



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

# Sistema de Control Basado en la Percepción de Unidades Móviles y Reacciones Anticipadas Mediante el Uso de Tecnologías Inalámbricas

Seminario de Titulación para Optar al Título de Ingeniero Civil en Automatización

Autor: Joaquín Alder Silva Faúndez

CONCEPCIÓN-CHILE  
2011



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

# **Sistema de Control Basado en la Percepción de Unidades Móviles y Reacciones Anticipadas Mediante el Uso de Tecnologías Inalámbricas**

**Autor: Joaquín Alder Silva Faúndez**

**Profesores Guía: Cristian Durán Faúndez.  
Cristhian Aguilera Carrasco.**

**CONCEPCIÓN-CHILE**  
**2011**



# Resumen

---

La presente tesis expone el estudio, desarrollo e implementación de un sistema de posicionamiento de baja complejidad basado en tecnología inalámbrica, aplicado sobre un brazo robot para dotarlo de la capacidad para reaccionar de forma anticipada ante la proximidad de un objeto a manipular. La estimación de proximidad de los objetos fue logrado mediante la incorporación de nodos inalámbricos basados en el estándar IEEE 802.15.4 los cuales permitieron entregar información sobre la intensidad de potencia con la cual se recibía una transmisión de datos (RSSI).

Previo al desarrollo fue realizado un estudio para comprobar el comportamiento de las señales inalámbricas y establecer las condiciones sobre las cuales es posible realizar una estimación de proximidad satisfactoria. El estudio abarco tanto el efecto provocado por aspectos relacionados a los nodos involucrados como condiciones físicas del lugar de experimentación. De los resultados obtenidos se estableció un área de operación alrededor del nodo receptor sobre la cual se consideraron válidas las estimaciones de distancias hechas por el sistema. Esto debido a la inestabilidad que presenta el indicador de RSSI bajo un ambiente cerrado.

El desarrollo del sistema de posicionamiento y reacción anticipada se basó sobre un modelo matemático que relaciona la intensidad de potencia recibida con la distancia a la cual transmite un nodo situado junto al objeto de interés. El estado oculto del sistema es determinado mediante el filtro de Kalman extendido. Esto permitió estimar la distancia y velocidad del objeto de interés. A partir de estas estimaciones se determina el tiempo que le resta al objeto para aproximarse hasta el robot. Esta información es procesada por un controlador para determinar el instante en el cual el robot opera y manipula el objeto.

La última fase del trabajo aplicó una serie de pruebas al sistema para medir su desempeño. A partir de estos resultados se demuestra entre otras conclusiones la viabilidad de emplear las señales inalámbricas para la estimación de distancia en ambientes cerrados, considerando algunas restricciones.

# Índice

Introducción .....	5
Contenido .....	7
Objetivos.....	8
I.    Objetivo general.....	8
II.   Objetivos específicos .....	8
1.    Estado del Arte .....	9
1.1.  Introducción.....	9
1.2.  Problemática de Control Anticipativo .....	10
1.3.  Contexto Global.....	11
1.4.  Mecanismos de Solución Empleados en la Industria .....	13
1.5.  Localización y Posicionamiento .....	14
1.5.1.  Propiedades del Posicionamiento y Localización .....	15
1.5.2.  Métodos de Localización y Medición de Distancia.....	16
2.    Marco Teórico.....	19
2.1    Radio Frecuencia .....	19
2.1.1.  Introducción.....	19
2.1.2.  Comportamiento de las Ondas de Radio.....	20
2.1.3.  Atenuación de las Ondas.....	22
2.1.4.  Propiedades Ópticas de las Ondas.....	23
2.1.5.  Modelamiento de Pérdidas por Trayectoria .....	27
2.2.  Estimación de Distancias en Sistemas Inalámbricos.....	28
2.2.1.  Tiempo de Arribo (ToA).....	28
2.2.2.  Diferencia de Tiempo de Arribo (TDoA).....	29
2.2.3.  RSSI.....	30
2.2.4.  Determinación de Ángulos.....	30

