CAPÍTULO 3

MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA EXTERIORES

3.1 Tipos de Modelos.

La forma en que las ondas se propagan puede variar desde algo muy sencillo hasta algo realmente complicado, las complicaciones en los medios de propagación son debidas a los obstáculos ya sean naturales o artificiales que provocan desviaciones de las ondas.

El modelado y predicción de la forma en que las ondas electromagnéticas se propagan constituyen un campo de gran interés para el diseño de redes de comunicaciones inalámbricas. Un modelo de propagación es una ecuacion normalmente dada en dB(decibeles) que trata de calcular y describir las pérdidas de una señal en determinado ambiente de propagación.

En gran parte las predicciones para un diseño son datos tomados de la realidad que se mezclan con datos estadísticos y en algunos casos teóricos, gracias a esto se logra una descripcion de la forma en que las ondas se propagan. Se deben hacer las diferencias entre los datos teorícos, estadísticos y empíricos.

Durante varios años se ha buscado el modelo que describa correctamente la propagación de ondas, pero al pasar de los años, diversos modelos se han propuesto y se han llegado a diseñar modelos específicos para ambientes específicos, frecuencias específicas y aplicaciones específicas.

La utilidad específica de los modelos está en predecir la potencia de la señal que se transmite y que se recibe a determinada distancia, aunque también se toman en cuenta las variaciones de la potencia en el punto receptor.

3.1.1 Modelos de propagación para pico células.

Junto con los ambientes de cobertura macrocelular y microcelular, para los que ya hoy en día existe una planificación, existe otro tipo de ambiente de operación de las redes celulares, el futuro de las comunicaciones celulares evoluciona hacia escenarios

picocelulares. Las picocélulas son células de tamaño reducido que alcanzan los 100m como distancia máxima de cobertura y están situadas en el interior de edificios. Con lo que comenzará a hacerse necesario el contar con métodos de predicción de cobertura en ambientes interiores [24].

Estos ambientes se caracterizan, desde el punto de vista de la propagación, por una presencia muy importante de obstáculos dispersores. Ello provoca una varianza muy importante en los niveles de potencia media recibidos en distintos emplazamientos y una fuerte dispersión temporal de la onda que llega al receptor.

Se abren dos posibilidades alternativas para abordar este problema, basadas en modelos de tipo estadístico o determinista. Los primeros se basan en la información estadística referente a las características promedio de los dispersores en este tipo de entornos, mientras que los segundos utilizan información realista. Este tipo de modelos serán detalladamente definidos y explicados en el capítulo siguiente.

3.1.2 Modelos de penetración en edificios.

La extensión de la provisión de servicios celulares a entornos de interior de edificios hace preciso considerar la penetración de señal hacia y desde dichos edificios. De este modo, es posible determinar niveles de interferencia no deseados o incluso la posibilidad de extender el servicio proporcionado por microcélulas en el exterior hacia el interior de determinados edificios.

Para penetración en edificios se toman en cuenta diversos aspectos, de estos, los principales son las características de los materiales de los que está construído el edificio. Con esto se puede tener una idea de las pérdidas, mediante mediciones hechas para un edificio en

específico o con modelos de propagación que incluyan las características de los materiales de construcción .

3.1.3 Modelos de tráfico y movilidad.

Las herramientas de tercera generación incorporarán modelos de tráfico y movilidad mejorados. Estos permitirán estimar la densidad de demanda de tráfico en función de la información demográfica. Evidentemente, las dificultades que se le ven a este tipo de modelado hacen recomendable la utilización de bases de datos que sean actualizadas constantemente y que sean medidas sobre la red en operación, siempre que ello sea posible. Pero si no es éste el caso, es decir, en las etapas iniciales de la planificación, estos modelos encuentran una aplicación inmediata. Es previsible el desarrollo de modelos de densidad de tráfico no uniformes. Se considerarán distintos patrones de movilidad para distintos perfiles de usuarios.

