

# CAPÍTULO 4

## Transmisión y localización de dispositivos.

### METODOLOGÍAS DE LOCALIZACIÓN

Para ubicar un punto en el espacio existen diferentes métodos de localización, los más destacados son AOA (ángulo de llegada, *angle of arrival*), TOA (tiempo de llegada, *time of arrival*), TDOA (diferencia de tiempo de llegada, *time difference of arrival*) y RSSI (indicador de la fuerza de la señal recibida, *received signal strength indicator*). Estos cuatro métodos se muestran en la figura 4.1.

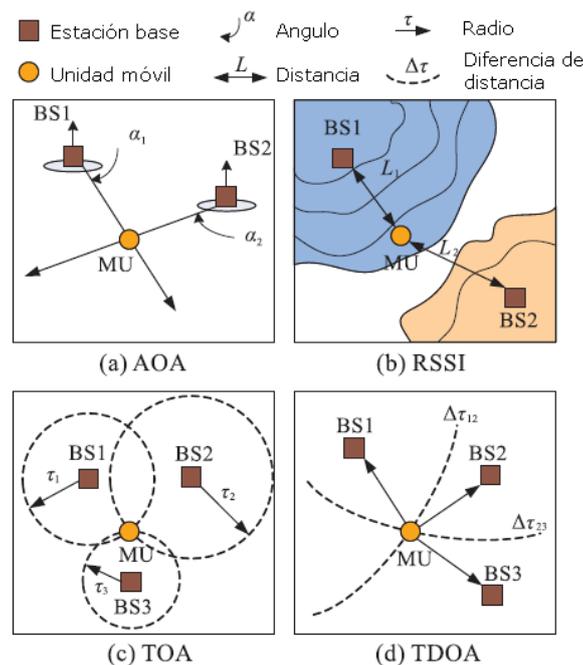


Figura 4.1 Métodos de localización.

Imagen tomada de "Wireless sensor networks for resources tracking at building construction sites"

Los problemas de la ubicación usando los métodos de la medida del tiempo se concentran en la sincronización de los relojes así como la dificultad de los cálculos matemáticos necesarios para determinar la posición. Cuando usamos el método de medir el ángulo de llegada, nos enfrentamos a la dificultad de necesitar un mayor número de antenas para cubrir toda el área. El uso de RSSI nos permite determinar la posición de un objeto con relativamente menor esfuerzo.

Todos estos métodos se basan en la lectura hecha por nodos fijos de la red que son quienes proporcionan la información necesaria para estimar la posición de los nodos móviles. Cuando se hace el modelado y diseño del sistema se deben tener en cuenta factores como las interferencias propias de la instalación, obstáculos que se atraviesen en el camino de la señal que provoquen pérdidas por absorción, efecto multitrayectoria y el desvanecimiento de la señal. Tanto AOA como TOA y TDOA necesitan contar con línea de vista para determinar el origen de la señal y poder hacer el cálculo de la posición de algún transmisor, lo que las hace técnicas poco prácticas para cálculos de localización en interiores.

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

Actualmente hay sistemas que basan su funcionamiento en ultrasonido o láser y que dan una buena precisión de localización, sin embargo, el uso de dispositivos de este tipo incrementan el costo, el tamaño y el consumo de potencia de los elementos del sistema que los use.

En el mercado hay sistemas que ya cuentan con los componentes necesarios para efectuar la tarea de localización sin la necesidad de agregarles más elementos. Los métodos de localización que se usan son los que se mencionaron con anterioridad y que se explican con mayor detalle a continuación.

Nos concentraremos en la metodología usando RSSI debido a que para las demás técnicas debemos contar obligadamente con línea de vista. El factor de la línea de vista es un elemento muy importante a considerar ya que la mayoría de las veces los dispositivos no podrán verse pero deberán tener la capacidad de obtener alguna lectura que nos permita determinar las coordenadas del nodo móvil.

#### ANGULO DE LLEGADA

Este método usa un arreglo multiantena en el que cada una de ellas tiene ubicaciones conocidas. Cuando un dispositivo transmisor se encuentra en la línea de vista de una antena, este le envía la señal a la antena que se encargará de determinar de qué dirección proviene dicha señal; la antena mide el ángulo con el que llega la señal para determinar una posición preliminar. Para tener una correcta aproximación se necesita de la lectura de al menos otra antena que siga el mismo procedimiento. La posición se fijará en el punto de intersección de las señales que llegan a las dos antenas.

La información se envía a una central que será la encargada de determinar la posición por métodos trigonométricos conociendo las coordenadas de las antenas que recibieron la señal del nodo móvil y que envían los datos a dicha central.

Este método resulta muy impráctico por la necesidad de tener un gran arreglo de antenas para poder determinar la posición de los dispositivos. La precisión de esta técnica se reduce con el desvanecimiento de la señal y efectos multitrayectoria.

#### TIEMPO DE LLEGADA

Esta técnica se basa en la medida del tiempo de llegada de la señal transmitida por una terminal móvil a diferentes estaciones base. Una de las posibilidades para los cálculos es medir el tiempo que le toma a la señal hacer un viaje redondo. El cálculo de la distancia se hace considerando el tiempo que se tarda en llegar la señal desde el dispositivo móvil hasta la estación base a la velocidad de la luz. La fórmula para calcular la distancia sería entonces  $d = \frac{(c)(t)}{2}$ .

La división entre dos es porque estamos tomando la medida del tiempo que le toma a la señal hacer el viaje de ida y vuelta.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

Se necesitan al menos tres antenas que midan el tiempo de viaje de la señal; el tiempo se usa como un parámetro que nos permite calcular la distancia que existe entre el dispositivo móvil y las antenas. Cuando ya se conocen al menos tres medidas, se usan métodos trigonométricos de intersección para ubicar al dispositivo. Este procedimiento es el que se usa en los sistemas GPS; sin embargo, es indispensable el uso de relojes muy precisos para poder obtener buenos cálculos de posición. Esto es un factor adverso muy importante porque las ondas radioeléctricas viajan a la velocidad de la luz y un retraso de tan solo 10ns se traduce en un error de hasta 3 metros.

Los satélites que trabajan con los sistemas GPS tienen relojes atómicos muy precisos que no se atrasan ni se adelantan. Estos relojes son muy caros y por lo tanto no se usan en aplicaciones GPS de uso común y mucho menos en aplicaciones de localización en interiores. Este error acarreado por la des-sincronización de los relojes, se reduce tomando más de tres lecturas y siguiendo el mismo procedimiento geométrico de intersección. Otros factores que afectan los cálculos de esta técnica son el desvanecimiento y el efecto multitrayectoria.

#### RSSI

Esta técnica se basa en las ecuaciones de pérdidas de propagación. Cuando conocemos la potencia de transmisión de un emisor, y medimos la potencia recibida en una antena, podemos estimar la distancia que existe entre estos dos dispositivos en función de la diferencia que existe entre los dos valores de potencia. Esta técnica se ve afectada por el entorno ya que tanto el desvanecimiento como los efectos multitrayectoria y la absorción provocada por diferentes materiales, disminuyen la potencia transmitida traduciéndose esto en errores de cálculo de la distancia.

La idea con esta técnica es configurar el receptor con una medida de referencia para saber la potencia que recibe del emisor a esa distancia. Cuando el emisor se aleja del receptor, la potencia recibida disminuirá y así podremos determinar una posición aproximada del dispositivo móvil. De acuerdo con la ecuación de Friis de espacio libre, la potencia decrece de manera cuadrática cuando la distancia aumenta.

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

$P_{RX}$  es la potencia que llega al receptor.

$P_{TX}$  es la potencia transmitida por el emisor.

$G_{TX}$  es la ganancia del transmisor.

$G_{RX}$  es la ganancia del receptor.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$d$  es la distancia que existe entre el emisor y el receptor.

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

El indicador RSSI se calcula como el cociente de la potencia recibida  $P_{RX}$  y una potencia de referencia  $P_{ref}$ . Es decir, RSSI se calcula de la siguiente manera:

$$RSSI = 10 \cdot \log \frac{P_{RX}}{P_{ref}} \quad [RSSI] = dBm$$

Generalmente se toma el valor de la potencia de referencia como  $P_{ref} = 1mW$ .

Vemos entonces que, en la ecuación de Friis, la potencia recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que existe entre emisor y receptor y que esta distancia afecta también al indicador RSSI, es decir, a menor potencia recibida, menor valor de RSSI.

La medida del valor de RSSI se debe tomar en al menos tres antenas diferentes y después se sigue el mismo algoritmo geométrico de triangulación de localización que se usa en las otras técnicas para determinar la posición del dispositivo móvil.

