

# REDES DE SENSORES INALAMBRICOS

## Capa Física

Dr.-Ing. Benigno Rodríguez

31 de agosto de 2015

# AGENDA

- 1 Introducción
- 2 Propagación
  - 2.1 Mecanismos de propagación
  - 2.2 Causas del desvanecimiento de la señal
- 3 Indicadores de Radio de Cobertura
- 4 Modelos de Canal
- 5 Antena PIFA
- 6 Técnica de Transmisión
- 7 Modulación

# 1 INTRODUCCION

Para poder entender y optimizar las redes de sensores inalámbricos (WSNs) es importante comenzar por comprender la capa física de las mismas. Por esto se estudiarán:

- 1.- Conceptos generales de Capa Física en WSNs (bajo consumo, sensores económicos, etc.).
- 2.- Los **mecanismos de propagación y causas del desvanecimiento de la señal.**
- 3.- **Indicadores de radio de cobertura.**
- 4.- **Modelos de canal** que permiten simular la propagación y optimizar el desempeño de estas redes.
- 5.- Las **antenas** utilizadas.
- 6.- La **técnica de transmisión** utilizada.
- 7.- La **modulación** utilizada.

# 1 INTRODUCCION

En la Fig. 1 se presenta el esquema general de un radioenlace.

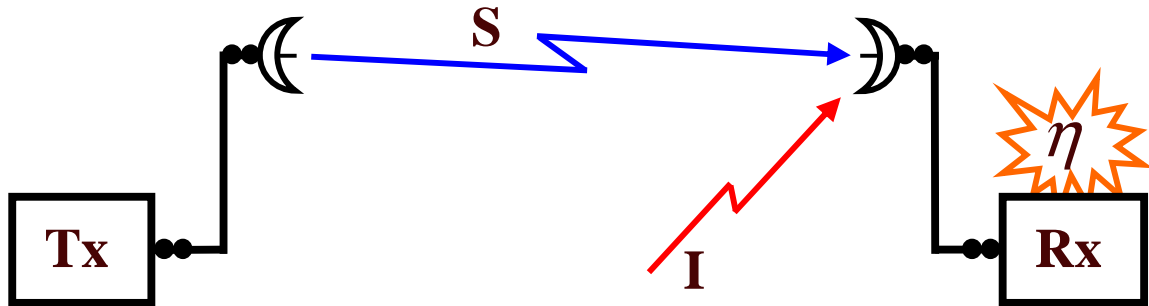


Figura 1: Esquema general de un radioenlace (fuente [1]).

## 2 PROPAGACION

Conocer los mecanismos de propagación y las causas de desvanecimiento de la señal nos permite diseñar redes inalámbricas óptimas.

En el caso de redes ya desplegadas, permite corregir las ineficiencias propias de una instalación deficiente.

## 2.1 MECANISMOS DE PROPAGACION

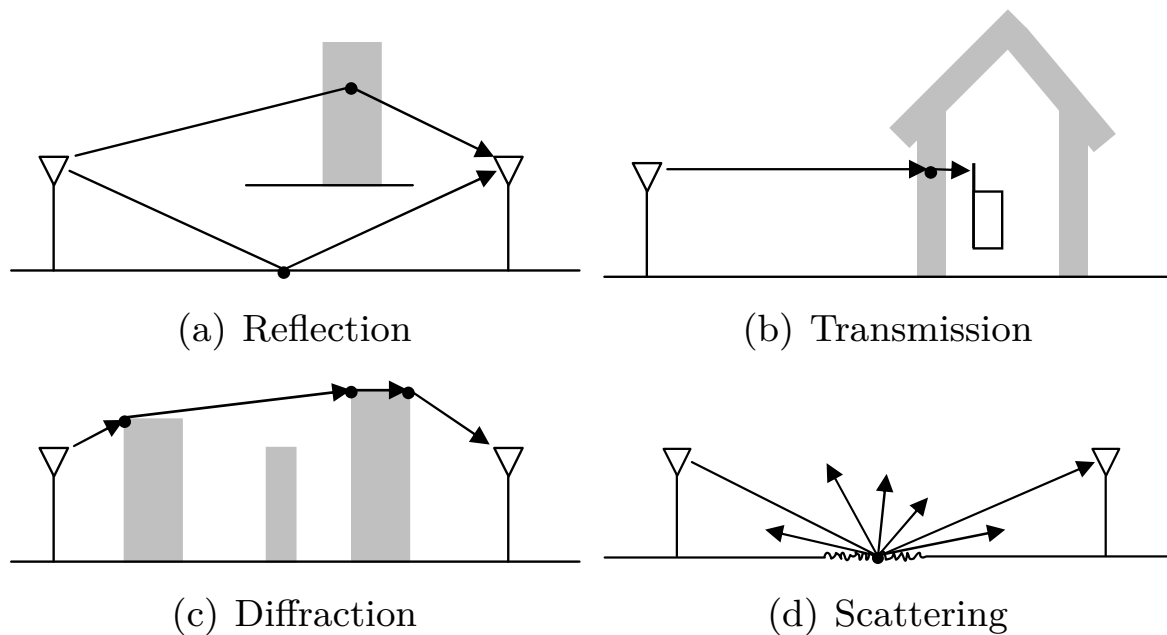


Figura 2: Mecanismos de Propagación (fuente [1]).