3.1.4 Modelos de gran escala y modelos de pequeña escala.

Podemos clasificar a los modelos de propagación en tres grandes tipos, el primero de ellos son los llamados modelos de gran escala o *Large Scale Models*, este tipo de modelos nos ayuda a predecir pérdidas cuando el transmisor y el receptor se encuentran a una distancia grande [1].

El segundo tipo de modelos son los de pequeña escala o *Small Scale Models*, este tipo de modelos son útiles para distancias cortas y cuando se desea una predicción de los rápidos cambios en la intensidad de la potencia.

Algunos de los factores que afectan directamente a los modelos de pequeña escala son la multitrayectoria, la cual a su vez genera el efecto de *Small Scale Fading*, los tres más importantes efectos generados por el *Small Scale Fading* son [1]:

- Cambios rápidos en la intensidad de la señal en pequeñas distancias recorridas e intervalos de tiempo.
- Modulación de Frecuencia al azar por las variaciones del corrimiento del efecto Doppler en las diferentes multitrayectorias de la señal.
- Dispersión en tiempo (ecos) causados por los retrasos en la propagación de la multitrayectoria.

El tercer tipo de modelos son los llamados "Indoor Propagation Models", este tipo de modelos describe o predice las pérdidas dentro de construcciones e interiores, se hablará en detalle de este tipo de modelos más adelante.

3.2 Modelos para propagación en ambientes abiertos.

El tipo de enfoque de estos modelos está condicionado a la casi nula existencia de obstáculos para la propagación de las ondas electromagnéticas, estos modelos surgen por la necesidad de modelar una zona geográfica de terreno irregular, pero con el menor número de obstáculos para así lograr la predicción de las pérdidas que se tienen en el camino hacia el móvil, este tipo de modelos a pesar de llegar a ser de los más sencillos que existen no deben de dejar de tomar en cuenta ciertos parámetros para sus cálculos entre los que podemos mencionar:

- Modelar la zona de cobertura
- Tomar en cuenta la existencia de obstáculos (árboles, edificios, montañas)

En los sistemas de comunicación la transmisión de señales frecuentemente se lleva a cabo sobre terrenos irregulares, por lo tanto, es necesario tomar en cuenta el perfil del terreno de un área para calcular las pérdidas por trayectoria, así como los obstáculos, maleza, árboles,

edificios, etc. Existen varios modelos de propagación que tratan de predecir las pérdidas por trayectoria: [31]

- Longley-Rice (ITS, Irregular Terrain Model).
- Durkin (Edwards, Durkin, Dadson).
- Okumura.
- Hata.
- PCS extensión to Hata Model.
- Walfish & Bertoni.
- Wideband PCS Microcell Model.
- Walfish-Ikegami.
- Knife-Edge diffraction Model.
- Radar Cross Section Model.
- Three-Ray Multipath Dispersive Fading Channel Model (incluye una señal refractada de la atmósfera).

Sólo se describiran algunos de estos modelos, basándonos en el hecho de darle mayor importancia a los modelos de propagación en interiores que serán descritos en el siguiente capítulo, algunos de los modelos empíricos y estadísticos de mayor uso son los siguientes.

Modelos Empíricos de Pérdidas por Trayectoria:

- Lee model.
- Ibrahim Parsons.

Modelos Estadísticos:

- Loo model.
- Corazza model.
- Lutz model.

3.2.1 Modelo de propagación para el espacio libre o Modelo de Friss.

Este modelo no es tan útil para aplicaciones en las que existen obstáculos, se requiere de una clara línea de vista entre el transmisor y el receptor para poder modelar con ayuda de este modelo, así como las características del espacio libre. Las pérdidas de enlaces satelitales y los enlaces de microondas se pueden describir utilizando este modelo, el modelo de propagación para el espacio libre describe y predice la caída de la potencia en relación con la distancia de separación entre el receptor y el transmisor y la frecuencia de operación.