2.3.	Estimación Mediante RSSI.....	31
2.3.1.	Introducción.....	31
2.3.2.	Modelamiento.....	32
2.3.3.	Algoritmos de Estimación.....	33
2.3.4.	Sistemas Desarrollados. ....	36
2.3.5.	Consideraciones en el Uso de RSSI.....	40
2.4.	Dispositivos IEEE 802.15.4 .....	42
2.4.1.	Introducción.....	42
2.4.2.	Red Inalámbrica de Área Personal (WPAN).....	43
2.4.3.	Tipos de Dispositivos .....	43
2.4.4.	Topología .....	44
2.4.5.	Arquitectura.....	45
3.	Caso de Estudio .....	46
3.1.	Problemática .....	46
3.2.	Descripción del Entorno .....	48
3.3.	Dispositivos Empleados .....	51
3.3.1.	SCORBOT-ER 9 .....	51
3.3.2.	Sistema de Transporte.....	52
3.3.3.	Módulos Inalámbricos .....	53
3.4.	Estudio Comportamiento RSSI .....	54
3.4.1.	Objetivo de los Experimentos .....	54
3.4.2.	Descripción de los Experimentos.....	55
3.4.3.	Resultados y Observaciones .....	64
3.4.4.	Conclusiones.....	72
4.	Desarrollo del Sistema.....	74
4.1.	Introducción.....	74
4.2.	Alcances.....	74

4.3.	Estudio Sistema CIM.....	75
	Especificaciones Conveyor.....	75
4.4.	Requisitos.....	79
4.5.	Diseño del Sistema .....	80
	4.5.1. Visión General.....	81
	4.5.2. Modelo del Sistema.....	81
	4.5.3. Filtrado de la Señal .....	89
	4.5.4. Estimación Tiempo de Arribo .....	97
	4.5.3. Controlador Sistema. ....	98
	4.5.4. Obtención de RSSI desde Dispositivos XBee.....	103
	4.5.5. Configuración Dispositivos Inalámbricos .....	106
	4.5.6. Configuración manipulador y transporte .....	109
	4.5.7. Software del Sistema .....	111
	4.5.8. Esquema del Sistema Implementado .....	116
5.	Pruebas de Sistema .....	117
	5.1. Introducción.....	117
	5.2. Calibración del Sistema.....	117
	5.3. Comparación de Filtros .....	120
	5.4. Descripción Pruebas de Sistema Realizadas .....	122
	5.4.1. Prueba de Desempeño Individual .....	123
	5.4.2. Prueba de Desempeño Global.....	123
	5.4.3. Degradación de Estimación por Disminución de Tasa de Muestreo. ....	124
	5.5. Resultados .....	125
	5.5.1. Prueba de Desempeño Individual.....	125
	5.5.2. Prueba de Desempeño Global.....	126
	5.5.3. Degradación de Estimación por Disminución de Tasa de Muestreo. ....	127
	5.6. Observaciones .....	128

6.	Conclusiones .....	131
7.	Trabajo Futuro .....	134
7.1.	Mejoras al Sistema.....	134
7.2.	Estudios Restantes al Sistema.....	135
8.	Bibliografía .....	136
	Anexo.....	141
A.	Resultados Experimentos .....	142
B.	Módulos Inalámbricos XBee .....	158
1.	Introducción.....	158
2.	Características .....	159
2.1.	Tipos de dispositivos.....	159
2.2.	Topología de red .....	160
2.2.	Direccionamiento .....	161
2.3.	Modos de operación.....	162
2.4.	Especificaciones técnicas.....	163
C.	Configuración Módulos XBee .....	164
1.	Driver.....	164
2.	Configuración de XBee con X-CTU.....	164
3.	Configuración en modo de comandos.....	169
3.1.	Configuración modo transparente.....	169
3.2.	Configuración en modo API.....	171
4.	Aplicaciones .....	173
4.1.	Transmisión de datos en modo Trasparente.....	173
4.2.	Transmisión de datos en modo API.....	179

# Introducción

---

Los avances en la miniaturización de los componentes electrónicos, el desarrollo de modernas técnicas de construcción y el avance en tecnologías de comunicación han permitido la creación de dispositivos inalámbricos cada vez más eficientes, de menor tamaño, mayores prestaciones y un menor consumo energético. Este desarrollo ha permitido que muchas tecnologías, antes inaccesibles estén al alcance del público en general. Esto ha permitido darnos cuenta de la importancia que poseen algunas tecnologías junto a las mejoras y ventajas que posee su aplicación. Recientemente ocurrió con el acceso a las masas de la telefonía celular lo que nos permitió darnos cuenta de la importancia de estar conectados.