## 2.2 CAUSAS DEL DESVANECIMIENTO DE LA SEÑAL

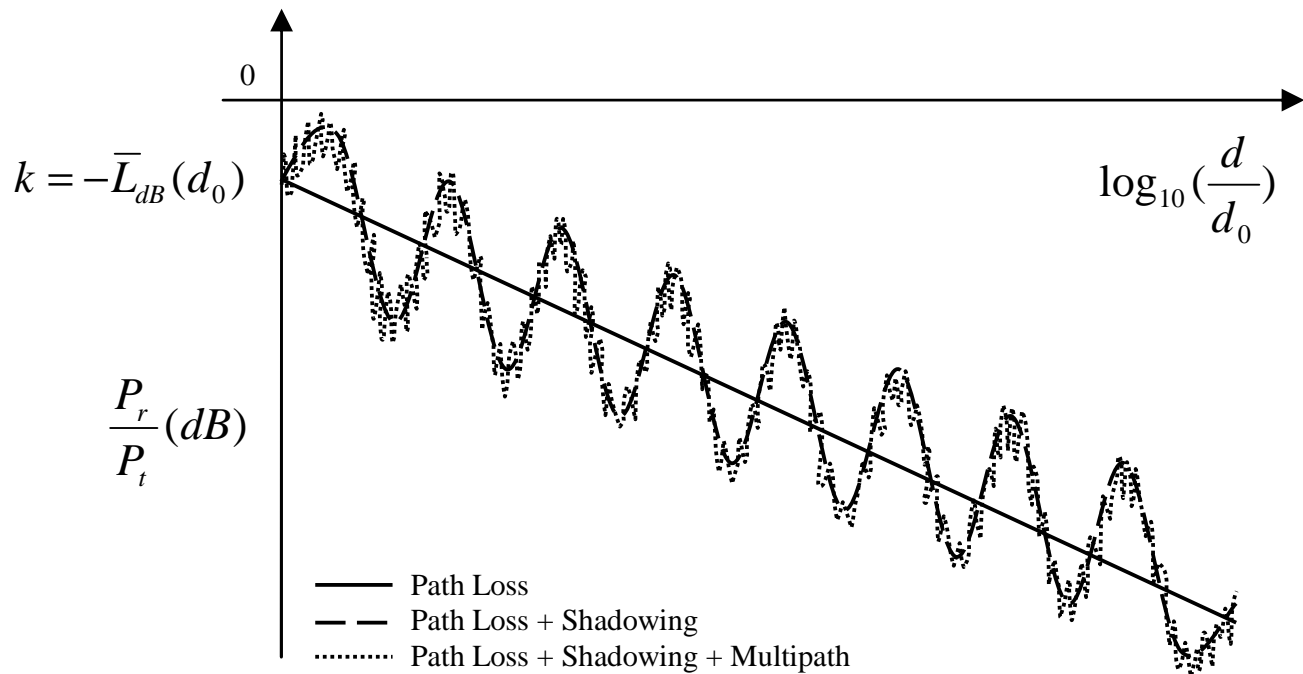


Figura 3:  $\left(\frac{P_r}{P_t}\right)_{dB}$  versus  $d$  for “path loss”, “path loss+shadowing” and “path loss+shadowing+multipath propagation” (fuente [1]).

## 2.1.1 Pérdida de Espacio Libre (Free Space Loss)

Esta pérdida se refiere a la atenuación natural de la señal en un escenario sin obstrucciones. El factor de pérdida de espacio libre (Free Space Loss Factor del inglés) tiene la siguiente forma.

$$\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (1)$$

- Cuando mayor es la frecuencia mayor es la atenuación. La atenuación es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia ( $f * \lambda = c$ ).
- El factor de atenuación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Esto tiene que ver con que la potencia se distribuye en un frente de onda (área) que crece con el cuadrado de la distancia.



## 2.1.1 Pérdida de Espacio Libre (Free Space Loss)

La ecuación de transmisión de **Friis** nos permite calcular la potencia recibida en función de la potencia transmitida y los parámetros del sistema -para un enlace sin obstrucciones-.

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt} \cdot e_{cdr} \cdot (1 - |\Gamma_t|^2) \cdot (1 - |\Gamma_r|^2) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \cdot D_t(\theta_t, \phi_t) \cdot D_r(\theta_r, \phi_r) \cdot |\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2 \quad (2)$$

## 2.1.2 Desvanecimiento Lento (Slow Fading - Shadowing)

Desvanecimiento por obstrucciones (shadowing en inglés).

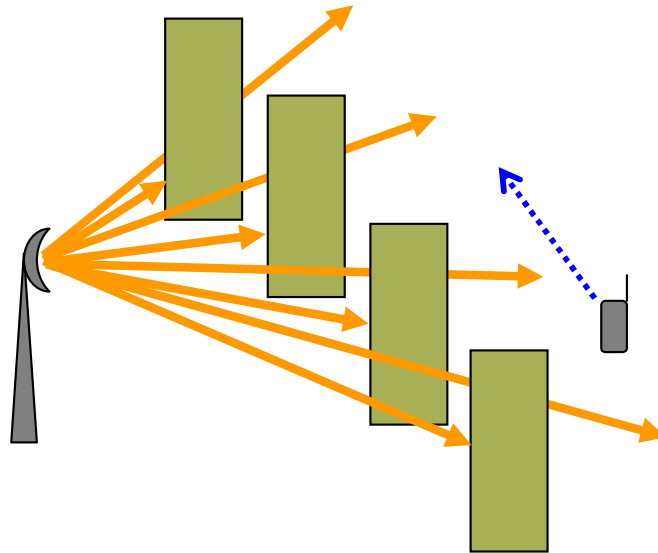


Figura 4: Atenuación por obstrucciones (Slow Fading).

