



# RADIOENLACES EN ENTORNOS MARINOS

Los entornos marinos presentan importantes retos que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar cualquier sistema de radiocomunicaciones. En este documento se van a comentar los aspectos teóricos de los distintos fenómenos que afectan a un radioenlace instalado en estos entornos: reflexiones sobre el mar, variación del nivel del mar (mareas), mayor humedad en el ambiente, etc.

## Fundamentos básicos de propagación

### Propagación en espacio libre

La propagación en espacio libre responde a un modelo ideal equivalente a las condiciones de propagación en el vacío. La fórmula de *Friis* para las pérdidas de propagación de ondas radioeléctricas en espacio libre en función de la distancia es la siguiente:

$$L[\text{dB}] = 32.45 + 20 * \log(d[\text{km}]) + 20 * \log(f[\text{MHz}])$$

### Propagación con línea de vista (LOS)

Se define “propagación **LOS**” (*Line of Sight*) o “propagación con línea de vista” como aquellos escenarios en los que la línea recta que une los equipos de transmisión y recepción no se ve obstruida por ningún obstáculo. Es decir, que hay visión directa (sin recurrir a rebotes) entre los equipos. En caso de emplear antenas directivas es indispensable que estén apuntadas correctamente.

En el rango de frecuencias de trabajo de aerDOCSIS (**hasta 6 GHz**), para garantizar la línea de vista es necesario añadir un determinado “despejamiento”, de modo que el obstáculo más cercano debe mantener una distancia mínima respecto a la línea que une los equipos que intervienen en la comunicación. Esto se debe a que la potencia de la señal no se concentra en un rayo de grosor infinitesimal (línea de vista óptica), sino que se distribuye en un elipsoide alrededor de esa línea que une los equipos que intervienen en la comunicación. El espacio comprendido dentro de ese elipsoide se denomina la “Primera Zona de Fresnel”. Ningún obstáculo debe situarse dentro de ese elipsoide para considerar comunicación LOS. La siguiente figura explica cómo afecta un obstáculo en función de su posición respecto a las zonas de Fresnel.

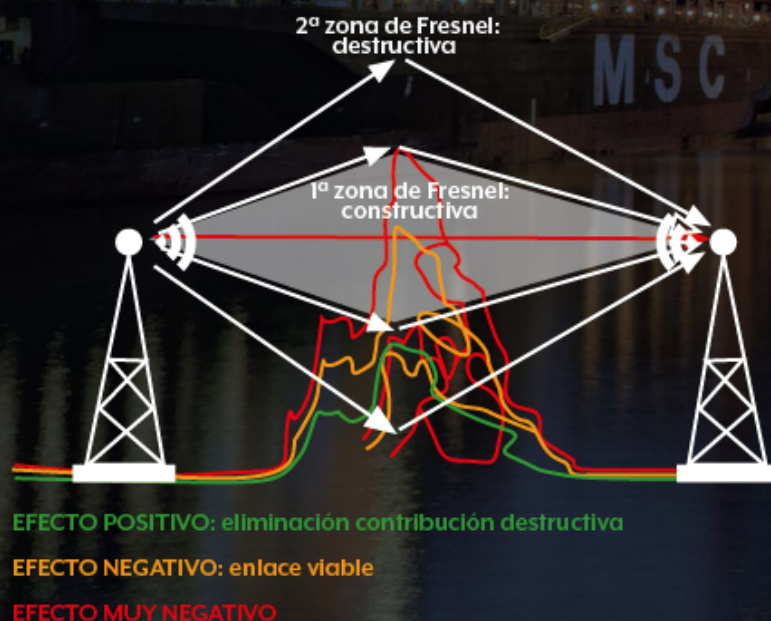


Figura 1—Efecto de los obstáculos sobre las zonas de Fresnel

El elipsoide tiene sus focos situados en los extremos del enlace, y su máximo radio se calcula en base a la siguiente fórmula (d es la distancia del enlace, “r” es el radio de la zona de Fresnel y “f” es la frecuencia en GHz):

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{d}{4f}}$$

Sin embargo, comúnmente se acepta que la comunicación es LOS si hay un despejamiento de por lo menos un 60% del radio de la primera zona de Fresnel. Si la distancia entre la línea de vista y el obstáculo es inferior al 60% del radio de la primera zona de Fresnel en ese punto, la comunicación no podrá considerarse LOS.

