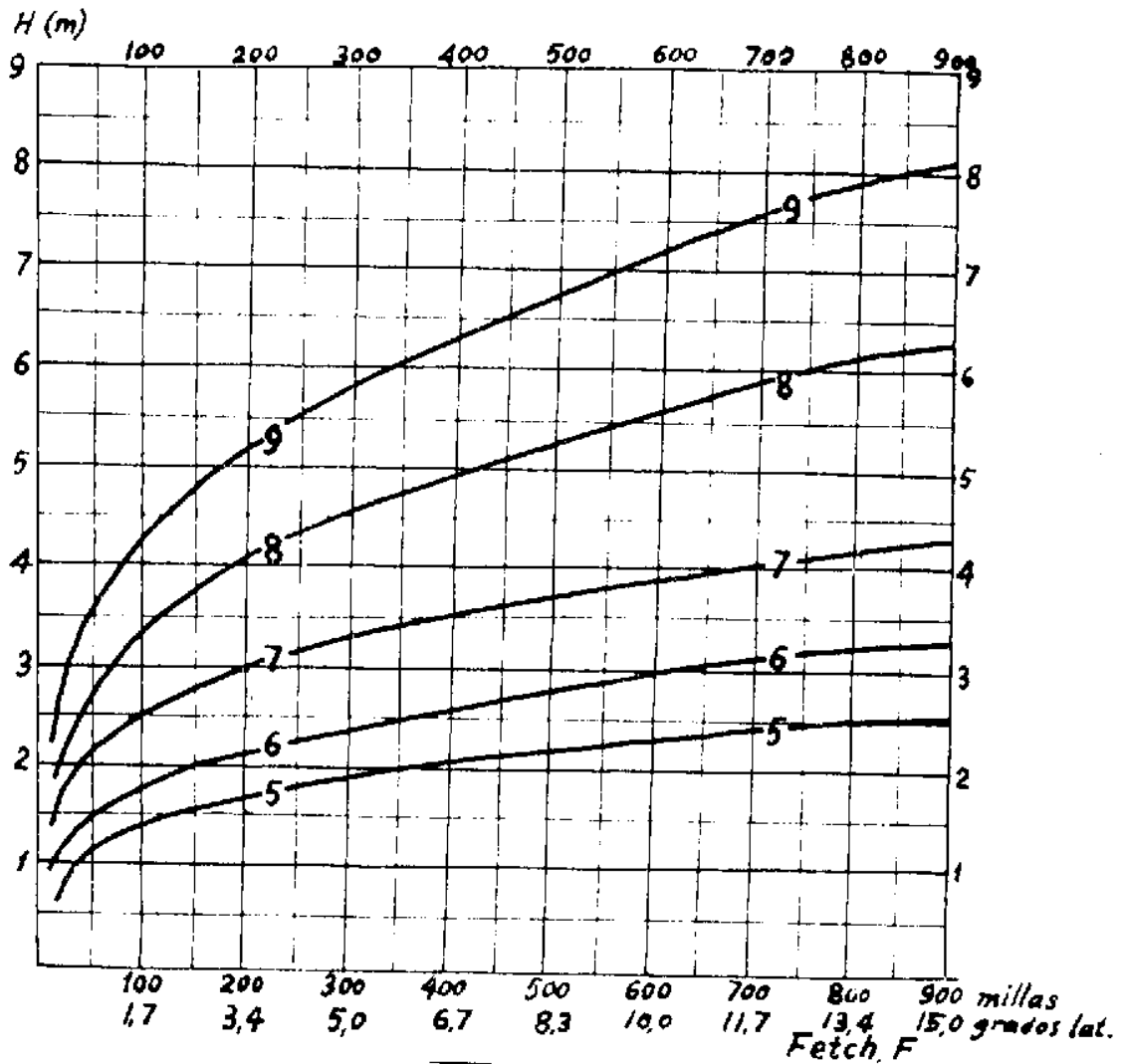


Figura 12.1

Análogamente, si suponemos que la región en que se produce la mar de viento posee un fetch infinito, el estado de la mar alcanzado para cada intensidad del viento dependerá sólo de la persistencia, $H=H(W, t)$, y así, en la figura 12.2 se recoge tal dependencia de forma análoga al caso anterior.

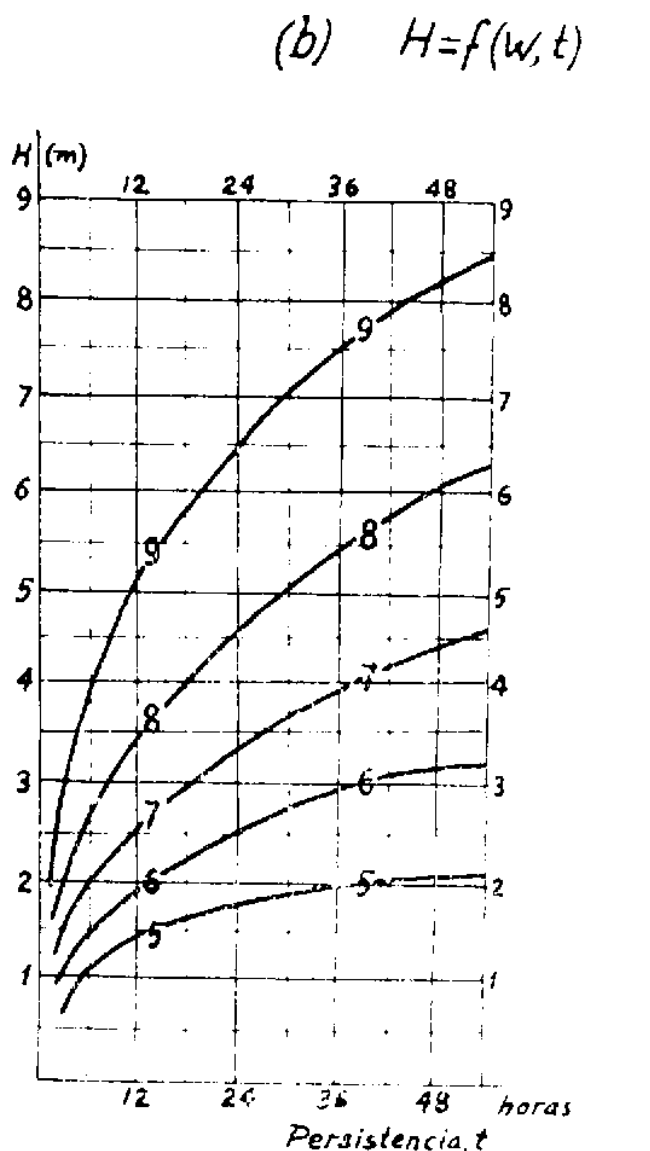


Figura 12.2

Es obvio que, en los dos casos expuestos, se han contemplado condiciones ideales, en el primero la persistencia y en el segundo el fetch se han supuesto infinitos. En la práctica jamás encontramos estas circunstancias, y para determinar la altura del oleaje usaremos el ábaco correspondiente a la magnitud que se encuentra limitada, F ó t . La utilización del ábaco incorrecto proporcionaría alturas superiores a las reales.

