

MODELOS DE PROPAGACIÓN A GRAN ESCALA:

- Un canal inalámbrico impone limitantes en el desempeño de los sistemas que emplean este medio de transmisión.
- Existen diferentes niveles de obstrucción.
- medios cableados son estacionarios y predecibles, mientras el medio inalámbrico es altamente aleatorio y difícil de analizar.
- modelar el canal de propagación ha sido una tarea difícil, desde hace muchos años.
 - la mayoría de los resultados son de tipo estadístico, basándose en mediciones obtenidos para sistemas específicos o bandas de frecuencias representativas del sistema que desea modelar.
- Los mecanismos detrás de la propagación de ondas electromagnéticas son diversos y pueden ser generalmente atribuidos a tres fenómenos:



- REFLEXIÓN.
- DISPERSIÓN.
- DIFRACCIÓN.

- Los celulares operan en zonas más entre transmisor y receptor y donde se causan altas pérdidas por difracción debido a la presencia de edificios de gran altura.
- Debido a las múltiples reflexiones ocurridas en varios objetos las ondas electromagnéticas recorren diferentes trayectos de largo variable
 - la interacción entre estas ondas causa desvanecimientos por múltiples trayectorias en una ubicación específica.
 - la fuerza (potencia) con que llegan estas ondas decrece a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta.

EIRP: (effective isotropic radiated power).

- Un radiador isotrópico es una antena ideal que irradia la potencia inyectada a sus terminales de manera uniforme en todas direcciones, con ganancia unitaria.
- Generalmente es empleada como una antena de referencia, es decir, la ganancia de la antena se documenta respecto a la ganancia de una antena isotrópica, en dB.
- Representa la máxima potencia efectiva irradiada en la dirección de la máxima ganancia de la antena, computada respecto de una antena isotrópica.

$$EIRP = P_t \cdot G_t$$

PATH LOSS:

- Representan las pérdidas por camino recorrido calculables según el modelo de espacio libre corresponden a

$$P_L [dB] = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left(\frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right)$$

- si se emplean antenas isotrópicas (ganancias en 0 dB), resulta:

$$P_L [dB] = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right)$$

- Validez del modelo.

- Modelo de FRIS solo es válido para regiones del espacio que se encuentran en el campo lejano o región de Fraunhofer, esta se define por la banda de operación del sistema y por las dimensiones de la antena empleada en la transmisión de la señal.

- La región de Fraunhofer corresponde a una distancia desde el TX superior a d_f , donde d_f está dado por:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$$

$d_f \gg \lambda$, $D \leftarrow$ mayor dimensión física de la antena.

- Estos modelos se han centrado tradicionalmente en:

- 1.- La predicción de la potencia promedio de la señal recibida en Rx, dada una separación al Tx.
Estos se conocen como modelos de gran escala y permiten predecir la cobertura de un sistema inalámbrico.
- 2.- Analizar la variación de la señal en el receptor y/o en puntos cercanos a la ubicación del mismo.
Estos se conocen como modelos de pequeña escala y estudian las fluctuaciones que existen a pequeñas distancias o diferentes instantes de tiempo.

MODELOS DE GRAN ESCALA:

- predicen la potencia promedio recibida en un sistema de comunicaciones inalámbricas.

1. modelos de propagación en espacio libre: (FRIS)

- modelado para situaciones donde el Tx y Rx tienen una vista clara del otro. Sin obstrucciones de la LOS. Ej: sistemas satelitales.
- Los enlaces inalámbricos típicos no satisfacen esto, pero el modelo provee una cota para el diseño de los mismos, y en espacios abiertos entrega unos pocos dB de diferencia respecto a resultados empíricos.

$$Pr(d) = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L}$$

* La ecuación de FRIS muestra que la potencia recibida disminuye con el cuadrado de la distancia entre el Tx - Rx; o sea P_r decae con una razón de 20dB/decada.

• $Pr(d)$ = potencia recibida a distancia d entre el Tx y Rx

• P_t = potencia transmitida en los terminales de la antena.

