

$$\frac{g T_s}{U_{10}} = f_2 \left( \frac{g F}{U_{10}^2}, \frac{g t}{U_{10}} \right) \quad (\text{XII-14})$$

con lo que ahora es necesario variar los valores de tan sólo dos parámetros adimensionales dentro de los paréntesis. Es más, suponiendo que el efecto del fetch y de la duración es independiente, rigiendo aquél que limite más el crecimiento de la ola, en realidad es sólo necesario realizar experimentos o mediciones separados para el caso de oleaje limitado por fetch (variando el primer parámetro adimensional) y para el caso de oleaje limitado por duración (variando el segundo parámetro adimensional). Observe que la forma de los parámetros adimensionales ya nos muestra información muy valiosa sobre la importancia relativa de cada una de las variables  $U_{10}$ ,  $F$  y  $t$ . Por ejemplo, para oleaje limitado por fetch, dada la variación del primer parámetro adimensional con el cuadrado de  $U_{10}$  y con la primera potencia de  $F$ , el aumentar la velocidad del viento al doble implicaría un efecto similar al de cuadruplicar el fetch<sup>6</sup> y tan solo de duplicar la duración.

Las mediciones asociadas con el llamado método SMB (de las siglas de sus principales contribuyentes Svedrup, Munk y Bretschneider), al ajustárseles curvas por mínimos cuadrados (CFE, 1983) producen, para oleaje limitado por fetch

$$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = 0.2525 \tanh \left[ 0.01 \left( \frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0.49} \right] \quad (\text{XII-15})$$

$$\frac{g T_s}{U_{10}} = 0.358 \left( \frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0.28} \quad (\text{XII-16})$$

mientras que para oleaje limitado por duración

<sup>6</sup> El efecto no es exactamente igual pues el parámetro adimensional dependiente, del lado izquierdo de la ecuación, también depende de  $U_{10}$ .

$$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = 12.3174 \tanh \left[ 0.0004345 \left( \frac{g t}{U_{10}} \right)^{0.33} \right] \quad (\text{XII-17})$$

$$\frac{g T_s}{U_{10}} = 50.721 \tanh \left[ 0.015 \left( \frac{g t}{U_{10}} \right)^{0.20} \right] \quad (\text{XII-18})$$

Puesto que, a priori, no es obvio si una cierta situación producirá oleaje limitado por fetch, limitado por duración o completamente desarrollado, el juego de ecuaciones (XII-15 y XII-16 vs. XII-17 y XII-18) a utilizar no se conoce. La limitación que regirá será aquella que produzca la mínima altura de ola, es decir, habrá que calcular con las ecs. XII-15 y XII-17, seleccionar la que produzca la  $H_s$  menor y después calcular  $T_s$  con la que resulte la limitante que rige (ecs. XII-16 o XII-18). Las ecuaciones empíricas anteriores son válidas para generación de oleaje en aguas profundas.

En la fig. XII.13 se muestra graficamente el tipo de relaciones empíricas entre los parámetros adimensionales a los que hemos hecho referencia. En esta se observa claramente que para fetch o duración suficientemente grandes, tanto la altura de ola significativa como su periodo tienden a un valor final constante (para una  $U_{10}$  dada) y que este estado completamente desarrollado coincide tanto por la rama de limitación por fetch como por la rama de limitación por duración.

En la figura XII.14 se muestra un nomograma, ya en términos de las variables directamente, no de los parámetros adimensionales, que permite el cálculo de la altura y periodo de la ola significativa en términos de  $U_{10}$ ,  $F$  y  $t$ . Este se fundamenta también en observaciones empíricas pero modificadas por los resultados obtenidos en el experimento JONSWAP (OMM,1976).