En la figura 12.3 se muestra una gráfica que permite determinar la persistencia mínima, t_m , que, para diversos fetch (líneas gruesas), necesaria para levantar una mar plenamente desarrollada, con distintas velocidades de viento.

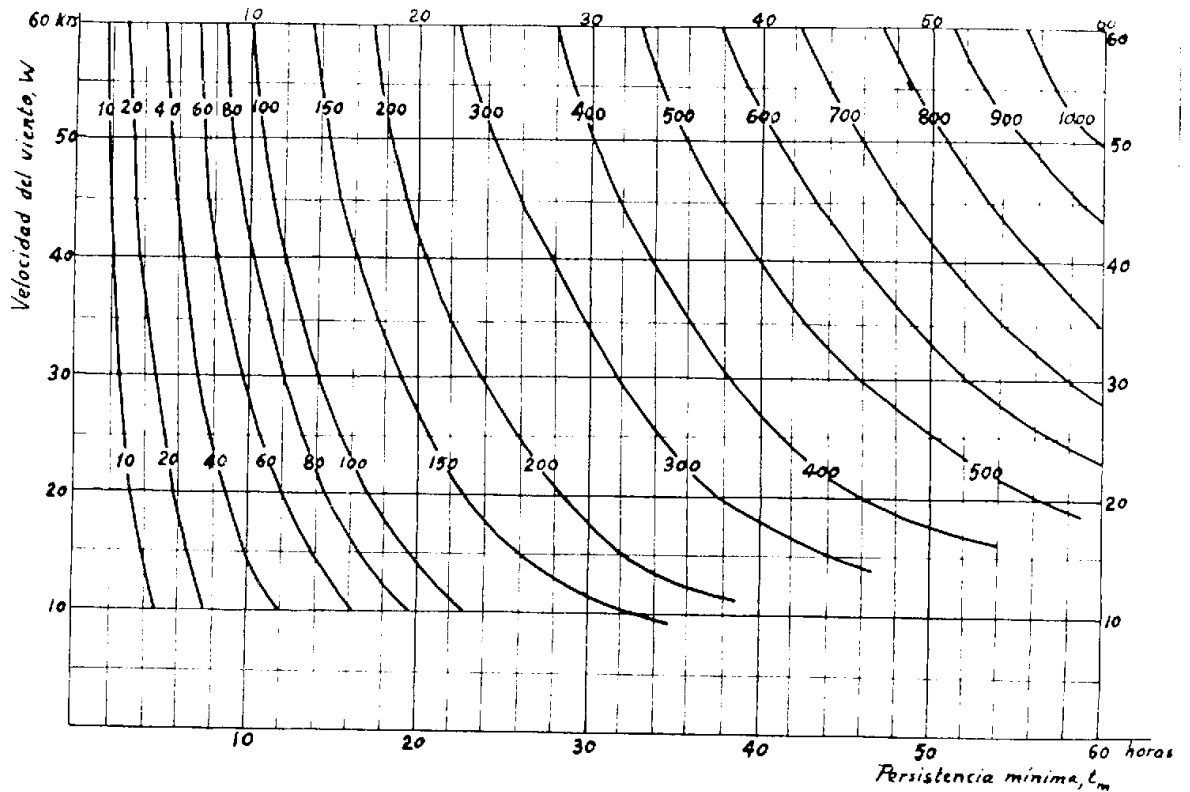


Figura 12.3

Con objeto de consolidar las ideas, efectuemos un ejemplo: Hallar el estado de la mar que genera un viento de 30 nudos (fuerza 7) soplando a lo largo de 640 millas sobre el océano, durante 12 horas.

El gráfico de la figura 12.3 concluye que con ese viento y ese fetch son precisas 55 horas para alcanzar mar plenamente desarrollada. Esto significa que la situación planteada en el problema contempla una mar en desarrollo, por no haber alcanzado la persistencia mínima. Hemos de consultar, en tal caso, la gráfica de la figura 12.2, $H=H(W, t)$, que proporciona una altura de 2.6 m para las olas.

Si hubiésemos consultado el ábaco de la figura 12.1, $H=H(W,F)$, habríamos encontrado olas de 3.9 m, superiores a las que realmente corresponde.

Como regla práctica, se aconseja determinar las alturas de las olas con ambos ábacos, tomando la menor de las alturas indicadas.

12.2.- Fetchs móviles.

En la descripción anterior hemos considerado que la zona generadora es un ente estático. Sin embargo, es muy frecuente que estas zonas experimenten un desplazamiento, con lo que la predicción del estado de la mar se complica considerablemente, ya que influye en él un nuevo parámetro vectorial: la velocidad de la zona generadora.

Este problema es muy corriente en el Atlántico Norte en invierno, por la cantidad de borrascas móviles que lo cruzan, y cuyo desplazamiento puede formar un ángulo cualquiera con el viento existente en el fetch. En tales casos, encontrar la relación entre la fuerza del viento y la propagación de la energía resulta muy complicado, por lo que limitaremos nuestro estudio a dos casos extremos, en que las direcciones de los vientos de una zona generadora y su propio desplazamiento son paralelos o perpendiculares, casos que ilustra la figura 12.4. Así, en la zona generadora S, ambos se desplazan en una misma dirección, y si ambas velocidades son del mismo orden, las olas se encontrarán sometidas siempre al embate del viento, lo que significa que la mar se encontrará plenamente desarrollada antes que si la citada zona fuera estacionaria, es decir, *un fetch corto y móvil puede generar una ola más alta que otro estacionario de la misma longitud*, o lo que es lo mismo *un fetch móvil equivale a otro estacionario más largo*.