En la actualidad otra de las tecnologías que se introducen fuertemente en la vida cotidiana son los sistemas de posicionamiento global o GPS incorporados en una gran cantidad de aparatos móviles. Esto ha puesto en la palestra el tema del posicionamiento aun cuando éste se ha venido desarrollando desde hace muchos años.

El sistema de posicionamiento global se ha transformado en uno de los sistemas de posicionamiento más conocidos y usados en el mundo. Su uso puede verse en los sistemas de transporte público como buses, trenes y en sistemas de navegación de aviones y barcos.

La importancia de conocer la ubicación de los objetos ha llevado a la aplicación de las tecnologías de posicionamiento a sectores como el industrial y el minero. Sobre este último pueden verse desarrollo de tecnologías que han permitido a los camiones de transporte en las minas de cobre, ser manejados de forma autónoma. En el sector industrial puede verse el uso de sistemas de posicionamiento que difieren al tradicional GPS. Un ejemplo de esto son los sistemas de posicionamiento desarrollados por la empresa Ubisense el cual mediante el uso de

radiofrecuencia permiten la estimación de posición para diversas aplicaciones en entornos cerrados.

Las limitaciones de los sistemas de posicionamiento basados en satélites impiden su uso en ambientes cerrados esto conlleva al empleo de diversas técnicas como las basadas en ondas de radio o sonido para lograr el posicionamiento en este tipo de ambientes.

Debido a la importancia que posee este campo y su aplicación al sector industrial es que se desea poseer un sistema de posicionamiento de baja complejidad basado en tecnologías inalámbricas que permita lo anterior.

Con miras de lograr dicho propósito se han desarrollado en la universidad estudios previos para evaluar la factibilidad de obtener datos útiles para el posicionamiento de nodos inalámbricos empleando tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4. El resultado de tal estudio junto a otros que se mencionan durante el transcurso de este trabajo, demuestran la factibilidad de esta tesis. Sin embargo a pesar de lo anterior aún no existe un método que permita un posicionamiento exacto de un objeto.

Para concretar la tarea anterior se inicia el desarrollo de un sistema de posicionamiento en un ambiente simple y acotado como es el laboratorio de sistemas automatizados de producción CIMUBB. En este lugar existe un sistema industrial a pequeña escala con un ciclo productivo repetitivo.

A partir de este desarrollo se desea implementar un sistema de reacción anticipada que permita reducir los tiempos muertos del sistema CIM, al dotar a un robot del sistema con la capacidad de reaccionar de forma anticipada ante la llegada de un objeto de interés. Lo anterior basado en la noción de proximidad que le brindara los nodos inalámbricos.

## Contenido

El presente trabajo se divide en 8 capítulos en los cuales se desarrollan diferentes temas. El capítulo 1 o “estado del arte” se explica brevemente los desarrollos realizados en materia de posicionamiento y la real importancia que este posee. El capítulo 2 establece el marco teórico del trabajado en el cual se exponen los fundamentos de las ondas de radio frecuencia, sus propiedades y características, así como las formas en las que el medio las afecta. Junto a lo anterior se exponen los métodos y bases del posicionamiento.

El capítulo 3 se centra en la problemática a enfrentar describiendo el problema, el entorno de trabajo y los elementos a utilizar durante el desarrollo del sistema. Posteriormente se realiza un estudio sobre el comportamiento de las señales inalámbricas en el entorno de trabajo.