En el capítulo X, sección X.3.5, se mencionaron varios espectros de

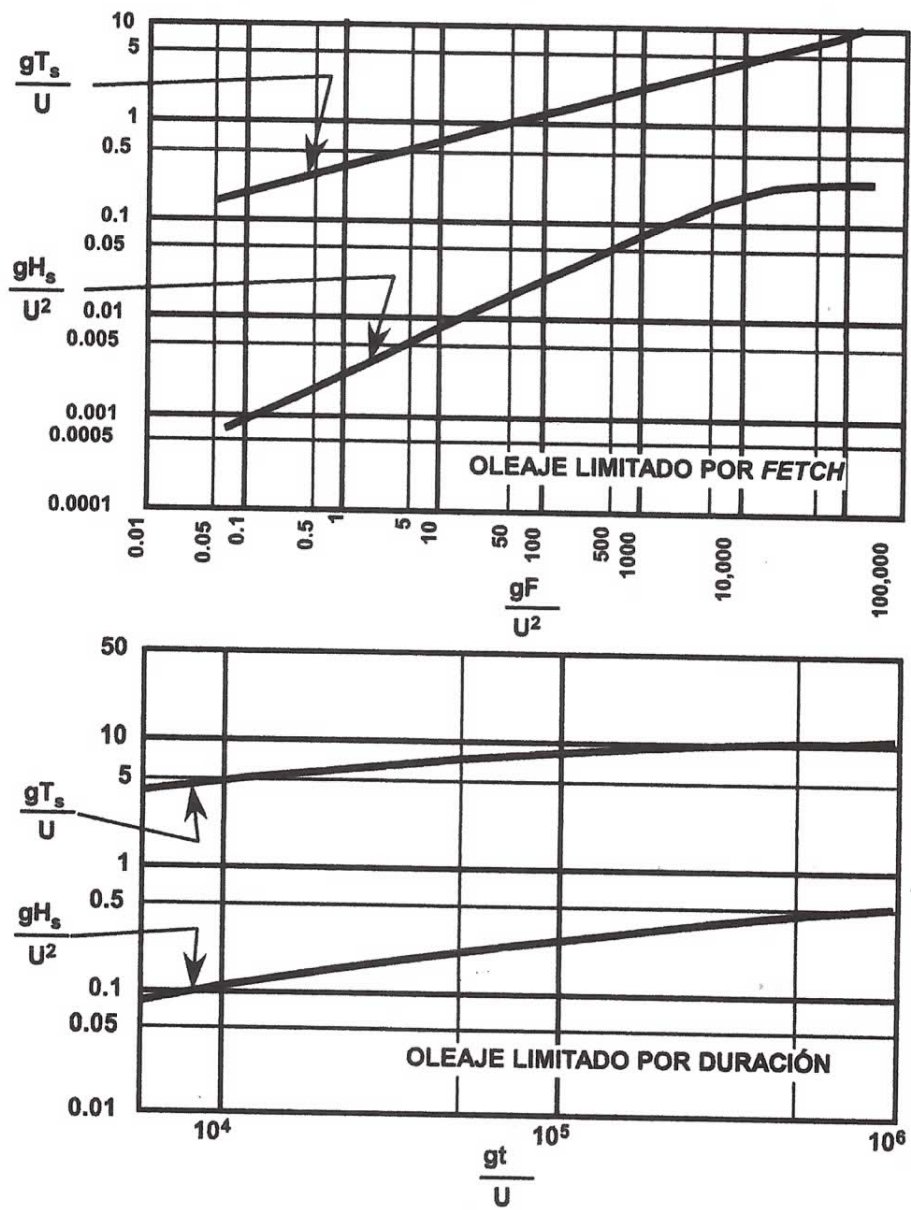
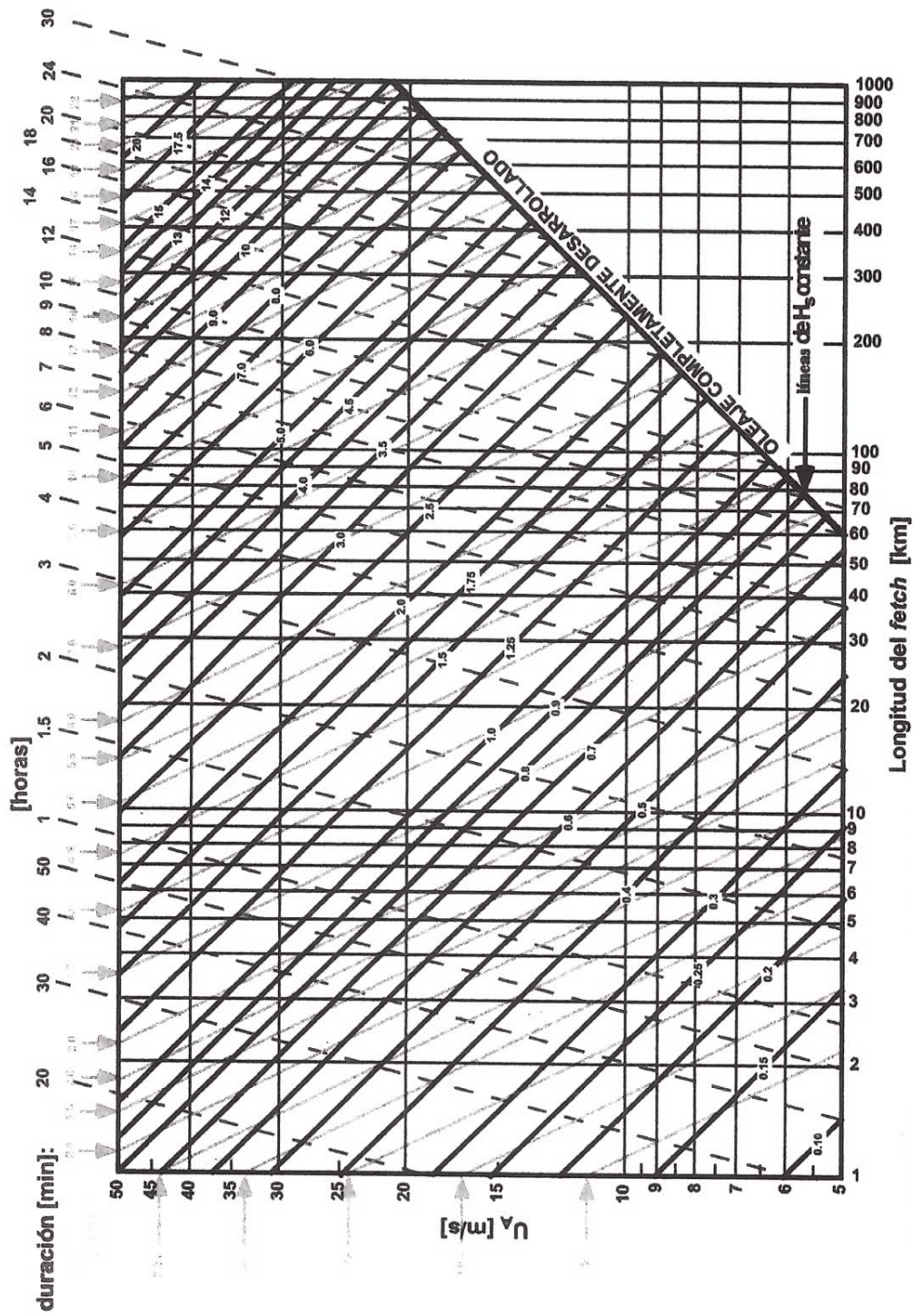


Fig. XII.13. Diagrama para cálculo de altura y periodo de ola significativa para oleaje generado por viento con limitación de *fetch* (superior) o limitación de duración (inferior), en términos de los parámetros adimensionales (ver ecs. XII-15 a XII-18). Fuente: CFE (1983).