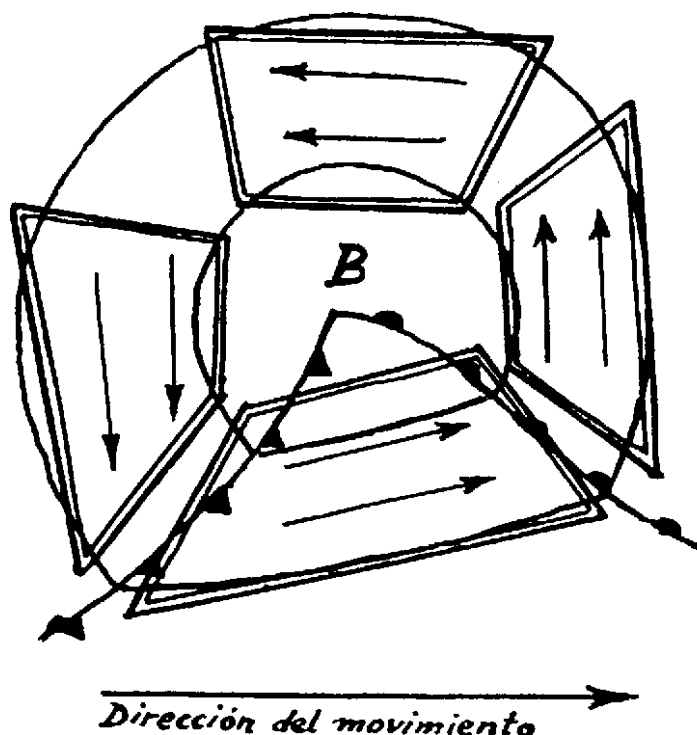


Figura 12.4

Por el contrario, la zona generadora N enfrenta su desplazamiento a la dirección de las olas, lo que equivale a decir que *el fetch móvil, en este caso, es equivalente a otro estacionario de menor extensión.*

El análisis que acabamos de efectuar es sólo cualitativo. Para efectuar aplicaciones cuantitativas tendremos en cuenta las velocidades del fetch y de las olas (velocidad de grupo determinada a partir de su periodo), de manera que el tiempo transcurrido hasta que se separan proporciona la *persistencia equivalente* con la que efectuaremos los cálculos pertinentes igual que si se tratara de una zona generadora estática.

Cuando las direcciones de desplazamiento son perpendiculares calcularemos la persistencia efectiva dividiendo la anchura de la zona generadora por su velocidad de traslación.

El método que se indica no está fundamentado en un análisis riguroso del problema, pero proporciona resultados suficientemente satisfactorios, y dentro del margen de error admitido en la prognosis del estado de la mar.

12.3.- Mar de fondo.

Cuando el oleaje originado por el viento abandona la zona generadora, continúa propagándose, pero como ya no dispone de un aporte energético, su avance será cada vez menos intenso, por lo que se irá amortiguando al tiempo que redondea su perfil. *La mar de viento se ha convertido en mar de fondo.*

Observemos que la condición definitoria de la mar de fondo es que cese el aporte energético del viento, lo que significa que también es posible que exista mar de fondo en una zona generadora, si dentro de la misma deja de soplar el viento.

La mar de fondo se propaga con la velocidad de grupo, anteriormente estudiada, por lo que es capaz de alcanzar enormes distancias en el océano.

El pronóstico de la mar de fondo no es, por tanto, función de los vientos previstos, sino del movimiento previsto para las olas de una mar de viento fuera de su zona generadora.

Recordemos que las olas generadas por el viento no son "monocromáticas", sino que resultan de la superposición de toda una serie de componentes, cada una de las cuales posee una frecuencia y amplitud propias, que se propagan en la dirección en la que sopla el viento (tren de ondas). Como la velocidad individual es función de su periodo, las olas de periodo más corto irán quedando rezagadas, de manera que al cabo de un tiempo la banda de frecuencias será más estrecha, permaneciendo solo las componentes con periodo más largo. por este motivo la mar de fondo se caracteriza por un perfil más regular que la mar de viento. Como el avance es

amortiguado (disminuye su amplitud) ambos factores contribuyen a que disminuya la pendiente. Esto explica que las olas de viento, irregulares y de gran pendiente, se transformen en una ondulación más regular y de menor pendiente cuando alcanzan una zona de calma.

En virtud de la dispersión angular citada en la sección anterior, la mar de viento no se propaga solo en la dirección del viento reinante en la zona generadora, por lo que las zonas no situadas directamente frente a la misma se verán también afectadas por la mar de fondo.

12.4.- Parámetros de la mar de fondo.

Si conocemos la altura, H_0 , alcanzada por la mar de viento al final de la zona generadora y su longitud de onda, L , es posible determinar la altura y hora de llegada a un punto cualquiera de la mar de fondo.

La distancia entre el límite de la zona generadora y el punto considerado se denomina **distancia de amortiguamiento**.

El citado cálculo se basa en la hipótesis de que el principal factor de amortiguamiento es la viscosidad, y por tanto la disminución de altura es función exponencial de la distancia recorrida. Así, llamando H a la altura que las olas tendrán tras haber recorrido en calma una distancia D , tendremos que

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{D}{L}} \quad (12.1)$$

donde D se expresa en km. y L en metros.

Una expresión más tradicional para el resultado anterior es

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{D}{L}} \quad (12.2)$$

en que D viene expresado en millas (1.852 km) y L en pies (0.308 m). De ella se deduce una apreciada regla práctica que señala que *la altura de las olas se reducen en un tercio cuando han recorrido una distancia en millas igual a su longitud de onda en pies*.

Al segundo término de las expresiones anteriores, determinado para una D y L dadas, se denomina **coeficiente de amortiguamiento**, y siempre será menor que la unidad.

Para averiguar la hora de llegada aplicaremos el criterio según el cual la velocidad de propagación de la mar de fondo (tren de ondas) es la mitad de la velocidad con que se propagan las olas individuales que la conforman, y de acuerdo con (10.4) tendremos:

$$V = \frac{gT}{4\pi} = 1.53 T \quad (12.3)$$

donde V se mide en nudos y T en segundos.

A veces no resulta conocido el periodo, sino la longitud de onda de la ola, siendo útil recordar la relación deducida con anterioridad:

$$L = 1.56 T^2 \quad (12.4)$$

con L en metros y T en segundos.

A partir de la velocidad de grupo y la distancia de amortiguamiento, es simple determinar la hora de llegada al punto considerado.

12.5.- Zonas de viento secundario.

En lo expuesto se ha supuesto que la mar de fondo avanza por zonas en calma, y por tanto solo se ve afectada por el factor de amortiguamiento. Sin embargo es más frecuente que la mar tendida encuentre a su paso áreas azotadas por el viento. En este caso el oleaje es afectado por los vientos, que alteran sus características. Tal área se denomina **zona de viento secundario**.