Una herramienta para calcular la atenuación por obstrucciones es considerar las zonas de **Fresnel** obstruidas.

Modelo teórico que integra la *pérdida de espacio libre* y el *desvanecimiento lento* (*path loss*) [2].

$$L_{dB}(d) = \overline{L}_{dB}(d) + X_\sigma = \overline{L}_{dB}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (3)$$

$X_\sigma$  es una variable aleatoria de distribución gaussiana y media 0 (en dB) con desviación estándar  $\sigma$  (también en dB). Entonces  $X_\sigma$  introduce una variación gaussiana con respecto a la pérdida de espacio libre (que modela el efecto de las obstrucciones o shadowing).  $L(d)$  en escala lineal es:

$$L(d) = 10^{\frac{\overline{L}_{dB}(d_0)}{10}} \cdot \left( \frac{d}{d_0} \right)^n \cdot 10^{\frac{X_\sigma}{10}} \quad (4)$$

Cuadro 1: Exponentes de pérdida de camino (Path Loss=FSLF+Shadowing).

Environment	Path Loss Exponent (n)
Free Space	2
Urban area cellular radio	2.7 to 3.5
Shadowed urban cellular radio	3 to 5
In building line of sight	1.6 to 1.8
Obstructed in building	4 to 6
Obstructed in factories	2 to 3

## 2.1.3 Desvanecimiento Rápido (Fast Fading - Multipath Fading)

El desvanecimiento rápido hace referencia a grandes variaciones en los niveles de potencia en distancias muy próximas, esto es causado por un efecto multicamino (del inglés multipath fading).

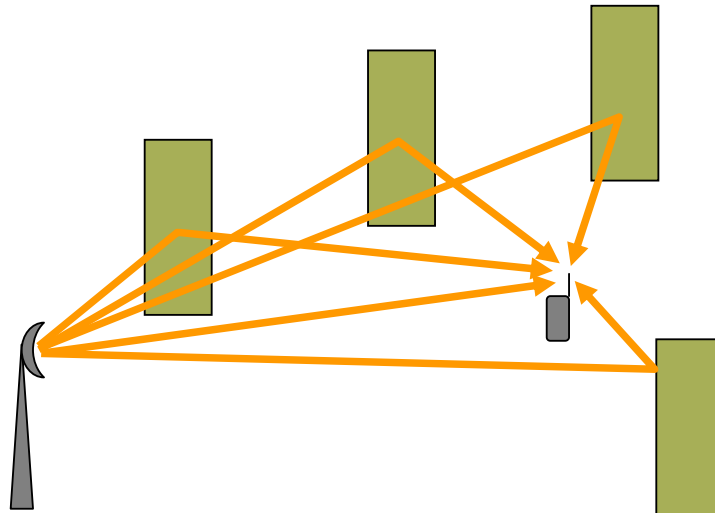


Figura 5: Desvanecimiento por Multicamino (Fast Fading).

## 2.1.3 Desvanecimiento Rápido (Fast Fading - Multipath Fading)

### Canales Invariantes en el Tiempo

$$h(\tau) = \sum_{p=1}^P h_p \cdot \delta(\tau - \tau_p) \quad (5)$$

### Canales Variantes en el Tiempo

$$h(\tau, t) = \sum_{p=1}^P h_p(t) \cdot \delta(\tau - \tau_p) \quad (6)$$

# 3 INDICADORES DE RADIO DE COBERTURA

Estos indicadores nos permitirán ubicar los sensores adecuadamente, sin degradar el desempeño de la WSN [4].

- 1.- **PER** (Packet Error Ratio). Un paquete es considerado erróneo cuando al menos uno de sus bits de datos es erróneo.
- 2.- **PRR** (Packet Reception Ratio) o **PSR** (Packet Success Ratio). **PRR=PSR=1-PER**.
- 3.- **RSSI** (Received Signal Strength Indicator). La mayoría de los transceptores poseen un indicador de RSSI integrado.
- 4.- **SNR** (Signal to Noise Ratio).
- 5.- **CINR** (Carrier to Interference plus Noise Ratio).
- 6.- **LQI** (Link Quality Indicator). Propuesto en el estándar *IEEE 802.15.4* (implementación dependiente del proveedor). Para su medida se usan los primeros 8 símbolos del paquete recibido.  $50 \leq LQI \leq 110$  (cuanto más grande mejor).

## 4 MODELOS DE CANAL

Los modelos de canal nos permitirán modelar el enlace y evaluarlo mediante simulaciones en diferentes situaciones.

Esto permite optimizar el diseño de la WSN. Muchas veces el desempeño de una WSN resulta deteriorado por una incorrecta ubicación de los sensores.

Las simulaciones permitirán comparar también el desempeño de diferentes sensores, así como evaluar la incorporación de nuevos módulos o algoritmos en los sensores.



## 4.1 Modelo AWGN

El ruido blanco gaussiano aditivo es el modelo de canal más sencillo y no por ello menos útil.