**Fig. XII.14.** Nomograma para el cálculo de la altura de ola significativa,  $H_s$ , y el periodo del pico del espectro,  $T_p$ , en función del factor de esfuerzo por viento  $U_A$  y la longitud del fetch (o alternativamente la duración del viento). El factor de esfuerzo de viento se relaciona con  $U_{10}$  a través de la ec. XII.3 y el periodo del pico del espectro se relaciona con  $T_s$  aproximadamente como  $T_s = 0.95 T_p$ . El nomograma es válido solo para condiciones de generación de oleaje en agua profundas. Fuente: Shore Protection Manual (1984).

oleaje estándar. Aunque en dicha sección el énfasis era en la distribución de la energía a través de las diferentes frecuencias, es claro que los espectros cuyos parámetros se encuentran asociados a la velocidad del viento generador, pueden ser utilizados para calcular también la altura de la ola significativa. Ejemplos aplicables a oleaje completamente desarrollado son el de Newmann (ec.X-45) y el de Pierson-Moskowitz (ecs. X-47 y X-48). Para casos con limitación por fetch o duración (p.ej. el método de Pierson-Neumann-James) se hace referencia a CFE (1983).

### XII.3.3. Estimación y pronóstico de oleaje en forma analítica

Desarrollos más recientes en el área de generación de oleaje por viento, Hasselman et al (1973), han permitido establecer una ecuación diferencial que describe el proceso de crecimiento de la energía de oleaje al estar sujeto al viento. Puesto que dicha ecuación requiere de una solución numérica, mayores comentarios al respecto se dejan para la siguiente sección. Sin embargo, con base en dicha solución numérica, Hasselman (1976) planteó un modelo paramétrico<sup>7</sup> que posteriormente el Shore Protection Manual (1984) simplifica a las siguientes expresiones para el caso de oleaje limitado por fetch

$$\frac{g H_s}{U_A^2} = 1.6 \times 10^{-3} \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{1/2} \quad (\text{XII-19})$$

$$\frac{g T_s}{U_A} = 2.857 \times 10^{-1} \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{1/3} \quad (\text{XII-20})$$

donde sin sorpresa alguna, los parámetros adimensionales coinciden con aquellos mencionados en la sección anterior. En la ec. XII-19,  $H_s$  debe interpretarse como la ola significativa con base *espectral* (vs. observacional como en la sección anterior). Estas son aproximadamente equivalentes solo para aguas profundas, condición para la que son

<sup>7</sup> Es decir, un modelo que no requiere la solución de la ecuación diferencial gobernante, sino la aplicación de expresiones puramente algebraicas.

válidas las ecs. XII-19 y 20. También, en la ec. XII-20,  $T_s$  debe ser interpretado sólo aproximadamente igual al periodo de ola significativa observacional (de hecho 95% de dicho valor).  $U_A$  es la velocidad de viento ajustada ya definida en la sección XII.2.1, ec. XII-3. Para lograr dicho desarrollo de oleaje se requiere de una duración mínima dada por

$$\frac{gt_{eq}}{U_A} = 6.88 \times 10^1 \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{2/3} \quad (\text{XII-21})$$

es decir, sin una duración del viento generador (asumido constante en dirección y magnitud)  $t_{eq}$ , el oleaje no estaría limitado por fetch, sino por duración. Visto de otra manera,  $t_{eq}$  es la duración equivalente al fetch  $F$  en el proceso de generación de oleaje por el viento. El oleaje parcialmente desarrollado tendría una distribución de energía, a través de las diversas frecuencias, determinada en su forma general por la ec. X-52.

Las ecs. XII-19,20 y 21 son válidas sólo en el proceso de formación, antes de alcanzar los valores completamente desarrollados dados por

