

## **3. PROPAGACIÓN DE SEÑALES**

### 3.1 INTRODUCCIÓN

---

Una vez que se ha presentado la clasificación de los diferentes tipos de materiales de construcción que intervienen en las obras, es turno de hablar de los sistemas de comunicación. Primeramente, se puede ver a la comunicación como la forma de compartir o poner en común alguna cosa con alguien, es decir, hacer llegar un mensaje desde el emisor al receptor de manera clara y entendible. En el trayecto del enlace comunicativo se presentan una serie de circunstancias que intervienen en dicha conexión por lo que en este capítulo se habla de los sistemas de comunicación así como los elementos que lo conforman; los mecanismos de propagación como son reflexión, refracción, dispersión y difracción; por último, los modelos de propagación.

### 3.2 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

---

Al hablar de la historia de la radio comunicación nos tenemos que remontar a 1876 fecha en la cual salen a la luz pública los trabajos realizados por James Clark Maxwell siendo éstos las famosas “Ecuaciones de Maxwell” que rigen el comportamiento de las ondas electromagnéticas. La formulación moderna de las ecuaciones de Maxwell es debida a Oliver Heaviside y Josiah Willard Gibbs

quienes en 1884 reformularon las ecuaciones originales de Maxwell. Para profundizar en las ecuaciones de Maxwell se puede consultar el libro de John Hendry titulado “*James Clerk Maxwell and the theory of the electromagnetic*” [14].

Posteriormente, en la década de 1880, Rudolph Hertz realiza experimentos en VHF (Very High Frequency) y de esa fecha en adelante empiezan a surgir importantes aportaciones que van mejorando la comunicación a través de ondas electromagnéticas [11].

La comprensión de estos principios y el uso de las ondas electromagnéticas en nuestros días tienen diferentes aplicaciones en diversos campos tales como el de la comunicación y más recientemente la comunicación inalámbrica mediante la cual se realizan conexiones o enlaces que no se basan en el contacto físico a través de cables.

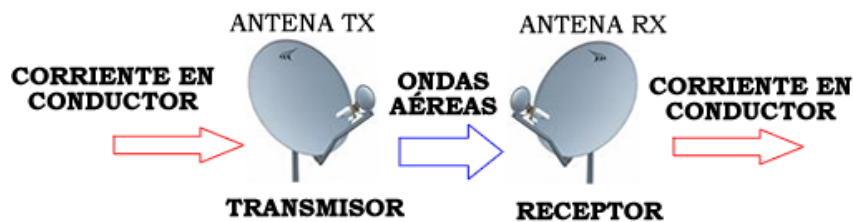
En un sistema típico de comunicación inalámbrico, se tiene que la energía eléctrica fluye a través de una corriente a lo largo de un conductor, es aquí donde se transforma en una serie de ondas que viajan en el aire, para que posteriormente se vuelvan a convertir en corriente que fluirá en un conductor de nueva cuenta [33].



**Figura 3.1** Diagrama a bloques de un sistema genérico de comunicación inalámbrica.

### 3.2.1 Antenas

Para completar el esquema mostrado en la figura 3.1 se requiere la presencia de una antena, pues sin ésta, no existirían transmisiones inalámbricas. Su trabajo es muy simple, se encarga de la conversión de señales eléctricas que fluyen en un conductor a ondas aéreas (en el transmisor) o bien, convertir estas ondas aéreas a señales eléctricas que fluirán en un conductor (en el receptor). En otras palabras, convierte ondas guiadas a ondas que viajarán en el espacio libre y viceversa. Se conoce como el corazón del sistema.



**Figura 3.2 Sistema de comunicación inalámbrica.**

El tamaño de las antenas está relacionado con la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia transmitida o recibida, en general, es un múltiplo o submúltiplo exacto de esta longitud de onda. Por lo que, a medida que se van utilizar frecuencias mayores, las antenas disminuyen su tamaño [33].

