

# Propagación de RF

### **1.1 Características de la propagación de RF.**

Las ondas de radio son ondas electromagnéticas que poseen una componente eléctrica y una componente magnética y como tales, están expuestas a ciertos fenómenos los cuales son capaces de modificar el patrón de propagación de las ondas. En condiciones especiales y con una atmósfera uniforme, las ondas de radio tienden a desplazarse en línea recta, esto quiere decir que siempre que haya una línea de vista entre el emisor y el receptor, este tipo de comunicación será bastante eficiente, pero si se requiere de una comunicación de un punto a otro, el cual se encuentra más allá del horizonte, tendremos que tomar en cuenta las distintas condiciones de propagación y las adecuadas frecuencias para su correcta comunicación. Para realizar comunicaciones

seguras entre dos puntos lejanos y sin salir de la atmósfera, se utilizan frecuencias denominadas altas frecuencias (High frequency) ó HF que van de 3 Mhz a los 30 Mhz, ya que estas frecuencias son reflejadas en la atmósfera y regresan a la tierra a grandes distancias. Las frecuencias en orden de VHF, UHF Y SHF no se reflejan en la atmósfera salvo en ciertas circunstancias, es por esto que solo son útiles en comunicaciones de punto a punto y satelitales.

No se podría hablar de comunicación por medio de ondas de radio a grandes distancias si no se toman ciertos fenómenos en cuenta como lo son la refracción, reflexión, dispersión y difracción los cuales hacen posible la comunicación entre dos puntos más allá del horizonte.

## **1.2 Conceptos básicos para la propagación de RF.**

Como ya se dijo antes, los fenómenos de refracción, reflexión, dispersión y difracción son de gran importancia para las comunicaciones inalámbricas. Este tipo de ondas pueden viajar en el vacío a la velocidad de la luz y aproximadamente a un 95% de esta velocidad en otros medios, en la atmósfera terrestre la velocidad se reduce insignificadamente.

### **1.2.1 Refracción.**

Las ondas de radio están expuestas a sufrir una desviación en su trayectoria cuando atraviesan de un medio a otro con densidad distinta, en comunicaciones este efecto sucede cuando las ondas electromagnéticas atraviesan las distintas capas de la

atmósfera variando su trayectoria en un cierto ángulo. La desviación de la trayectoria es proporcional al índice de refractividad el cual está dado por:

$$IR = \frac{V_p}{V_m}$$

Ecuación 1.1

$IR$  = Índice de refractividad.

$V_p$  = Velocidad de propagación en el espacio libre.

$V_m$  = Velocidad de propagación en el medio.

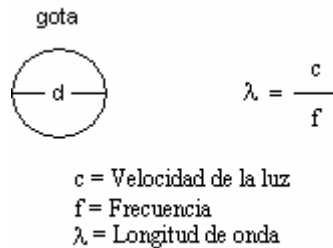
### 1.2.2 Reflexión.

Las ondas de radio atraviesan las diversas capas de la atmósfera, desde la tropósfera hasta la ionósfera y si los índices de refractividad de cada una de estas capas son muy diferentes. Estos distintos índices pueden llegar a producir reflexión total, siendo las frecuencias de VHF y superiores las más propensas a esta desviación de trayectoria.

### 1.2.3 Dispersión.

El efecto de la dispersión ocurre cuando las ondas de radio atraviesan alguna masa de electrones o pequeñas gotas de agua en áreas suficientemente grandes. En comunicaciones de radio es importante mencionar que la dispersión de la señal generada por lluvia depende de la comparación del tamaño de la longitud de onda de la señal y el diámetro de la gota de lluvia. Si el diámetro  $d$  de la gota de lluvia es menor a la longitud de onda  $\lambda$  la atenuación será pequeña, pero ésta se acrecentará si el diámetro de la gota supera a la longitud de onda de la señal. La figura 1.1 muestra la relación entre la

longitud de onda y el diámetro de la gota de lluvia. Generalmente la refracción se produce solamente a determinados ángulos. Este efecto es similar al que le ocurre a la luz intentando atravesar la niebla.