• G_t, G_r = ganancia de las antenas transmisoras y receptoras.

• λ = longitud de onda

• d = distancia entre antenas

• L = factor de pérdidas (atenuación de cables, filtros, etc)

2. Modelo de dos rayos:

- se modela que al Rx llega el haz directo LOS, e existe un rebote (reflexión) en la tierra.
- Este modelo asume que la tierra es plana, lo cual resulta razonable para separaciones típicas Tx-Rx de sistemas celulares, los cuales fluctúan en el orden de las decenas de km.
- se puede demostrar que para las suposiciones efectuadas,

$$P_r(d) = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{h_t \cdot h_r}{d^2} \right)^2 \quad (1)$$

- Si para (1) $d \gg \sqrt{h_t \cdot h_r}$ entonces decae asintóticamente con d^4 .
- Se realizó una deducción del modelo de dos rayos, a partir de ecuaciones de propagación de OET.
 - Este modelo asumía la existencia de un haz directo y de un rebote en la tierra.
 - La deducción realizada asumió antenas apuntadas para maximizar la ganancia.
 - El resultado final arroja que existe una zona donde la potencia recibida depende del universo de la distancia al cuadrado entre el transmisor y el receptor, y otra dependiente de la cuarta potencia.
- Se resume el modelo de 2 rayos considerando el lóbulo de radiación de las antenas.

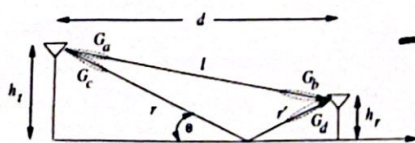


Figure 2.4: Two-Ray Model.

Esquema de la situación analizada

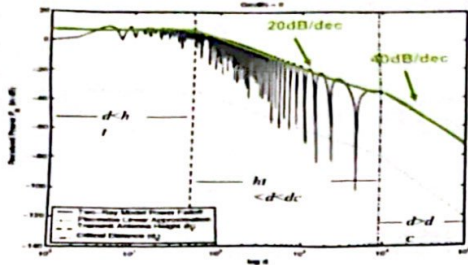
- Definamos las ganancias en función del patrón de radiación como:

$$\sqrt{G_T} = \sqrt{G_a G_b}, \quad \sqrt{G_R} = \sqrt{G_c G_d}$$

- y la potencia recibida está dada por:

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + 10\log_{10}(G_t) + 20\log_{10}(h_t h_r) - 40\log_{10}(d)$$

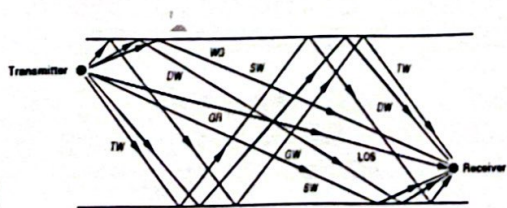
- La distancia crítica donde se genera el cambio de pendiente está dada por:



$$d_c = \frac{4 \cdot h_t \cdot h_r}{\lambda}$$

3. Modelo de 10 rayos:

- Se desea modelar un enlace inalámbrico instalado en una calle donde existen edificios de gran altura.
 - El frente de ondas verá muros inyectos.
 - Existirían múltiples reflexiones, en rigor, infinitas, pero solo un grupo de ellas serán significativas.
- Esto da origen a un modelo del tipo "guía de ondas" o un "canal" atravesado por el frente de ondas para alcanzar la posición del receptor.
- Este fenómeno también es conocido como "encapronamiento".
- Se ha demostrado empíricamente que considerar las reflexiones simples, dobles y triples, da origen a un modelo de 10 rayos que representa con bastante precisión la situación observada en los experimentos.



- Se consideran las siguientes reflexiones:

- Haz directo (LOS)
- Reflexión en tierra (GR)
- Una muralla (SW)
- Doble muralla (DW)
- Triple muralla (TW)
- Muralla - tierra (WG)
- Tierra - muralla (GW)

- y P_r está dada por:

$$(2) \quad P_r = P_t \left[\frac{\lambda}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{G_r}{L} + \sum_{i=1}^9 \frac{R_i |a_{xi}|^2 e^{j\phi_i}}{X_i} \right|^2$$

En donde, en (2): - $\frac{\sqrt{G_i}}{L}$ = distancia y ganancia LOS.