$$\frac{g H_s}{U_A^2} = 2.433 \times 10^{-1} \quad (\text{XII-22})$$

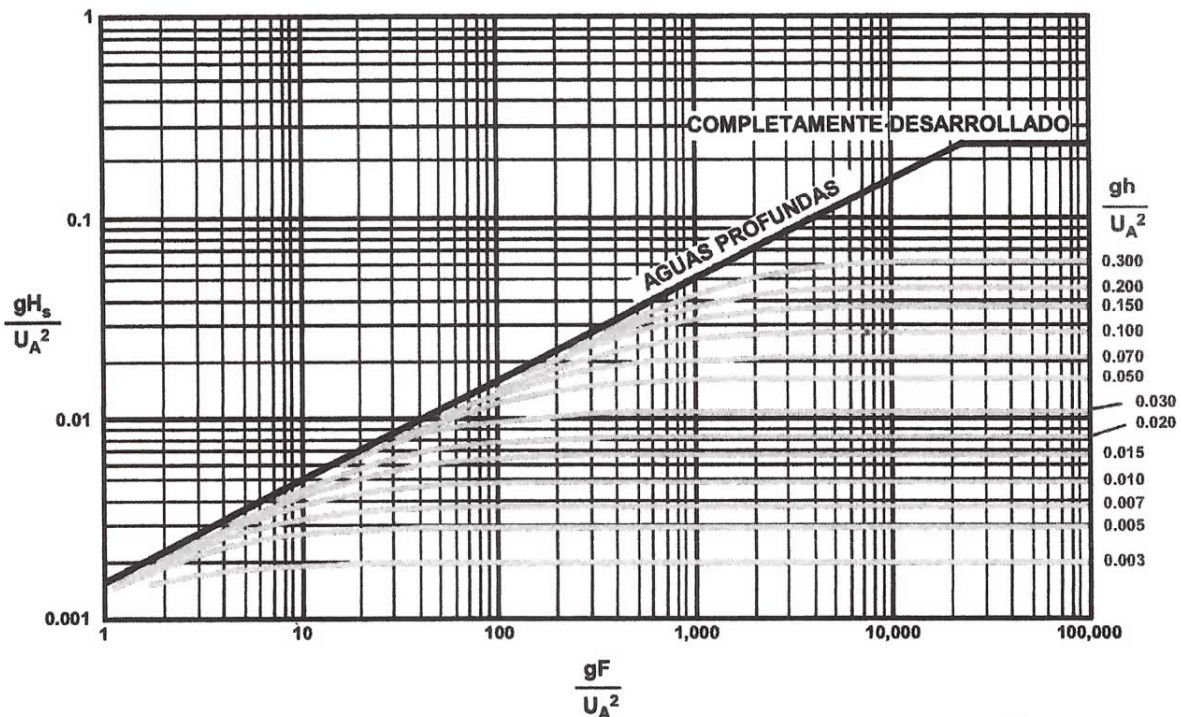
$$\frac{g T_s}{U_A} = 8.134 \quad (\text{XII-23})$$

$$\frac{gt_{eq}}{U_A} = 7.15 \times 10^4 \quad (\text{XII-24})$$

Observe que estas últimas expresiones proporcionan formas de cálculo muy rápido para las condiciones máximas de oleaje generado por el viento de magnitud conocida, así el tiempo que le tomará generarlas. Por ejemplo, un viento tal que  $U_A = 60 \text{ km/h} = 16.67 \text{ m/s}$  generará, eventualmente y con suficiente fetch, olas con  $H_s = 6.89 \text{ m}$ ,  $T_s = 13.82$

s, tomándole para ello  $t_{eq} = 121,499 \text{ s} = 33.7 \text{ horas}$ .

Las figuras XII.15 y XII.16 presentan formas gráficas de las ecuaciones aquí descritas, incluyendo el caso de aguas no profundas (de profundidad  $h$ ). Para gráficas en términos de las variables directas (no parámetros adimensionales) e incluyendo el caso de limitación por duración, se refiere al lector al Shore Protection Manual (1984), figuras 3-23 y 3-24. Es importante mencionar que aunque los métodos del SMB (sección XII.3.2) y el de Hasselmann simplificado (esta sección) producen resultados muy similares en el desarrollo inicial del oleaje limitado por fetch, las diferencias son importantes al aproximarse al estado completamente desarrollado, tanto en la altura de ola y su periodo, así como en el fetch y duración necesarios para alcanzar dicho estado.



**Fig.XII.15.** Diagrama de cálculo de la altura de ola significativa para condiciones limitadas por *fetch* utilizando el método paramétrico simplificado de Hasselmann. La línea negra es para condiciones de aguas profundas y las líneas grises son para condiciones de aguas no profundas. La porción horizontal de cada línea (negra o gris) corresponde a condiciones de oleaje completamente desarrollado. Fuente: Shore Protection Manual (1984).