#### 3.2.1.1 Regiones de Campo Cercano y Lejano de una Antena

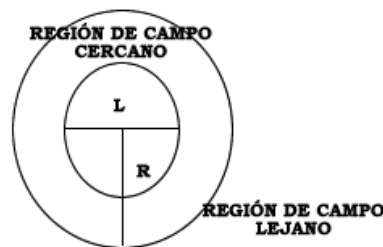
El comportamiento de radiación de las antenas en sus proximidades va cambiando rápidamente conforme la distancia se incrementa, este cambio incluye

tanto a la energía radioactiva como a la reactiva. Para determinar el punto o radio donde se da esta separación se cuenta con la siguiente ecuación [28]:

$$\text{Ecuación 3.1} \quad R = \frac{2L^2}{\lambda}$$

Donde  $L$  representa el diámetro de la esfera más pequeña que encierra a la antena, es decir, la mayor dimensión física de la antena y  $\lambda$  representa la longitud de onda de la antena. Todas las unidades de la ecuación son de longitud por lo que se deben manejar las mismas.

La región comprendida hasta  $R$  se conoce como campo cercano o región de Fresnel, mientras que una distancia mayor corresponde al campo lejano o región de Fraunhofer.



**Figura 3.3 Definición de regiones de una antena.**

En la región de campo cercano predominan los campos de radiación y su distribución angular depende de la distancia que hay a la antena. Se le conoce como región de Fresnel en el momento en que se orienta hacia el infinito.

En cuanto al campo lejano, su distribución del campo angular es independiente a la distancia que hay a la antena, teniendo sus límites en el infinito.

### 3.2.1.2 Patrón de Radiación

El patrón de radiación de una antena es una gráfica de su radiación de campo lejano. Es una forma de clasificar las antenas, donde encontramos dos tipos principales: antenas direccionales y omnidireccionales. Las antenas direccionales se suelen utilizar para unir dos puntos a largas distancias mientras que las antenas omnidireccionales se usan para dar señal extensa en los alrededores [29].

Específicamente, es su potencia radiada por unidad de ángulo dada por la ecuación 3.2.

$$\text{Ecuación 3.2} \quad U = r^2 S$$

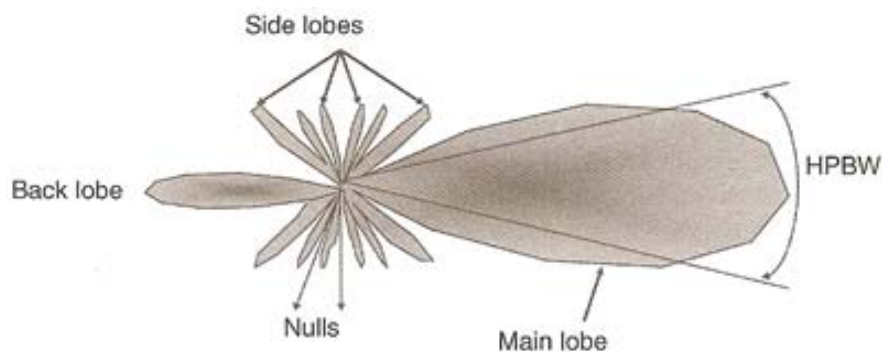
Donde  $U$  es la intensidad de radiación dada en watts por unidad de ángulo,  $S$  es la densidad de potencia en watts sobre metro cuadrado y  $r$  es la distancia a cada punto dada en metros.

Un ejemplo de utilización es que si se necesita dar cobertura de red inalámbrica en toda un área próxima (una planta de un edificio) lo recomendable es que se utilice una antena omnidireccional. Si tiene que dar cobertura de red inalámbrica en un punto muy concreto lo ideal es instalar una antena direccional.

### 3.2.1.3 Antenas Direccionales

Este tipo, orienta la señal en una dirección muy determinada con un haz estrecho pero de largo alcance. Se puede hacer una analogía con un foco que emite un haz de luz concreto y estrecho pero de forma intensa (más alcance).

