

# Capítulo I

## Propagación electromagnética

La propagación electromagnética puede definirse como la transmisión de energía a través del espacio a través de un medio con características particulares. Estas características definen el comportamiento de las señales EM mientras fluyen. Las señales electromagnéticas entonces tendrán una velocidad particular, una dirección particular y una intensidad que cambiará dependiendo de las condiciones del medio. Estos comportamientos también dependen de la dirección inicial de las ondas, de la frecuencia y de la polarización de estas ondas. Pero para que las ondas electromagnéticas puedan ser de utilidad para los seres humanos y sacar algo de provecho con ellas es necesario estudiar cómo se van a comportar las señales EM a través de los medios. Es por eso que en este capítulo se definen algunos conceptos que son importantes para la mejor asimilación de las ondas electromagnéticas y de los resultados que se presentan al final de este documento.

El término onda solo puede definirse por su relación con los términos “campo” y “propagación”. La propagación de ondas es en particular una forma de propagación, característica de cierto campo que dado un elemento del campo que está en un punto particular en un momento particular tenga en un momento subsecuente un desplazamiento con poca o ninguna deformación. Esta propiedad hace posible definir la velocidad de propagación. Su valor depende de los parámetros del campo y de las características del medio. Si las variaciones en tiempo de la cantidad que caracteriza los campos son periódicas, la distancia viajada en un periodo es conocida como la longitud de onda [13].

## 1.1 La onda electromagnética

Todos los campos electromagnéticos se pueden derivar de las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (a)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (b) \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (c)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (d)$$

En donde E es la intensidad del campo eléctrico en volts por metro y H es la intensidad del campo magnético en amperes por metro.

D es el desplazamiento en coulombs/metro

B es la inducción magnética en weber /metro

J es la densidad de corriente eléctrica en amperes/metro<sup>2</sup>

$\rho$  es la densidad de carga eléctrica en coulombs/metro<sup>3</sup>

t es el tiempo en segundos

$\nabla$  es el operador de vector diferencial

Para aplicar las ecuaciones de Maxwell a la descripción de campo electromagnético podemos considerar que  $J=0$ ,  $B = \mu H$  y  $D = \epsilon E$  con de  $\mu$  es la permeabilidad magnética y  $\epsilon$  la constante dieléctrica de la atmósfera. Ecuaciones de onda para E y H se pueden deducir entonces. La ecuación de onda para E puede convertirse en:

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1.2.)$$

De la misma forma una ecuación de onda análoga para H. Las soluciones no triviales más simples para estas ecuaciones de onda describen una onda plana con E y H normales entre si y con la dirección de propagación. Las magnitudes de E y H de los componentes del campo se pueden relacionar con:

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E \quad (1.3)$$

El índice de refracción  $n$  de un medio se define como la razón de la velocidad  $c$  de una onda plana en espacio libre con la velocidad  $v$  del medio.

$$n = c\sqrt{\mu\epsilon} \quad (1.4)$$

El valor de  $\mu$  tiene el valor numérico  $\frac{4\pi}{10^7}$  en el espacio libre y difiere poco del valor en la atmósfera.

## 1.2 Radiación de fuente isotrópica

Por definición una fuente isotrópica irradia uniformemente en todas las direcciones. Si la potencia total en watts irradiada por una fuente isotrópica es  $P_t$ , el flujo de potencia neto a través de la superficie de una esfera con la fuente en su centro también es  $P_t$ . La potencia promedio por unidad de área es:

$$P_{AV} = \frac{P_t}{4\pi d^2} \quad (1.5)$$

Con  $d_r$  como la distancia en metro a la superficie de la fuente. El patrón de radiación se muestra en la figura 1.0 en dónde se aprecia que se forma una esfera perfecta.

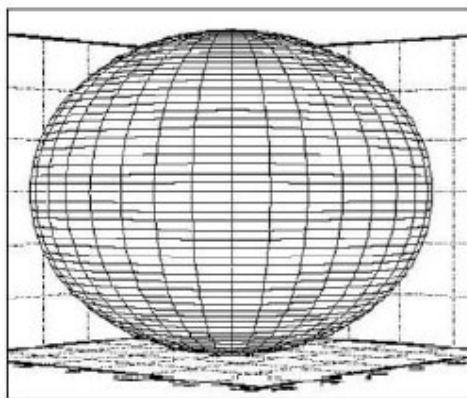


Figura 1.0 Patrón de radiación isotrópico.