La Figura 2 muestra un enlace con la zona de Fresnel totalmente liberada:



Figura 2—Despejamiento total de la primera zona de Fresnel

La Figura 3 muestra un enlace con la zona de Fresnel parcialmente obstruida. Dado que el despejamiento es superior al 60%, se puede considerar que el enlace cuenta con línea de vista.



Figura 3—Despejamiento parcial (> 60%) de la primera zona de Fresnel

Por último, la Figura 4 muestra un ejemplo en el que el despejamiento es inferior al 60%, por lo que el enlace no puede considerarse con línea de vista.

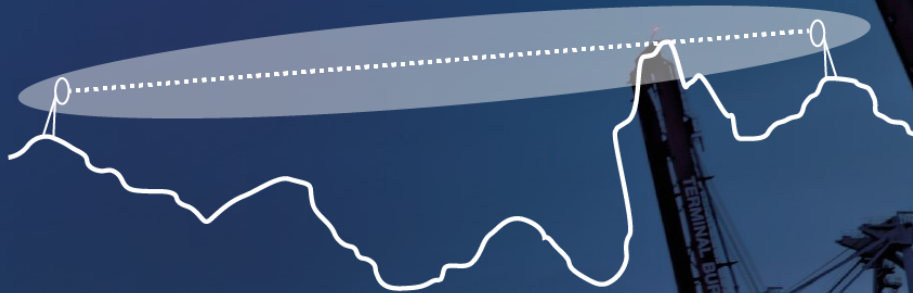


Figura 4—Obstrucción de la primera zona de Fresnel

En caso de contar con línea de vista en base a la definición anterior, las pérdidas de propagación se aproximarán a las pérdidas de espacio libre de la fórmula de *Friis*. Sin embargo, la presencia de elementos en los que se pueda reflejar la señal tiene como consecuencia que al receptor no llegue un único rayo directo desde el transmisor, sino también rayos reflejados en esos elementos. En el siguiente punto se analizará más en detalle este tema.

### Rayo Directo y Rayo Reflejado

Ya hemos comentado que la combinación de los rayos directo y reflejado ocasiona un patrón de interferencias constructivas o destructivas según sea la fase y la amplitud de los diferentes rayos. El resultado de la combinación de los rayos es muy difícil de predecir, ya que depende de la posición exacta de todos los elementos que rodean la línea directa de la transmisión. Por este motivo se suelen emplear métodos estadísticos que ayudan a calcular la desviación de las pérdidas reales sobre el valor proporcionado por la fórmula de *Friis*.

Simplificando, se puede usar el modelo de único rayo reflejado. En ese caso, la comunicación se establecería como suma de una onda directa y otra reflejada en el suelo, que interfieren entre sí.

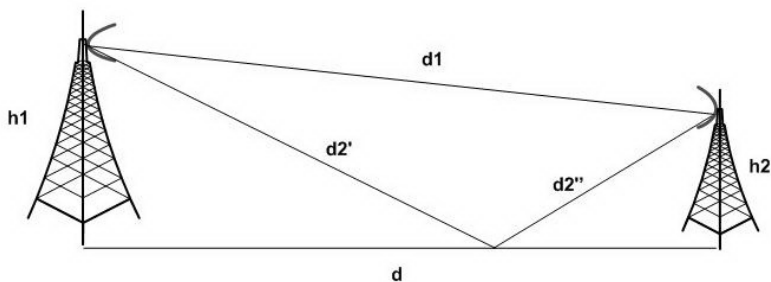


Figura 5—Modelo simple de rayo reflejado



La Figura 5 muestra un modelo de propagación entre dos extremos separados por una distancia “d”. Teniendo en cuenta que unas alturas de las antenas sobre la superficie denominadas “h1” y “h2”, podemos calcular que:

- El **rayo directo** recorre una distancia **d1**. Recorre la menor distancia posible entre ambos puntos y por lo tanto generalmente llegará con una amplitud mayor que cualquier rayo reflejado. “d1” puede ser calculado fácilmente mediante el teorema de Pitágoras:

$$d_1 = \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2}$$

- El **rayo reflejado** recorre una distancia **d2**. Llegará con una amplitud menor que el rayo directo y con una distinta fase. Si llamamos “r” a la distancia en la superficie desde la primera estación hasta el punto de reflexión, y teniendo en cuenta que el rayo reflejado debe llegar y marchar del punto de reflexión con el mismo ángulo, tenemos que:

$$\tan(a) = \frac{h_1}{r} = \frac{h_2}{d-r}$$

$$r = \frac{dh_1}{h_1 + h_2} \quad d-r = \frac{dh_2}{h_1 + h_2}$$

La distancia  $d_2$  se calcula como la suma de  $d_2'$  y  $d_2''$ :

$$d_2 = \sqrt{h_1^2 + r^2} + \sqrt{h_2^2 + (d-r)^2}$$

$$d_2 = \sqrt{h_1^2 + \frac{d^2 h_1^2}{(h_1 + h_2)^2}} + \sqrt{h_2^2 + \frac{d^2 h_2^2}{(h_1 + h_2)^2}}$$

Finalmente se obtiene que:

$$d_2 = \sqrt{d^2 + (h_1 + h_2)^2}$$

Las fórmulas para la distancia recorrida por rayo directo y rayo reflejado sólo difieren del signo entre las Alturas de las antenas. La diferencia entre ambas distancias es:

$$\delta = \sqrt{d^2 + (h_1 + h_2)^2} - \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2}$$

Se puede ver fácilmente que para grandes distancias (mucho mayores que las alturas de las antenas), la distancia recorrida por ambos rayos es muy similar, así que podemos decir que  $\delta$  converge a 0 para largas distancias.

La combinación de dos rayos en el punto de recepción depende de la diferencia de fase entre ellas, teniendo en cuenta que  $180^\circ$  será el punto de cambio de fase. Para distancias cortas y pequeños valores de longitud de onda  $\lambda$  respecto a las alturas de las antenas,  $\delta$  tendrá un valor de varias longitudes de onda. A medida que la distancia aumenta,  $\delta$  comienza a reducirse hasta llegar a cero para una distancia tendiendo a infinito. Para cualquier distancia en donde  $\delta$  es un múltiplo entero de  $\lambda$ , la combinación de ambos rayos será destructiva debido al desplazamiento de  $\lambda/2$  en el punto de reflexión. Para distancias en las que  $\delta$  es un múltiplo de impar de  $\lambda/2$ , la combinación será constructiva, ya que ambos rayos se suman en fase.

Basándonos en el análisis previo, el resultado de combinar los dos rayos puede ser constructivo o destructivo dependiendo de la distancia. Para unos  $\lambda$ ,  $h_1$  y  $h_2$  dados, si representamos la amplitud recibida en función de la distancia, se aprecia un comportamiento periódico en el que van apareciendo ceros cuando  $\delta$  es un múltiplo par de  $\lambda/2$  y máximos cuando se trata de un múltiplo impar.

El número de nulos es finito, ya que  $\delta$  decrece de forma "monótona" con el cuadrado de la distancia a la antena más baja, hasta llegar a cero. El número de ceros será igual a dos veces el ratio entre la altura de la antena menor y la longitud de onda.