Las antenas direccionales envían la información a una cierta zona de cobertura, a un ángulo determinado, por lo cual su alcance es mayor, sin embargo fuera de la zona de cobertura no se puede establecer comunicación [29].



**Figura 3.4 Patrón de radiación de una antena [28].**

### 3.2.1.4 Antenas Omnidireccionales

Para este caso, la señal es orientada en todas direcciones con un haz amplio pero de corto alcance. Las antenas omnidireccionales envían en teoría la información a los 360 grados por lo que es posible establecer comunicación independientemente del punto en el que se esté. En contrapartida el alcance de estas antenas es menor que el de las antenas direccionales.

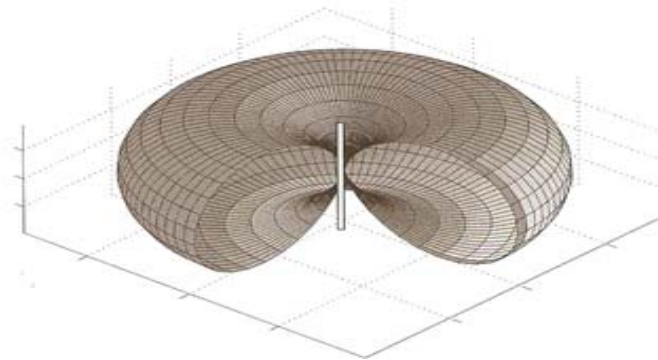


Figura 3.5 Patrón de radiación de una antena omnidireccional [28].

### 3.2.2 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es el recurso más importante para un sistema de comunicación inalámbrico. Se divide en rangos de frecuencias para poder clasificar sus usos y aplicaciones. La parte que corresponde a radio frecuencias abarca de los 30 kHz a los 300 GHz. En la tabla 3.1 se muestra como se divide el espectro electromagnético [4].

Tabla 3.1 Designación de bandas de frecuencia.

BANDA DE FRECUENCIA	RANGO DE FRECUENCIA
Extremely Low Frequency (ELF)	< 3 kHz
Very Low Frequency (VLF)	3-30 kHz
Low Frequency (LF)	30-300 kHz
Medium Frequency (MF)	300 kHz-3MHz
High Frequency (HF)	3-30 MHz
Very High Frequency (VHF)	30-300 MHz
Ultra High Frequency (UHF)	300 MHz-3 GHz
Super High Frequency (SHF)	3-30 GHz
Extra High Frequency (EHF)	30-300 GHz

### **3.2.2.1 Extremely Low Frequency (ELF) y Very Low Frequency (VLF)**

En este rango de frecuencias, la longitud de onda de la señal es muy larga en el rango superior a los 10 kilómetros por lo tanto, las antenas son muy grandes. Sus aplicaciones principales son para telegrafía a nivel mundial, en barcos y submarinos. Frecuencias por debajo de los 9 kHz son destinadas para uso militar.

### **3.2.2.2 Low Frequency (LF)**

Frecuencias bajas para aplicaciones de comunicación de costa a embarcaciones, *broadcasting* y enlaces trasatlánticos. Para el sistema se usa polarización vertical existiendo gran ruido atmosférico y cuentan con un ancho de banda limitado.

### **3.2.2.3 Medium Frequency (MF)**

La longitud de onda para esta banda va de 100 metros a 1 kilómetro. Dentro de sus aplicaciones más importantes están el uso en radio AM, radio navegación y comunicaciones móviles marítimas. Para esta banda se recomienda el uso de antenas direccionales.

### **3.2.2.4 High Frequency (HF)**

Entre las aplicaciones principales para este rango de frecuencias está *broadcasting* internacional, comunicaciones punto a punto a larga distancia así como comunicaciones móviles marítimas y aeronáuticas. El sistema empleado es



por medio de arreglo de dipolos, existe importante ruido de medio ambiente y el ancho de banda es de 6 kHz.