The diagram shows a circle representing a rain drop with a horizontal line through its center labeled 'd' for diameter. To the right of the circle is the equation  $\lambda = \frac{c}{f}$ . Below the circle, the variables are defined: 'c = Velocidad de la luz', 'f = Frecuencia', and ' $\lambda$  = Longitud de onda'.

Figura 1.1 Relación diámetro de gota con longitud de onda.

#### 1.2.4 Difracción.

Se puede entender a la difracción como el esparcimiento de las ondas en los límites de una superficie, esto quiere decir que para que exista la difracción tiene que haber un obstáculo, así es como este fenómeno permite que parte de la señal llegue al otro lado del objeto. Este fenómeno es de gran utilidad para las zonas de *sombra de señal* que pueden ser producidas por grandes edificios o montañas.

### 1.3 Comunicaciones inalámbricas.

Como ya se dijo antes gracias a los fenómenos de reflexión, refracción, difracción y dispersión, se pueden realizar las comunicaciones inalámbricas a grandes distancias. A continuación se mostrarán las distintas formas de comunicación que existen gracias a estos fenómenos.

#### 1.3.1 Propagación por onda directa.

Para realizar este tipo de propagación es necesario que exista una línea de vista entre el transmisor y el receptor. En este tipo de comunicación se utilizan frecuencias por encima de los 50 Mhz. Esto se debe a que las frecuencias altas se ven menos afectadas por los fenómenos atmosféricos, además de que no requiere de antenas grandes para tener una transmisión efectiva de gran directividad, lo que provoca la confiabilidad de que la información llegue a otro lado del transmisor, este tipo de propagación se utiliza para la televisión y la radio FM. La figura 1.2 muestra la propagación por onda directa.

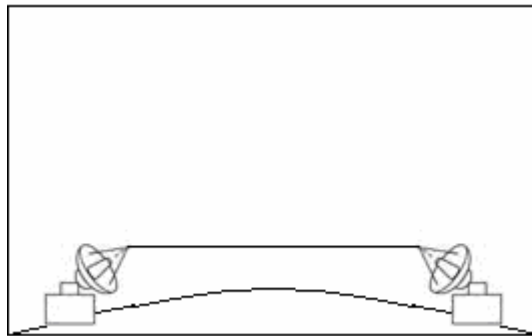


Figura 1.2 Propagación de RF con línea de vista.

### **1.3.2 Propagación por onda terrestre.**

Este tipo de propagación es posible gracias a la difracción. Las ondas de radio siguen la curvatura de la tierra por la cual la señal de RF es capaz de alcanzar grandes distancias antes de que la señal sea absorbida por la tierra. Gracias al efecto de la difracción la señal puede sortear edificios y montañas. La figura 1.3 muestra el efecto que tiene la difracción sobre las señales de RF.

La propagación por onda terrestre solo es útil para frecuencias inferiores a los Mega Hertz, siendo ésta una de las mejores formas de transmitir una señal de RF de

baja frecuencia a largas distancias. Este tipo de propagación es comúnmente usada por las radiodifusoras de media onda y de onda larga.

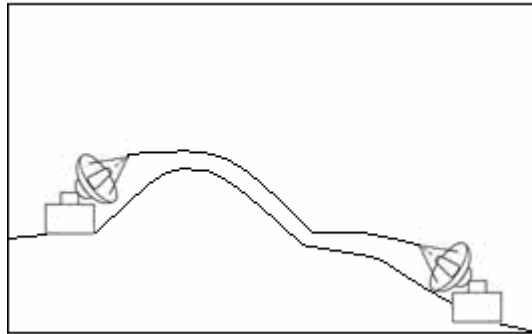


Figura 1.3 Propagación de RF sobre la superficie de la tierra.