### 1.3 Transmisión entre antenas isotrópicas

Una antena isotrópica puede utilizarse para recibir y transmitir. Usada como antena receptora su función es la de absorber potencia de la radiación de un campo en el cual está situada la antena. La cantidad de potencia que se absorbe en relación con la densidad de potencia en el campo se determina por la “apertura efectiva” de la antena, la cual se define como el área en el frente de onda incidente que transmite un flujo de potencia igual la potencia disipada en la carga conectada a las terminales de salida de la antena. La apertura efectiva de una antena isotrópica es  $\lambda^2 / 4\pi$  con  $\lambda$  como la longitud de onda de la radiación incidente. Una antena receptora isotrópica situada en un campo con densidad de potencia  $P_{av}$  dará a su carga una potencia recibida dada por

$$P_R = P_T \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (1.6)$$

Con  $r$  es la distancia entre las antenas.

La diferencia entre la potencia transmitida y la potencia recibida se puede definir como las pérdidas por transmisión y se mide comúnmente en decibeles.

$$L = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R} \quad (1.7)$$

Si combinamos las dos ecuaciones anteriores obtenemos que:

$$L = 21.98 + 20 \log_{10} \frac{r}{\lambda} \quad (1.8)$$

Esta ecuación se puede escribir de una manera que sea más práctica para análisis de propagación. Reemplazando la longitud de onda en metros y  $f$  por la frecuencia en Mhz gracias a la relación  $\lambda = 10^{-6} c / f$  en dónde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío de magnitud  $2.998 \times 10^8 m/s$  y convirtiendo la distancia  $r$  entre las antenas de metros a kilómetros se obtiene:

$$L = 32.44 + 20 \log_{10} r + 20 \log_{10} f \quad (1.9)$$

## 1.4 Transmisión entre antenas directivas

Para antenas directivas las ecuaciones se deben de cambiar un poco para que describan la potencia de transmisión. Es importante que la potencia que sale de las antenas directivas no es la potencia de transmisión si no es la potencia efectiva radiada denotada como  $D_T(\varphi_T, \theta_T)P_T$  en dónde el primer factor representa la directividad de la antena transmisora.  $\varphi_T$  y  $\theta_T$  representan los ángulos en coordenadas esféricas describiendo el desplazamiento de la dirección de máxima radiación de la antena transmisora desde la línea que junta las antenas [13]. También el factor  $\lambda^2/4\pi$  representa la apertura efectiva de la antena isotrópica receptora y para encontrar la apertura efectiva en las antenas directivas se le debe agregar el factor de directividad haciendo de esta  $D_T(\varphi_T, \theta_T)\lambda^2/4\pi$ . Los ángulos en coordenadas esféricas representan el desplazamiento de la dirección de máxima ganancia de la antena receptora desde la dirección que une las antenas. De esta forma la potencia recibida se representa como:

$$P_R = D_T(\varphi_T, \theta_T)D_R(\varphi_R, \theta_R)P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \quad (1.10)$$

Si ambas antenas están alineadas para una pérdida por transmisión mínima, los dos factores de directividad se vuelven las directividades máximas en las antenas. Las modificaciones correspondientes a las pérdidas por transmisión se pueden utilizar agregando simplemente  $10\log_{10} D_T(\varphi_T, \theta_T)$  y  $10\log_{10} D_R(\varphi_R, \theta_R)$  a la ecuación [13].

## 1.5 Ganancia

Hemos estado hablando de la palabra ganancia en las descripciones anteriores pero aún no se ha explicado completamente el concepto. Más adelante en este escrito se referirá a las antenas por su ganancia y no por su directividad. Por esta razón es necesario describir los fundamentos para entender perfectamente su función en el análisis de propagación de las ondas electromagnéticas.