#### **3.2.2.5 Very High Frequency (VHF)**

Esta banda tiene servicios militares y para propósitos de emergencia. También se usa para televisión, teléfonos inalámbricos análogos y radio navegación aérea. El ruido atmosférico es mínimo pero significativo.

#### **3.2.2.6 Ultra High Frequency (UHF)**

Rango de frecuencias más importante para el desarrollo de esta tesis pues caen las aplicaciones de telefonía celular. Además del celular, se usa para televisión, conexiones satelitales, radar, telemetría, teléfonos inalámbricos entre otras. Las antenas usadas son pequeñas y el ancho de banda posible es amplio.

#### **3.2.2.7 Super High Frequency (SHF)**

También conocidas con frecuencias de micro-ondas destinados para enlaces fijos terrestres, televisión satelital y radar. Se requiere una línea de vista para hacer el enlace y es posible diseñar antenas chicas de alta ganancia.

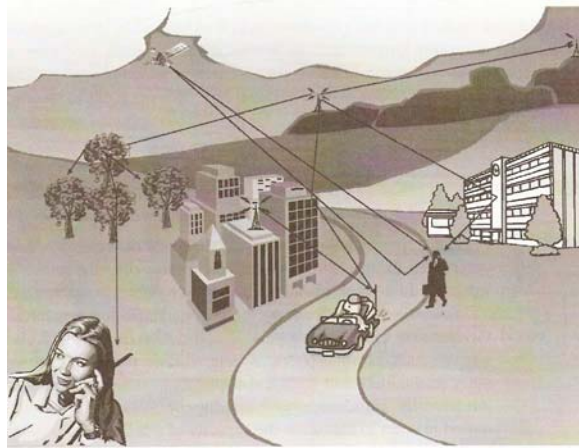
#### **3.2.2.8 Extra High Frequency (EHF)**

Destinadas a comunicaciones con línea de vista para futuras aplicaciones satelitales, se requieren de antenas pequeñas direccionales pues la longitud de onda es milimétrica lo que también provoca un ancho de banda muy grande.

### 3.3 MECANISMOS DE PROPAGACIÓN

---

La propagación de señales es la forma en que se comporta cada una de ellas en el viaje que realizan desde el emisor hasta el receptor, existen ciertos factores que intervienen en ese trayecto, que son conocidos como mecanismos básicos de propagación que son: refracción, reflexión, dispersión y difracción.



**Figura 3.6 Propagación de una señal [28].**

#### 3.3.1 Refracción

La refracción es el cambio de dirección de una señal cuando se transmite de un medio a otro teniendo la condición de que esos medios tengan un índice de refracción distinto. En la refracción intervienen dos ángulos conocidos como ángulos de transmisión y ángulo de incidencia, que están relacionados entre sí por la ley de refracción de Snell mostrada en la siguiente ecuación:

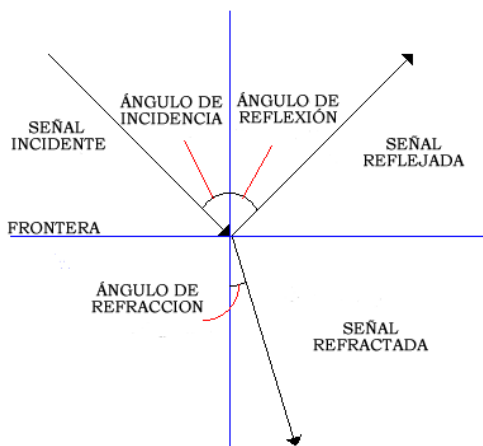
**Ecuación 3.3**  $n_1 \text{sen} \theta_i = n_2 \text{sen} \theta_t$

Donde  $\theta_i$  y  $\theta_t$  son los ángulos de incidencia y transmisión mientras que  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del medio 1 y del medio 2 respectivamente.