### **1.3.3 Propagación por onda refractada o ionosférica.**

Ésta es una de los tipos de propagación más importantes. Aquí influirá la atmósfera como reflector y esto a su vez ocurre en la ionósfera. La ionósfera es una capa de la atmósfera que se encuentra entre los 40 Km. y 320 Km. y está formada por aire altamente ionizado por la radiación solar. Cuando esta capa se encuentra eléctricamente cargada hace que la señal comience a cambiar en un cierto ángulo, esto lo hace sucesivamente hasta que se realiza una reflexión total y la señal regresa a tierra. La figura 1.4 muestra como la señal se refracta en la ionósfera para hacerla llegar al receptor.

Este tipo de propagación puede ser capaz de conectar dos puntos, los cuales no tienen línea de vista y se puede transmitir a una distancia de hasta 4000 Km. Si las condiciones de la atmósfera fueran adecuadas se podría conectar un punto a cualquier otro lado del planeta, esto es porque la señal refractada de la ionósfera también puede ser reflejada por la tierra y así sucesivamente. Es importante mencionar que la

propagación ionosférica está determinada por la frecuencia utilizada y por el nivel de ionización de la atmósfera. Si se tiene una frecuencia grande la refracción sufrida por la misma ionósfera será menor. Se cuenta con una frecuencia establecida a utilizar a distintas horas del día para poder realizar la comunicación ionosférica, esto se conoce como *Frecuencia Útil Máxima, FUM*. Esto es útil para las comunicaciones satelitales, ya que si se utiliza una frecuencia mayor a la FUM, no se reflejará en la atmósfera y se disparará al espacio.

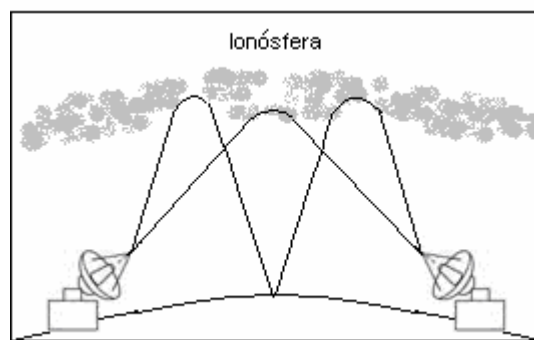


Figura 1.4 Propagación de RF por medio de refracción en la ionósfera.

#### 1.3.4 Propagación por difracción ionosférica.

Este tipo de propagación se produce cuando las ondas emitidas son superiores a los 30 Mhz, debido a su frecuencia la señal no será reflejada por la ionósfera, pero si será difractada, por lo que una pequeña parte de la señal llegará a tierra y solo podrá ser captada por un receptor especialmente sensible. Es por esto que este tipo de transmisión utiliza muy poco debido a su baja eficiencia. La figura 1.5 muestra el efecto de la difracción de una señal por la ionósfera.



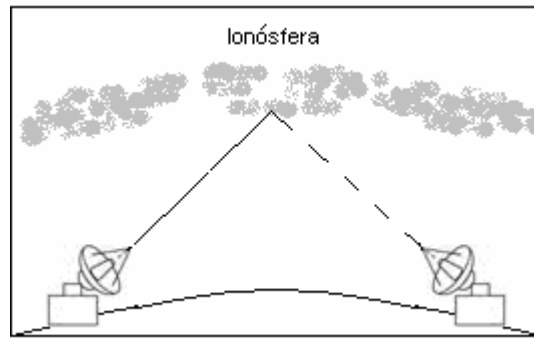


Figura 1.5 Efecto de la difracción de una señal de RF en la ionósfera.

### 1.3.5 Propagación por difracción meteórica.

Para este caso ocurre el mismo efecto de propagación que con el fenómeno de difracción ionosférica, pero aquí la ionósfera se alimenta por el frotamiento de los meteoritos que vienen a gran velocidad del espacio exterior. Este tipo de transmisión se utiliza para comunicaciones a corta distancia y solo funciona a horas y condiciones precisas. La figura 1.6 muestra el efecto que tienen los meteoros en la ionósfera para que pueda existir la difracción de la señal.