Puesto que la influencia sobre el oleaje de la mar de fondo primaria es, en definitiva, una cuestión energética, y la propia mar de fondo lleva asociada una energía, cualquier viento no será capaz de alterar sustancialmente el oleaje. Así, se realiza el convenio de definir como zona de viento secundario aquella en que la componente del mismo paralela a la propia mar de fondo, no sea inferior a 6 nudos, pues velocidades menores no afectan a aquella.

Es evidente que existen múltiples posibilidades desde que una mar de viento abandona su zona generadora, se convierte en mar de fondo y avanza por diversas zonas de viento secundario (que la modifican) hasta alcanzar una determinada zona en calma. En la figura 12.5 se esquematizan múltiples combinaciones.

El efecto que, en la mar de fondo, provoca una zona de viento secundario es la modificación de la altura de las olas respecto de la que tendría en caso de avanzar por una zona en calma, aumentándola o disminuyéndola según que la componente de viento en la zona sea del mismo sentido que la mar o de sentido contrario, respectivamente.

En definitiva, el citado efecto puede ser interpretado como una alteración en la distancia de amortiguamiento, de manera que en lugar de considerar la distancia real se utiliza la

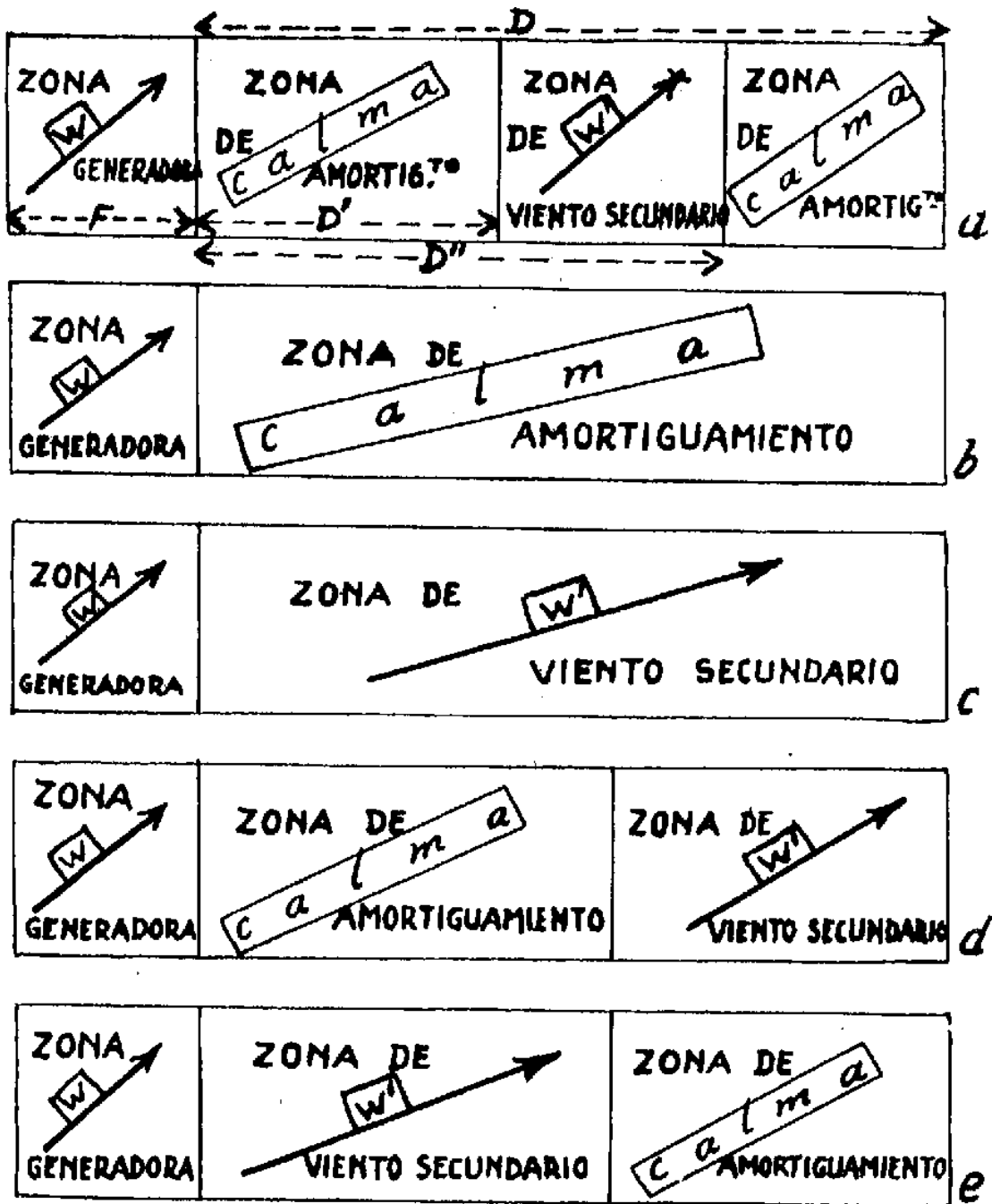


Figura 12.5

denominada **distancia de amortiguamiento efectivo**, D_e , definida como la distancia de mar en calma que produce igual amortiguamiento que la zona secundaria en cuestión.

No es difícil deducir que tal parámetro vale

$$D_e = D \left(1 - \frac{W'}{c}\right) \quad (12.5)$$

siendo W' la componente paralela a la mar de fondo del viento secundario (positiva si tiene el mismo sentido y negativa en caso contrario).

El paso de la mar tendida por sucesivas zonas de vientos secundarios dará lugar a la reiterada aplicación de lo expuesto, sustituyendo cada distancia de amortiguamiento real por sus respectivas distancias de amortiguamiento efectivo.

12.6.- Rompiente..

Al inicio de este mismo capítulo señalamos que una ola se hace inestable y rompe cuando su pendiente H/L supera el valor de $1/7$. Ello obedece a que en tal caso la velocidad de la partícula de agua supera en lo alto de la cresta la velocidad de la propia ola, y la abandona "por delante" dando lugar a **rociones**.

Abordar la predicción de rompientes en la costa es muy complejo y escapa al propósito del presente curso, aunque no renunciamos a dar unas pocas ideas básicas.