### 3.3.2 Reflexión

La reflexión es el mecanismo de propagación que se da cuando una señal golpea un objeto que presenta dimensiones más grandes que su longitud de onda. Una parte de la señal emitida se transmite dentro del objeto siempre y cuando no sean materiales conductores perfectos, la otra parte de la señal es reflejada. Los ángulos de reflexión  $\theta_r$  y el de incidencia  $\theta_i$  son iguales como lo enuncia la ley de reflexión de Snell.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE UNA SEÑAL



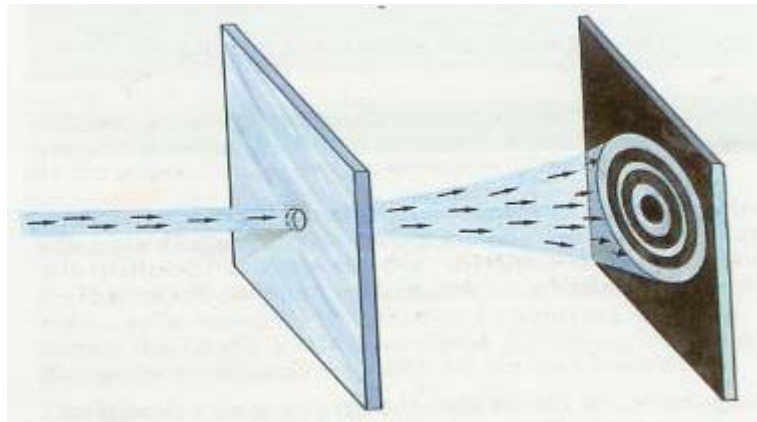
**Figura 3.7 Reflexión y refracción de una señal.**

### 3.3.3 Dispersión

Es el fenómeno que ocurre cuando la señal que viaja en el espacio golpea una superficie rugosa o áspera ocasionando que la señal se disperse hacia varias direcciones. Para considerar que la superficie sea rugosa la diferencia de altura entre su mínima y máxima protuberancia es menor a su altura crítica ( $h_c$ ) obtenida del criterio de Rayleigh mostrada en la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 3.4} \quad h_c = \frac{\lambda}{8 \operatorname{sen} \theta_i}$$

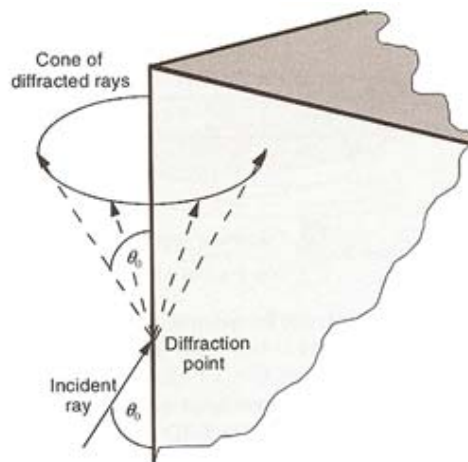
Donde  $\lambda$  representa la longitud de onda de la señal expresada en metros, mientras que  $\theta_i$  es el ángulo con el que la señal se impacta con el obstáculo. Ejemplos comunes de obstáculos que provocan la dispersión son árboles, postes de luz, vegetación entre otros.



**Figura 3.8 Dispersión de una señal.**

### 3.3.4 Difracción

La difracción de las señales es la curva que éstas realizan alrededor de un objeto y la cual, provoca un cambio de dirección de la señal. El cambio de dirección que presenta la onda está relacionada directamente con el tamaño del obstáculo y la longitud de onda de la señal, a mayor longitud de onda o menor grosor del objeto, mayor cambio de dirección.



**Figura 3.9 Difracción de una señal [28].**

Aunque la difracción puede ocasionarle pérdidas a la señal, su ventaja es que permite la propagación de señales de RF sobre la superficie curva de la Tierra más allá del horizonte, además de poder superar obstáculos cuando no existe una línea e vista entre transmisor y receptor.