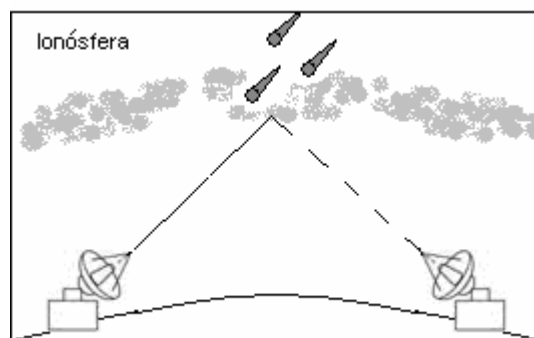


Figura 1.6 Efecto de la ionósfera cargada por los meteoros del espacio exterior.

### **Propagación troposférica.**

La capa troposférica se encuentra entre los 11 Km. y los 16 Km. En esta capa se forman las nubes y la temperatura desciende rápidamente debido a la altura. Cuando se produce la inversión del gradiente de temperatura, se generan los denominados canales de ionización, los cuales son ideales para que las ondas de radio puedan viajar, este tipo de propagación es útil para frecuencias de VHF y UHF. La figura 1.7 muestra el efecto que tiene la capa troposférica en la señales de RF a altas frecuencias.

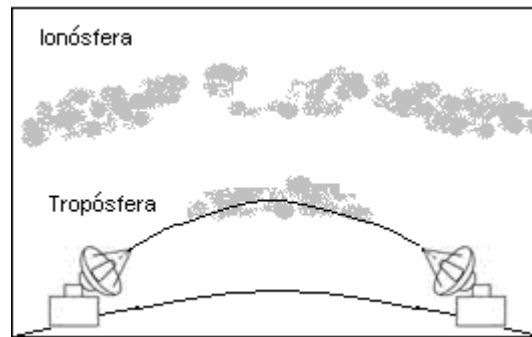


Figura 1.7 Propagación de RF en la tropósfera.

### **1.3.7 Propagación por reflexión más allá de la atmósfera.**

Existen dos tipos de reflexión, la primera es la propagación por reflexión en la luna, la cual utiliza al satélite natural como reflector, para que este tipo de propagación funcione es necesario que la luna se pueda ver entre las dos estaciones tanto transmisora como receptora, además de que se utilizan frecuencias de VHF y UHF para poder cruzar la atmósfera. La segunda forma de propagación es la que utilizan los satélites artificiales como reflector y funciona bajo el mismo efecto que la primera. La figura 1.8 muestra el funcionamiento básico de una transmisión más allá de la atmósfera.

Existen dos tipos de satélites artificiales:

1. Satélites pasivos: Estos satélites se encuentran en órbita alrededor de la Tierra y sirven como espejos, reflejando la onda de radio y regresándola a la Tierra.
2. Satélites activos: Estos satélites funcionan igual que los satélites pasivos, pero la diferencia es que estos reciben la señal y la amplifican para mandarla de regreso a la Tierra.

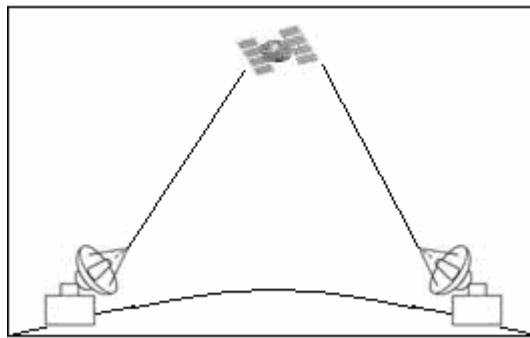


Figura 1.8 Propagación de RF por medio de un satélite artificial.