Como se indicó anteriormente,  $\delta$  converge a cero para largas distancias. Esto significa que ambos rayos se recorren la misma distancia, pero debido a la inversión de la fase en el punto de reflexión, los rayos se suman de manera destructiva hasta infinito.

La máxima distancia posible para la que los dos rayos se suman de manera constructiva (dando lugar a la máxima amplitud) se da cuando  $\delta$  es exactamente igual a  $\lambda/2$ . Este es el último máximo antes de que la amplitud comienza a converger a cero debido a la combinación destructiva de ambas señales.

Para  $\delta$  mayor que  $\lambda/2$ , la amplitud varía con la distancia con ceros y máximos que tienen lugar cuando  $\delta$  es un múltiplo entero de  $\lambda/2$ . La máxima distancia a la que se puede encontrar un nulo es cuando  $\delta$  es igual que  $\lambda$ ; después, la combinación de ambos rayos pasa a ser constructiva por última vez para  $\delta = \lambda/2$ . Para distancias en las que  $\delta$  es menor que  $\lambda/2$  no existen más ceros, y la amplitud comienza a ser monótona decreciente tendiendo a cero en el infinito.

La distancia crítica donde se encuentra el último máximo ( $\delta = \lambda/2$ ) y después de la cual no aparecen más nulos, se denomina "*Fresnel Breakpoint*" (Punto de Ruptura de Fresnel). Para esa distancia, la diferencia entre la distancia recorrida por los dos rayos es sólo de media longitud de onda.

Para comprender mejor el significado de "*Fresnel Breakpoint*", basta con revisar la definición de la primera zona de Fresnel. Se define esta primera zona como una elipse en la que la distancia recorrida por dos rayos cualesquiera difiere en  $\lambda/2$ . Matemáticamente se define como "los puntos donde la suma de la distancia a los dos focos es igual a la distancia entre los dos focos más  $\lambda/2$ ". El Punto de Ruptura de Fresnel se encuentra para la distancia en la que el punto de reflexión se sitúa en el límite de la primera zona de Fresnel.

Si el punto de reflexión cae fuera de la primera zona de Fresnel (situación de Línea de Vista), la combinación de los dos rayos puede ser constructiva o destructiva dependiendo de la diferencia de fase. Si el punto de reflexión está exactamente situado en el límite de la primera zona de Fresnel, la combinación será constructiva, pero si se encuentra dentro de ella (No Línea de Vista), la combinación de los rayos se volverá más y más destructiva.

Para calcular la distancia al “Fresnel Breakpoint”, debemos volver a la definición de  $\delta$ , que en este caso debe ser igual a  $\lambda/2$  :

$$\delta = \sqrt{d^2 + (h_1 + h_2)^2} - \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2}$$

$$\delta + \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2} = \sqrt{d^2 + (h_1 + h_2)^2}$$

$$\delta^2 + d^2 + (h_1 - h_2)^2 + 2\delta \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2} = d^2 + (h_1 + h_2)^2$$

$$\sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2} = \frac{4h_1h_2 - \delta^2}{2\delta}$$

$$d^2 = \left( \frac{4h_1h_2 - \delta^2}{2\delta} \right)^2 - (h_1 - h_2)^2$$

La Distancia al “Fresnel BreakPoint” resulta ser, para valores pequeños de  $\delta$ , (media longitud de onda), mucho menor que las alturas de las antenas. En ese caso, la última fórmula puede aproximarse a:

$$d \approx \frac{2h_1h_2}{\delta}$$

Con lo que se concluye que la distancia de BreakPoint ( $\delta = \lambda/2$ ) es:

$$d_{BP} = \frac{4h_1h_2}{\lambda}$$

## El entorno marino

### Reflexiones sobre agua

Un radioenlace que discorra sobre el mar tiene un problema principal: las reflexiones sobre el mar. El rayo reflejado tendrá casi la misma amplitud que el original pero llegará en contrafase. Hay dos casos situaciones posibles:

1. Por debajo de la distancia de Fresnel (aquella distancia para la que la primera zona de Fresnel toca la superficie del agua). En este caso, la combinación de los rayos puede ser constructiva o destructiva, generando nulos o máximos en función de la altura de las antenas respecto al agua.