#### RSSI y ZigBee

Como ya mencionamos, el método RSSI se ve afectado por los efectos de desvanecimiento y multitrayectoria; por eso, los sistemas que usan esta técnica necesitan recabar una gran cantidad de datos para dar una buena precisión; sin embargo, esta necesidad de más datos provoca que exista un incremento en el tráfico de las señales, mayor consumo de energía y una menor vida útil de las baterías. Además, esta misma necesidad de recolectar más datos incrementa el tiempo de respuesta, factor importantísimo cuando se trata de localizar algún dispositivo y más aún cuando se trata de la vida de alguna persona.

Es por esto que el uso del estándar IEEE 802.15.4 resulta tan atractivo para aplicaciones donde se necesite ubicar a los dispositivos de una red, ya que la naturaleza de dicho estándar es permitir una comunicación de bajo consumo de potencia y de baja tasa de transmisión, lo que permite alargar la vida útil de las baterías. La técnica de modulación que utiliza permite tener disponibilidad del canal para que aún cuando se tome la lectura de varias antenas, se pueda tener un buen tiempo de respuesta.

Las características básicas de ZigBee, que ofrecen una gran ventaja para esta y otras aplicaciones, son que tiene una tasa de transferencia de 250 kbps, 16 canales en la banda de transmisión de 2.4 GHz, modulación DSSS y encriptación AES.

La propia naturaleza de los sistemas ZigBee permite tener sistemas flexibles en el sentido de que los dispositivos pueden ser reubicados en el caso de ser requeridos; por ejemplo, si el hospital va a sufrir una remodelación, el cambio de

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

las antenas será muy sencillo. En el caso de que el hospital fuera a tener una ampliación, la incorporación de nuevos elementos al sistema es muy simple ya que las redes ZigBee pueden soportar una gran cantidad de nodos, así que la escalabilidad no es un elemento que pudiera volverse en nuestra contra.

Al ser ZigBee una tecnología con un bajo consumo de energía y esto permitir tener una larga vida útil de las baterías, permite tener un sistema con una buena relación costo-desempeño porque no tenemos que estarnos preocupando constantemente por el reemplazo de las baterías.

El uso de RSSI para la localización en interiores es la mejor opción porque elimina la necesidad de contar con línea de vista entre los dispositivos para que se pueda dar la comunicación y no se necesita de infraestructura extra para llevar a cabo esta tarea. En un ambiente como un hospital, y siendo móviles los dispositivos que queremos ubicar, es necesario usar una técnica que nos permita obtener lecturas confiables independientemente del entorno.

Como en cualquier método de localización, un sistema que trabaje con RSSI debe tener dispositivos fijos y dispositivos móviles, que serán los que localizaremos. Los primeros se encuentran colocados en puntos estratégicos de la instalación con coordenadas conocidas que servirán de referencia para la localización de los últimos. Algunos estudios han llegado a la conclusión de que la manera de reducir el error de precisión a un rango de  $\pm 1.5$  a  $\pm 2$  metros, es instalar las antenas con una densidad de  $0.27 \text{ nodos}/\text{m}^2$ <sup>1</sup>.

Los dispositivos móviles se sujetan a los objetos que queremos localizar, en nuestro caso, se encontrarán adheridos a los brazaletes que portarán los pacientes. Cada uno cuenta con un número de identificación único que será el que le permita al sistema diferenciarlo de todos los demás brazaletes.

La robustez de un sistema es un factor muy importante, sobre todo si consideramos que será un sistema dedicado a ubicar a los pacientes dentro de un hospital. Saber la posición de un brazalete es un asunto de seguridad en el caso de un bebé, cuando alguna persona intente sacarlo de la instalación sin previa autorización, la robustez y confiabilidad del sistema serán elementos invaluable al momento de evitar una salida no programada. La manera de garantizar la robustez del sistema es colocar la cantidad suficiente de antenas y la topología más adecuada para mantener permanentemente ubicados a los pacientes portadores de los brazaletes.

La precisión en la localización es un argumento muy importante para determinar la eficiencia de un sistema que pretenda cubrir este objetivo. Dadas las condiciones variables en un entorno inalámbrico, es importante considerar modelos

---

<sup>1</sup> “Indoor localization system using RSSI measurement of wireless sensor network based on ZigBee standard”, SUGANO.

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

de propagación no lineales que permitan considerar todos los elementos adversos que pudieran presentarse. Como ya se ha mencionado se deben tener en cuenta los materiales que estarán presentes en la vecindad de los dispositivos. Para poder decir que un sistema tiene una buena precisión se debe tomar como referencia un margen de error no mayor de 1 a 2 metros.

#### MODELOS DE TRANSMISIÓN

En una comunicación inalámbrica, el medio de transmisión son ondas electromagnéticas que se propagan en el aire, y a diferencia de un sistema alámbrico que es estacionario y predecible, los sistemas inalámbricos son aleatorios, variantes en el tiempo y muy difíciles de modelar porque en cada caso se presentan diferentes variables que complican la comunicación entre dos dispositivos, desde la movilidad de los mismos hasta los objetos que se atraviesan en el camino de la señal.

Los análisis básicos parten de la base de la transmisión entre dos dispositivos en espacio abierto y con línea de vista. En estos casos, la potencia de la señal recibida decae en función de la frecuencia y de la distancia que existe entre el transmisor y el emisor. Tradicionalmente se hacían los estudios analizando la potencia recibida en el receptor desde un transmisor fijo y uno variable; estas consideraciones sólo nos permiten estimar el rango del transmisor pero no determinar la potencia recibida considerando los factores inherentes a una transmisión inalámbrica en interiores.

La fórmula que nos permite calcular la potencia recibida en el receptor en un medio libre de obstáculos separado una distancia  $d$  del emisor se conoce como ecuación de Friis de espacio libre y se define de la siguiente manera:

$$P_R(d) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}$$

donde  $P_T$  es la potencia transmitida

$P_R(d)$  es la potencia recibida en función de la distancia entre emisor y receptor

$G_T$  es la ganancia del transmisor

$G_R$  es la ganancia del receptor

$d$  es la distancia entre emisor y receptor

$\lambda$  es la longitud de la onda.

Sabemos que  $\lambda = \frac{c}{f}$ ; por lo tanto podemos expresar la fórmula de  $P_R(d)$  de la siguiente manera:

$$P_R(d) = \frac{P_T G_T G_R C^2}{(4\pi)^2 f^2 d^2}$$

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

Esta fórmula muestra que la potencia recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia emisor-receptor y al cuadrado de la frecuencia a la que trabaja el sistema. Esto sugiere que la potencia recibida decae con la distancia a una tasa de 20dB/década.

Es indispensable considerar la pérdida en la transmisión que se traduce en una atenuación de la señal. Se define la pérdida  $l$  como el cociente de la potencia transmitida entre la potencia recibida:

$$l = \frac{P_T}{P_R} = \frac{(4\pi)^2 d^2 f^2}{G_T G_R C^2}$$

Expresada en decibeles:

$$L = 10 \log \frac{P_T}{P_R} = -10 \log \frac{(4\pi)^2 d^2 f^2}{G_T G_R C^2}$$

donde  $L$  es la pérdida en decibeles.

Si asumimos que las ganancias de las antenas emisoras y receptoras son unitarias tenemos que:

$$L = 10 \log \frac{P_T}{P_R} = -10 \log \frac{(4\pi)^2 d^2 f^2}{C^2}$$

o también

$$L = 20 \log_{10}(f_{MHz}) + 20 \log_{10}(d) - 28$$

Esta fórmula para la pérdida sólo es aplicable para sistemas ideales que no presentan obstáculos en su línea de vista y sólo se debe usar para estimaciones iniciales.

Cuando pensamos en instalar un sistema de comunicación inalámbrica es importante conocer cuál es la máxima pérdida que se puede tolerar en el sistema. Para esto existe un parámetro conocido como presupuesto de enlace que se expresa:

$$LB = P_T + G_T + G_R - RS$$

donde LB es presupuesto de enlace

$P_T$  es la potencia transmitida en dB

$G_T$  y  $G_R$  son las ganancias del emisor y receptor en dB

RS es la sensibilidad del receptor.

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

Este último parámetro es el valor mínimo de la señal de RF que puede detectar el sistema con un nivel aceptable de SNR (relación señal a ruido). Esta sensibilidad se define como:

$$RS = -174 \text{ dBm/Hz} + NF + 10 \log B + SNR_{MIN}$$

donde -174dBm/Hz es el ruido de piso

NF es la figura de ruido del receptor en dB

B es el ancho de banda del receptor

SNR es la relación señal a ruido mínima.

El valor del presupuesto de enlace es muy importante porque nos permite ver si la comunicación va a poder realizarse, si el valor de las pérdidas es mayor que el presupuesto de enlace entonces habrá pérdida de información y no habrá comunicación entre los dispositivos.