En este modelo la señal que decodifica el receptor  $r(t)$  está compuesta por la señal que llega a la antena  $s(t)$  más una señal de ruido  $n(t)$  blanco gaussiano aditivo.

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (7)$$

Con respecto a este ruido  $n(t)$ , también llamado ruido térmico, podemos decir que sus muestras se obtienen de un proceso aleatorio, gaussiano, de media 0. La función densidad de probabilidad (PDF) de  $n(t)$  para un tiempo arbitrario  $t$  es:

$$pdf(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{n}{\sigma}\right)^2} \quad (8)$$

Donde  $\sigma^2$  es la varianza de  $n$ .

## 4.2 Modelo Rayleigh

Para modelar **canales donde no hay línea de vista** (*NLOS*) se usa la distribución *Rayleigh*. La *función densidad de probabilidad* (PDF) de esta distribución es:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} & (0 \leq r \leq \infty) \\ 0 & (r < 0) \end{cases} \quad (9)$$

Donde  $r$  es el módulo del voltaje de la onda recibida.  $\sigma$  el valor *RMS* del voltaje de señal recibida antes de la detección de envolvente.

El módulo de la suma en cuadratura, de dos señales de ruido gaussiano de media 0, tiene una distribución Rayleigh.

## 4.3 Modelo Rician

Para modelar **canales donde hay línea de vista (LOS)** se usa la distribución *Ricean*. La *función densidad de probabilidad* (PDF) de esta distribución es:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{(r^2+A^2)}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{A \cdot r}{\sigma^2}\right) & (A \geq 0, r \geq 0) \\ 0 & (r < 0) \end{cases} \quad (10)$$

Donde:  $A$  es el valor de pico de la amplitud de la “señal dominante” (camino directo/línea de vista).  $I_0(x)$  es la “función de Bessel modificada de primera clase y orden cero”.  $\sigma^2$  es la potencia promedio de todos los caminos sin línea de vista (*NLOS*).

Un parámetro que caracteriza la *distribución de Ricean* es el “factor de *Ricean*” ( $k$ ), el cual se define como:  $k = \frac{A^2}{2\sigma^2}$  o  $k(\text{dB}) = 10\log\left(\frac{A^2}{2\sigma^2}\right)$  en dB. Observar que cuando  $A \rightarrow 0$  entonces  $k \rightarrow 0$  (o a  $-\infty$  en dB) y la *distribución de Ricean* se transforma en la *distribución de Rayleigh*.

## 4.4 Modelo WSSUS

Cuando un canal puede ser categorizado como estacionario en sentido amplio (en el tiempo) y la propagación a través de múltiples caminos no correlacionada (amplitudes y fases no correlacionadas entre los distintos caminos que componen el canal), podemos decir que el canal es Wide Sense Stationary with Uncorrelated Scattering (**WSSUS**). Este modelo estocástico nos permite caracterizar el desempeño de un sistema en distintos escenarios.

## 4.4 Modelo WSSUS

Un canal *WSSUS* con  $P$  caminos de propagación (ecos) se describe en -banda base- con la siguiente *respuesta impulsiva de canal variante en el tiempo*:

$$h(\tau, t) = \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{p=1}^P \delta(\tau - \tau_p) e^{j(2\pi f_{D,p}t + \theta_p)} \quad (11)$$

Donde  $P$  es el número de caminos considerados,  $\tau_p$  es la demora asociada a cada uno de los caminos,  $f_{D,p}$  es el corrimiento Doppler en frecuencia para cada uno de los caminos y  $\theta_p$  es la fase inicial para cada camino [3]. Si bien es cierto que el modelo es válido para  $P \rightarrow \infty$ , en general se usa con  $P = 20$  o  $P = 30$ .  $\tau_p$ ,  $f_{D,p}$  y  $\theta_p$  son variables aleatorias, cada una con su propia PDF.

Su nombre viene de: Planar Inverted F Antenna (PIFA)

Principales características de una antena F invertida plana (PIFA)

- Antena de parches (patch antenna). Esto la convierte en una antena económica y robusta de fácil fabricación y muy buenas características.
- Monopolo de  $\lambda/4$  (optimiza el uso del espacio). Tiene un patrón de radiación omnidireccional.
- Buena relación frente/espalda (Front to Back ratio).
- Su polarización es elíptica, lo que le permite recibir polarizaciones verticales y horizontales simultáneamente. Que sea elíptica y no lineal se debe a que el elemento radiante es un parche plano y no un conductor cilíndrico.

## 5 ANTENA PIFA

- Posee buena ganancia en ambas polarizaciones.
- Es fácil adaptar la impedancia de entrada ( $Z_{in}$ ) sin necesidad de circuitos adicionales (ajustando la ubicación relativa entre la alimentación y el stub).
- Es una antena de banda angosta, cuyo ancho de banda aumenta con el espesor del sustrato (“aislante” en Fig. 6). También se puede aumentar el ancho de banda disminuyendo el valor de la constante dieléctrica del sustrato.
- Comúnmente usada en teléfonos celulares, sensores y demás dispositivos pequeños.
- Información complementaria en: <http://www.qsl.net/va3iul>.