Cuando la mar de fondo alcanza la costa, la velocidad de propagación es $c = g d$, siendo d la profundidad del fondo. La línea de crestas tiende a colocarse paralela a la costa, con independencia de la dirección de la que provenga. Su longitud de onda disminuye mientras que su periodo permanece constante, lo que hace disminuir la velocidad, como indica la expresión anterior, a causa de la disminución del fondo.

La relación d/L_0 (siendo L_0 la longitud de onda de la ola en aguas profundas) es la llamada **profundidad relativa**, que es la principal variable independiente en la teoría de predicción de rompientes. Cuando es inferior a $1/2$ la ola rompe al alcanzar su pendiente el valor crítico de $1/7$.

Observaciones experimentales han permitido verificar que, a medida que la ola avanza sobre fondos menores, la relación entre profundidad y altura de la ola que rompe es prácticamente constante e igual a **1/3**.

P12.1.- *Isobaras rectilíneas correspondientes a vientos de 30 nudos se prolongan a lo largo de 500 millas durante 36 horas. Determinar el oleaje que se habrá establecido al cabo de ese tiempo en puntos distantes 100, 200, 300, 400 y 500 millas del inicio de la zona generadora y discutir los resultados obtenidos.*

En el ábaco de persistencias mínimas observamos que para vientos de 30 nudos soplando durante 36 horas, la mar se habrá desarrollado sólo en las primeras 360 millas, a partir de las cuales la mar se encontrará todavía en desarrollo. Con ello, y usando los ábacos que se indican, para fuerza 7 del viento:

$$F=100 \text{ Mi} \rightarrow H=H(W,F) = H(7,100) = \mathbf{2.5 \text{ m}}$$

$$F=200 \text{ Mi} \rightarrow H=H(W,F)=H(7,200) = \mathbf{3 \text{ m}}$$

$$F=300 \text{ Mi} \rightarrow H=H(W,F) = H(7,300)= \mathbf{3.3 \text{ m}}$$

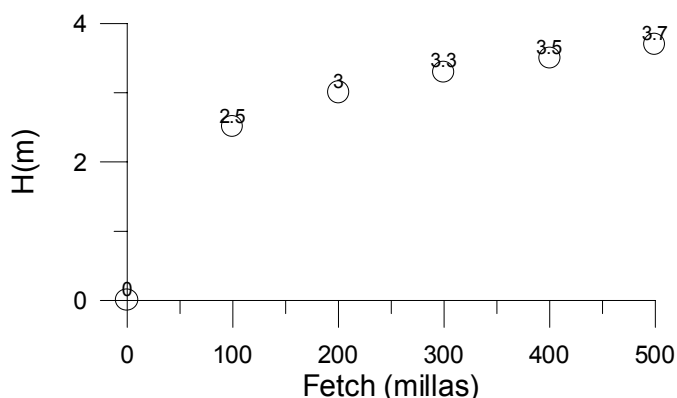
$$F=400 \text{ Mi} \rightarrow H=H(W,t)=H(7,36)=3.9 \text{ m}$$

$$H=H(W,F)=H(7,400)=\mathbf{3.5 \text{ m}}$$

$$F=500 \text{ Mi} \rightarrow H=H(W,t)=H(7,36)=3.9 \text{ m}$$

$$H=H(W,F)=H(7,500)=\mathbf{3.7 \text{ m}}$$

donde, para los fetch de 400 y 500 millas, hemos calculado la mar en desarrollo y plenamente desarrollada y nos quedamos con la menor (no olvidemos la aproximación que introduce el uso de los ábacos, en que las velocidades del viento se expresan en fuerza Beaufort). Con tales resultados podemos representar las alturas en función de las distancias, obteniendo así el perfil de desarrollo de la mar a lo largo de todo el fetch.



P12.2.- *Una depresión establecida sobre el océano genera vientos de fuerza 8 que levantan olas de altura máxima 5 metros. ¿Cuál es el alcance de la zona generadora? ¿Cuánto tiempo lleva activo este temporal?*

Utilizando los ábacos de mar plenamente desarrollada y persistencia mínima:

$$H=H(W,F) \rightarrow 5=H(8,F) \Rightarrow F=400 \text{ millas}$$

$$t_m=f(F,W) \rightarrow t_m(400,8) = 36 \text{ horas}$$

P12.3.- Isobaras anticiclónicas generan vientos constantes de 25 nudos, durante 36 horas, a lo largo de 500 millas. Si se trata de aire inestable, ¿qué oleaje máximo producirán?

Al tratarse de isobaras anticiclónicas y ser el aire inestable, el viento compensado (viento eficaz para producir oleaje) se obtiene sumando un 15% al valor medido, esto es 29 nudos ($f=7$).

El ábaco de persistencias mínimas indica que para conseguir mpd con $F=500$ millas y $w=29$ nudos, es necesario que el viento sople durante, al menos, 47 horas. Ello significa que el oleaje observado en las condiciones propuestas es de mar en desarrollo, por lo que su estado lo obtendremos del ábaco $H=H(W,t) = H(f=7, t=36) = 3.9$ metros

P12.4.- Isobaras ciclónicas aproximadamente rectilíneas a lo largo de 200 millas generan un viento de fuerza 6. La temperatura del aire es de 20°C y la del mar de 15°C. Determinar la altura del oleaje provocado al cabo de 12 horas, así como la previsión en caso de que persista la misma situación de superficie.

Aunque el aire es estable ($T_{mar}-T_{aire}<0$), al ser las isobaras rectilíneas el viento compensado coincide con el medido. La persistencia mínima

$$t_m(W=6,F=200)=26 \text{ horas}$$

con lo que $t < t_m$, y por tanto la mar estará en desarrollo, con lo cual

$$H=H(W,t)=H(W=6,t=12)=1.9 \text{ metros}$$

El estado de la mar 12 horas después ($t=24 \text{ h} \approx 26 \text{ h}$) será plenamente desarrollado, con lo que

$$H=H(W,F)=H(W=6, F=200) = 2.1 \text{ metros.}$$

El pronóstico del estado de la mar, tras las primeras 12 horas, sería: mar creciente hasta 2.1 metros durante las siguientes 14 horas.

P12.5.- Un barco navega con rumbo N a 15 nudos, cuando entra en una zona generadora de vientos de levante de 40 nudos, que posee una anchura de 180 millas y cuyo origen se encuentra 300 millas al este. Periodo del oleaje observado, 5s. ¿Qué altura de olas afectará al buque en ese instante y en las próximas 12 horas?