#### PÉRDIDAS EN INTERIORES

Ya mencionamos que las transmisiones en interiores y en exteriores son diferentes. Las consideraciones en exteriores deben tener en cuenta si los sistemas son fijos así como la interferencia provocada por la atmósfera y objetos. En las transmisiones que se dan en interiores debemos considerar si son sistemas con movilidad, los obstáculos que existen entre emisor y receptor así como los materiales de los mismos obstáculos.

Los análisis que se hacen tienen como objetivo asegurar una cobertura eficiente del área deseada y evitar la interferencia, tanto la provocada por los dispositivos del propio sistema como la de los sistemas que se encuentren en la misma instalación. Para garantizar la cobertura del sistema se deben considerar la geometría del edificio y los materiales de construcción, ya que todo esto afecta la propagación de la señal. Debido a que trabajaremos con ondas milimétricas debemos considerar todos los cambios en el ambiente porque estos tendrán efectos sustanciales en las características de propagación.

Las variaciones en la propagación de la información en un canal de ondas radioeléctricas en interiores, están provocadas generalmente por:

- reflexión y refracción provocada por los objetos dentro de la habitación
- pérdidas en la transmisión a través de las paredes, suelos y otros obstáculos
- cambios de canales, especialmente en los pasillos, a altas frecuencias
- el movimiento de personas y objetos en la habitación, incluyendo la posibilidad de que los dispositivos sean móviles.

Los servicios de comunicación inalámbricas se pueden caracterizar por los siguientes parámetros:

- tasas de transmisión altas/medias/bajas

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

- área de cobertura de la estación base; por ejemplo una habitación, un piso o un edificio
- dispositivos móviles/portátiles/fijos
- transmisiones en tiempo real/tiempo no real/tiempo cuasi real
- topología de la red.

#### MODELOS DE PÉRDIDAS EN INTERIORES

Los modelos de transmisión en interiores se hacen considerando las pérdidas que se dan por los objetos y paredes en el piso o el edificio. El modelo básico se expresa de la siguiente manera:

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \text{ [dB]}$$

donde  $N$  = coeficiente de distancia de pérdida de potencia

$f$  = frecuencia en MHz

$d$  = distancia en metros entre la estación y el dispositivo portátil

$L_f$  = factor de penetración de piso en dB

$n$  = número de pisos entre la base y el dispositivo portátil.

Los parámetros variables que se consideran en esta fórmula se han obtenido con base en resultados de diferentes mediciones hechas por diferentes investigadores y dependen de la frecuencia de trabajo y del tipo de edificio con el que se trabaje. Los valores de dichos variables pueden encontrarse en tablas.

La naturaleza de los dispositivos móviles/portátiles provoca variaciones en el tiempo, frecuencia y desplazamiento espacial, lo que nos lleva a definir un modelo de multitrayectoria. Aún cuando se trate de dispositivos estáticos, se deben considerar los efectos de los objetos móviles que se encuentren en la vecindad de los mismos dispositivos y que puedan tener efectos importantes de dispersión de la señal. El retraso de cada multitrayectoria es proporcional a la longitud de la trayectoria. Un estimado del retraso máximo en nanosegundos se puede calcular multiplicando por un factor de 3.3 la mayor distancia en metros de la habitación.

El objetivo principal del modelado del canal es proporcionar una representación matemática precisa de la propagación de las ondas de radio que se van a usar en un enlace de ondas radioeléctricas y en simulaciones del sistema. Dado que el canal radioeléctrico es lineal, se puede describir totalmente por su respuesta impulso. Cuando ya se conoce la respuesta impulso, podemos determinar la respuesta del canal con cualquier entrada.

Esta respuesta impulso varía con la posición del receptor y puede variar también con el tiempo. Por lo tanto, usualmente se mide y reporta como un promedio de perfiles medidos sobre una longitud de onda para reducir efectos de ruido o sobre varias longitudes de onda para determinar un promedio espacial. El procedimiento recomendado es formar un modelo estadístico de la siguiente manera: para cada respuesta impulso estimada, localizar las veces antes y

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

después del retraso promedio  $T_D$  más allá del cual la densidad de potencia no excede ciertos valores específicos (-10, -15, -20, -25, -30 dB) con respecto a la densidad de potencia máxima. La media de las distribuciones de estas veces forma el modelo de respuesta impulso.

Otras consideraciones son el efecto de la polarización y el patrón de radiación de las antenas. Las características de reflexión de los materiales de los edificios dependen de la polarización, ángulo de incidencia y la permitividad de los materiales. Los ángulos de arribo de las componentes multitrayectorias se distribuyen dependiendo del ancho del haz de la antena, estructura del edificio y la ubicación de emisores y receptores. Por lo tanto, vemos que la polarización y el patrón de radiación de las antenas afectan significativamente la propagación en interiores.

Pruebas de propagación en interiores realizadas a 60 GHz con una antena de transmisión omnidireccional y cuatro tipos de antenas receptoras (omnidireccional, haz ancho, cuerno estándar y haz angosto), muestran que el uso de antenas de haz angosto suprime los componentes de retrasos.

Los materiales del edificio, acabados y los muebles, son elementos de gran importancia al momento de analizar un modelo de pérdidas. Las características de reflexión y transmisión de estos materiales depende la permitividad de los mismos. Es por eso que el análisis se debe hacer con el conocimiento de los elementos que estarán presentes en el sitio para considerarlos como variables básicas.

Dada la permitividad compleja  $\eta$  de los objetos, el coeficiente de reflexión está dado por:

El vector E normal al plano de reflexión

$$R_N = \frac{\sin \theta - \sqrt{\eta - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\eta - \cos^2 \theta}}$$

El vector E paralelo al plano de reflexión

$$R_P = \frac{\sin \theta - \sqrt{(\eta - \cos^2) / \eta^2}}{\sin \theta + \sqrt{(\eta - \cos^2) / \eta^2}}$$

donde  $\eta = \epsilon_r - j50\sigma\lambda$

$\sigma$  es la conductividad.

Los efectos particulares provocados por los materiales serán más notorios con el aumento de la frecuencia.

# Transmisión y localización de dispositivos.

---

Un factor más que se presenta en las comunicaciones inalámbricas en interiores es el movimiento de objetos y de personas en la vecindad de las antenas o en otros lugares del edificio; sin embargo, estas variaciones son muy lentas en comparación con la tasa de transmisión que se usa y por lo tanto pueden tratarse como invariables en el tiempo.

Todas estas características nos muestran que no hay manera de generar un modelo general para la transmisión en interiores toda vez que cada instalación presenta particularidades diferentes; sin embargo, los modelos de pérdidas son indispensables para hacer una instalación confiable, que garantice un buen enlace entre los dispositivos y donde podamos confiar en la transmisión de la información independientemente de los inconvenientes que se pudieran presentar.

Teniendo esto en consideración, ahora veremos que el mercado nos ofrece diferentes alternativas para implementar el sistema que proponemos. Gracias a la asociación ZigBee Alliance, se garantiza la interoperabilidad entre los dispositivos de diferentes fabricantes, que aunque tengan diferentes parámetros de radio, todos deberán cumplir con los requisitos impuestos por este organismo.

Cuando hacemos el análisis de los dispositivos tenemos que considerar lo siguiente para escoger la mejor opción de acuerdo a nuestras necesidades:

- qué tan simple o compleja será la red
- escoger la frecuencia de radio de la aplicación
- parámetros de RF y costo
- la arquitectura de la MAC
- decidir si se usará una solución de uno o dos chips
- factores que afectan el consumo de potencia.

Los parámetros de radiofrecuencia que se deben considerar, porque tienen implicaciones directas en el costo del sistema, son la sensibilidad del receptor, la potencia de transmisión y el presupuesto de enlace.

La sensibilidad del receptor es la potencia mínima en dBm que debe recibir el radio para tener un enlace confiable. El estándar IEEE 802.15.4 especifica una sensibilidad mínima de -85 dBm para los radios que trabajen en 2.4 GHz. Una mayor sensibilidad permite poner los radios más separados, reduciendo costos.

La potencia de transmisión es la que define la fuerza de la señal. El estándar IEEE 802.15.4 fija la potencia de salida mínima en -3 dBm. A mayor potencia mayor alcance. El presupuesto de enlace tiene influencia en el rango de la línea de vista y la robustez en las transmisiones sin línea de vista.

La arquitectura del controlador de acceso al medio es el software que provee la interfaz entre la capa de seguridad de la red y el radio 802.15.4. Las implementaciones MAC pueden afectar la complejidad del sistema, desempeño, consumo de potencia, costo y escalabilidad de algunas características del sistema.