La potencia recibida por una antena receptora la cual esta separada de la antena transmisora una distancia *d*, esta dada por la ecuación 3.1[18].

$$P_r(d)=[\ P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot ?^2] \ / \ [\ (4?\ )^2 \cdot d^2 \cdot L] \qquad \textbf{(3.1)}$$

Donde:

P_t es la potencia transmitida en Watts.

P_r es la potencia recibida en Watts.

G_t es la ganancia de la antena transmisora.

G_r es la ganancia de la antena receptora.

d es la distancia de separación del transmisor y el receptor que está dada en metros.

L es el factor de pérdidas no relacionado con la propagación.

? es la longitud de onda en metros que es dependiente de la Frecuencia.

Las unidades tanto de la potencia transmitida, como las de la potencia recibida deben expresarse en Watts, dB, dBm. Y los valores de las ganancias de recepción y transmisión son cantidades adimensionales.

La ecuación 3.1 nos hace ver que la potencia de la señal recibida es inversamente proporcional a el cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, lo que implica que se atenúa 20dB por década.

El factor de pérdida L es usualmente dependiente de la atenuación de la línea de transmisión, la pérdida por los filtros junto con las pérdidas de las antenas, si se tiene un valor de L=1 se puede hablar de la no existencia de pérdidas en el sistema [18].

Se pueden mencionar otros parámetros como la ganancia de la antena, cuya ecuación está dada por:

$$G = \frac{4p\,A_e}{l^2} \qquad \textbf{(3.2)}$$

La apertura efectiva de la antena A_e está relacionada directamente con el tamaño de la antena y ? que es la longitud de onda, se relaciona con la frecuencia de la portadora como antes se menciono mediante la ecuación:

$$l = \frac{c}{f} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Donde:

f es la frecuencia de la portadora en Hertz

c es la velocidad de la luz dada en metros/segundo

Las pérdidas por trayectoria en un sistema son regularmente expresadas en unidades de decibeles (dB), estas pérdidas pueden no incluir la ganancia de las antenas, lo cual provoca tener una ecuación más sencilla, la ecuación que incluye las ganancias de las antenas con unidad en Watts es la siguiente.

$$P_L = 10 \log(P_t/P_r) = -10 \log(G_t \cdot G_r \cdot ?^2) / (4?)^2 \cdot d^2) \text{dB} \quad \textbf{(3.4)}$$

También puede ser expresada en decibeles del modo siguiente:

$$L_p(\text{dB}) = 20 \log d + 20 \log f - 10 \log G_t - 10 \log G_r - 147.55 \text{ dB} \quad \textbf{(3.5)}$$

Cuando se excluyen las ganancias de las antenas, se toma una ganancia unitaria para el sistema con lo que la ecuación se reduce a algo más simple, y la ecuación es la siguiente.

$$P_L = 10 \log(P_t/P_r) = -10 \log(?^2) / (4?)^2 \cdot d^2) \quad \textbf{(3.6)}$$

La ecuación del modelo de Friis sólo es válida para predecir valores de la potencia recibida (P_r) para valores de distancia que se encuentren en la región de far-field de la antena transmisora.

Esta región de far-field o región de Fraunhofer de una antena transmisora se define como la distancia más allá de la distancia d_f la cual se relaciona con la dimensión mayor de la apertura numérica de la antena transmisora y con la longitud de onda de la señal portadora. La ecuación 3.7 calcula la distancia de Fraunhofer [18].

$$d_f = \frac{2D^2}{l} \quad \textbf{(3.7)}$$

Donde:

d_f es la distancia de Fraunhofer

D es la dimensión real física de la antena.

? es la longitud de onda

La ecuación 3.7 es valida sólo si se cumple la siguiente condición:

$$d_f >> D \text{ y } d_f > >1 \quad \textbf{(3.8)}$$

3.2.2 Modelo de Dos Rayos de Reflexión Terrestre.

Este modelo es muy útil para conocer la reflexión que tienen las señales sobre la tierra, se basa en óptica geométrica, este modelo considera la transmisión de las señales en forma directa junto con la propagación de las ondas al reflejarse sobre la tierra, como se puede ver en la Figura 3.1.