# 5 ANTENA PIFA

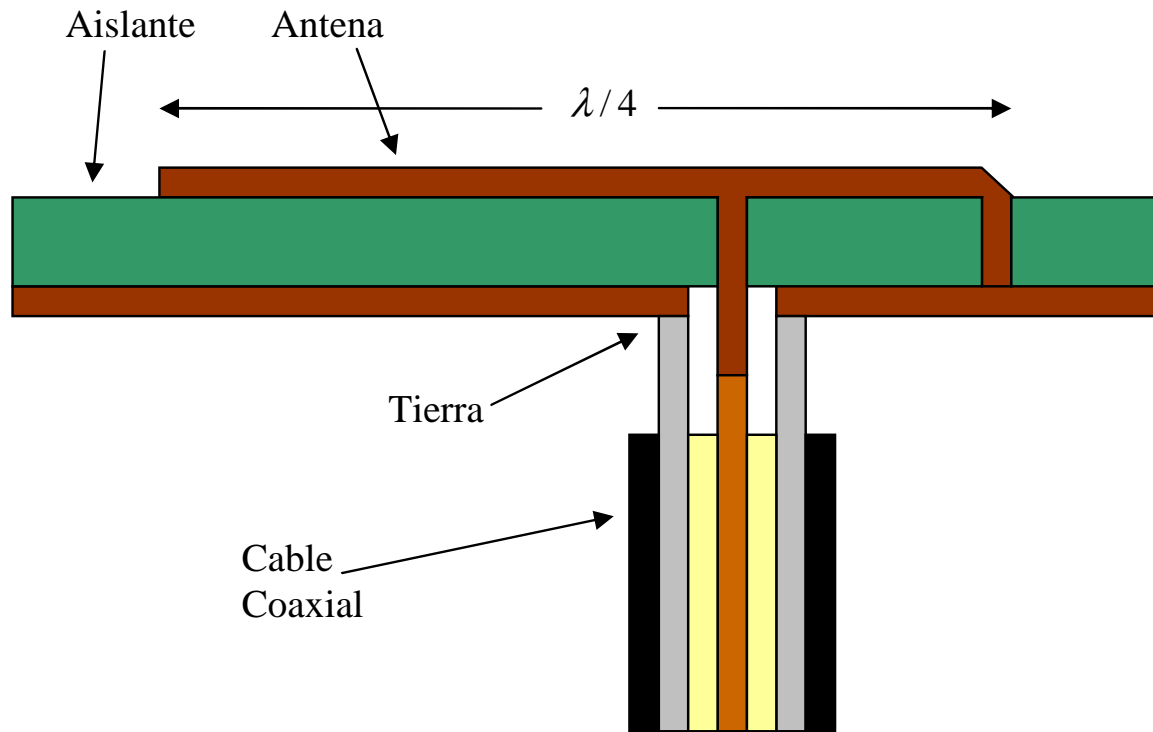


Figura 6: Antena PIFA.



# 5 ANTENA PIFA

## Detalles del diseño<sup>1</sup>

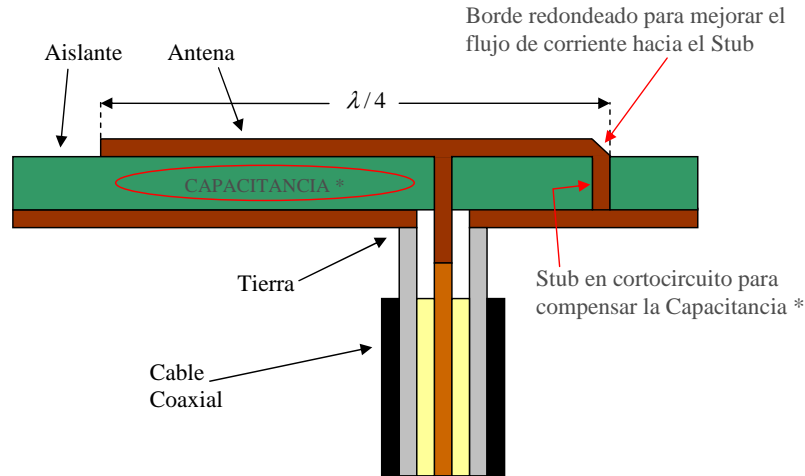


Figura 7: Detalles de diseño de una antena PIFA.

Si no se compensa la Capacitancia  $*$  con el Stub en cortocircuito, esta afectaría la Impedancia de entrada ( $Z_{in}$ ).