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

Algunos fabricantes reducen el tamaño de la memoria flash pero esto trae efectos negativos en la escalabilidad de aplicaciones de próxima generación.

Cuando queremos decidir si usar un dispositivo en función de la estructura del chip que usemos, debemos inclinarnos por un fabricante que ofrezca múltiples controladores con un rango de memoria adecuado para sus radios. Para quienes no tienen mucha experiencia en la integración de radio con controladores, esta es la mejor opción. Sin embargo, esto podría atar al diseñador con un microcontrolador que no es el óptimo para la aplicación. Aún más, quizá el controlador tenga suficiente memoria flash para la aplicación inmediata pero que resultará insuficiente cuando se desee escalar el sistema.

Los factores que más afectan el consumo de potencia y que deben considerarse con mucha atención son los voltajes de alimentación del radio y del microcontrolador, la corriente del radio y del microcontrolador, la frecuencia de reloj a la que opera el controlador, la cantidad de componentes externos que requiere el sistema (en especial amplificadores de potencia) y el tamaño del código.

En la tabla 4.1 que se presenta a continuación se muestran las diferencias de los parámetros mencionados entre algunos fabricantes.

FABRICANTE	NÚMERO DE PARTE	SENSIBILIDAD DEL RECEPTOR (dBm)	POTENCIA DE TRANSMISIÓN (dBm)	PRESUPUESTO DE ENLACE (dBm)	LINEA DE VISTA (m)	MEMORIA FLASH (KB)
Texas Instruments	CC2430F128	-92	0	92		128
	CC2431	-92	0	92		128
	CC2510	-103	1	104		32
	CC2520	-98	5	103	400	
	CC2530F256	-97	4.5	101.5		256
Jennic	JN5121	-90	0	90		
	JN5139-001-M00	-96	2.5	98.5	1000	Externa
	JN5148	-95	2.5	97.5		
Ember	EM250	-99	3	102		128
	EM260	-99	2.5	101.5		Externa
	EM357	-100	3	103		192
Atmel	AT86RF230	-101		104		
	AT86RF231	-101		104		

Tabla 4.1 Diferencias entre productos de diferentes fabricantes.

El canal de radio en interiores difiere del canal móvil de radio tradicional en dos aspectos principalmente: las distancias que se cubren son mucho menores y la variabilidad del ambiente es mucho mayor para separaciones mucho menores entre emisor y receptor<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> “Wireless communications, principles and practices”, RAPPAPORT.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

El medio inalámbrico es inestable por sí mismo y además ya hemos comentado que debemos sumarle las consideraciones de un ambiente de interior. Los factores que afectan la señal son la absorción por diferentes obstáculos, objetos en movimiento, la reflexión, la difracción y la refracción, traduciéndose todo esto en múltiples trayectorias, es decir, la señal llega a la antena desde distintas direcciones con fases diferentes, lo que provoca la obtención de una señal distorsionada de la original.

Dependiendo del ambiente, los cambios en la humedad, temperatura o intensidad de la luz también pueden afectar la propagación de la señal. Estos factores no serán determinantes en nuestro caso de estudio.

Cabe señalar que la corta distancia que pudiera existir, (y que existe en nuestro caso), entre emisor y receptor, proporciona ventajas como un menor retraso y menos dispersamiento de retraso. Sin embargo, es importante resaltar que aunque existen más consideraciones que afectan la señal, un ambiente *indoor* puede considerarse cuasi-estático, es decir, varía muy lentamente en el tiempo, por lo que no se hace indispensable un sistema de detección que se ajuste constantemente<sup>3</sup>.

Sobra decir que esta consideración es simplemente para la comunicación entre dispositivos que se encuentran estáticos en la instalación, en el caso de los dispositivos móviles hay que tener presentes las consideraciones que hacen Rappaport y otros autores en el sentido de que las condiciones de vecindad del dispositivo móvil no permanecen constantes.

Todas estas consideraciones han obligado al desarrollo de modelos que permitan tener mayor certeza de los valores que se leen en las antenas, específicamente cuando se trata de un ambiente *indoor*.

#### CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE TRANSMISIÓN

Es claro que no existe ningún modelo que sea ideal y que pueda aplicarse en todos los ambientes, ni siquiera uno que sea funcional para un ambiente en todos los casos, para cada caso se deben tomar las precauciones pertinentes.

Los modelos de propagación se enfocan tradicionalmente en predecir la intensidad de la señal recibida en una antena a una cierta distancia del transmisor, así como la variabilidad de la intensidad de la señal en su proximidad en una ubicación particular. De esta manera podemos separar los modelos en dos grandes grupos; los modelos de gran escala y los modelos de pequeña escala, dependiendo de la separación que exista entre transmisor y receptor.

Los modelos de gran escala se usan en ambientes *outdoor*, donde la distancia entre emisor y receptor va desde varios cientos de metros hasta algunos kilómetros. Los modelos de pequeña escala se enfocan en interiores y tienen

---

<sup>3</sup> “The mobile radio propagation channel”, PARSONS, J. D.

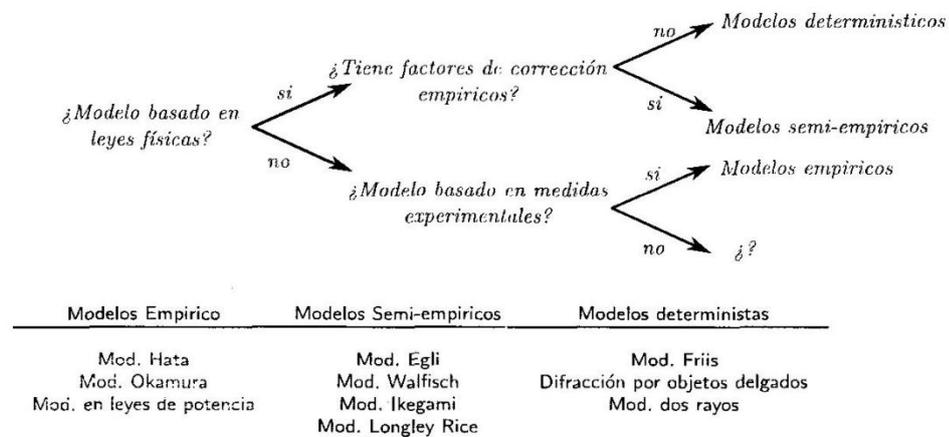
## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

rangos de distancia de unos cuantos metros hasta unos cien metros aproximadamente.

Los modelos pueden tomarse a partir de experiencias previas o generar uno nuevo en función de las características del ambiente en el que se va a instalar el sistema.

Una clasificación que podemos hacer de estos modelos de propagación queda de la siguiente manera:



Los modelos empíricos son los que se basan en mediciones hechas directamente en la instalación, esto nos da una base que contiene datos de la señal y algún parámetro que estemos midiendo. Este tipo de modelos ayudan a la reducción de la complejidad computacional y a incrementar la precisión.

El aproximamiento empírico ajusta curvas o expresiones analíticas que recrean un conjunto de datos medidos. Esto tiene la ventaja de tomar en cuenta implícitamente todos los factores de propagación, tanto los conocidos como los desconocidos, a través de medidas del campo específico, lo que le otorga cierta superioridad frente a los otros modelos.

Los modelos deterministas se basan en experimentos previos que nos proporcionan fórmulas que podemos aplicar en el caso que estemos estudiando, es decir, se infiere la posición del dispositivo ya que sólo tenemos una fórmula aproximada para hacer los cálculos que no considera los efectos de multitrayectoria particulares de la instalación en cuestión.

Debemos mencionar que el uso de los modelos deterministas es muy particular y sólo deben aplicarse cuando el sistema a modelar se encuentra en una instalación de características muy similares a la situación de donde se obtuvo dicho modelo, de otra manera las fórmulas serán imprecisas y poco útiles.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

El hecho de que los modelos deterministas sean imprecisos se debe a que estos modelos sólo consideran un edificio vacío, no los muebles ni el flujo de personas que habrá. Se pueden incorporar algoritmos que consideren las pérdidas por los muebles usando una base de datos previa que define pérdidas en función de los materiales, pero esta metodología consume una gran cantidad de recursos de memoria. En pocas palabras, los modelos deterministas solamente simulan una función de lo que está pasando en realidad.

La mayoría de los modelos de propagación se derivan de la combinación de métodos analíticos y empíricos.

Estos modelos sólo son válidos para la frecuencia a la que fueron obtenidos, para una frecuencia y condiciones particulares diferentes, se deben tomar nuevas mediciones.

Otra manera de clasificar los modelos de propagación es dividirlos en cuatro grupos:

- modelos empíricos de banda angosta
- modelos empíricos de banda ancha
- modelos para variaciones de tiempo
- modelos determinísticos.