- x_i = distancia recorrida por el i-ésimo rayo.

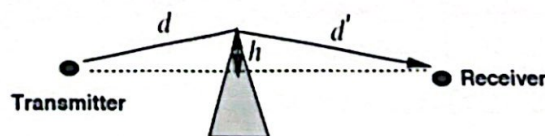
- R_i = Coef de reflexión del i-ésimo rayo.

- $\sqrt{G_{xi}}$ = multiplicación de la ganancia de las antenas Tx y Rx en la dirección del i-ésimo rayo.

$$- \Delta\phi_i = \frac{2\pi(x_i - L)}{\lambda}$$

4. modelo de Fresnel (filo de cuchillo)

- Es un modelo de propagación, el cual modela la difracción en obstrucciones (curvaturas del frente de ondas).



- Existe un rayo directo, obstruido que pasa el obstáculo recorriendo una distancia $(d + d')$
- Este modelo asume objetos infinitesimalmente delgados y bloqueo total en dirección perpendicular a la propagación del frente de ondas.
- No considera las propiedades eléctricas de la obstrucción ni difracción en superficies rugosas.
- Empleando este parámetro se puede demostrar que las pérdidas por camino recorrido empleando un modelo filo de cuchillo, referenciadas respecto al "path loss" del haz directo están dadas por:

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2(d + d')}{\lambda \cdot d \cdot d'}}$$

5. modelo de Path Loss Simplificado,

- Los modelos antes vistos requieren de procesos de medición o simulación complejos desde el punto de vista de un operador de servicios.
- Así se propuso el modelo de "Path Loss simplificado", el cual depende de un solo parámetro empírico: el exponente de pérdidas general.

$$P_r = P_t \cdot K \left(\frac{d_0}{d} \right)^\gamma$$

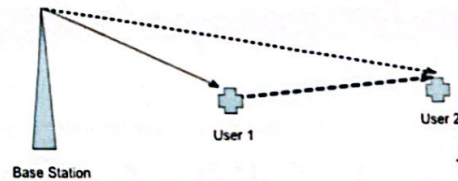
(ganancia efectiva del sistema)

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + K(\text{dB}) - \gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

- Resultados empíricos para el exponente de pérdida han sido publicados por diversos autores.

Environment	γ range
Urban macrocells	3.7-6.5
Urban microcells	2.7-3.5
Office Building (same floor)	1.6-3.5
Office Building (multiple floors)	2-6
Store	1.8-2.2
Factory	1.6-3.3
Home	3

Table 2.1: Typical Path Loss Exponents



MODELOS EMPÍRICOS:

- La dificultad de modelar los fenómenos de reflexión, dispersión y difracción hace que nazcan estos modelos, válidos para el rango de frecuencias para los cuales fueron diseñados.
- Así se da origen a modelos empíricos, para enlaces interiores y exteriores.

- Estos modelos han sido de gran utilidad para predecir la cobertura de sistemas celulares.

1. modelo de Okumura:

- Okumura realizó una extensa campaña de medición estimando la atenuación del enlace estación base a usuario móvil en Tokio, generando un conjunto de curvas que muestran la mediana de la atenuación relativa a las pérdidas de espacio libre.
- Este se aplica sobre distancias de 1-100km y frecuencias en el rango 150-1500MHz y las alturas de las estaciones base en un rango de 30-100m.
- La mediana de la atenuación experimental está dada por:

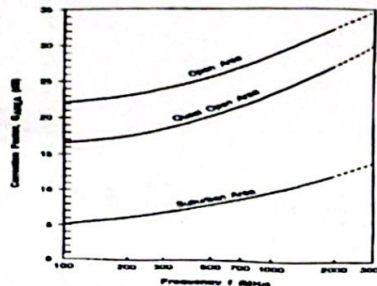
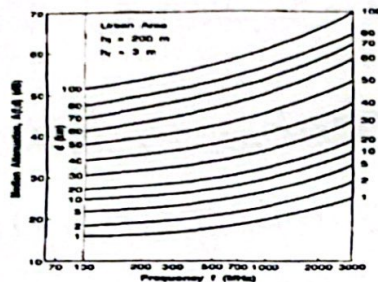
$$L_{50}(\text{dB}) = L_f + A_{\text{mu}}(f, d) - G(h_t) - G(h_r) - G_{\text{AREA}}$$

- d = distancia entre el transmisor y el receptor.
- L_{50} = mediana (percentil 50) de las pérdidas de propagación.
- L_f = pérdida de espacio libre.
- A_{mu} = atenuación mediana por sobre la de espacio libre considerando todos los ambientes.
- $G(h_t)$ = es un factor dependiente de la altura de A_T .
- $G(h_r)$ = || || || || || A_R .
- G_{AREA} = ganancia debido al tipo de ambiente.

- Los valores de A_{mu} y $G(AREA)$ se obtienen de las curvas de resultados empíricos de Okumura.
- Los valores de $G(h_t)$ y $G(h_r)$ se calculan a partir de:

$$G(h_t) = 20 \log_{10} (h_t / 200), \quad 30m < h_t < 1000m$$

$$G(h_r) = \begin{cases} 10 \log_{10} (h_r / 3), & h_r \leq 3m \\ 20 \log_{10} (h_r / 3), & 3m < h_r < 10m \end{cases}$$



2. Modelo de Hata:

- El modelo de Hata es una formulación matemática de los resultados empíricos (curvas) entregadas por Okumura. Es válido sobre el rango de frecuencias de 150 - 1500 MHz.
- Este simplifica el cálculo de path loss debido a que no se requiere interpolar ni buscar detalladamente en las curvas el punto deseado.
- Define tres zonas: urbanas, suburbanas y rurales.



- Para el caso de regiones urbanas, la mediana esta dada por:

$$L_{50}(\text{urban})(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \cdot \log d.$$

en donde ($h_{re} = h_{rv}$ y $h_{te} = h_t$).

En ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_{re}) = (1.11 \log f_c - 0.7) h_{re} - (1.56 \log f_c - 0.8) \text{dB}$$

En grandes ciudades:

$$a(h_{re}) = 8.29 (\log 1.54 h_{re})^2 - 1.1 \text{dB}, \quad f_c \leq 300 \text{MHz}.$$

$$a(h_{re}) = 3.2 (\log 11.75 h_{re})^2 - 4.97 \text{dB}, \quad f_c \geq 300 \text{MHz}.$$

• Zonas urbanas:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urban}) - 2[\log(f_c/28)]^2 - 5.4$$

• Zonas rurales:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urban}) - 4.78 (\log f_c)^2 - 18.33 \log f_c - 40.98$$

3. COST 231:

- Este modelo se creo con el fin de extender el modelo Hata hasta 2GHz.
- El modelo queda definido por:

$$L_{50}(\text{urban}) = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \log d + C_M$$

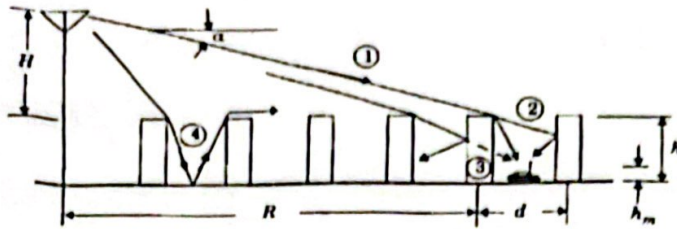
donde

$$C_M = \begin{array}{ll} 0\text{dB} & \text{ciudades pequeñas y suburbanas.} \\ 3\text{dB} & \text{centros metropolitanos.} \end{array}$$

este modelo es valido para los sgtes parametros:

$$\begin{array}{l} f = 1500\text{MHz a } 2000\text{MHz} \\ h_{te} = 30\text{m a } 200\text{m} \\ h_{re} = 1\text{m a } 10\text{m} \\ d = 1\text{Km a } 20\text{Km} \end{array}$$