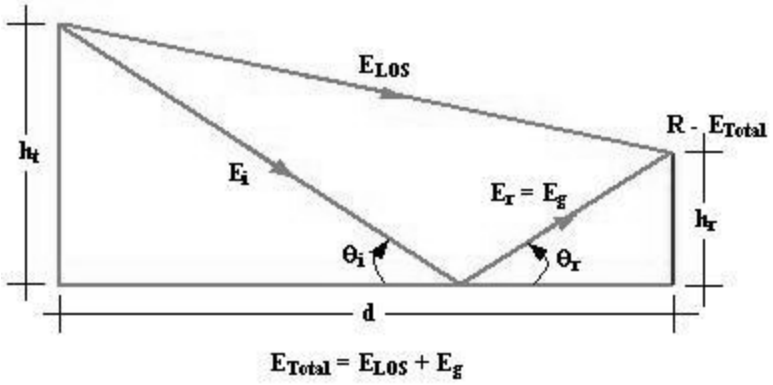

Figura 3.1 Parámetros Básicos para Modelo de dos Rayos [31].

Se puede decir que este modelo toma en cuenta más factores que se acercan a la realidad y que son más adecuados para predecir las pérdidas de la potencia a distancias de varios

kilómetros. Es de aplicación regular para sistemas de telefonía celular que tienen antenas de más de 50m[18].

El terreno de separación entre el transmisor y el receptor puede considerarse plano para los cálculos de este modelo debido a que normalmente se toman en cuenta distancias de varios kilómetros para la separación.

La ecuación que describe la potencia en Watts recibida para este modelo es la siguiente.

$$P_r = (P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot h_r^2 \cdot h_t^2) / d^4 \qquad \textbf{(3.9)}$$

Se asume que la distancia de separación entre el transmisor y el receptor es mucho mayor que la altura de las antenas estos factores nos hacen llegar a la ecuación en decibeles (dB).

$$P_L(dB) = 40\log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log \; + 20 \log h_r + 20 \log \cdot h_t) \qquad \textbf{(3.10)}$$

3.3 Modelos de Propagación de RF para ambientes Urbanos.

Para la propagación en ambientes urbanos se tienen diferentes obstáculos con lo que los parámetros a tomar en cuenta son mucho más que en un modelo para espacios abiertos, los modelos para ambientes urbanos son de gran interés en la época actual, ya que para telefonía móvil, es necesaria una descripción del comportamiento de la propagación en las grandes urbes.

Actualmente la telefonía celular tiene un gran auge con lo que este tipo de modelos marca la diferencia en el diseño de la cobertura en zonas urbanas, el crecimiento de las

comunicaciones inalámbricas y con esto las redes del mismo tipo también marcan otro aspecto importante a tomar en cuenta para tener una buena predicción de la propagación de las señales.

Las investigaciones para hacer este tipo de modelos iniciaron desde hace varios años, las primeras investigaciones se hicieron por Okumura en Japón, el método que utilizó Okumura requirió de un gran esfuerzo para su tiempo, ya que requería de interpretación de gráficas creadas a partir de mediciones hechas en su país[18].

La persona que continuo con las investigaciones de Okumura fue el investigador Masaharu Hata, el logró modelar las gráficas tomadas por Okumara y con esto logro realizar las ecuaciones del modelo que actualmente se conoce con los apellidos de estos dos personajes [18].

Existen diferentes modelos propuestos para ambientes variados y con condiciones específicas como se ha mencionado, a continuación se explicaran brevemente algunos de ellos.

3.3.1 Modelo de Okumura.

Este modelo como se mencionó es uno de los más utilizados para la predicción dentro de ambientes urbanos, es aplicable para frecuencias que van de los 150Mhz a los 1920Mhz, por lo que se encuentra dentro de las bandas VHF y UHF, pero también se está utilizando en frecuencias superiores a los 3000Mhz y para distancias que van de 1Km hasta los 100

Km. Los rangos para la altura de las antenas para telefonía celular van de los 30m a los 100m [1].

$$L_{50}(dB) = L_F + A_{mu} - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad \textbf{(3.11)}$$

Donde:

$L_{50}(dB)$ es la atenuación mediana por trayectoria en decibeles.