Los *modelos empíricos de banda angosta* son expresiones simples de ecuaciones matemáticas que presentan las pérdidas como una salida. Las ecuaciones se obtienen ajustando a un modelo previo las medidas tomadas en la instalación.

Los *modelos empíricos de banda ancha* se expresan en una forma de tablas que enlista el promedio de los valores de pérdidas de dispersión y valores típicos de retardo de potencia. Los *modelos para variaciones de tiempo* se usan por ejemplo para estimar el espectro Doppler de la señal recibida. Finalmente, los *modelos determinísticos* son métodos que simulan físicamente la propagación de las ondas de radio.

Los modelos empíricos de banda ancha se consideran como medios para la evaluación del retraso de dispersión y retraso de potencia promedio. Uno de estos dos factores, junto con las características Doppler, es típicamente requerido como parámetros de entrada de los sistemas de simulación.

Las variaciones en el tiempo, de las cuales surgen los modelos con este nombre, resultan principalmente por alguna de las tres circunstancias siguientes: la posición de la antena receptora cambia, la orientación de la antena cambia y el movimiento de los objetos que se encuentran alrededor de las antenas.

Como ya dijimos, los modelos determinísticos se usan para simular físicamente la propagación de las ondas de radio. Por lo tanto el efecto del

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

ambiente en los parámetros de propagación puede ser considerado de una manera más precisa que en los modelos empíricos. Otra ventaja de estos modelos es que es posible predecir varios parámetros de propagación tales como pérdidas de trayectoria, respuesta impulso y ángulo de llegada al mismo tiempo.

Un ejemplo de modelo determinístico es el modelo de lanzamiento de rayos (*RLM, ray launching model*), que involucra a un cierto número de rayos que se lanzan de la antena transmisora en direcciones específicas. Para cada rayo se determina un punto de intersección con una pared y el rayo incidente se descompone en dos rayos, uno de penetración a la pared y uno más reflejado; cada rayo se sigue hasta la siguiente intersección sucesivamente. El seguimiento de rayo termina cuando la amplitud de este cae por debajo de un umbral predeterminado o se llega a un cierto número de interacciones rayo-pared.

Finalmente tenemos los modelos empíricos de banda angosta. Estos los podemos dividir en tres tipos: modelo multipared, modelo de atenuación lineal y modelo de una pendiente.

El primero de estos nos da la pérdida de trayectoria como la pérdida en espacio libre más las pérdidas que se introducen provocadas por las paredes y pisos que se encuentran en el camino de la trayectoria directa entre transmisor y receptor. Se ha observado en la práctica que la pérdida total de piso es una función no lineal del número de pisos penetrados. Esta característica es tomada en cuenta introduciendo un factor empírico  $b$ . El modelo multipared se puede expresar de la siguiente manera:

$$L = L_{FS} + L_C + \sum_{i=1}^l k_{wi} L_{wi} + k_f^{\left[\frac{k_f+2}{k_f+1} - b\right]} L_f$$

donde  $L_{FS}$  es la pérdida en espacio libre entre emisor y receptor

$L_C$  es una pérdida constante

$k_{wi}$  es el número de paredes penetradas tipo  $i$

$k_f$  es el número de pisos penetrados

$L_{wi}$  es la pérdida de la pared tipo  $i$

$L_f$  es la pérdida entre los pisos adyacentes

$b$  es el parámetro empírico

$I$  es el número de tipo de paredes.

Tanto los modelos teóricos como los basados en mediciones indican que la potencia promedio de la señal recibida decrece logarítmicamente con la distancia, tanto en un ambiente *outdoor* como en un ambiente *indoor*. El promedio de pérdida en la trayectoria para una separación arbitraria entre emisor y receptor se expresa como una función de la distancia usando un factor de atenuación,  $n$ .

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n$$

o también

$$\overline{PL}(dB) = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

donde  $n$  es el factor de atenuación que indica la tasa a la que la potencia decae

$d_0$  es una distancia de referencia que se determina de las medidas cercanas al transmisor

$d$  es la separación entre emisor y receptor.

Las barras en las fórmulas indican valores promedio.

Teniendo esto como referencia, veamos ahora el modelo de atenuación lineal. Este modelo también considera las pérdidas en espacio libre y a su vez considera que la pérdida es linealmente dependiente de la distancia, es decir:

$$L = L_{FS} + \alpha d$$

donde  $\alpha$  es un factor de atenuación.

El modelo más simple de los modelos empíricos de banda angosta, y de los modelos de propagación en interiores en general, es el modelo de una pendiente. Este modelo también asume que existe una dependencia lineal entre las pérdidas de trayectoria y la distancia logarítmica. El modelo se expresa de la siguiente manera:

$$L = L_0 + 10n \cdot \log(d)$$

donde  $L_0$  es la pérdida de trayectoria a un metro de distancia

$n$  es un índice de caída de la potencia

$d$  es la distancia que existe entre emisor y receptor.

Este modelo es muy sencillo de usar porque únicamente la distancia aparece como un parámetro de entrada. Sin embargo la dependencia de este parámetro debe ser tomada en cuenta como poco confiable y es por eso que se usa un índice de caída de potencia.

La razón de no confiar en la lectura directa de estas mediciones, es que las lecturas que se hace en las antenas es una consideración que se hace de que

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

estamos tratando con un ambiente *outdoor* y con línea de vista. La distancia leída directamente será un valor inexacto cuando estemos en un ambiente *indoor*.

El modelo de una pendiente es el modelo que nosotros usaremos debido a la simplicidad del mismo. Se debe notar que aún siendo un modelo simple contiene la información necesaria para obtener buenos valores. Este modelo nos permite trabajar con las pérdidas sin la necesidad de emplear datos teóricos de pérdidas por materiales, muebles, pisos, etc., que es un trabajo muy complejo y con datos muy variables. La simplicidad del modelo no sacrifica precisión, razón importantísima por la que nos inclinamos por el uso de este.

Tenemos la fórmula de pérdidas según el modelo de una pendiente:

$$L = L_0 + 10n \cdot \log(d)$$

De este modelo nosotros podemos medir  $L_0$  y obtener el valor de  $L$ ; dicho valor lo obtendremos de la diferencia entre el valor de la potencia de transmisión y la potencia de recepción, valor conocido el primero y determinable el segundo por medio del valor de RSSI.

$$RSSI = 10 \cdot \log \frac{P_{RX}}{P_{ref}}$$
$$L = P_{TX} - P_{RX}$$

Tenemos entonces un modelo del que no conocemos ni el índice de caída de potencia o factor de atenuación, ni la distancia entre el emisor y el receptor. Nosotros estamos interesados en conocer la distancia entre el emisor y el receptor, esa es nuestra incógnita, este valor nos permitirá determinar la posición del *tag* que queremos localizar. El valor de  $n$  es un valor que debe ser obtenido de manera práctica para poder caracterizar de manera correcta cada una de las antenas.

Cuando se grafica en una escala  $\log - \log$ , la pérdida de trayectoria modelada es una línea recta con una pendiente igual a  $10n$  [dB] por década. El valor de  $n$  depende del ambiente de propagación. En espacio libre,  $n = 2$  y cuando se presentan obstáculos,  $n$  tendrá un valor más grande.

Es importante seleccionar una distancia de referencia  $d_0$  de espacio libre que sea apropiado para el ambiente de propagación. La distancia de referencia debería estar siempre en el campo lejano de la antena para que los efectos del campo cercano no afecten la referencia de la pérdida de trayectoria.

La tabla 4.2 enlista exponentes de pérdidas de trayectoria típicos obtenidos en varios ambientes de radio móviles.

Transmisión y localización de dispositivos.

AMBIENTE	EXPONENTES DE PÉRDIDAS, <i>n</i>
Espacio libre	2
Área urbana de radio celular	2.7 – 3.5
Área urbana de radio celular con sombra	3 – 5
En edificio con línea de vista	1.6 – 1.8
En edificio sin línea de vista	4 – 6
En fábrica sin línea de vista	2 – 3

Tabla 4.2 Exponentes de las pérdidas en diferentes escenarios.

MODELO DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN

Como ya mencionamos, un buen sistema de localización debe contar con el respaldo suficiente para poder confiar en que los dispositivos podrán ser localizables en cualquier punto de la instalación. Es por esto que se debe hacer una buena propuesta donde las antenas estén colocadas de tal manera que hasta en el último rincón del hospital, se puedan tomar cuando menos tres lecturas para poder estimar correctamente la posición del dispositivo móvil.

Nuestra propuesta se hizo para el hospital general de Chilpancingo Guerrero “Dr. Raymundo Abarca Alarcón” perteneciente a la Secretaria de Salud. Con base en el diseño arquitectónico de este, se propone colocar las antenas en los puntos necesarios para obtener la lectura de los brazaletes en cualquier punto del hospital.