Cuando el barco penetra en la zona generadora (posición A), el oleaje posee un periodo de 5 s, luego su velocidad de propagación es de $c=3.06 \times 5=15.18$ nudos. Al ser la velocidad del

viento de 40 nudos, la edad del oleaje viene dada por $c/W = 0.38$, lo que indica que se trata de una mar en desarrollo (edad < 0.46), por tanto su altura la obtendremos mediante el ábaco

$$H = H(W, t) = H(40, 300) = 5 \text{ metros}$$

Podemos confirmar que la mar se encuentra en desarrollo usando el ábaco de persistencia mínimas, según el cual

$$t_m(W=40, F=300) = 28 \text{ horas}$$

ahora bien, si la mar se desplaza a 15.18 nudos, las 300 millas de alcance de la zona generadora las recorrería en $t = 300/15.18 = 20$ horas, que es menor que la persistencia mínima para alcanzar mpd.

Doce horas más tarde el buque habrá recorrido $d = 12 \times 15 = 180$ millas, por lo que se encontrará en una posición B, aún dentro de la zona generadora. Para entonces la persistencia del viento será de $20 + 12 = 32$ horas, sin que haya cambiado el fetch de la zona. Siendo ahora $t > t_m$ la mar se encontrará plenamente desarrollada, por lo que su estado vendrá dado por

$$H = H(W, F) = H(40, 300) = 5.2 \text{ metros}$$

que, como vemos, ha supuesto muy poco cambio en la altura de las olas.

P12.6.- Un buque que navega a 15 nudos con viento de proa de 25 nudos, observa olas de 2 m de altura que rompen en rociones en su cúspide. Efectuar la predicción del estado de la mar para las siguientes 12 horas.

Si el oleaje rompe en rociones, interpretamos que la mar está desarrollada, por lo que

$$H = 2 \text{ m} = H(W, F) = H(25, F) \Rightarrow F = 150 \text{ millas}$$

Puesto que en 12 horas el buque recorre $12 \times 15 = 180$ millas, al cabo de las mismas el buque, que ha ido acortando el fetch (y por tanto experimentando una disminución del estado de la mar) habrá salido de la zona generadora, por lo que, en ausencia de otras informaciones, navegará por mar en calma.

P12.7.- En una zona generadora de 400 millas de alcance, se encuentran olas de 3.5. m de altura. ¿qué posibles vientos existen y, en cada caso, cuál es el desarrollo de la mar?

De conformidad con el ábaco $H = H(W, F)$, la única posibilidad de que encontremos tal altura de oleaje con mpd y un alcance de 400 millas para la zona generadora es que el viento posea una intensidad de

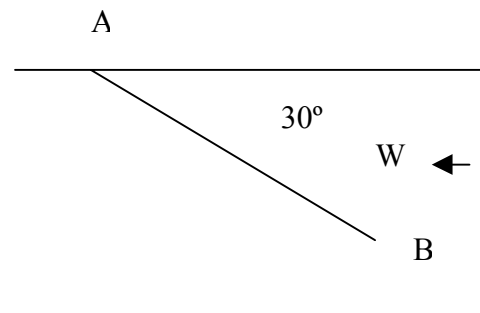
$$H = 3.5 = H(W, 400) \Rightarrow W = 30 \text{ nudos } (f = 7)$$

Para mares en desarrollo se dan más posibilidades, en efecto:

$$H=3.5=H(W,t) \Rightarrow (W=9, t=4 \text{ h}) \text{ ó } (W=8, t=13 \text{ h}) \text{ ó } (W=7, t=27 \text{ h})$$

Nótese la aproximación que supone utilizar los ábacos en términos de escala Beaufort para el viento: vientos de fuerza 7 son solución tanto para mpd como para med.

P12.8.- Un barco navega a 12 nudos cuando entra en una zona generadora con mar de 3 m. de altura, periodo medio de 6 s y vientos de 30 nudos que le entran abiertos 30° por la amura de Br. ¿cuál será el oleaje que le afectará al cabo de 12 horas, si durante ese tiempo continúa dentro de la misma zona generadora?



$$T=6s \Rightarrow c=3.06 \times 6 = 18.36 \text{ nudos (velocidad de propagación de la mar)}$$

$$\text{edad} = c/W = 0.61 > 0.46 \Rightarrow \text{mpd, luego}$$

$$H=3=H(W,F)=H(30,F) \Rightarrow F=200 \text{ millas}$$

Al cabo de doce horas el buque a pasado de A a B (distantes $12 \times 12 = 144$ millas), con lo que en la nueva posición el alcance de la zona generadora se ha reducido a

$$F' = F - AB \cos 30^\circ = 75 \text{ millas}$$

con ello,

$$H=H(W,F) = H(30, 75) = 2.2 \text{ m.}$$

12.9.- Un barco navega a 15 nudos y alcanza un punto donde reinan vientos de 30 nudos a lo largo de 200 millas durante las últimas 36 horas. ¿qué oleaje encontrará?. Si navega proa a la mar ¿cuál será el oleaje 6 y 12 horas más tarde?. Responder la misma cuestión si navega con el mar de popa.

Para tal viento (30 nudos) y alcance(200 millas) la persistencia mínima es de 24 horas, luego el buque encontrará mpd, por tanto

$$H=H(W,F) = H(30,200)=3 \text{ m}$$

Proa al mar

$$t=+ 6 \text{ horas:}$$

$$\text{distancia recorrida} = 15 \times 6 = 90 \text{ millas}$$

$$F' = 200 - 90 = 110 \text{ millas}$$

$$H = H(W, F) = H(30, 110) = 2.5 \text{ m.}$$

$t = +12$ horas

$$\text{distancia recorrida} = 15 \times 12 = 180 \text{ millas}$$

$$F' = 200 - 180 = 20 \text{ millas}$$

$$H = H(30, 20) = 1.5 \text{ m}$$

Mar de popa:

$t = +6$ horas

$$\text{distancia recorrida} = 90 \text{ millas}$$

$$F' = 200 + 90 = 290 \text{ millas}$$

$$t' = 36 + 6 = 42 \text{ horas } [t_m(30, 290) = 38 \text{ h} < 42 \text{ h} \Rightarrow \text{mpd}]$$

$$H = H(W, F) = H(30, 290) = 3.2 \text{ m}$$

$t = +12$ horas

$$\text{distancia recorrida} = 180 \text{ millas}$$

$$F' = 200 + 180 = 380 \text{ millas}$$

$$t' = 36 + 12 = 48 \text{ horas } [t_m(30, 380) = 38 \text{ h} < 48 \text{ h} \Rightarrow \text{mpd}]$$

$$H = H(W, F) = H(30, 380) = 3.5 \text{ m.}$$

P12.10.- Al final de una zona generadora de mar de viento, el oleaje alcanza 5 metros de altura y 120 m de longitud de onda. Determinar cuándo y con qué altura alcanzará la mar de fondo un punto distante 500 millas.