L_F es la atenuación por el espacio libre.

$A_{mu}(f,d)$ es la atenuación Relativa Promedio(curvas).

$G(h_{tx})$ Ganancia de la altura de la antena de Tx.

$G(h_{rx})$ Ganancia de la altura de la antena Rx.

G_{AREA} es la ganancia debida al tipo ambiente.

Okumura encontró que $G(h_{te})$ tiene una variación de pérdidas de 20dB/década y que $G(h_{re})$ tiene una variación de 10dB/década para alturas menores de 3m[18].

$$G(h_{te}) = 20 \, Log(h_{te}/200) \quad para \;\; 30\,m < h_{te} < 1000\,m \quad \textbf{(3.12)}$$

$$G(h_{re}) = 10 \, Log(h_{re}/3) \quad para \;\; h_{re} < 3\,m \quad \textbf{(3.13)}$$

$$G(h_{re}) = 20 \, Log(h_{re}/3) \quad para \;\; 3\,m < h_{re} < 10\,m \quad \textbf{(3.14)}$$

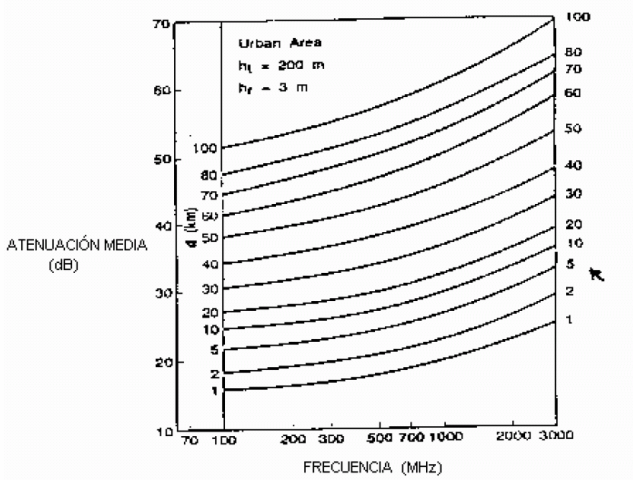

Figura 3.2 Curvas de las mediciones realizadas por Okumura [18].

La figura 3.1 muestra las gráficas de las mediciones a partir de la cuales se logró concretar el modelo de Okumura, el cual no es un modelo analítico, este es un modelo bastante simple y además de esto adecuado para calcular las pérdidas para sistemas celulares y sistemas de radio terrestre en ambientes poblados.

3.3.2 Modelo Okumura-Hata

Este es un tipo de modelo empírico, que se basa en los datos de las pérdidas de propagación provistos por Okumura y es válido para el rango de frecuencias VHF y UHF pero dentro de los límites de los 150Mhz hasta los 1500Mhz.

Las pérdidas en un área urbana fueron presentadas en una fórmula general para un ambiente urbano, sin embargo existen caracterizaciones de esta ecuación para distintos ambientes.

$$L_{50}(\text{urbano})(\text{dB}) = 69.55+26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log \text{the}) \log d \quad \textbf{(3.15)}$$

Para la ecuación 3.15 se deben de tomar en cuenta ciertas restricciones como:

- $150\text{Mhz} < f_c < 1500\text{Mhz}$
- $30\text{m} < h_{te} < 200\text{m}$
- $1\text{m} < h_{re} < 10\text{m}$

con respecto a las variables de la ecuación 3.15 se puede notar que son las mismas que para el modelo Okumura.

f_c es la frecuencia portadora en Mhz.

h_{te} es la altura de la antena transmisora en metros para un rango que va de 30m a 200m.

h_{re} es la altura de la antena receptora en metros para un rango que va de 1m a 10m.

$a(h_{re})$ es el factor de corrección por la altura efectiva del móvil que es función del tipo de área de servicio.

d es la distancia entre el transmisor y el receptor en Kilómetros.