La distribución de las antenas en el primer y segundo piso se hizo considerando que en cualquiera de los puntos de esos niveles haya siempre tres antenas que registren la señal de los tags para poder determinar su posición. La razón de usar sólo tres antenas para su localización es que al ser pisos donde no hay salidas a la calle sino sólo a los otros pisos del hospital, el margen de error que se pudiera tener no es crítico en el momento de estar buscando a algún paciente ya que sabremos que están en algún punto de estos niveles.

En la planta baja, que es la única que tiene acceso a la calle, se ubicaron un total de 31 antenas. La razón de haber colocado esta cantidad, que es muy superior a las colocadas en los otros dos niveles, es que hay que cubrir un área más grande y que es el único nivel con acceso a la calle y por lo tanto se debe tener mayor precisión en la cobertura.

La distribución de las antenas permite tener cubiertas todas y cada una de las entradas/salidas al hospital. La distancia entre cada una de las antenas en este piso es igual a la mitad del radio de cobertura que tienen, esto garantiza que en el peor de los casos, cada tag esté dentro del alcance de cuando menos tres antenas y de hasta 11 en el mejor. Todas las salidas tienen cobertura de mínimo 4 antenas para tener una ubicación muy precisa de los tags cuando se acerquen a estos puntos.

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

A pesar de que en algunos estudios<sup>4</sup> se sugiere que la manera de tener una buena aproximación es instalando las antenas con una densidad de  $0.27 \text{ nodos}/\text{m}^2$  nosotros usamos una densidad aproximada de  $0.14 \text{ nodos}/\text{m}^2$  considerando que las antenas propuestas tienen un buen radio de alcance y una buena sensibilidad.

Esta aparente menor cantidad de antenas no es tal, la ubicación de todas ellas se planeó analizando cada rincón de la instalación y asegurándonos de que en cualquier punto que se pudiera encontrar algún paciente portando un brazalete, fuera localizable por al menos tres antenas.

Habiéndose ya instalado todas las antenas, tenemos entonces nuestros puntos de referencia con coordenadas conocidas que nos permitirán determinar la posición de los dispositivos móviles. El siguiente paso es determinar la manera en que se estimará la posición de los brazaletes por medio de la interpretación de RSSI.

Ya mencionamos que los *tags* adheridos a los brazaletes se comunicarán con las antenas, esto será de manera periódica para que el sistema sepa que los pacientes siguen dentro de la instalación y que no están cerca de una salida o de un área que pudiera ser de peligro. Los *tags* enviarán un paquete de datos, en cada paquete irá un encabezado PHY y contendrá además una dirección ID que es la dirección MAC del dispositivo y que será su clave de identificación en el sistema.

Algunas antenas determinadas, se programarán para que en el momento de que dejen de recibir la señal de algún brazalete, envíen una alerta al coordinador central para que este esté enterado de que algún paciente está fuera del área permitida pero que aún sigue dentro del hospital. Esto permitirá tomar las medidas necesarias con mucho tiempo de anticipación.

Cuando un *tag* se prepara para comunicarse, envía una petición, si el canal está disponible empieza la transmisión, el primer dato que llega a la antena es un delimitador de inicio del *frame*, de esta manera la antena ya sabe que empezó una transmisión y está preparada para recibir la información; después la antena recibe el byte que le indicará el tamaño del paquete; después la antena filtra la información que no necesita y envía al resto al coordinador central.

Cuando el coordinador reciba esta información sabrá de qué paciente se trata, y al medir la potencia con la que llega dicho paquete a la antena, podremos saber en dónde se encuentra dicho paciente tomando como referencia las coordenadas fijas de las antenas que lo identificaron y el valor de RSSI para determinar en qué parte del hospital se encuentra el portador del brazalete.

---

<sup>4</sup> “Indoor localization system using RSSI measurement of wireless sensor network based on ZigBee standard”, SUGANO.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

La información recolectada por las antenas se envía al coordinador central que será el encargado de realizar los cálculos necesarios para conocer la posición del paciente. Para hacer esto, se necesita la lectura de tres o más antenas para determinar la posición de un *tag*. Cuando el coordinador central identifica una ID proveniente de tres o más antenas, hará los cálculos necesarios para determinar la ubicación del paciente.

Un dato muy importante es saber cómo se va a hacer la lectura de varios brazaletes al mismo tiempo, porque de otra manera la ubicación de los pacientes sería lenta y poco eficiente. Las antenas que instalaremos usan la tecnología ZigBee para la comunicación pero también usan la tecnología RFID para poder leer muchos elementos.

Con la ayuda de estas tecnologías haremos un monitoreo constante de todos los *tags* y no tenemos que esperar a que las antenas “pasen lista” de todos los brazaletes y vuelvan a empezar para saber la posición de los pacientes. El coordinador central tendrá una base de datos con la dirección MAC de todos los *tags*, de esta manera, sólo los dispositivos que estén en la base de datos podrán transmitir información a las antenas del sistema.

Ya hemos comentado de las bondades que tiene RSSI; es un valor que se lee sin la necesidad de aumentar la infraestructura del sistema, lo que mantiene pequeño tanto su costo como su tamaño.

Para nuestro caso, deseamos obtener el valor de una distancia en función del parámetro RSSI, lo que nos permitirá determinar las coordenadas del *tag* que queremos localizar. El valor de RSSI se lee directamente de las antenas y es simplemente la relación de la potencia recibida con respecto a una potencia de referencia, es decir:

$$RSSI = 10 \cdot \log \frac{P_{RX}}{P_{ref}}$$

las unidades de RSSI son [dBm].

El cálculo de la distancia se vería como un simple despeje de alguna fórmula de propagación. La ecuación de Friis nos da una manera simple de hacer el cálculo.

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Ya que conocemos los valores de las potencias, de las ganancias y la longitud de onda; calcular el valor de la distancia se reduce a un simple despeje. Sin embargo, estamos tratando con un ambiente de interiores donde se deben considerar muchos factores que afectan la señal. La fórmula de Friis sólo es aplicable en espacio libre, donde el único parámetro que afecta la lectura de la

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

potencia es la distancia entre el emisor y el receptor por lo que no es útil para una instalación en interiores.

#### OBTENCIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN

Ya vimos todos los factores que afectan la trayectoria de una señal desde su origen hasta la antena que la detecta. Como hemos visto, los modelos de propagación en interiores están pensados para considerar todos estos factores.

Como ya sabemos, la potencia decrece en un factor  $\alpha$  con la distancia.

$$P_{RX} = \alpha \frac{P_{TX}}{d^\alpha}$$

donde  $P_{RX}$  es la potencia recibida  
 $P_{TX}$  es la potencia transmitida  
 $d$  es la distancia entre emisor y receptor  
 $\alpha$  es la constante de atenuación.

Esta constante de atenuación es un valor que está en función del ambiente. Podemos decir que es un valor variable que oscila entre 2 y 4, es obtenido de manera experimental y nos proporciona una manera de ver cómo se comporta la señal en los alrededores de la antena.

Como ya hemos visto y comentado, los modelos de propagación en interiores son muy complejos y no se pueden hacer las mismas consideraciones para todas las instalaciones. Es claro también que no podemos considerar un modelo idéntico para todas las antenas dentro de una misma instalación ya que la vecindad de cada una de las antenas difícilmente será igual que la de otra. El parámetro que dota de identidad propia a cada una de las antenas es el factor de atenuación.

En general, los modelos de propagación empíricos se basan en una gran cantidad de medidas que se hacen en la instalación específica. Para cualquier modelo, la cantidad de datos que se recolecten debe ser tal que nos proporcione una muy buena aproximación para cualquier situación que se puede presentar. Como ya dijimos, estos modelos no proporcionan valores 100% precisos del enlace, sin embargo, nos dan unos buenos valores de predicción del enlace en cuestión.

Se propondrá un algoritmo para calcular un factor de atenuación para cada antena. Este algoritmo será útil para cualquier instalación de interiores donde se pretenda implementar un sistema de comunicación inalámbrico de localización. Este algoritmo nos dará un modelo único para cada antena que nos permitirá conocer con gran precisión la distancia que existe entre el emisor y el receptor. De esta manera, este valor de la distancia nos permitirá confiar en los valores de las coordenadas del tag que queremos ubicar.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

En nuestro caso, la distancia entre cada una de las antenas es igual al radio de cobertura de las mismas, para el primer y segundo piso, y de la mitad del radio en el caso de la planta baja. La propuesta de esta separación es para tener una buena aproximación en los cálculos al momento de realizar la triangulación así como evitar pérdidas por retrasos.