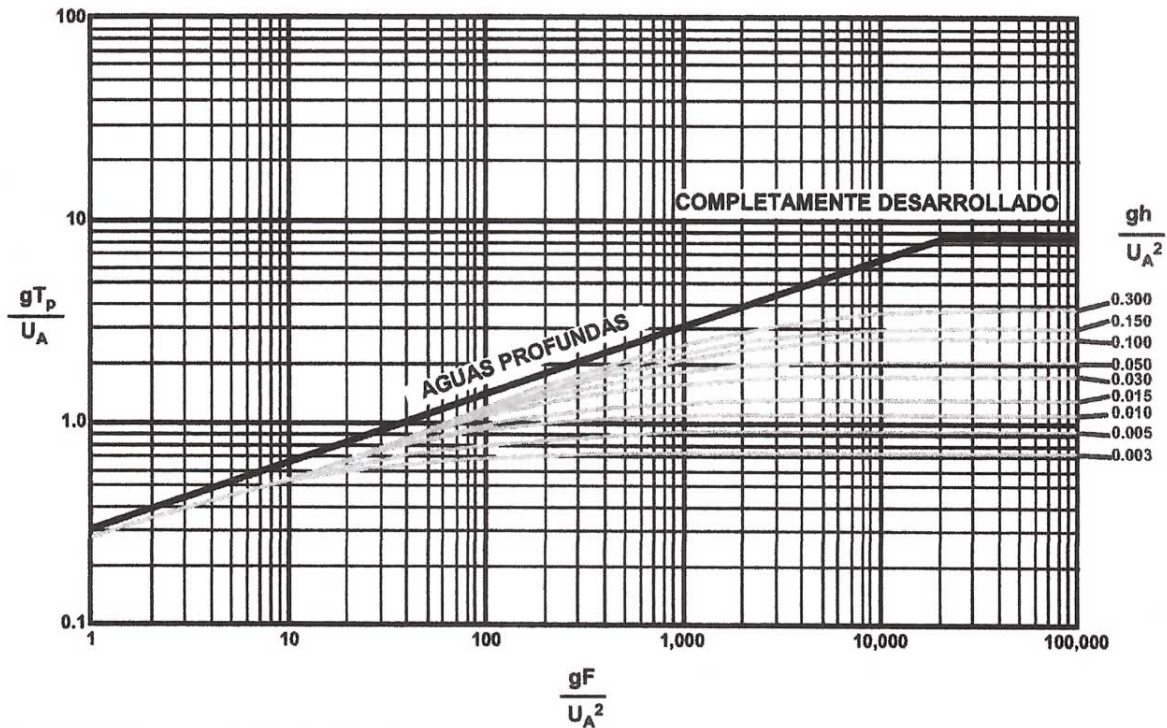


Fig.XII.16. Diagrama de cálculo del periodo de ola al pico del espectro para condiciones limitadas por fetch utilizando el método paramétrico simplificado de Hasselmann. La línea negra es para condiciones de aguas profundas y las líneas grises son para condiciones de aguas no profundas. La porción horizontal de cada línea (negra o gris) corresponde a condiciones de oleaje completamente desarrollado. Fuente: Shore Protection Manual (1984).

### XII.3.4. Evolución fuera de la zona de generación

Cuando el oleaje sale fuera de la zona de generación, ya sea por curvatura en las líneas de flujo del viento, disminución sensible de su magnitud o cualquier otra razón, se podría pensar que el estado de oleaje calculado para el final del fetch será aquél que permanezca inalterado más allá de él. Sin embargo esto no es así. Además de efectos de pérdida de energía por fricción interna, el estado de oleaje a diferentes distancias del final del fetch varía fuertemente por otros efectos. La diferencia del aspecto del mar bajo estas condiciones es tan distinto al de la zona de generación que en idioma inglés se ha acuñado un término especial para él, el de *swell* (vs. el término *wind waves* u olas de viento), término que, nuevamente en idioma español, no tiene una traducción satisfactoria. En la zona de generación el oleaje es altamente irregular con muchas componentes de frecuencia y dirección distinta presentes simultáneamente. Esto le da una aspecto caótico a la superficie y las olas individuales aparecen



al observador como muy esbeltas (relaciones H/L grandes) y con crestas cortas y muy agudas. Más allá de la zona de generación, el oleaje aparece como más regular con dominancia de una sola componente en frecuencia y dirección, olas individuales menos esbeltas, crestas más largas y redondeadas. La diferencia se agudiza conforme más lejos nos encontremos de la zona de generación.

El principal efecto que produce tal evolución fuera de la zona de generación es la dispersión de las diferentes componentes frecuenciales que componen al oleaje al final del fetch, al avanzar las olas más largas (y de mayor periodo) más rápido que las más cortas (y de menor periodo), tal y como la relación de dispersión lo establece (ecs. III-40, III-41, III-40 a.p. y III-41 a.p.). Inmediatamente al salir de la zona de generación, al convertirse las olas en ondas gravitacionales libres, el proceso de separación empieza a ocurrir. De esta forma, a zonas muy lejanas de la zona de generación llegarán primero olas largas (y rápidas) y conforme avanza el tiempo irán dominando olas más cortas (y lentas). Las ondas muy cortas tienden a tener fuertes pérdidas internas de energía o ser modificadas por vientos suaves diferentes a los de la zona de generación. Por ello, las componentes de mayor frecuencia que abandonan la zona de generación no sobreviven grandes distancias en forma inalterada. Por el contrario, las más largas, pueden alcanzar zonas a cientos o miles de kilómetros de la zona de generación sin haber sido modificadas significativamente.

Los elementos necesarios para calcular esta evolución del oleaje fuera de la zona de generación, en el espacio (para un instante dado) o en el tiempo (para una posición dada) ya han sido planteadas anteriormente. Si al espectro de oleaje al final del fetch se le divide en bandas representando a cada banda por una ola representativa discreta, el avance individual de cada componente puede ser calculado de acuerdo a su celeridad, pudiendo componerse nuevamente el estado del oleaje para cualquier instante y distancia del fetch. Sólo es necesario recordar que la celeridad que se debe asignar al frente de olas de cada frecuencia no corresponde a la celeridad de las ondas individuales, sino a la celeridad del grupo (ec. V-22), pues las ondas

individuales no pueden avanzar por enfrente del grupo, al alcanzar dicho frente desaparecen. Lo mismo se aplica a la cola del grupo.

Por supuesto que la recomendación anterior presupone que la transferencia de energía entre componentes de diferente frecuencia ha cesado fuera de la zona de generación. Si la zona de interés se encuentra además en aguas no profundas o cerca de litorales, todas las demás transformaciones por cambio gradual de profundidad, interacción con el fondo, interacción con estructuras y litorales, tendrían que ser consideradas para establecer el estado de la superficie marina.