La única nueva variable incluida en este modelo es la del factor de corrección por altura efectiva del móvil $a(h_{re})$, este factor es dependiente de la zona de cobertura.

Se pueden definir diferentes valores de $a(h_{re})$ para diferentes ambientes de propagación. El valor de $a(h_{re})$ para ciudades pequeñas y medianas es:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log f_c - 0.7)\, a(h_{re}) - (1.56 \log f_c - 0.8)\ \text{dB} \qquad \textbf{(3.16)}$$

Para un ambiente suburbano la ecuación para calcular $a(h_{re})$ es:

$$L(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbano}) - 2[\log (f_c/28)]^2 - 5.4 \qquad \textbf{(3.17)}$$

para áreas rurales se utiliza la siguiente ecuación para encontrar el valor de $a(h_{re})$

$$L(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbano}) - 4.78(\log f_c)^2 + 18.33 \log f_c - 40.94 \qquad \textbf{(3.18)}$$

para ciudades grandes se utilizan diferentes ecuaciones dependiendo del valor de la frecuencia.

$$a(h_{re}) = 8.29(\log 1.54\, h_{re})^2 - 1.1\ \text{dB para } f_c < 300\ \text{Mhz} \qquad \textbf{(3.19)}$$

$$a(h_{re}) = 3.2(\log 11.7\, h_{re})^2 - 4.97 \text{ dB para } f_c > 300 \text{ Mhz} \quad \textbf{(3.20)}$$

El único de los inconvenientes con este modelo es que no se adapta a sistemas de comunicación de telefonía celular que tengan un radio de 1Km por celula.

3.3.3 Modelo Walfish Bertoni

Este modelo utiliza modelos de difracción para con éstos lograr obtener la potencia media que llega al móvil cuando se encuentra al nivel del suelo, este modelo considera el efecto de los techos y la altura de las construcciones [18].

Para este modelo las pérdidas por trayectoria se modelan como el producto de tres factores, las pérdidas por trayectoria se representan como S, y la ecuación 3.21 representa el producto de estos tres factores.

$$S = P_0 \cdot Q_2 \cdot P_l \quad \textbf{(3.21)}$$

Donde:

P_o es la pérdida del espacio libre entre antenas isotropicas

$$P_0 = \left[\frac{l}{4 \cdot \Pi \cdot R} \right] \quad \textbf{(3.22)}$$

P_l representa las pérdidas por difracción que existen en la señal, estas pérdidas son tomadas desde el techo hasta el nivel del pavimento.

Q^2 es la atenuación existente a nivel de los techos, a causa del número variable de construcciones que puede provocar un efecto de *shadowing* para el receptor.

La ecuación 3.23 describe el modelo de Walfish y Bertoni.

$$S(dB) = L_0 + L_{rts} + L_{ms} \quad \textbf{(3.23)}$$

3.3.4 Modelo Walfisch-Ikegami

Este es un sistema híbrido para sistemas celulares de PCS de corto alcance, este modelo puede ser utilizado en las bandas UHF y SHF. Se usan comúnmente para la predicción en micro células para telefonía celular[1].

Este modelo también permite incorporar la estimación de pérdidas por trayectoria, al ser un modelo complicado y es de los más usados en la actualidad para diseños en ambientes densamente urbanos, los parámetros a incluir para los cálculos son númerosos, a continuación se detallarán éstos junto con las restricciones que se tienen para este modelo.

Este modelo es útil para ambientes urbanos densos y se basa en varios parámetros urbanos como, la densidad de los edificios, la altura promedio de los edificios, la altura de las antenas menor a la de los edificios(h_{roof}), la anchura de las calles(w), la separación entre los edificios(b), la dirección de las calles con respecto a la trayectoria directa de la antena transmisora y el móvil. La Figura 3.3 muestra las diferentes componentes que la señal toma al ser propagada en un ambiente urbano denso.[1].