### 3.4 MODELOS DE PROPAGACIÓN

---

Existen seis diferentes tipos de sistemas de comunicaciones inalámbricas que son [28]:

Los enlaces satelitales, típicamente creados por estaciones fijas en la Tierra y antenas en la órbita geoestacionaria de la misma dándose la propagación por medio de la atmósfera.

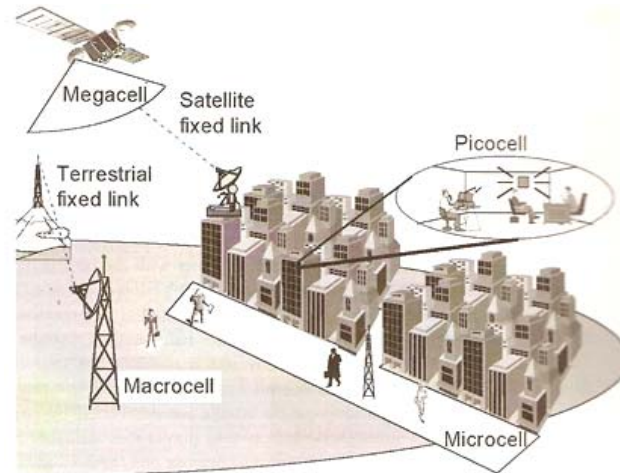
Enlaces terrestres fijos, usados para crear enlaces de alto nivel de transmisión entre dos puntos en la Tierra para servicios como telefonía o redes de datos cubriendo grandes áreas en zonas urbanas y suburbanas.

Mega células, su área de cobertura puede ser proporcionada por un satélite o bien objetos a gran altura en la Tierra como pudiera ser un globo aerostático, por lo general, se recomienda para regiones con bajo tráfico de usuarios.

Macro células, diseñados para dar servicios móviles en zonas abiertas, rurales, urbanas y suburbanas con una densidad de tráfico medio extendiendo su área de cobertura de una a varias decenas de kilómetros.

Micro células, que se usó se recomienda en zonas con altos niveles de tráfico, en zonas abiertas o bien entre edificios, la antena por lo regular está a nivel del suelo.

Por último, se tiene las pico células, diseñadas para entornos interiores como puede ser dentro de edificios con altos niveles de tráfico.



**Figura 3.10 Tipos de sistemas de comunicación inalámbrica [28].**

Cada uno de los sistemas de comunicación inalámbricos descritos anteriormente tienen sus características propias en cuanto a la propagación de las señales y los factores que intervienen, debido a lo anterior, se han desarrollado modelos para la propagación de ondas para cada uno de los tipos.

### **3.4.1 Modelo de Friis**

El modelo de Friis o también llamado modelo de propagación en el espacio libre se utiliza cuando existe una línea de vista entre transmisor y receptor, es decir, no existe la presencia de obstáculos entre estos dos elementos. Predice que la potencia recibida disminuye como una función de la distancia de separación entre transmisor y receptor. Sirve como base para la mayoría de los modelos de propagación [11].

Si se asume que se tienen una antena A transmisora y una B receptora separadas por una distancia “ $r$ ” en metros, siendo la potencia transmitida “ $P_t$ ” en

watts y las ganancias máximas de A “ $G_a$ ” y B “ $G_b$ ”, entonces la potencia recibida en las terminales de la antena receptora B “ $P_r$ ” en watts se define con lo que se conoce como ecuación de Friis:

$$\text{Ecuación 3.5} \quad P_r = P_t G_a G_b \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

Una vez que tenemos establecida la ecuación de Friis (ec. 3.5), podemos definir las pérdidas por trayectoria (*Path Loss*) como la diferencia entre la potencia transmitida y recibida (ec. 3.6):

$$\text{Ecuación 3.6} \quad \text{Perdidas} = P_L = P_t - P_r = 10 \log \frac{P_t}{P_r} \text{ dB}$$