Si una antena de transmisión es usada en vez de antena de referencia, el campo en general tiene diferente valor. La potencia  $P$  del transmisor se vuelve la potencia efectiva  $P'$  y entonces:

$$G = \frac{P'}{P} \quad (1.11)$$

Donde  $G$  es la ganancia infinita de la antena transmisora en una dirección. En casos donde la antena de referencia es una antena isotrópica la ganancia se llama ganancia absoluta o ganancia isotrópica. En espacio libre el dipolo Hertziano y el dipolo de media onda tienen ganancias absolutas de 1.75 dB y 2.15 dB respectivamente. Si uno de estos dipolos está tomado como antena de referencia, la ganancia relativa de cualquier antena es medida como un número menor al valor de la ganancia absoluta [13].

Una antena receptora que está en un punto de una onda plana donde la densidad de superficie de la potencia es  $S$ , recibe una cierta potencia  $P$  proporcional a  $S$ . El coeficiente de proporcionalidad, que tiene dimensiones de área, se llama el área efectiva de la antena. Esta área no necesariamente está relacionada con las dimensiones geométricas de la antena. Para ondas por con longitudes de onda menores a las de las UHF las antenas presentan una abertura perpendicular a la dirección de propagación, el área efectiva es generalmente proporcional a esta apertura y el coeficiente de proporcionalidad está entre 0.5 y 0.7.

Ganancia está definida para una antena transmisora y área efectiva para antenas receptoras. Ya que la misma antena puede utilizarse para transmitir o para recibir existe una relación entre las dos cantidades. Aplicando el principio de reciprocidad la ganancia  $G$  de una antena en una dirección particular es proporcional al área efectiva  $A$  en la misma dirección. El coeficiente de proporcionalidad es independiente de la antena y para una longitud de onda  $\lambda$  en espacio libre.

$$\frac{G}{A} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \quad (1.12)$$

Para una antena isotrópica la ganancia equivale a 1 y consecuentemente el área efectiva  $A_0$  de una antena isotrópica equivale a:

$$A_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (1.13)$$

En condiciones de espacio no-libre estas ecuaciones no se aplican.

## 1.6 Uso de las unidades DB

Es muy común usar el término decibeles cuando se habla de ganancia de las antenas o de pérdidas por propagación. Estas unidades no se utilizan arbitrariamente, si no que su función es la de simplificar las unidades de las que se está tratando. Los decibeles se usan para describir el efecto de los sistemas en la intensidad de las señales que se están mandando. Es frecuente decir que un cable tiene una pérdida de 6dB o que un amplificador tiene una ganancia de 15 dB. Estas unidades son útiles porque las intensidades de la señales varían logarítmicamente y no linealmente, es una forma de simplificar los números para variaciones muy grandes. Estas unidades son de gran utilidad por que las ganancias y pérdidas pueden ser calculadas tan solo con sumar o restar números enteros. Por ejemplo, cada vez que el nivel de potencia se duplica o divide entre dos se pueden sumar o restar 3dB. Esto corresponde a una ganancia o reducción del 50%.

Las unidades dB se deben referenciar a un nivel de potencia. Los niveles de potencia a menudo se pueden representar en dBm. 0 dBm está definido como un 1mW de potencia en las terminales de una carga como las de una antena [14]. Señales pequeñas son números negativos como por ejemplo -83dBm. Así, 125mW son 21 dBm y 250 mW son 24dBm. La Figura 1.1 presenta como la ganancia o atenuación en unidades de dB es lineal, es decir solo se suma la ganancia o resta la pérdida a la señal de entrada.