El capítulo 4 describe el desarrollo de la solución al problema planteado. Se expone la solución global y los diversos componentes del sistema.

El capítulo 5 expone las pruebas realizadas al sistema para medir su desempeño y los resultados logrados.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo desarrollado. Posteriormente en el capítulo 7 se indican las propuestas de mejora para el sistema y aspectos en cuales aún se debe desarrollar.

# Objetivos

---

## I. Objetivo general

Estudio e implementación de algoritmos de control para brazo robótico que considere información acerca de la distancia de los objetos a manipular proporcionados por dispositivos inalámbricos basados en el estándar IEEE 802.15.4.

## II. Objetivos específicos

- Estudio de relación entre RSSI y distancia de transmisión en dispositivos basados en el estándar IEEE 802.15.4.
- Implementación de experimentos que permitan la obtención de datos utilizables para análisis de relación entre RSSI y distancia.
- Estudio técnicas de control para robot que integren la estimación de distancia de los objetos a manipular.
- Implementación y comparación de algoritmos de control para robot Scrobot-ER 9 que integren la estimación de distancia.

# 1. Estado del Arte

---

## 1.1. Introducción

La anticipación es un proceso que el hombre realiza continuamente durante su existencia. Muchas veces sin ser consciente de este acto. Cruzar una calle con tráfico, atrapar un objeto en caída, etc. Son solo ejemplos simples de acciones que involucran procesos tan complejos como predicción de trayectoria, estimación de posición, entre otros. La capacidad para anticipar un suceso guarda estrecha relación con las experiencias vividas, es decir se conoce con antelación el comportamiento del fenómeno enfrentado.

El hombre trata continuamente de emular esta capacidad para aplicarla en diversos aspectos de la vida. Como por ejemplo pronosticar el clima, estimar el comportamiento del mercado de valores o bien estimar los tiempos de llegada de aviones. Todos parten de la base de un conocimiento previo, de un modelo que describe su comportamiento.

Si pensamos en el comportamiento de objetos móviles y la forma de anticipar su comportamiento. Será relevante disponer de información referente a su ubicación y el momento en el cual un evento podrá ocurrir. Normalmente las personas obtienen esta información de forma visual. La ingeniería ha emulado este método con los sistemas de visión artificial. Sin embargo su uso se ve limitado por ciertas restricciones como iluminación del área de interés, ubicación de las cámaras, obstrucción del campo visual, tipo material, etc. Esto suma interés al desarrollo de tecnologías capaces de entregar datos útiles para posicionar a un objeto de interés.

De esta forma es como en la segunda guerra mundial se puede observar el desarrollo del sistema de radar para la detección de aviones y barcos. Avances más contemporáneos los podemos ver en el sistema de posicionamiento global (GPS) que permiten conocer nuestra ubicación sobre la tierra. Otros avances se

dan en el área de visión artificial los cual permiten obtener información del medio para ser aplicados por ejemplo en navegación autónoma de vehículos y robots.

A través del tiempo se han llevado las tecnologías de ubicación a diversas áreas con el fin de obtener información que permita anticipar una respuesta. Algunas de las áreas de gran relevancia en la cual se aplican estas tecnologías es en el sector industrial, transporte y la minería

## **1.2. Problemática de Control Anticipativo**

Desde los comienzos de los sistemas productivos. Se ha buscado las formas de reducir los costos operativos y minimizar los tiempos de proceso empleado. Primero con la incorporación de las máquinas, luego con las líneas de producción en serie. Ya en la actualidad podemos ver la incorporación de los sistemas informáticos en la industria

Los sistemas de producción en serie son eficientes y veloces en la producción de un producto normado, pero poco flexibles al momento de generar una mayor variedad de productos. La introducción de la robótica y máquinas de propósito general como máquinas de control numérico, permiten mayor flexibilidad en la producción al permitir variar su forma de operación.