Para calcular el valor de  $\alpha$ , se tomarán varias lecturas a diferentes distancias de la antena y mediremos el valor de la potencia recibida  $P_{RX}$ . Se graficará potencia vs distancia. En la gráfica tendremos varios valores de potencia para una misma distancia manteniendo constante la potencia de transmisión  $P_{TX}$ . De esta gráfica calcularemos una recta aproximada que modele el comportamiento de los datos, la pendiente de esta recta será el valor del factor de atenuación de la antena con la que estemos trabajando.

#### ALGORITMO PARA LA OBTENCIÓN DEL FACTOR DE ATENUACIÓN

Después de la instalación de las antenas en los lugares óptimos para garantizar la cobertura de todos los puntos, se procede a la realización de las mediciones.

Se toma un *tag*, cuya potencia de transmisión es conocida. Se hace una división de cinco segmentos entre dos antenas, es decir que para las últimas dos rondas de medidas, el *tag* estará más cerca de una segunda antena que de la antena con la que estamos trabajando.

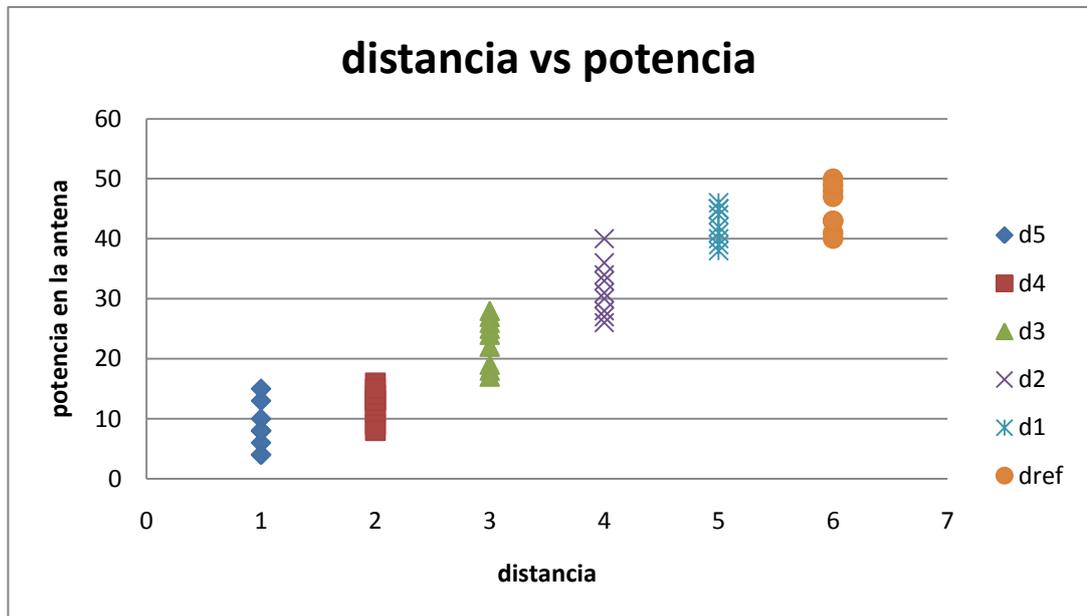
Para una primera antena se ubica el *tag* a un metro de distancia de ella para tener el valor de la potencia de referencia que necesitamos tener como dato para los cálculos. La propuesta es tomar medidas con una separación de 10 grados entre una y otra manteniendo constante la distancia entre el *tag* y el receptor. Esta distancia se irá modificando de acuerdo a la división que se hizo inicialmente. Al final de la lectura de cada antena, tendremos un total de 180 mediciones.

Cada uno de los valores podrá ser distinto de los demás ya que para cada lectura, aún para un mismo radio, las condiciones de vecindad de la antena no serán necesariamente los mismos debido a los objetos que la rodean.

La gráfica que se tendrá con los valores medidos tendrá más o menos la forma de la gráfica 4.1

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.



Gráfica 4.1 Distancia contra potencia.

Se ve que para un mismo valor de distancia, tenemos diferentes valores de potencia. Los datos que se presentan en esta gráfica son simplemente ilustrativos y no corresponden a ningún tipo de mediciones.

Ya se ve que es una tarea complicada obtener un valor de una recta considerando que los puntos no guardan una relación lineal entre sí. Este problema se resuelve con la ayuda del método numérico de mínimos cuadrados para obtener una recta aproximada.

La interpretación de esta recta es para nosotros el comportamiento de la señal para esa antena. En otras palabras, la gráfica nos muestra el comportamiento de la señal en la vecindad de dicha antena. La pendiente de la recta nos dice los valores promedios que afectan la señal. La dispersión nos dice de qué manera se están comportando los efectos multitrayectoria. El valor de la pendiente será entonces el valor del factor de atenuación para dicha antena.

Con la obtención de esta recta tenemos entonces el valor del factor  $\alpha$ . Tenemos entonces:

$$y = \alpha x + b ; \text{ es decir, } P_{RX} = \alpha d + b$$
$$L = L_0 + 10\alpha \cdot \log(d)$$
$$L = P_{TX} - P_{RX}$$

Vemos entonces que tenemos todos los elementos para despejar la distancia de esta fórmula y dejarla en función de los otros parámetros, todos conocidos ahora.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

$$L = L_0 + 10\alpha \cdot \log(d)$$

$$d = \sqrt[10\alpha]{10^{L-L_0}}$$

Los valores de  $\alpha$  para cada antena, nos permiten tener una caracterización específica de estas. Es indispensable tener mucha confianza en el valor de  $\alpha$  ya que se ve claramente la dependencia de la distancia con este factor.

Con esta fórmula se tendrá una manera de calcular la distancia entre emisor y receptor, teniendo como parámetros de entrada el valor de la pérdida  $L$  que es una variable que se modificará con la distancia y que es función de la potencia de transmisión y de recepción, un valor constante de  $L_0$  y un valor constante de  $\alpha$  para una misma antena, valor que será diferente para cada antena del sistema.

El valor de esta distancia, así como los valores conocidos de las coordenadas de las antenas que están leyendo dicho valor, son los parámetros que nos permitirán determinar las coordenadas desconocidas del tag que estamos tratando de localizar.

#### ALGORITMO PARA LA LOCALIZACIÓN

El método que usamos para la localización de los dispositivos es triangulación. Esto lo hacemos con el uso de ecuaciones sencillas de geometría analítica.

Después de la recepción y cálculo de los valores necesarios para la determinación de las coordenadas, el siguiente paso es determinar la procedencia de esos valores.

Vemos que la posición del tag es función de varias variables:

$$(x, y)_{tag} = f(x_1, y_1, d_1, x_2, y_2, d_2, x_3, y_3, d_3, \dots, x_n, y_n, d_n)$$

El coordinador central, quien será el encargado de realizar todos los cálculos necesarios, recibe de la antena 1, el valor de sus coordenadas y el valor RSSI. Ya vimos cómo este último parámetro nos permite determinar el valor de la distancia entre el tag y la antena. Tenemos entonces una primera terna de valores. Otras dos ternas de valores serán recibidas y usadas para los cálculos.

El coordinador central asocia cada terna con un tag, ya que entre la información que llega a la antena y que después es transmitida al coordinador central, está un número ID único que identifica a dicho tag. Este número es reconocido por el coordinador central y lo asocia con las ternas de valores que lo incluyan. De esta manera el coordinador central sabe que está realizando los cálculos para un tag específico.

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

El coordinador tiene entonces los siguientes valores:

Antena 1  $\rightarrow (x_1, y_1)$  y  $d_1$

Antena 2  $\rightarrow (x_2, y_2)$  y  $d_2$

Antena 3  $\rightarrow (x_3, y_3)$  y  $d_3$

Los valores desconocidos son el valor de  $x$  y de  $y$  de las coordenadas del tag. Sabemos que la fórmula para calcular la distancia entre dos puntos es:

$$d = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}$$

En nuestro caso el valor de la distancia va asociado al valor del par de coordenadas, es decir:

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}$$

Nuestras incógnitas son los valores de  $x$  y de  $y$ . Entonces, desarrollamos esta ecuación:

$$\begin{aligned} (d_1)^2 &= (x_1)^2 - 2x_1x + (x)^2 + (y_1)^2 - 2y_1y + (y)^2 \\ (x)^2 + (y)^2 - 2x_1x - 2y_1y + \boxed{(x_1)^2 + (y_1)^2 - (d_1)^2} &\stackrel{=}{=} 0 \rightarrow ec.1 \end{aligned}$$

El mismo proceso se realiza para las antenas dos y tres.

$$\begin{aligned} (d_2)^2 &= (x_2)^2 - 2x_2x + (x)^2 + (y_2)^2 - 2y_2y + (y)^2 \\ (x)^2 + (y)^2 - 2x_2x - 2y_2y + \boxed{(x_2)^2 + (y_2)^2 - (d_2)^2} &\stackrel{=}{=} 0 \rightarrow ec.2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (d_3)^2 &= (x_3)^2 - 2x_3x + (x)^2 + (y_3)^2 - 2y_3y + (y)^2 \\ (x)^2 + (y)^2 - 2x_3x - 2y_3y + \boxed{(x_3)^2 + (y_3)^2 - (d_3)^2} &\stackrel{=}{=} 0 \rightarrow ec.3 \end{aligned}$$

$$(x_1)^2 + (y_1)^2 - (d_1)^2 = a$$

$$(x_2)^2 + (y_2)^2 - (d_2)^2 = b$$

$$(x_3)^2 + (y_3)^2 - (d_3)^2 = c$$

Transmisión y localización de dispositivos.