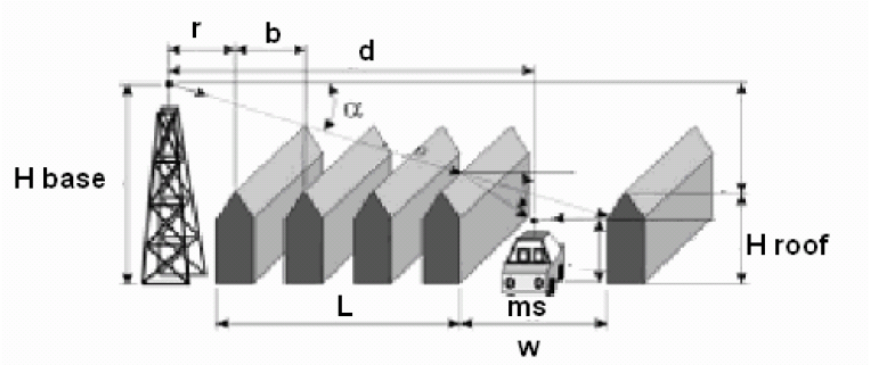

Figura 3.3 Multi-trayectoria de una señal propagada [18].

Generalmente, la altura de la antena del transmisor es menor que la altura promedio de los edificios, por lo tanto, las señales se propagan por las calles y las calles se comportan como una guía de onda**.**

En el caso en el que existe línea de vista entre el transmisor y el receptor se puede utilizar la ecuación 3.24 o la 3.25, la cual es simple y sencilla, con esta ecuación se pueden calcular las pérdidas por propagación. Esta ecuación es diferente a la que se usa para el modelo de Friss.

Para propagación cuando existe línea de vista:

$$L_p(dB) = 42.6 + 26 \log(d) + 20 \log(f) \qquad \textbf{(3.24)}$$

En el modelo Walfish-Ikegami cuando no existe línea de vista(NLOS) las pérdidas por trayectoria se calculan con**:**

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad \text{para} \quad L_{rts} + L_{ms} > 0 \qquad \textbf{(3.25)}$$

Donde:

L_O son las pérdidas por el espacio libre

L_{msd} son las pérdidas por difracción de múltiples esquinas de los techos de los edificios

L_{rts} roof top to street, son las pérdidas debidas a una única difracción final cuando la onda se propaga hacia la calle.

El valor de L_b puede llegar a ser el mínimo de L_O cuando $L_{rts} + L_{msd} <=0$, aunque en otros casos puede llegar a ser negativo.

La determinación de L_{rts} se basa principalmente en el modelo de Ikegami, junto con el ancho de las calles y la orientación de las mismas con respecto a las antenas transmisoras.

En un ambiente Urbano Denso como se representa de forma sencilla en la Figura 3.4, el modelo Walfish-Ikegami se aplica con las siguientes características:

- Multi-trayectoria
- Las antenas transmisoras están por debajo de la altura de los edificios.

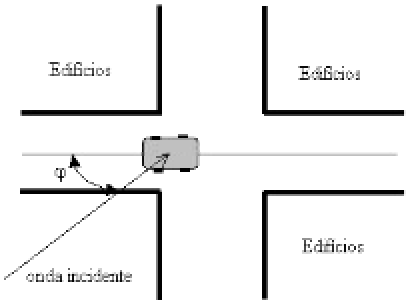

Figura 3.4 Representacion de un ambiente Urbano [32].

3.4 Conclusiones

Debido a los diversos aspectos que fueron tratados en este capítulo enfocados a propagación en exteriores, se puede comenzar a tener una mayor idea del modo en que se plantean las ecuaciones que representan los modelos de propagación y dar un preámbulo hacia los modelos de propagación para interiores que es nuestro siguiente capítulo. En este capítulo se observaron los parámetros que toman en cuenta los modelos descritos junto con los ambientes en los que se realizaron los cálculos. En el siguiente capítulo se explicarán diversos modelos de propagación para interiores y junto con esto se tratarán las características para un ambiente interior.