El factor de amortiguamiento valdrá: $(2/3)^{D/L} = 0.595$, donde hemos utilizado $D=500$ millas y $L=390$ ft, con ello

$$H = 0.595 H_0 = 0.595 \times 5 = 3 \text{ m}$$

Por otra parte, $L = 1.56 \times T^2$, esto es, $T^2 = 120/1.56$, con lo que $T = 8.8$ s, y la velocidad de propagación de la mar, $c = 3.06 \times T = 27$ nudos.

Como la distancia recorrida por la mdf es de 500 millas, tardará en alcanzar el punto citado

$$t = D/c = 500/27 = 18.5 \text{ h} = 18^h 30^m.$$

P12.11.- En una zona generadora de 300 millas han soplado vientos de 28 nudos que han desarrollado plenamente la mar. Determinar la altura que alcanzará la mdf en un punto situado a 200 millas de distancia, y el tiempo que tardará en alcanzar dicho punto, si el periodo del oleaje es de 10 s.

Mar de viento (mpd). Utilizando el ábaco correspondiente,

$$H=H(W,F)=H(28,300)=3.2 \text{ m (altura a la salida de la zona generadora)}$$

Mar de fondo (El periodo dado es el del oleaje, es decir su valor medio)

$$L=1.56 T^2 = 156 \text{ m} = 506 \text{ ft} \quad y \quad c=3.06 T = 30.6 \text{ nudos (grupo)}$$

$$t = 200/30.6 = 6.5 \text{ h} = 6^{\text{h}} 30^{\text{m}} \text{ (tiempo que tarda en alcanzar la mdf al punto)}$$

En cuanto al coeficiente de amortiguamiento:

$$(2/3)^{D/L} = (2/3)^{200/506} = 0.85$$

con lo cual

$$H = 0.85 H_0 = 0.85 \times 3.2 = 2.7 \text{ m.}$$

P12.12.- Una zona de 300 millas es barrida por vientos de fuerza 8 el tiempo suficiente para desarrollar plenamente la mar, generando grupos de olas de 5, 7 y 9 s de periodo. Estudiar la evolución de la mar de fondo a 150 millas del final de la zona generadora.

Mar de viento (mpd)

Persistencia mínima $\Rightarrow t_m(W=8,300)=30$ horas (tiempo mínimo que lleva soplando el viento)

$$H=H(W,F) = H(8,300) = 4.5 \text{ m (altura de la mar a la salida de la zona generadora)}$$

Los periodos dados corresponden a grupos de olas, cada uno de los cuales se desplazará con velocidades:

$$c_1=3.06 \times 5 = 15.3 \text{ nudos} \Rightarrow L_1=1.56 \times 25 = 39 \text{ m} = 127 \text{ ft}$$

$$c_2=3.06 \times 7 = 21.4 \text{ nudos} \Rightarrow L_2= 1.56 \times 49 = 76.5 \text{ m} = 248 \text{ ft}$$

$$c_3=3.06 \times 9 = 27.5 \text{ nudos} \Rightarrow L_3= 1.56 \times 81 = 126 \text{ m} = 410 \text{ ft}$$

cada uno de tales grupos genera mdf con coeficientes de amortiguamiento respectivos, tras recorrer 150 millas, de

$$(2/3)^{150/127} = 0.62, (2/3)^{150/248}=0.78 \text{ y } (2/3)^{150/410}=0.86, \text{ que proporcionan mares de alturas}$$

$H_1= 4.5 \times 0.62 = 2.8 \text{ m}$, $H_2=4.5 \times 0.78=3.5 \text{ m}$ y $H_3=4.5 \times 0.86 = 3.9 \text{ m}$, que alcanzarán el punto distante 150 millas:

$t_1 = 150/15.3 = 9.8$ horas, $t_2 = 150/21.4 = 7$ horas y $t_3 = 150/27.5 = 5.5$ horas, respectivamente, después de abandonar la zona generadora.

P12.13.- En un punto del océano se inicia una mdf que se desplaza a 42 nudos en dirección NE, con una altura inicial de 6 m. Recorre 200 millas y entra en una zona de vientos secundarios del N de 35 nudos que le afectan durante 150 millas. ¿Con qué altura y al cabo de cuánto tiempo afectará la mdf a un punto distante 500 millas del final de la citada zona generadora?

La zona de viento secundario genera viento de

$$W' = -W \cos 45 = -24.7 \text{ nudos}$$

opuesto a la dirección en que avanza la mdf, por lo que la distancia equivalente a las 150 millas batidas por tan viento será

$$D_e = D \left(1 + \frac{W'}{c} \right) = 150 \left(1 + \frac{24.75}{42} \right) = 238 \text{ millas}$$

es decir, las 150 millas con viento en contra producen el mismo amortiguamiento que 238 millas de mar en calma. De esta forma, la distancia de amortiguamiento efectiva recorrida por la mdf hasta alcanzar el punto en cuestión es

$$D = 200 + 238 + 150 = 588 \text{ millas}$$

y, por tanto, teniendo en cuenta que

$$c = 3.06 T \Rightarrow T = 42/3.06 = 13.7 \text{ s y } L = 1.56 \times T^2 = 294 \text{ m} = 954 \text{ ft}$$

tendremos

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{D}{L}} = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{588}{954}} = 0.779$$

es decir, $H = 0.779 \times 6 = 4.7 \text{ m}$.

la mar de fondo tardará $t = d/c = 500/42 = 12$ horas en alcanzar el punto (a efectos de determinar el tiempo que tarda en desplazarse la mdf, la distancia recorrida por la mar ha de ser la real)

P12.14.- Una mdf de 5 m de altura se propaga hacia el norte con velocidad de 20 nudos, ¿qué intensidad ha de tener un viento secundario del SW que le afecta 300 millas más al norte para mantener la altura de las olas? ¿Cuál es la altura de tal oleaje?

$$c = 3.06 \times T \Rightarrow T = 20/3.06 = 6.5 \text{ s y } L = 1.56 T^2 = 67 \text{ m} = 216 \text{ ft.}$$