Si bien los sistemas productivos flexibles poseen mayores ventajas al adaptarse a los requerimientos del mercado poseen la desventaja de incrementar los tiempos de producción. Las secuencias de operación en las máquinas de propósito general son controladas mediante computadoras las cuales normalmente ejecutan en orden las secuencias de operaciones. En el caso particular de un robot este realiza una acción previa ocurrencia de un evento (termino de otra tarea o cumplimiento de cierta condición). Terminada la tarea este debe esperar un nuevo evento para realizar otra operación.

Los momentos de espera en una máquina (tiempos muertos) son tiempos de proceso desperdiciado. Estas al carecer de inteligencia no poseen los medios para predecir un evento futuro y realizar una tarea que aproveche dicho tiempo muerto.

En esta materia existen soluciones por parte de la industria para otorgar a las máquinas algún grado de percepción de su entorno para anticipar su respuesta ante un evento.

Dotar a una máquina con la capacidad de reaccionar de forma anticipada permite reducir los tiempos de proceso al minimizar los tiempos de espera. Sin embargo esta tecnología tiene asociados costos económicos y de desarrollo. Por lo cual su implementación solo se realiza en la medida que esta sea necesaria. Por ejemplo como medida de seguridad. Se implementan sistemas que permiten informar sobre el ingreso de personas en el área de trabajo de una máquina para que ésta tome las medidas pertinentes. Un caso de interés es la detección o percepción de cercanía de objetos para anticipar una respuesta ante un evento que lo involucre.

### **1.3. Contexto Global**

En los sectores productivos se entiende la importancia de optimizar la producción. En esta materia existen numerosos métodos y teorías que apuntan a la reducción de costos y uso eficiente de recurso. La optimización va desde el punto de vista macro de un sistema hasta el micro optimizando procesos determinados dentro de una línea productiva. Si bien este último punto de vista es de nuestro particular interés no debe olvidarse el contexto global en el cual se enmarca.

Un ejemplo de optimización a gran escala es el caso de la automotriz Toyota. Esta empresa ante un escenario de baja productividad crea y diseña una filosofía de producción que más tarde recibe el nombre de TPS (Toyota Producción System). Este sistema se centra en el flujo continuo de productos a través de procesos de valor agregado. Es decir evitando procesos innecesarios. Este sistema de producción se aplica de forma global a todo ámbito de la empresa (Liker, 2004). Desde el punto de vista de sus procesos Toyota incorpora continuamente nuevas tecnologías en pos de mejorar su producción. Sus plantas automatizadas incorporan un gran número de robot a su línea productiva. Los procesos de montaje de carrocería para los vehículos son llevados a cabo por

manipuladores autónomos (Figura 1.1). La reducción de tiempo en esta actividad se lleva a cabo mediante el paralelismo de las actividades. En una carrocería pueden llegar a trabajar hasta 4 robots de forma simultánea.

Otra forma de optimización es anticipar los movimientos de los robots mediante el conocimiento previo de la tarea realizada. Durante el montaje se realizan tareas repetitivas cuyas trayectorias son conocidas por los operadores. Estos ajustan la programación y los movimientos de los manipuladores para disminuir los tiempos muertos.



Figura 1.1. Montaje automatizado de puertas en un vehículo

El caso de optimización anterior es posible debido al conocimiento previo de la posición de los objetos involucrados a través del tiempo. Cuando lo anterior no es posible es necesario incorporar tecnologías que permitan la obtención de información útil para llevar a cabo dicha tarea. Un ejemplo de esto se da en el área de transporte en los sistemas de control de flota.

En Bogotá Colombia se encuentra implementado un sistema de transporte que incorpora tecnología de posicionamiento global para el control de la flota de buses. El conocimiento de la posición de cada bus permite regular su frecuencia, controlar su velocidad, conocer la ruta y determinar los horarios de las paradas. El centro de control continuamente envía y recibe información desde las máquinas así es posible detectar anomalías en el sistema y tomar las medidas pertinentes. (Trasmilenio S.A., 2011)

## 1.4. Mecanismos de Solución Empleados en la Industria

Las optimizaciones que involucran dotar a un proceso con una noción de su entorno varían dependiendo de la aplicación y del grado de complejidad deseado.