Otro efecto importante, aunque poco estudiado en detalle, es el efecto de dispersión angular de la energía. El espectro de oleaje al final del fetch es un espectro direccional con un contenido energético entre las diversas frecuencias distinto dependiendo del ángulo de propagación con respecto al eje del fetch. La forma de calcular el estado de oleaje en todo el abanico de *oleaje libre* (o *swell*) que se forma al final de la zona de generación es exactamente igual al ya propuesto, salvo que en este caso habrá que discretizar el espectro tanto en frecuencia como en ángulo de propagación. Sólo como herramienta para la comprensión intuitiva de esto se presenta la fig.XII.17, recomendación de OMM(1976), al respecto. Esta se encuentra en función de coordenadas espaciales en número de anchos del fetch. Observe que este efecto no solamente reduce la altura de oleaje en zonas fuera de la *continuación* del fetch, sino inclusive a lo largo del eje del mismo. En este sentido la dispersión de la energía que emerge del fetch en un abanico de mayor área, necesariamente indica una reducción de la altura de ola en la zona de propagación libre con respecto al final de la zona de generación. Es importante remarcar que dicho diagrama se refiere a la dispersión angular de la energía. Para estimar la reducción en la altura de ola por dispersión angular deben considerarse las raíces cuadradas de las fracciones de energía mostradas por las isolíneas. Por ejemplo, a 2.5 veces el ancho del fetch sobre el eje la energía que arriva es de tan solo 0.25 de la original, pero en términos de altura esta sería de 0.5 veces la original.

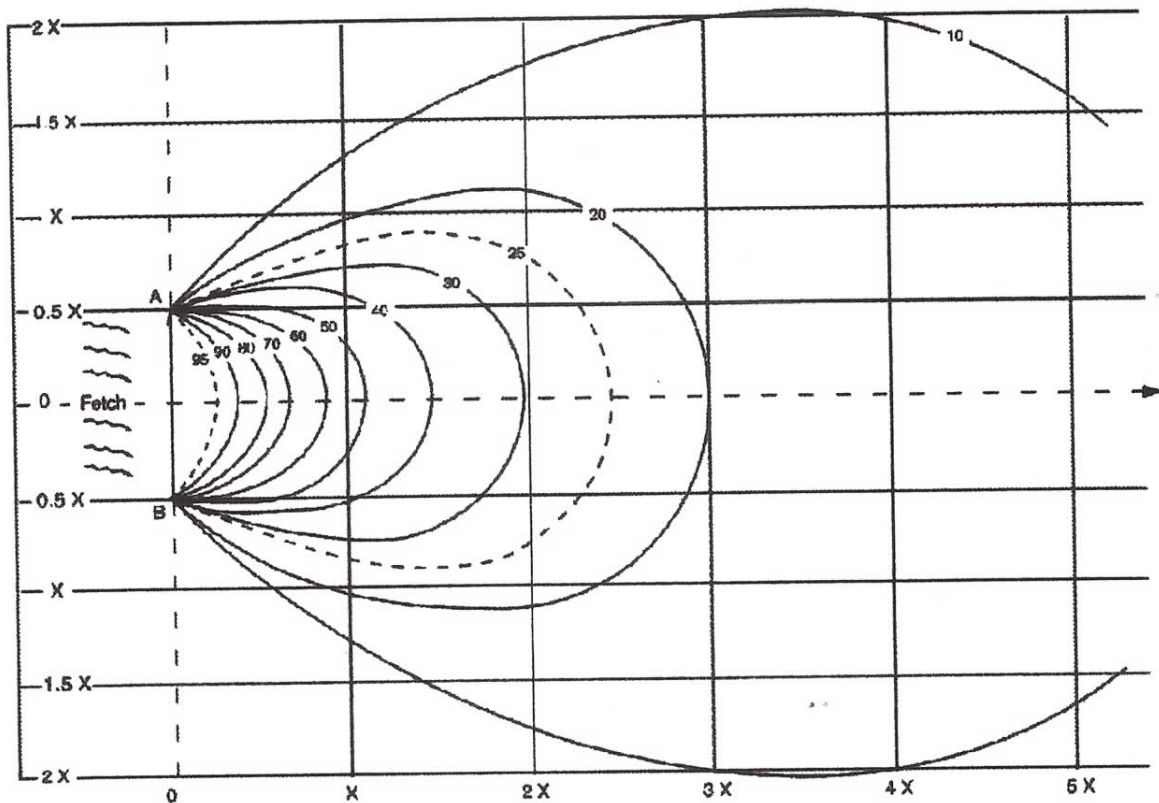


Fig. XII.17. Distribución de la energía de oleaje al salir de la zona de generación, en términos de número de anchos del fetch avanzados. Las isolíneas representan porcentajes de la energía del oleaje al final de la zona de generación. Estos porcentajes son aplicables a la variable de amplitud (o altura de ola) al cuadrado. Para aplicarlo directamente a la amplitud (o a la altura de oleaje) es necesario considerar la raíz cuadrada de las fracciones decimales correspondientes a cada isolínea. Fuente: OMM (1976 (1ª edición) y 1998 (2ª edición))