La mdf existente al entrar en la zona de viento secundario es

$$H/H_0 = (2/3)^{300/216} = 0.57 \Rightarrow H = 2.9 \text{ m.}$$

Si ha de sostenerse la mar en la zona de viento secundario, la distancia equivalente a la misma ha de ser nula, es decir, la componente de la velocidad del viento en la misma ha de ser igual a la velocidad de avance de la mar (20 nudos) y con su mismo sentido, luego

$$W' = W \cos 45 = 20 \Rightarrow W = 28 \text{ nudos.}$$

P12.15.- A bordo del buque SIRIUS observamos una mar de viento plenamente desarrollada. La ola más alta tiene 5 m de altura y 12 s de periodo, y desde ese punto se propaga como mdf hacia el E. Informamos de ello a otro barco, distante 300 millas al este de nuestra posición, que se encuentra en el centro de una zona generadora de 200 millas de largo y 100 millas de ancho con vientos del SE de 25 nudos. ¿Cuánto tardará la mdf en alcanzar al segundo barco? ¿Qué altura medirá para el oleaje de fondo?

Dada la situación enunciada, podemos estimar que la proyección de media zona generadora sobre la dirección de avance de la mdf, se convierte para esta en zona de viento secundario, que se opone a su avance (aumenta el amortiguamiento de la mdf), así:

$$\text{longitud de la zona de viento secundario} = 100 \cos 45^\circ = 71 \text{ millas}$$

$$\text{velocidad efectiva del viento secundario} = W' = 25 \cos 45 = 18 \text{ nudos}$$

Por otra parte, la velocidad de propagación de la ola más alta es $c_0 = 3.06 \times 12 = 36.7$ nudos, siendo esta la velocidad de una fase del oleaje, la velocidad de grupo para el mismo es la mitad, esto es, $c = 18.4$ nudos. Con ello, la distancia de amortiguamiento equivalente a la zona de viento secundario

$$D_e = 71 \left(1 + \frac{18}{18.4} \right) = 140 \text{ millas}$$

con lo que la distancia de amortiguamiento que recorre la mdf antes de alcanzar al segundo barco es $D = (300 - 71) + 140 = 369$ millas, y puesto que $L = 1.56 \times 12^2 = 225 \text{ m} = 729 \text{ ft}$, tenemos

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{369}{729}} = 0.81 \Rightarrow H = 4 \text{ m}$$

que será la máxima altura de olas para la mdf que afectará al barco en cuestión, y que alcanzará al mismo $t = 300/18.4 = 16.3$ horas = $16^h 18^m$, después de abandonar la zona generadora.

P12.16.- En una mdv que se propaga al E, y al final de su zona generadora, se observan dos grupos de olas extremas: una de 5 s de periodo y 6 m de altura, y otra de 12 s de periodo y 8

m de altura. La mdf así generada avanza 200 millas sobre mar en calma y penetra en una región de vientos secundarios de NW de 20 nudos que le afectan a lo largo de 300 millas, pasadas las cuales, avanza 100 millas más sobre mar en calma, y luego otras 150 millas con vientos del SW de 15 nudos. Analizar la mdf que alcanzará la costa situada al este y distante 900 millas del inicio de la mencionada mdf.

Primer grupo de olas

$$c_1 = 3.06 \times 5 = 15.18 \text{ nudos} \quad L_1 = 1.56 \times 25 = 39 \text{ m} = 127 \text{ ft}$$

Distancias de amortiguamiento equivalentes para las dos zonas de viento secundario:

$$D_{e1} = 300 \left(1 - \frac{20 \cos 45}{15.18} \right) = 20 \text{ millas} \quad D_{e2} = 150 \left(1 - \frac{15 \cos 45}{15.18} \right) = 45 \text{ millas}$$

Distancia de amortiguamiento equivalente hasta la costa:

$$D_e = 200 + 20 + 100 + 45 + 150 = 515 \text{ millas}$$

Factor de amortiguamiento:

$$(2/3)^{515/127} = 0.19$$

Altura de la mar en la costa:

$$H = 0.19 \times 6 = 1.2 \text{ m}$$

Tiempo de llegada:

$$t_1 = 900/15.18 = 59.3 \text{ horas} = 59^h 18^m$$

Segundo grupo de olas

$$c_2 = 3.06 \times 12 = 36.7 \text{ nudos} \quad L_2 = 1.56 \times 144 = 225 \text{ m} = 729 \text{ ft}$$

Distancias de amortiguamiento equivalentes para las dos zonas de viento secundario:

$$D_{e1} = 300 \left(1 - \frac{20 \cos 45}{36.7} \right) = 184 \text{ millas} \quad D_{e2} = 150 \left(1 - \frac{15 \cos 45}{36.7} \right) = 107 \text{ millas}$$

Distancia de amortiguamiento equivalente hasta la costa:

$$D_e = 200 + 184 + 100 + 107 + 150 = 741 \text{ millas}$$

Factor de amortiguamiento:

$$(2/3)^{741/729} = 0.66$$

Altura de la mar en la costa:

$$H = 0.66 \times 8 = 5.2 \text{ m}$$

Tiempo de llegada:

$$t_2 = 900/36.7 = 24.5 \text{ horas} = 24^h 30^m$$

P12.17.- A lo largo de 200 millas soplan vientos del W de fuerza 7 durante 36 horas, levantando un oleaje de 6.5 s de periodo. Este oleaje avanza sobre mar en calma a lo largo

198 Capítulo 12.- Predicción del estado de la mar

de 300 millas, al término de las cuales encuentra una región de vientos secundarios del SW de fuerza 7, que se mantiene por 150 millas más. La mar resultante continúa su avance hacia un punto distante 300 millas. ¿En qué instante y con qué altura alcanzará dicho punto?

Mar de viento

$$t_m(W=7, F=200) = 24 \text{ horas} \quad t > t_m \Rightarrow \text{mpd} \Rightarrow H = H(7, 200) = 3 \text{ m.}$$

Mar de fondo

$$c = 3.06 \times T = 3.06 \times 6.5 = 20 \text{ nudos}$$

Zona de viento secundario

$$D_e = 150 \left(1 - \frac{30 \cos 45}{20} \right) \approx 0 \text{ (mar sostenida)}$$

luego la distancia de amortiguamiento de la mdf es de 300+300 millas

$$L = 1.56 \times T^2 = 66 \text{ m} = 214 \text{ ft}$$

con lo que

$$H = H_0 \times 0.32 = 1 \text{ m.}$$

que tarda en llegar

$$t = 750/20 = 37^{\text{h}} 30^{\text{m}}.$$