Uno de los mecanismos más simples de implementar es el sistema basado en barreras. Un ejemplo es el sistema de barreras infrarrojas propuesto por la empresa “Protech Systems”. Este emplea un conjunto de emisor y receptor infrarrojo en conjunto con unos espejos como se observa en la Figura 1.2 de esta forma se logra monitorear un área de interés. Generado una señal en el momento que una persona u objeto irrumpe dentro de esta área. Las barreras han sido pensadas para su uso como medida de seguridad (Protech Systems, 2011).

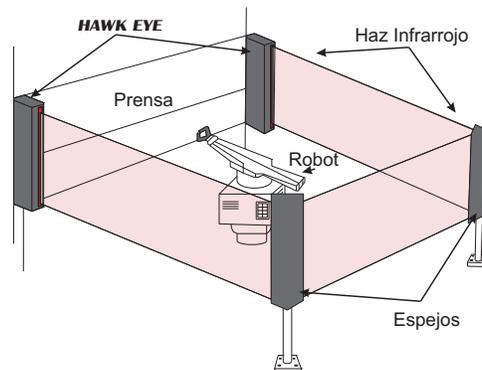


Figura 1.2. Sistema de barrera infrarroja HAWK-EYE S26.

Las barreras también han sido altamente utilizadas en las líneas productivas en serie como es el caso de las embotelladoras (Figura 1.3.a) en las cuales se emplean sensores especiales para la detección de fallas y posterior eliminación del producto afectado. Otro ejemplo son los sistemas de paletizado (Figura 1.3.b) en los cuales un sensor al final del sistema de transporte da aviso de su presencia. Para posteriormente ser depositado en un pallet por un robot manipulador.



Figura 1.3. Aplicación Sensores de barrera. (a) Detección de fallas. (b) Presencia de Productos.

Gran parte de los sistemas de detección incorporados en las líneas productivas otorgan un nivel básico de noción sobre el entorno de las máquinas. Esto generalmente se reduce a la presencia o no del objeto de interés. Si se conoce el comportamiento del objeto se puede dar el caso citado en el punto anterior y programar una acción que anteceda al evento, de lo contrario es necesaria la ocurrencia de éste para generar una acción.

## 1.5. Localización y Posicionamiento

Cuando un evento está próximo a ocurrir es importante conocer la respuesta a las preguntas ¿Dónde? y ¿Cuándo?. Esto nos permite reaccionar de forma adecuada al evento. En determinadas ocasiones se desconoce la respuesta a alguna de estas interrogantes o definitivamente de ambas. Lo importante para responder estas preguntas es tener un conocimiento sobre la ubicación del ente generador del evento.

Si se lanza una roca contra un vidrio se conoce el “donde” ocurrirá el evento sin embargo se desconoce el “cuando” este estará determinado por la distancia y la velocidad con la que se lanza el objeto. Si se lanza la misma roca desde un avión se desconocerán tanto el lugar de caída como en momento en el que ocurre debiéndose conocer todas las variables físicas lograr estimar el punto de impacto. Sin embargo, en el ejemplo anterior con poca información sobre el punto de

lanzamiento es posible localizar el lugar de caída aun cuando no sea posible determinar su posición exacta.

Localización y posicionamiento son términos muy similares. Ambos hacen referencia a ubicar el lugar donde se encuentra un objeto. Sin embargo el posicionamiento es un término mucho más específico en involucra la ubicación de forma exacta del objeto en cuestión.

### **1.5.1. Propiedades del Posicionamiento y Localización**

En el libro “Protocols And Architectures For Wireless Sensor Networks” (Holger & Andreas, 2005). Se definen una serie de propiedades referentes al tipo de localización o posicionamiento deseado. Entre estas tenemos:

- *Posicionamiento Físico o Localización simbólica*: el posicionamiento físico entrega la ubicación exacta del objeto en algún sistema de coordenadas por ejemplo en coordenadas cartesianas o coordenadas geográficas. Por otra parte la localización simbólica entrega la ubicación aproximada de un objeto mediante una referencia a un lugar, sector u otro objeto cercano a este. Por ejemplo: “el vaso esta sobre la mesa” o “el vaso está en la cocina”, etc.
- *Coordenadas absolutas y relativas*: en los sistemas de coordenadas absolutas la posición de un objeto se mide respecto al origen del sistema el cual es un punto predeterminado universal y absoluto para todo el sistema. En un sistema relativo las mediciones se realizan respecto a un punto de referencia que no siempre suele estar en el origen del sistema. Por ejemplo: El teléfono está a 2[m] del muro.