2. Más allá de la distancia de Fresnel, la combinación siempre es destructiva, por lo que las pérdidas crecen con la distancia a la cuarta (no al cuadrado). Este efecto es más pronunciado cuando la altura de una de las antenas respecto al agua es muy pequeña. Por ejemplo, en el caso de una boya flotando en el mar en la que se quiera instalar un equipo de radio, la antena se situará a una altura de 2 metros o menos sobre el mar. Eso implica que la primera zona de Fresnel toca directamente la superficie del agua.

Es importante tener también en cuenta que cuanto más conductora sea la superficie de reflexión, más potente será el rayo reflejado. De este modo la reflexión sobre el agua del mar (agua salada y por tanto más conductora que la superficie de un lago) genera interferencias destructivas más fuertes que las que ocurrirían en un escenario idéntico, pero con reflexiones sobre superficie terrestre.

## Efecto de las olas y mareas

Una de las principales diferencias entre la superficie terrestre y la marina es que la primera es estática mientras que la segunda es dinámica. En el mar, tenemos el efecto de las mareas que suben y bajan de forma continua, modificando la superficie del terreno.

El efecto de tener una superficie en movimiento es que las alturas relativas de las antenas en un radioenlace sobre el mar están continuamente cambiando, y por tanto el punto en el que el rayo se refleja en la superficie también cambia constantemente. Esto provoca que, dependiendo del estado del mar y del instante, podemos tener incluso un rayo reflejado con un efecto constructivo y al cabo de unas horas un efecto destructivo. Generalmente, tendremos un efecto destructivo de mayor o menor incidencia, en el que la marea hace de “sintonizador”, variando la altura de las antenas y por lo tanto alternando entre nulos y máximos de la señal según la fase del rayo reflejado va variando.

## Humedad relativa del aire

A pesar de que en las frecuencias en la que trabaja aerDOCSIS (3,5 y 5 GHz) no sea un factor del todo crítico, a la hora de realizar la planificación de un radioenlace son también muy importantes ciertos fenómenos que tienen que ver con la presencia de la troposfera. Uno de ellos es la atenuación que producen los elementos de esta: gases (agua y oxígeno) e hidrometeoros (lluvia, nieve, niebla...).

La atenuación por los gases moleculares (oxígeno y vapor de agua) se debe a la existencia de frecuencias de resonancia en la estructura electrónica de las diversas moléculas de la atmósfera. En estas frecuencias el gas absorbe energía y produce una fuerte atenuación. El nivel de atenuación dependerá, además de la frecuencia, de la concentración de gases, y por lo tanto de la altura.

La atenuación por lluvia depende del tamaño de las gotas y de su deformación al caer, pero sobre todo de la cantidad global de agua en el aire. Debido a la dificultad de medir los primeros parámetros se expresa en función de la intensidad de lluvia medida en mm/h o litros/hora. La atenuación se produce por la disipación por efecto Joule debida al comportamiento del agua como dieléctrico con pérdidas, y a la dispersión de la energía en direcciones diferentes a la de propagación que producen las propias gotas. Esta atenuación varía con la frecuencia

La UIT-R proporciona gráficas de atenuación tanto para distintos niveles de lluvia (mediante valores estadísticos de la lluvia en la zona) como para gases.

En el caso concreto de entorno marino, existirá siempre una alta humedad relativa en el aire, y cuanto menor se la altura relativa de las antenas sobre la superficie marina, mayor será también la concentración de partículas en suspensión tales como pequeñas gotas, salitre, etc. que atenuarán la señal. Habrá que tener en cuenta estas pérdidas a la hora de realizar el balance del enlace.