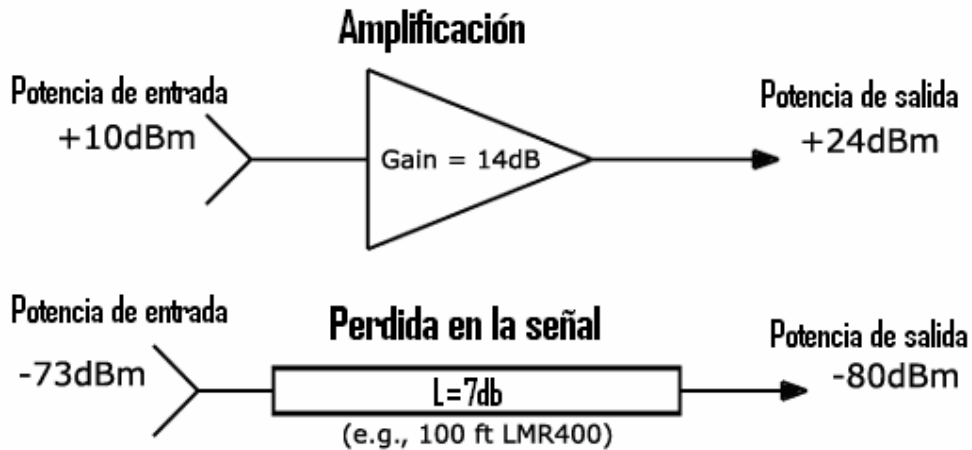


Figura 1.1 Amplificación y atenuación usando decibeles.

La ganancia de las antenas sobre antenas de dipolos a veces se mide en dBd. El término dBd generalmente se usa para describir la ganancia de una antena para antenas que operan por debajo de 1Ghz. La razón por la cual la ganancia de muchas antenas está medida en dBd es por eso que los diseñadores de antenas utilizan antenas de dipolo como un estándar. La diferencia en DB entre la antena y la antena de dipolo es la ganancia en dBd.

La ganancia de las antenas isotrópicas se mide en dBi. Desafortunadamente, la antena isotrópica no se puede realizar. La ganancia de antenas por arriba de 1Ghz se miden generalmente en dBi. Una antena de dipolo tiene una ganancia de 2.15 dB sobre una antena isotrópica con 0dBi.

La potencia efectiva radiada (ERP) se puede calcular fácilmente tan solo como sumar la ganancia de la antena más la potencia de transmisión (sin contar las pérdidas por del sistema) como en la Figura 1.2.



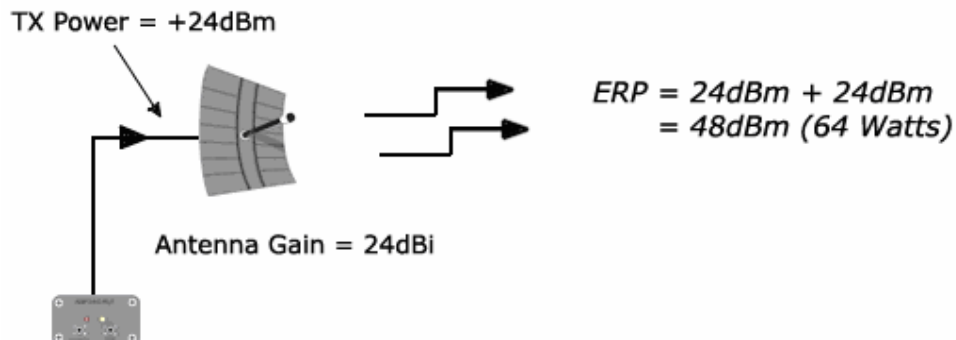


Figura 1.2 Potencia Efectiva Radiada (ERP).

Por ejemplo si una antena tiene una ganancia de 12dBi y se alimenta con 15dBm de potencia, entonces la potencia efectiva radiada es

$$ERP = 12dbi + 15dBm = 27dBm(500mW) \quad (1.14)$$

## 1.7 Bandas de frecuencias

El espectro electromagnética se divide con base es la frecuencia. Muchas de estas frecuencias se juntan en grupos llamados bandas. Estas agrupaciones tienen características que las diferencian de otras bandas. Las bandas en las que se divide generalmente del espectro electromagnético están designadas en la siguiente tabla. Sin embargo, existen grupos internacionales que definen estas bandas como por ejemplo la Internacional Telecommunications Union (ITU).