<sup>1</sup><http://www.qsl.net/va3iul>

# 5 ANTENA PIFA

## Detalles del diseño en 3D

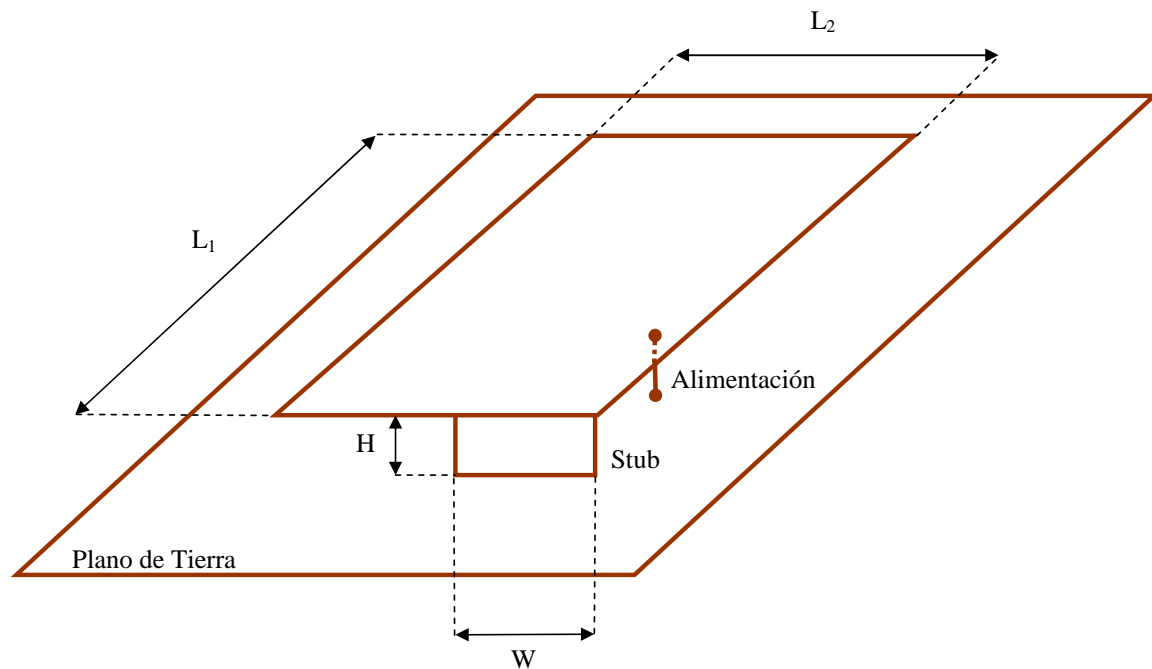


Figura 8: Detalles de diseño de una antena PIFA en 3D.

## Detalles del diseño en 3D

- Cuando más chico es  $W$ , menor es la *frecuencia de resonancia*.
- Cuando más grande es  $H$ , mayor es el *ancho de banda*.
- La ubicación del *punto de alimentación* afecta la *frecuencia de resonancia* y el *ancho de banda*.
- Ajustando la ubicación relativa entre el *punto de alimentación* y el *stub* se puede adaptar la *impedancia de entrada* ( $Z_{in}$ ).

# 6 TECNICA DE TRANSMISION

La técnica de transmisión utilizada es *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Es una técnica de espectro expandido basada en multiplicar la señal por secuencias pseudorandómica de mayor frecuencia, lo que produce una “expansión del espectro”.

El hecho de enviar la señal en una banda más ancha que la correspondiente a la misma, la hace más robusta frente la degradación que produce la aparición de subrangos de frecuencia muy atenuados o interferidos.

# 6 TECNICA DE TRANSMISION

Para recobrar la secuencia de datos (SeOr) en el receptor (SeDeRx), se realiza la operación XOR entre la secuencia recibida (SeCoRx) y la misma secuencia pseudorandómica (Spsr) que se usó en el transmisor.

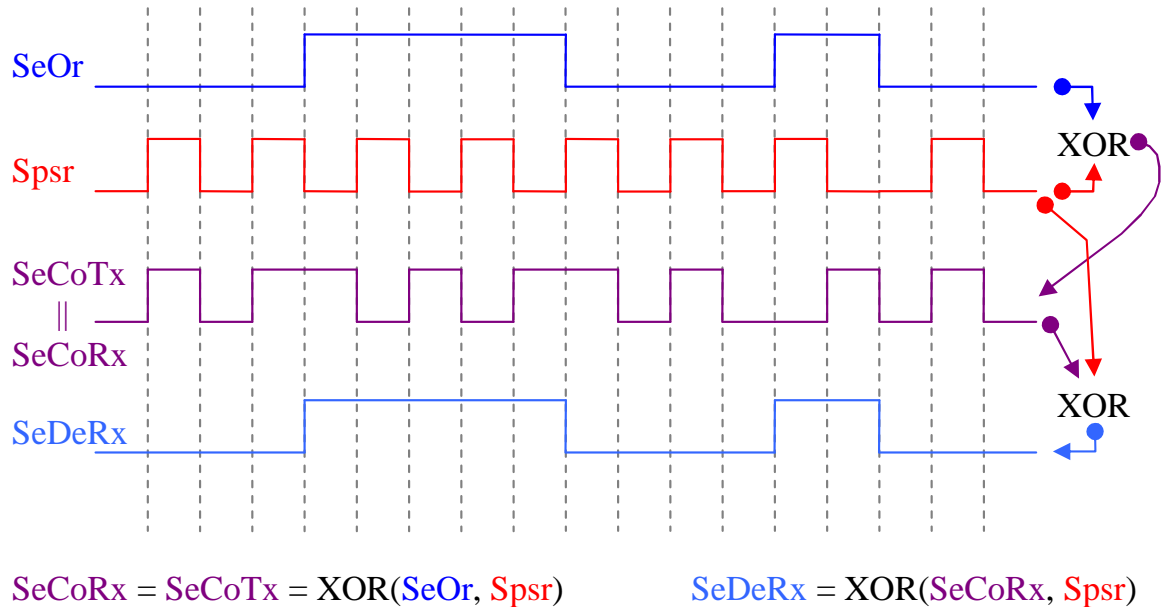


Figura 9: Ejemplo de transmisión basada en DSSS.

# 7 MODULACION

La modulación que se utiliza es una variedad de *Quadrature Phase Shift Keying* (**QPSK**), modulación por corrimientos de fase en cuadratura (cambios de  $90^\circ$  -o múltiplos- en la fase).