Si hacemos una sustitución en la ecuación 3.5 donde  $\lambda = \frac{c}{f}$ , siendo “ $c$ ” la velocidad de la luz en el vacío en metros sobre segundo cuadrado y “ $f$ ” la frecuencia de la señal en hertz podemos expresar las pérdidas como:

$$\text{Ecuación 3.7} \quad P_L = \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi r f}{c} \right)^2$$

Si se expresa las pérdidas del espacio libre en decibeles, con la frecuencia en mega hertz y la distancia en kilómetros se tiene:

$$\text{Ecuación 3.8} \quad P_L = 32.4 + 20 \log r + 20 \log f_{MHz}$$



### **3.4.2 Modelos de Propagación en Picocélulas**

Hemos mencionado anteriormente los seis tipos de sistemas de comunicación inalámbricos que pueden existir. Los equipos de comunicación personal son usados por las personas, las cuales pasan una gran cantidad de tiempo dentro de los edificios, debido a lo anterior, las pico células es el caso de nuestro interés. Se forman al colocar una estación bases dentro de un edificio, utilizadas por la telefonía celular donde existe alto nivel de tráfico como son estaciones de trenes, áreas de oficinas, aeropuertos, etc.

La propagación en pico células es relevante para determinar áreas de cobertura de la propagación dentro de edificios tanto para sistemas micro celulares como macro celulares donde se observa interferencias de tipo *indoor*.

#### **3.4.2.1 Modelos Empíricos de Propagación dentro de Edificios**

La propagación dentro de los edificios se debe principalmente a dos factores, atenuación debido a las paredes así como difracción de los obstáculos presentes. En ocasiones, puede existir difracción debido a esquinas de objetos.

Existe una aproximación exitosa para caracterizar las pérdidas en interiores, conocido como modelo ITU-R [28], considerando las pérdidas del espacio libre, la frecuencia de la señal así como dos tablas empíricas de la ruta de pérdida exponencial así como la pérdida por la penetración en el piso, siendo la ecuación:

**Ecuación 3.9**  $Loss = L_{dB} = 20 \log f_c + 10n \log r + L_f(n_f) - 28$

Donde  $n$  representa la ruta de pérdida exponencial obtenida por tabla,  $L_f(n_f)$  es la pérdida por penetración de piso obtenida por tabla,  $r$  la distancia entre terminales y  $f$  la frecuencia de la señal.

**Modelo COST-231 Multipared**

Este modelo de propagación entre edificios toma en cuenta las pérdidas del espacio libre  $L_f$  (ecuaciones 3.6 a 3.8) y un componente lineal de pérdidas que es proporcional al número de paredes atravesadas por la señal, la ecuación de este modelo es [28]:

**Ecuación 3.10**  $Loss = L = L_f + L_c + \sum_{i=1}^w L_{wi} n_{wi} + L_f n_f^{((n_f+2)/(n_f+1)-b)}$

Donde  $n_{wi}$  es el número de paredes atravesadas por la ruta directa tipo  $i$ ,  $L_{wi}$  es la pérdida en dB por penetración de la pared tipo  $i$ ,  $w$  es el número de paredes,  $n_f$  es el número de pisos cruzados,  $b$  y  $L_c$  son constantes empíricas y  $L_f$  la pérdida por piso.

**Tabla 3.2 Valores típicos recomendados para modelo Cost-231.**

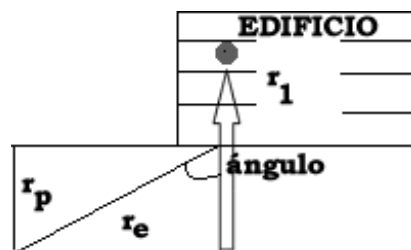
FRECUENCIA	Lw	Lf	B
900 MHz	1.9 dB	14.8 dB	0.46
1800 MHz	3.4 dB, 6.9 dB	18.3 dB	0.46

### 3.4.2.2 Modelos Empíricos de Propagación en Edificios

Las señales de RF penetran en los edificios con una frecuencia que depende de la pérdida producida por el tipo de edificio, su material de construcción así como el número de pisos de éste. Algunos modelos de propagación de nuestro interés para propagación en edificios son: COST231 con línea de vista y COST231 sin línea de vista [28].