Tabla 1.1 Bandas de Frecuencias de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

Designación	Banda ITU	Frecuencia	Longitud de onda
<b>ELF</b> extremely low frequency	1	3Hz a 30Hz	100'000km a 10'000 km
<b>SLF</b> Superlow frequency	2	30Hz a 300Hz	10'000km a 1'000km
<b>ULF</b> Ultralow frequency	3	300Hz a 3000Hz	1'000km a 100km
<b>VLF</b> very low frequency	4	3kHz a 30kHz	100km a 10km
<b>LF</b> Low frequency	5	30kHz a 300kHz	10km a 1km
<b>MF</b> medium frequency	6	300kHz to 3000kHz	1km to 100m
<b>HF</b> high frequency	7	3MHz a 30MHz	100m a 10m
<b>VHF</b> very high frequency	8	30MHz a 300MHz	10m a 1m
<b>UHF</b> Ultrahigh frequency	9	300MHz a 3000MHz	1m a 10cm
<b>SHF</b> superhigh frequency	10	3GHz a 30GHz	10cm a 1cm
<b>EHF</b> extremely high frequency	11	30GHz a 300GHz	1cm a 1mm

La IEEE o Institute of Electrical and Electronics Engineering de Estados Unidos divide el espectro en la siguiente tabla.

Tabla 1.2 Banda de frecuencias IEEE.

Banda	Rango de frecuencias	Origen del nombre
<a href="#">banda I</a>	A 0.2GHz	
<a href="#">banda G</a>	0.2 a 0.25 GHz	
<a href="#">banda P</a>	0.25 a 0.5 GHz	Previous,
<a href="#">banda L</a>	0.5 a 1.5 GHz	Long wave
<a href="#">banda S</a>	2 a 4 GHz	Short wave
<a href="#">banda C</a>	4 a 8 GHz	Compromise between S and X
<a href="#">banda X</a>	8 a 12 GHz	Used in WW II for fire control, X for cross (as in crosshair)
<a href="#">banda ku</a>	12 a 18 GHz	Kurz-under
<a href="#">banda K</a>	18 a 26 GHz	<a href="#">German Kurz (short)</a>
<a href="#">banda Ka</a>	26 a 40 GHz	Kurz-above
<a href="#">banda V</a>	40 a 75 GHz	Very high frequency
<a href="#">banda W</a>	75 a 111 GHz	<a href="#">W follows V in the alphabet</a>

También la organización del tratado del atlántico del norte (OTAN) divide las bandas de frecuencias en:

Tabla 1.3 Bandas de frecuencias OTAN.

Banda	Rango de Frecuencia
<a href="#">banda A</a>	A 0.25 GHz
<a href="#">banda B</a>	0.25 a 0.5 GHz
<a href="#">banda C</a>	0.5 a 1.0 GHz
<a href="#">banda D</a>	1 a 2 GHz
<a href="#">banda E</a>	2 a 3 GHz
<a href="#">banda F</a>	3 a 4 GHz
<a href="#">banda G</a>	4 a 6 GHz
<a href="#">banda H</a>	6 a 8 GHz
<a href="#">banda I</a>	8 a 10 GHz
<a href="#">banda J</a>	10 a 20 GHz

Todas estas bandas se comportan diferentes en el medio y todas ellas sufren pérdidas en su camino de propagación.

## 1.8 Pérdidas en la potencia de la señal

Mientras las ondas viajan a través del medio éstas van cambiando su dirección de propagación, su nivel de intensidad y en general su comportamiento. Esto se debe a que en el universo en realidad no existe espacio libre. Espacio libre quiere decir que no existe nada, absolutamente nada entre las antenas que están teniendo una comunicación. En la vida real las el medio que separa dos antenas siempre tiene “algo” en medio. Ese siempre tiene características únicas que hace que cada camino de onda se comporte de una manera muy singular. Las características del medio hacen que las ondas en cambian en general por algunos efectos de la interacción de las ondas con el medio. Las condiciones reales generalmente difieren de aquellas en el vacío y pueden variar de un punto a otro, pueden contener cuerpos con características eléctricas variadas produciendo superficies discontinuas. Desde el punto de vista teórico el estudio de propagación involucra resolver las ecuaciones de Maxwell en el momento que se pueda determinar:

- La posición y la naturaleza de las fuentes.
- Las características electromagnéticas de la propagación del medio
- Las condiciones de frontera en superficies que delimitan a los medios.
- Las condiciones iniciales

En la práctica este método solo puede usarse al precio de simplificarlas, ya que se volverían demasiado complejas mientras involucramos más y más factores del medio. Es por eso que usualmente se reducen para hacer modelos específicos para condiciones específicas. De esta manera, las ondas electromagnéticas son afectadas por fenómenos como, reflexión, dispersión, refracción, difracción, absorción.