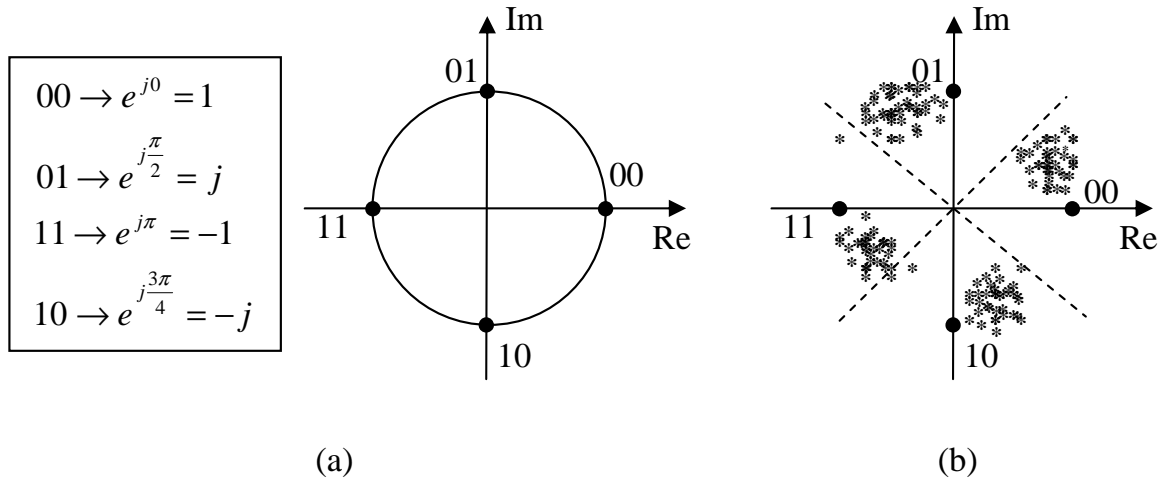


Figura 10: Modulación QPSK (fuente [1]).

# 7 MODULACION

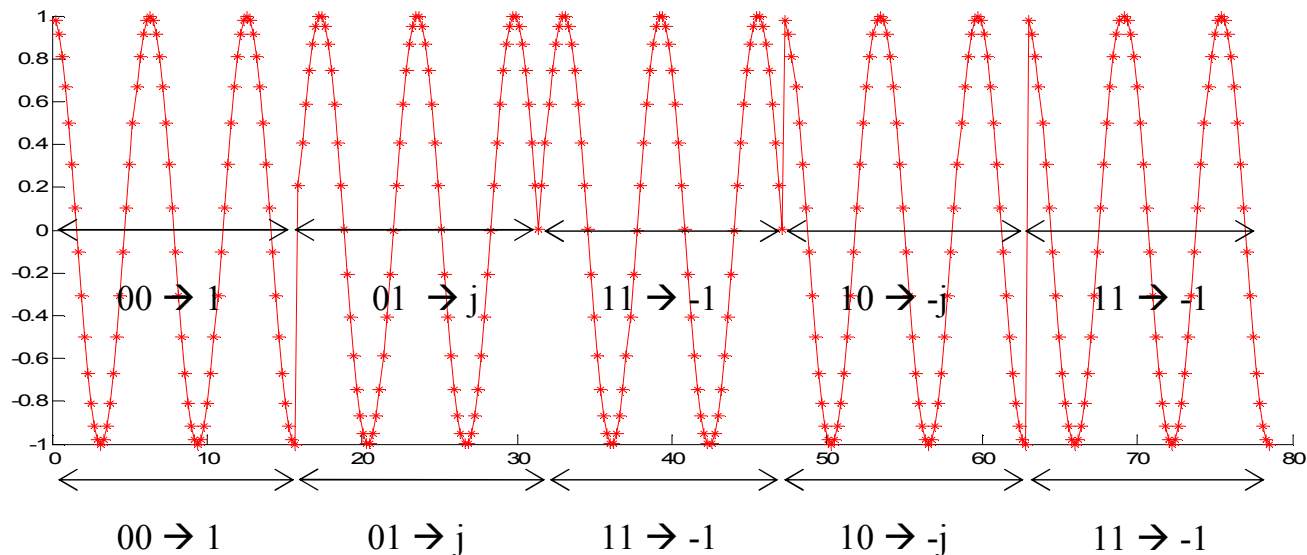


Figura 11: Ejemplo de modulación QPSK.

# 7 MODULACION

En particular el transceptor que se utilizará usa la modulación *Offset Quadrature Phase Shift Keying* (**OQPSK**). Esta modulación reduce los saltos de fase propios de QPSK, disminuyendo así la magnitud de las fluctuaciones de amplitud de la señal, con lo que se mejora el desempeño del sistema<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned} 00 &\rightarrow e^{j\frac{\pi}{4}} = 0,70711 + j0,70711 \\ 01 &\rightarrow e^{j\frac{3\pi}{4}} = -0,70711 + 0,70711j \\ 10 &\rightarrow e^{j\frac{5\pi}{4}} = -0,70711 - 0,70711j \\ 11 &\rightarrow e^{j\frac{7\pi}{4}} = 0,70711 - 0,70711j \end{aligned}$$

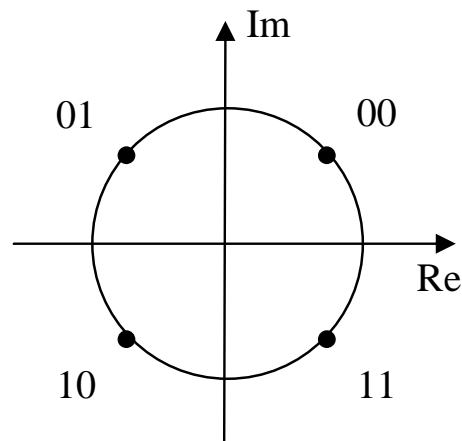


Figura 12: Constelación OQPSK.