#### **1.4 Propagación de RF para comunicaciones satelitales.**

Las frecuencias utilizadas en los sistemas satelitales se encuentran en el orden de 1GHz a 30GHz, la razón de utilizar este rango de frecuencias es para que las señales emitidas sean capaces de cruzar la atmósfera hacia el satélite y de regreso a la Tierra. Este tipo de enlaces no requieren de una línea de vista entre la estación transmisora y la estación receptora, para poderse comunicar una estación con otra es necesario crear el enlace por medio de un satélite, de modo que el receptor sea capaz de recibir la señal del emisor. Existen muchos fenómenos que alteran fácilmente las ondas de RF en los sistemas satelitales, es por esto que para realizar comunicaciones, ya sean satélite – tierra ó tierra – satélite, las señales tienen que sortear todos los fenómenos antes mencionados generados por la Tierra y la atmósfera en la propagación de señales de RF. Además existen otros efectos que dificultan las transmisiones satelitales y estos son:

- Pérdida en trayectoria por el espacio libre
- Ruido de precipitación atmosférica, producido por la lluvia intensa
- La radiación solar, así como la Luna como repetidor solar

#### 1.4.1 Pérdidas en trayectoria por el espacio libre.

Las pérdidas por trayectoria en el espacio libre  $L_p$ , se definen como las pérdidas que ocurren cuando una onda electromagnética es transmitida en el vacío. Pero en realidad no existe pérdida de energía al transmitir las ondas electromagnéticas, el efecto que ocurre realmente es una dispersión de la señal según se aleja del transmisor. Por eso es mejor llamar a este fenómeno *pérdidas por dispersión*. La ecuación 1.2 muestra las pérdidas por dispersión. [1]

$$L_p = \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi Df}{c} \right)^2$$

Ecuación 1.2

Expresando en decibels esta ecuación se obtiene

$$L_p(dB) = 10 \log \left( \frac{4\pi Df}{c} \right)^2 = 20 \log \frac{4\pi Df}{c}$$

Ecuación 1.3

Si la frecuencia se expresa en Mhz, la ecuación queda de la siguiente manera.  
[10]

$$\begin{aligned} L_p(dB) &= 20 \log \frac{4\pi (10)^6 (10)^3}{3 \times (10)^8} + 20 \log f(MHz) + 20 \log D(Km) \\ &= 32.4 + 20 \log f(MHz) + 20 \log D(Km) \end{aligned}$$

Ecuación 1.4

Si la frecuencia se indica en Ghz, la ecuación queda de la siguiente manera. [8]

$$L_p(dB) = 92.4 + 20\text{Log}f (GHz) + 20\text{Log}D(Km)$$

Ecuación 1.5

$L_p$  = Pérdidas por trayectoria en el espacio libre

$D$  = Distancia a la que viaja la señal

$f$  = Frecuencia de transmisión

$c$  = Velocidad de la luz

#### **1.4.2 Ruido de precipitación atmosférica, producido por la lluvia intensa.**

La lluvia es un fenómeno capaz de afectar a las comunicaciones por satélite debido a que ésta actúa como una cortina entre el transmisor y el receptor. Esto sucede tanto en el enlace de subida, como en el enlace de bajada. Siempre que una señal atraviese una zona de lluvia, se generará un problema de atenuación, esto es debido a la absorción de energía de las ondas electromagnéticas por parte de las gotas de agua, la cual puede reducir considerablemente la potencia de la señal. Las gotas de agua pueden llegar a convertirse en hielo o nieve, la atenuación debida a este fenómeno se llama *atenuación por hidrometeoros* y aumenta con la frecuencia. El hielo ubicado en las antenas terrenas también puede afectar la comunicación de las ondas de radio de los satélites, esto ocurre por el efecto de reflexión, ya que el hielo puede ser capaz de reflejar la señal en otra dirección que no sea el foco de la antena.

### 1.4.3 La radiación solar, así como la Luna como repetidor solar.

La radiación solar, es un gran problema en las transmisiones satelitales, esto se debe a que el Sol es un gran productor de ondas de radio, las cuales producen ruido en el enlace. Hay distintas formas en que el Sol afecta las comunicaciones de radio. En la figura 1.9 se muestra cómo la radiación emitida por el Sol afecta al enlace descendente, y ésta ocurre cuando el satélite se halla en línea recta entre el Sol y la estación terrestre.