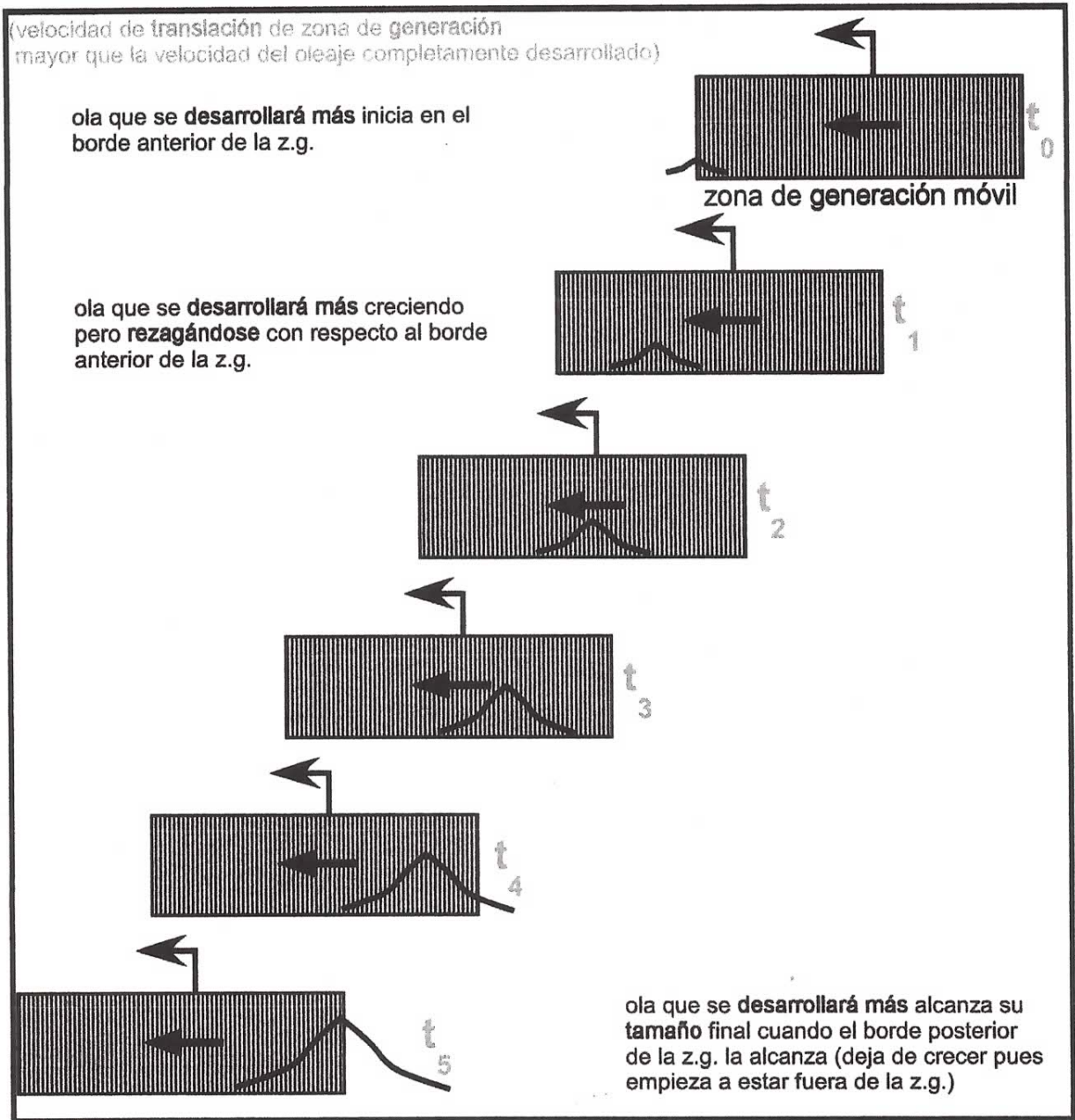
### XII.3.5. Adaptaciones a casos más realistas

Lo hasta ahora mencionado sobre estimación y pronóstico de oleaje resulta fuertemente restrictivo al considerar su uso real. Las suposiciones de iniciar la generación del oleaje desde un estado de tranquilidad, la inmovilidad de la zona de generación y la condición de aguas profundas son cuestiones que no siempre pueden ser aplicadas en condiciones reales. En esta sección comentaremos sobre algunas adaptaciones que a las herramientas (no numéricas) ya descritas se le pueden hacer para utilizarlas en casos más reales. Por brevedad, denominaremos a la zona de generación (con viento contante en magnitud y dirección), la z.g.