<sup>2</sup>CC2420\_Data\_Sheet\_1\_3.pdf



## Algoritmo de modulación OQPSK.

- 1.- Secuencia de bits a modular, ejemplo  $S_b = [1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]$ .
- 2.- Separación de bits pares (I) e impares (Q).  
 $I = [1\ 0\ 0\ 1]$ ,  $Q = [1\ 0\ 1\ 0]$ .
- 3.- Desfasaje (de medio tiempo de bit) de bits pares e impares  
 $S_{bd} = [(I_1, Q_1), (I_2, Q_1), (I_2, Q_2), (I_3, Q_2), (I_3, Q_3), (I_4, Q_3), (I_4, Q_4)]$   
 $= [(1,1), (0,1), (0,0), (0,0), (0,1), (1,1), (1,0)]$ .
- 4.- Mapeo de bits a puntos de la constelación  
 $P_c = [7\pi/4, 3\pi/4, \pi/4, \pi/4, 3\pi/4, 7\pi/4, 5\pi/4]$ . Estos puntos de la constelación se multiplicarán por la señal a modular y producirán los corrimientos de fase propios de la modulación OQPSK (ver Fig. 13).

# 7 MODULACION

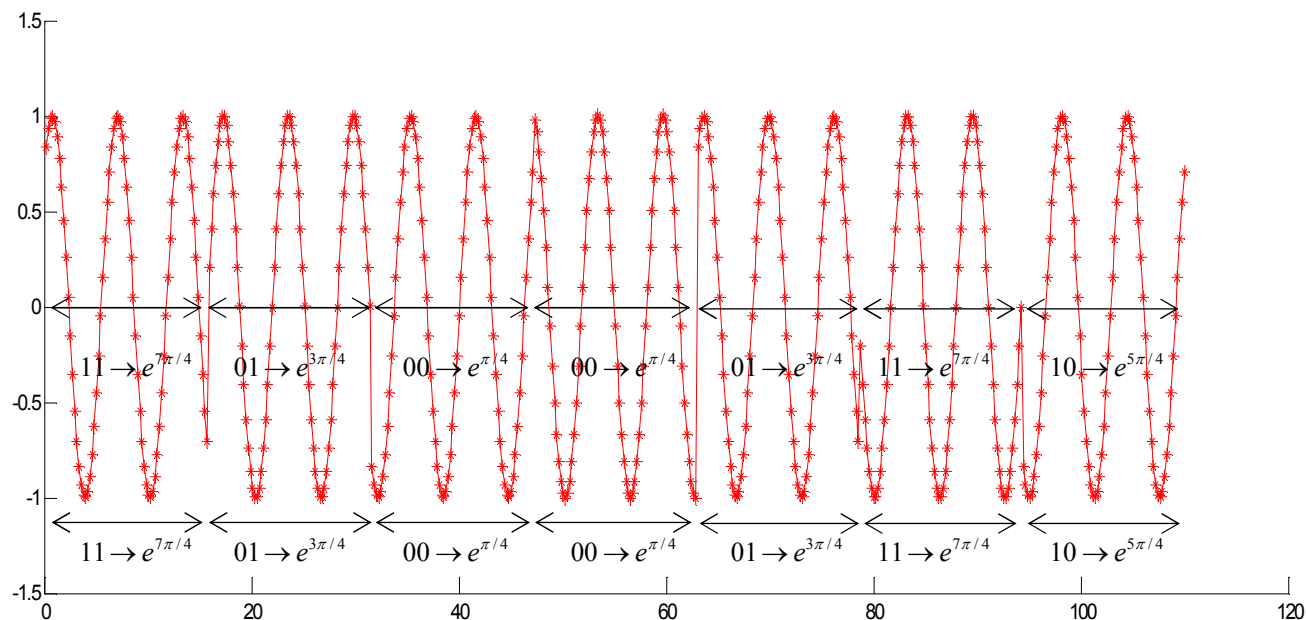


Figura 13: Ejemplo de modulación OQPSK.

En la Fig. 13 se puede observar que las fluctuaciones de amplitud son menores que las correspondientes a la modulación QPSK (Fig. 11).

# REFERENCIAS



[1] Benigno Rodríguez (2007)

Differential STBC for OFDM based Wireless Systems

*PhD thesis from Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)*

Department of Telecommunications, Göttingen: Cuvillier publishing house,  
Dec. 2007, ISBN 978-3-86727-459-3.



[2] T. S. Rappaport (2002)

Wireless Communications Principles and Practice

*Prentice Hall*, 2nd ed., 2002.



[3] P. Hoeher (1992)

A Statistical Discrete-Time Model for the WSSUS Multipath Channel

*IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 41(4), pp. 461-468, Nov. 1992.



[4] Nouha Baccour et al. (2012)

Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks: a Survey

*ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 8(4), Sep. 2012, DOI  
10.1145/2240116.2240123.