4. Walfish y Bertoni,



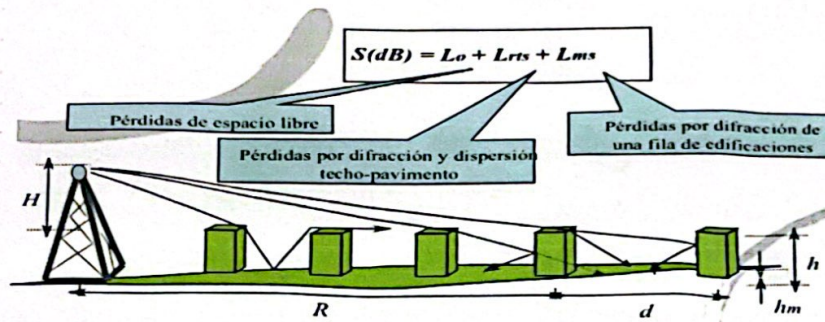
- este modelo considera el impacto de techos y altura de edificios al emplear la difracción como herramienta de predicción de la señal recibida (promedio) al nivel de calle.
- Este modelo define que el path loss es el producto de tres factores.
- Con esto pathloss queda definido según

$$S = P_0 Q^2 P_1$$

- donde P_0 corresponde a las pérdidas de espacio libre de dos antenas isotrópicas separadas por una distancia R .

$$P_0 = \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R} \right)^2$$

- el factor Q^2 da la reducción de la señal a nivel "de los techos", a causa de la fila de construcciones que ensombrecen al receptor.
- el término P_1 representa las pérdidas por difracción en la señal que va desde los techos al nivel de "pavimento".



MODELOS DE PROPAGACIÓN EN INTERIORES:

- Los ambientes de propagación en interiores difieren ampliamente en cuanto a los materiales empleados para la construcción de muros y pisos, el diseño de las habitaciones, los pasillos, o incluso el número de pisos. Todos estos factores tienen un impacto significativo en el path loss en un ambiente de propagación en interiores.

- Así resulta complicado encontrar modelos genéricos que pueden ser aplicados de manera rigurosa para determinar el pathloss de una situación particular.
- Los modelos de propagación en interiores deben reflejar de manera adecuada la atenuación a lo largo de los pisos debido a tabiques o muros, y la atenuación entre pisos.
 - diferentes mediciones considerando un gran número de edificios de características y diferentes, en distintas bandas de frecuencias, muestran que la atenuación por piso es mayor para el primer piso atravesando, siendo menor para los sucesivos.
 - Las pérdidas por muros o tabiques dependen del tipo de material empleado.
 - Si el transmisor está afuera del edificio, existe una pérdida por penetración de muros que disminuye con la frecuencia. Además, evidencia empírica ha mostrado que esta atenuación se reduce 1.4dB por piso por sobre el nivel de suelo. debido a la existencia de un menor número de dispersiones.

Partition Type	Partition Loss in dB
Cloth Partition	1.4
Double Plasterboard Wall	3.4
Foil Insulation	3.9
Concrete wall	13
Aluminum Siding	20.4
All Metal	26

Atenuación típica, 900-1300MHz

$$P_r = P_t + K - 10 \gamma \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] - \sum_{i=1}^{N_f} FAF_i - \sum_{i=1}^{N_p} PAF_i$$

- un modelo simple para propagación en exteriores considera el modelo de pathloss simplificado, agregando dos factores.
- **FAF**: representa la atenuación entre pisos. Se asume que la señal atraviesa N_f pisos, siendo FAF_i la atenuación asociada al i -ésimo piso.
- **PAF**: representa la atenuación por particiones o separaciones en un piso específico. Se asume que la señal atraviesa N_p particiones, siendo PAF_i la atenuación asociada a la i -ésima partición.