Ahora restamos la ecuación 2 a la ecuación 1

$$(x)^2 + (y)^2 - 2x_1x - 2y_1y + a = 0$$

-

$$(x)^2 + (y)^2 - 2x_2x - 2y_2y + b = 0$$

-----

$$(2x_2x - 2x_1x) + (2y_2y - 2y_1y) + (a - b) = 0$$

$$x(2x_2 - 2x_1) = (b - a) - (2y_2y - 2y_1y)$$

$$x = \frac{(b - a) - (2y_2y - 2y_1y)}{2x_2 - 2x_1} \rightarrow ec.4$$

De esta manera tenemos una función de  $x$  en términos de la variable desconocida  $y$  y los otros valores conocidos.

Ahora a la ecuación 3 le restamos la ecuación 2.

$$(x)^2 + (y)^2 - 2x_3x - 2y_3y + c = 0$$

-

$$(x)^2 + (y)^2 - 2x_2x - 2y_2y + b = 0$$

-----

$$(2x_2x - 2x_3x) + (2y_2y - 2y_3y) + (c - b) = 0 \rightarrow ec.5$$

Sustituyendo la ecuación 4 en la ecuación 5:

$$\frac{x_2(b - a) - x_2(2y_2y - 2y_1y)}{x_2 - x_1} - \frac{x_3(b - a) - x_3(2y_2y - 2y_1y)}{x_2 - x_1} + 2y_2y - 2y_3y + (c - b) = 0$$

$$y \left( \frac{2y_1x_2 - 2y_2x_2}{x_2 - x_1} + \frac{2y_2x_3 + 2y_1x_3}{x_2 - x_1} + 2y_2 - 2y_3 \right) = \frac{x_3(b - a)}{x_2 - x_1} - \frac{x_2(b - a)}{x_2 - x_1} - (c - b)$$

$$y = \frac{\frac{x_3(b - a)}{x_2 - x_1} - \frac{x_2(b - a)}{x_2 - x_1} - (c - b)}{\frac{2y_1x_2 - 2y_2x_2}{x_2 - x_1} + \frac{2y_2x_3 + 2y_1x_3}{x_2 - x_1} + 2y_2 - 2y_3}$$

Esta ecuación nos da el valor de la coordenada  $y$  del tag.

Sustituyendo este valor de  $y$  en la ecuación 4 tenemos el valor de la coordenada  $x$ , con lo que se completa el proceso de localización.

## Capítulo 4.

### Transmisión y localización de dispositivos.

---

$$y = \frac{\frac{x_3(b-a)}{x_2-x_1} - \frac{x_2(b-a)}{x_2-x_1} - (c-b)}{\frac{2y_1x_2 - 2y_2x_2}{x_2-x_1} + \frac{2y_2x_3 + 2y_1x_3}{x_2-x_1} + 2y_2 - 2y_3}$$
$$x = \frac{(b-a) - (2y_2y - 2y_1y)}{2x_2 - 2x_1}$$

En la figura 4.2 se presenta un pequeño esquema donde se muestra una parte de la instalación del hospital. Los puntos amarillos indican la posición de las antenas. El punto rosa muestra una posición desconocida del *tag* que queremos localizar. Los radios de cobertura de las antenas están indicados con los círculos que se aprecian. El área que se presenta es de aproximadamente 51 metros cuadrados. La cobertura de todos los puntos está garantizada gracias a otras antenas que no aparecen en este esquema porque están en las partes adyacentes a él.

En este esquema se ve aplicado el algoritmo descrito. La antena 1, 2, 3 y una cuarta que está en la esquina inferior izquierda, tienen al *tag* dentro de su radio de cobertura. Cada una de las tres antenas de nuestro ejemplo reciben la señal del *tag* vía inalámbrica; estas antenas envían al coordinador central su propia ubicación, el ID del *tag* y el valor leído de RSSI. Después de esto, el coordinador central se encarga de hacer las operaciones que se han comentado con anterioridad para determinar la posición del paciente que porta el brazalete con el *tag*

Transmisión y localización de dispositivos.

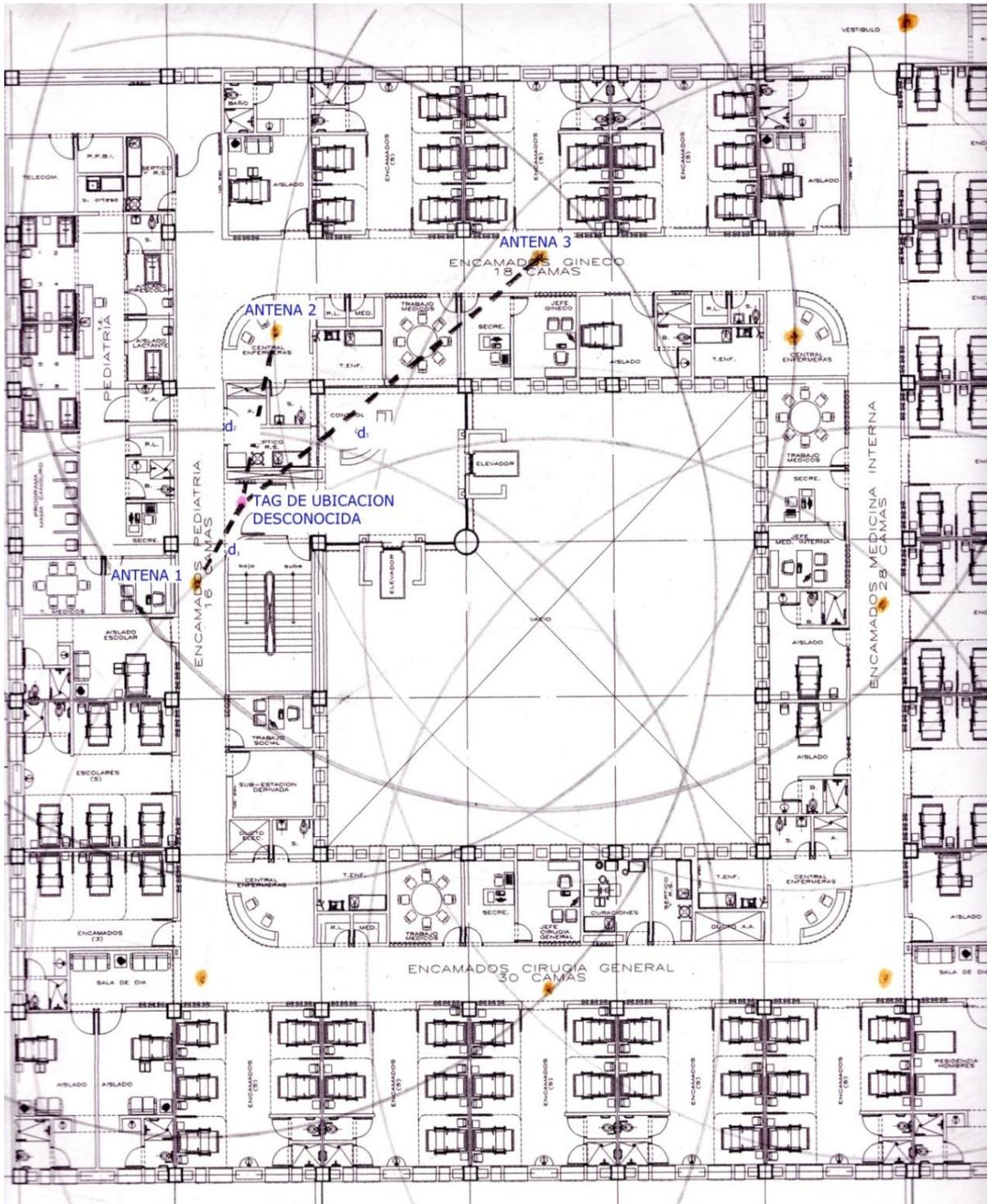


Figura 4.2 Diagrama de un hospital con propuesta de sistema de localización.