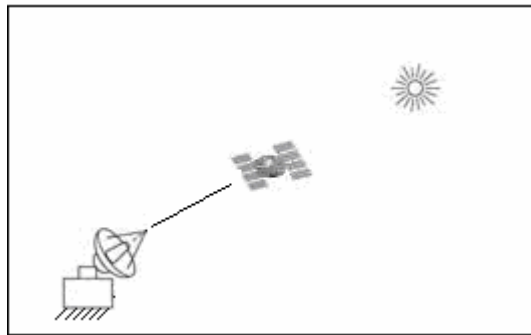


Figura 1.9 Enlace descendente afectado por la radiación solar.

Otro efecto provocado por el Sol puede ser observado en la figura 1.10 en la que se muestra un satélite que se encuentra en medio del Sol y un satélite secundario. En este caso el enlace descendente se verá afectado si la antena receptora se encuentra en dirección al espacio y no a la Tierra.

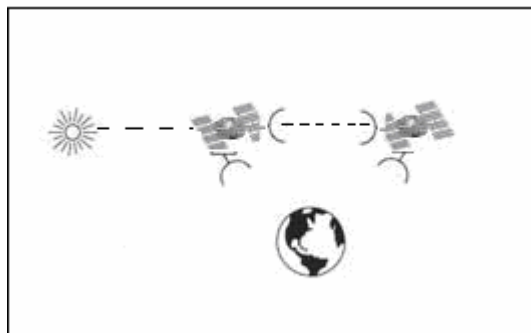


Figura1.10 Enlace afectado por la posición de las antenas y la radiación solar.

El último caso se muestra en la figura 1.11 la cual indica que cuando el haz de la antena sale fuera de la Tierra y se intercepta con la radiación solar, el enlace ascendente se verá afectado en gran cantidad por el Sol.

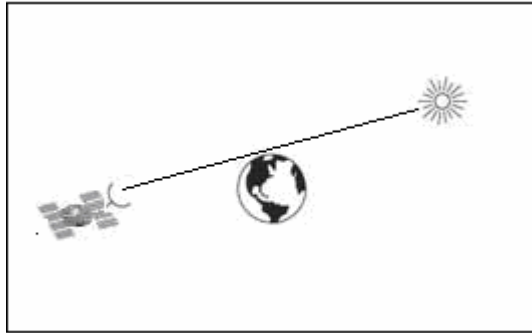


Figura 1.11 Enlace afectado por la dirección de la antena.

#### **1.4.4 Interferencia terrestre.**

La interferencia terrestre ocurre gracias a otras antenas que transmiten sobre la Tierra. Pero si se eleva el ángulo de las antenas de las estaciones terrestres el riesgo de interferencia terrestre será menor.

#### **1.4.5 Interferencia de satélites contiguos y canales contiguos.**

La interferencia de satélites contiguos ocurre cuando la antena no está perfectamente alineada con el satélite del cual queremos recibir la señal, esto genera que la señal de algún satélite que se encuentre cerca interfiera de manera grave en la señal que se quiere recibir. La interferencia de canales contiguos ocurre cuando existe una señal de interferencia en un canal contiguo.

#### **1.4.6 Pérdidas por transmisión debido a un eclipse.**

Este tipo de fenómenos puede llegar a interrumpir la transmisión del satélite.

Cuando el satélite entra en la sombra de la Tierra interrumpe la fuente de energía solar a sus celdas y esto provoca una pérdida en el servicio de transmisión. Esto significa que el satélite está activo gracias a las baterías de reserva que no son capaces de dar toda la potencia de salida. Los receptores que están en el extremo del área de cobertura pueden perder la señal. El eclipse solar únicamente se produce dos veces al año, y este efecto puede echar abajo las comunicaciones varios minutos al día.