La reflexión ocurre cuando una señal electromagnética, que se propaga, golpea sobre un objeto cuyas dimensiones son mucho más grandes que la longitud de onda de la señal electromagnética y que tiene diferentes propiedades eléctricas. La difracción de las señales de radio es la curva que hacen las señales alrededor de un objeto, y la cual provoca un cambio de dirección de la señal. La dispersión es el fenómeno que ocurre cuando una señal de radio golpea contra una superficie rugosa o áspera y la energía reflejada es difundida o reflejada en varias direcciones. La refracción es el cambio de dirección de una señal electromagnética cuando ésta se transmite de un medio a otro. Los árboles, edificios, lagos, vegetación, gases, temperatura, coches, material del suelo, etc, hace que estas propiedades entren en juego. A medida que cambia la frecuencia el comportamiento de las ondas varía enormemente

Reflexión y refracción toman lugar cuando dos diferentes tipos de medios son separados por una superficie la cual es mucho más grande y tiene muchas irregularidades muy pequeñas con respecto de la longitud de onda de la radiación. En particular, el radio de la curvatura en cualquier punto de una superficie debe ser muy grande con respecto de la longitud de onda. Es por esta razón que estos fenómenos son estudiados para superficies planas. La curvatura de la superficie se toma en cuenta después y es cuando entran en juego los conceptos de convergencia y divergencia. La reflexión es cuando una onda electromagnética cambia de medio y parte de la onda “rebota” en el medio en un ángulo definido por las características eléctricas de los medios en cuestión y del ángulo de incidencia. Si el ángulo de incidencia es perpendicular al plano imaginario que divide los dos medios entonces el rayo se reflejará en la misma dirección de propagación pero en sentido opuesto. De esta forma, si una onda se dirige al medio en un ángulo específico con respecto de la normal al medio, este “rebota” con un ángulo igual pero de signo contrario con respecto de la misma normal (Ver Figura 1.3).

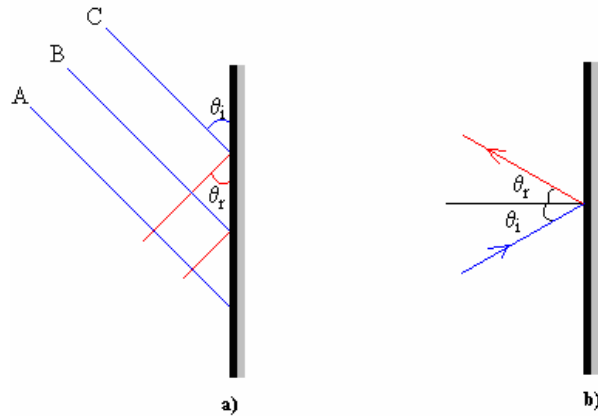


Figura 1.3 .Reflexión de una onda al cambiar de medio [20].

Pero no toda la energía rebota, parte de esta energía traspasa al medio y se comporta dependiendo de las características eléctricas de este. La refracción (del latín fractum, "quebrado") es el cambio de dirección que experimenta una onda electromagnética debido al cambio de velocidad cuando pasa de un medio con un índice de refracción dado a un medio con otro índice de refracción distinto (Ver Figura 1.4).

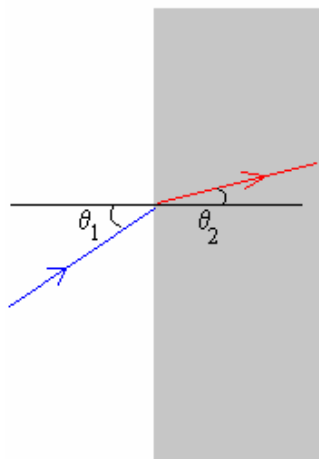


Figura 1.4. Refracción de ondas electromagnéticas [20].