#### ***Modelo COST-231 con Línea de Vista***

Este modelo es válido cuando existe una línea de vista entre la cara del edificio y una antena colocada en el exterior, recomendado para frecuencias de 900 a 1800 MHz. Este modelo semiempírico se apoya de la siguiente figura geométrica [28]:



**Figura 3.11 Geometría del modelo COST231 con línea de vista.**

Donde  $r_e$  es la longitud en metros de ruta de la antena a un punto de referencia del edificio. Este modelo es válido para rutas cortas, se hace en tres dimensiones y toma en cuenta el ángulo de incidencia de la señal en el edificio:

$$\text{Ecuación 3.11} \quad \theta = \cos^{-1}\left(\frac{r_p}{r_e}\right)$$

La pérdida total de ruta para el modelo se predice usando la siguiente ecuación:

**Ecuación 3.12** 
$$Loss = L = L_f + L_e + L_g (1 - \cos \theta)^2 + \max(L_1, L_2)$$

Donde  $L_f$  es la pérdida en el espacio libre en dB (ecuaciones 3.6 a 3.8) de  $(r_i+r_e)$ ,  $L_e$  es la pérdida con incidencia normal  $\theta=0$ .

$L_g$  es la pérdida por  $\theta=90$ ,  $L_1=n_w L_i$  y  $L_2=a(r_i-2)(1-\cos\theta)^2$  siendo  $w$  el número de paredes y  $a$  una atenuación específica.

La siguiente tabla muestra los valores de los parámetros que toma en cuenta este modelo:

**Tabla 3.3 Parámetros para modelo COST231 con línea de vista [28].**

PARÁMETRO	MATERIAL	VALOR APROXIMADO
$L_e$ o $L_i$ [dB $m^{-1}$ ]	Paredes de madera	4
	Concreto con ventanas	7
	Concreto sin ventanas	10-20
$L_g$ [dB]	Sin especificar	20
$A$ [Db $m^{-1}$ ]	Sin especificar	0.6

**Modelo COST-231 sin Línea de Vista**

Este modelo se refiere a pérdidas dentro del edificio provocado por un transmisor externo puesto en un lado cercano a la pared de interés, aproximadamente a 2 metros del nivel del suelo. La ecuación que lo define es la siguiente:

**Ecuación 3.13** 
$$Loss = L = L_{out} + L_e + L_{ge} + \max(L_1, L_3) - G_{fh}$$

Donde  $L_3 = ar_i$  y  $r_i$ ,  $L_e$ ,  $a$  y  $L_1$  son definido en el modelo COST231 con línea de vista y  $G_{fh} = nG_n$ ,  $hG_n$  donde  $h$  es la altura del piso y  $n$  el número de piso.

En la siguiente tabla se muestra los parámetros del modelo COST231 sin línea de vista.

**Tabla 3.4 Parámetros para modelo COST231 sin línea de vista [28].**

PARÁMETRO	VALOR APROXIMADO
$L_{ge}$ [dB] a 900 MHz	4
$L_{ge}$ [dB] a 1800 MHz	6
$G_n$ [dB por piso] a 900 y 1800 MHz	1.5-2 en edificios normales
	4-7 para pisos con altura de 4 metros

### 3.5 RESUMEN

---

Toda la teoría acerca de propagación de señales presentada en este capítulo es muy útil para el desarrollo de la tesis ya que al momento de realizar el experimento, descrito en capítulos subsecuentes, estarán presentes cada uno de los mecanismos de propagación en el lugar de experimentación así como también, al trabajar con antenas, tener conocimiento de sus parámetros es fundamental para ver el comportamiento de la señal y los rangos de frecuencia que se están usando.