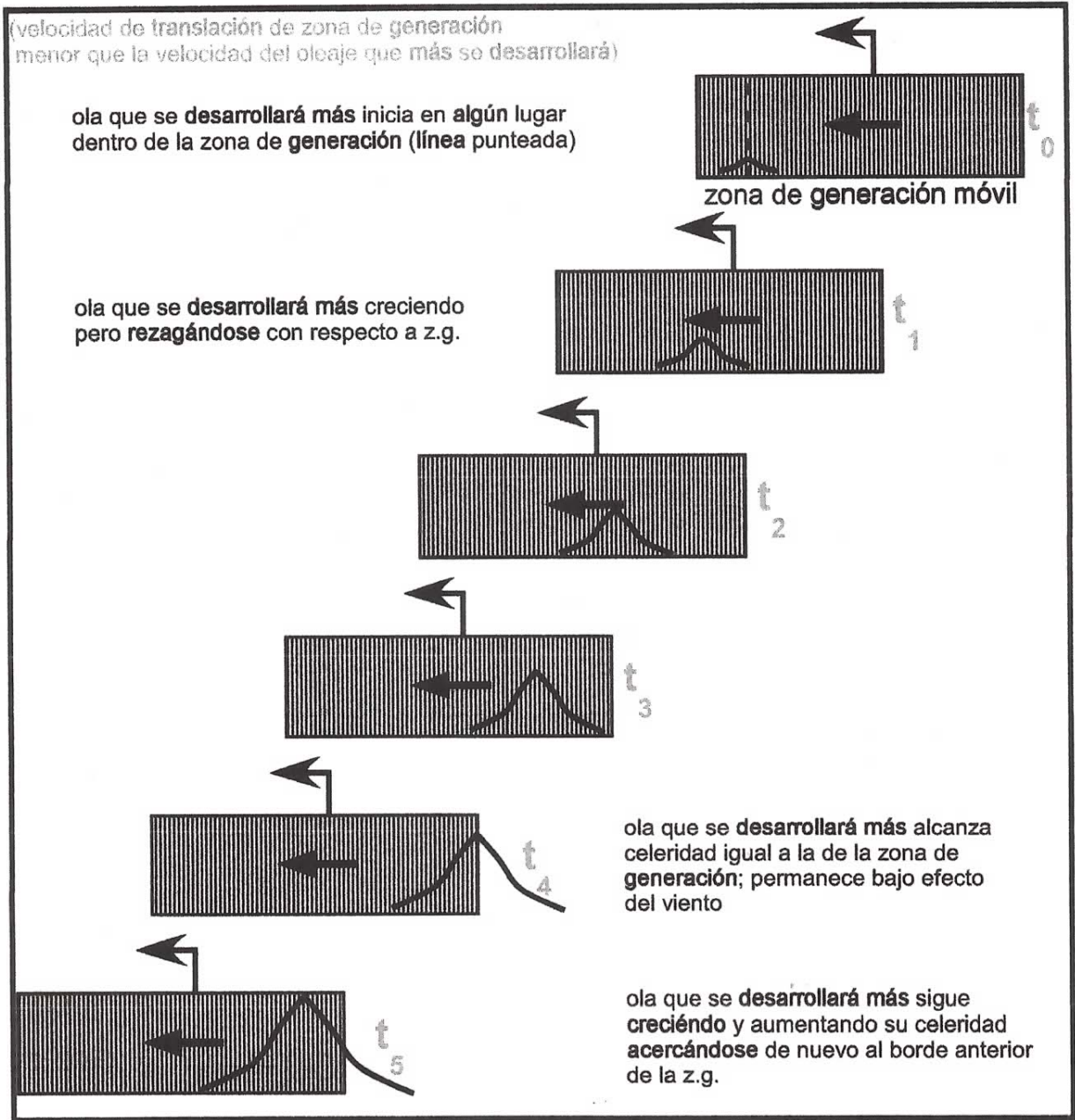
#### a) El caso de una zona de generación móvil.

Cuando la z.g. no se mantiene estática sobre la superficie de la Tierra, los conceptos y herramientas ya descritos requieren de ser adaptados para considerar la duración y el fetch al que efectivamente se verán sujetas las olas en su interior. En este sentido es importante considerar que una ola individual no tiene forma de saber si la zona de generación es móvil o inmóvil; mientras se encuentra dentro de ella seguirá sujeta a viento de magnitud y dirección constante y en ese sentido continuará desarrollándose sólo de acuerdo al tiempo y distancia que este viento lleve actuando sobre ella. Así pues, el problema se centra en establecer cuáles son los valores de esta duración y fetch efectivos considerando el movimiento relativo entre el oleaje (en dirección principal del viento y del eje del fetch) y la z.g. en sí. Aún para z.g.'s que se desplazan con velocidad y dirección constante, el problema se complica porque el oleaje se propaga a una celeridad que depende de su grado de desarrollo, más lento al principio y aumentándolo su celeridad hasta alcanzar su estado final.

Consideremos el caso simplificado de una z.g. que se mueve en la misma dirección que el viento, esto es en un efecto de *acompañamiento* del oleaje. Si la velocidad de desplazamiento de la z.g. es muy alta, digamos mayor que la velocidad terminal del oleaje completamente desarrollado, es claro que dicha z.g. dejará atrás aún a las olas más rápidas posibles. Intuitivamente, las olas más grandes serán aquellas que permanecen más tiempo (y distancia) dentro de la zona de generación, mismas que tendrán su lugar de origen precisamente en el borde anterior del fetch instantáneo al iniciar el proceso. El proceso de crecimiento continuará hasta que el borde posterior rebase a dichas olas que nacieron en el borde anterior. Esto se muestra esquemáticamente en la fig. XII.18.



**Fig.XII.18.** Evolución del oleaje dentro de una zona de generación móvil cuando la velocidad de translación de la zona de generación rebasa la celeridad del oleaje completamente desarrollado (para la celeridad de viento dada). El oleaje que más se desarrollará iniciará en el borde anterior de la z.g. y terminará en el borde posterior de la z.g.



**Fig.XII.19.** Evolución del oleaje dentro de una zona de **generación móvil** cuando la velocidad de translación de la zona de **generación** resulta menor a la celeridad del oleaje que más se **desarrollará**. Bajo suficiente duración de la zona de **generación**, el oleaje en  $t=t_5$  continuaría creciendo hasta que alcanzara al borde anterior de la z.g. o alcanzara el estado *completamente desarrollado*.