Un ejemplo de este fenómeno se ve cuando se sumerge un lápiz en un vaso con agua: el lápiz parece quebrado. Se utiliza la letra  $n$  para representar el índice de refracción del material, y se calcula por la siguiente fórmula:

$$n = \frac{C}{v} \quad (1.12)$$

$n$  : índice de refracción del medio en cuestión

$c$  : velocidad de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8$  m/s)

$v$  : velocidad de la luz en el medio en cuestión

Es decir que es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio.

Dado que la velocidad de la luz en cualquier medio es siempre menor que en el vacío, el índice de refracción será un número siempre mayor que 1.

Los ángulos de refracción están relacionados por la ley de refracción de Snell

$$n_1 \cdot \text{sen} \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen} \theta_2 \quad (1.13)$$

La difracción se explica por el principio de Huygens donde cada punto en un frente de onda puede considerarse como una fuente puntual isotrópica secundaria (Ver Figura 1.5).

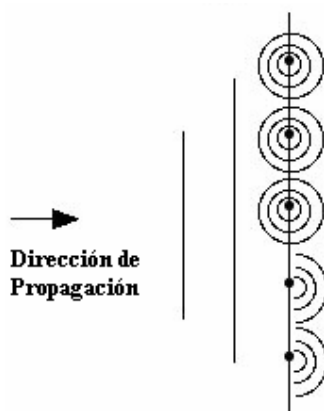


Figura. 1.5 Frente de onda de acuerdo al Principio de Huygens.

La dispersión se explica con el criterio de Rayleigh donde las ondas rebotan sobre superficies que son rugosas para la longitud de onda. Estas irregularidades se toman en cuenta de la siguiente forma. Si  $\Delta h$  denota la altura de una irregularidad en la zona de

reflexión y  $\varphi$  denota el ángulo entre el rayo incidente y la superficie promedio, la diferencia del camino introducido por las irregularidades es  $2\Delta h \sin \varphi$  y esta cantidad puede ser comparada con la longitud de onda para calcular la diferencia en fases así:

$$g = \frac{4\pi\Delta \sin \varphi}{\lambda} \quad (1.15)$$

Mientras la onda va avanzando la potencia promedio cambia en cada punto. Es por eso que se hacen modelos de propagación para calcular las pérdidas de las señales. El modelo más simple es el modelo de Friis que es deducido de las ecuaciones de Maxwell y predice las pérdidas en el espacio libre, es decir, cuando no hay nada en el camino de las ondas de una antena a otra.

Estos “modelos” son ecuaciones matemáticas que analizan la potencia de radiación, la frecuencia de la señal, la ganancia de las antenas, las condiciones atmosféricas y en algunos casos hasta la altura de edificios y densidad urbana.

## 1.9 Aproximación de Rayleigh

El scattering de Rayleigh es el scattering de cualquier radiación electromagnética producida por partículas mucho menores que la longitud de onda de esta. Ocurre cuando la señal EM viaja a través de sólidos y líquidos transparentes pero se identifica mejor en los gases [14].

La cantidad de scattering que es dependiente del tamaño de las partículas y de la longitud de onda, y por lo tanto varía inversamente a la cuarta potencia de la longitud de onda. Esta relación se conoce como la Ley de Rayleigh.

La intensidad  $I$  de la señal EM está dada por:

$$I = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{d}{2} \right)^6 \quad (1.16)$$

Dónde

R : Distancia a la partícula

$\theta$ : Ángulo

n: Índice de refracción

d: Diámetro de la partícula.

La distribución de Rayleigh, gobernada por el término  $(1+\cos^2\theta)$ , es simétrico en el plano normal a la dirección incidente de la señal EM. Integrando sobre una esfera que rodea a la partícula se define la *cross section* como:

$$\sigma_s = \frac{2\pi^5 d^6}{3 \lambda^4} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \quad (1.17)$$

Donde:

$\sigma_s$ : Rayleigh Cross Section

$\lambda$ : Longitud de onda

n: Índice de refracción

El coeficiente de Rayleigh para un grupo de partículas es el número de partículas por unidad de volumen N veces el cross-section.