### 1.5.2. Métodos de Localización y Medición de Distancia.

La locación y posicionamiento normalmente son entendidos como medidas de ubicación espacial de un objeto. Es decir, su posicionamiento es realizado considerando las 3 dimensiones. En varias aplicaciones de control ya sea con fines de optimización o seguridad, tal nivel de información no es requerida limitándose en muchos casos a información respecto a la cercanía de un objeto. Esto último puede ser entendido como un posicionamiento unidimensional. Es decir la medida de la distancia que separa a una entidad de otra.

#### Estimación de distancia

En la actualidad existen varias formas de medir la distancia entre dos objetos el más básico de ellos es la medición directa mediante algún método mecánico (como una cinta de medir o contar las revoluciones de una rueda, etc.). Se encuentran disponibles métodos más avanzados para realizar esta tarea que permiten a los sistemas de control disponer de esta información para la toma de decisiones. Algunos de estos métodos son los siguientes:

#### *Sistemas basados en barreras*

Este sistema es uno de los más utilizados en la industria consiste en un emisor luminoso y un foto-receptor. Ambos pueden estar ubicados unos frente al otro o encapsulados dentro de la misma unidad. Entre emisor y receptor existe un haz luminoso el cual al ser interrumpido por un objeto permite su detección. La barrera se ubica a una distancia prefijada (Figura 1.4) de esta forma es posible determinar cuándo un objeto está a una determinada distancia de una máquina.

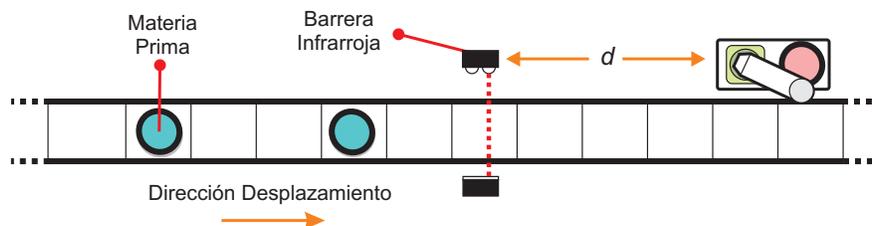


Figura 1.4. Barrera infrarroja.

Si bien este método es simple existe el inconveniente que la barrera o el algoritmo de la máquina debe ser ajustado cada vez que se realiza un cambio en la posición de esta.

### *Ultrasonido*

Este sistema es utilizado principalmente en la medición de altura en líquidos (por ejemplo tanques de petróleo). Su principio de operación se basa en la medición del tiempo de vuelo una señal ultrasónica [Ec. 1.1].

$$d = \frac{1}{2} \cdot (c \cdot ToF) \quad \text{Ec. 1.1}$$

Dónde:

$d$  : Es la distancia al transductor.

$c$  : Es la velocidad del sonido.

$ToF$ : Time of Flight o tiempo de vuelo.

### *Láser.*

Este es un método muy preciso de medición. Varias empresas poseen equipos que utilizan esta tecnología como por ejemplo: Stanley (TLM300) y Bosh (GLR225). El medidor láser utiliza un método de interferómetro para la medición de distancia puesto que la utilización directa de Ec. 1.1 requeriría de osciladores de alta frecuencia.

### *Visión*

Este método consiste en la adquisición de imágenes mediante cámaras digitales y su posterior procesamiento y análisis con el objeto de extraer información útil. Es un campo en constante desarrollo, algunas empresas ofrecen en el mercado sistemas basados en esta tecnología como por ejemplo: National Instrument, Matrox, Leutron Vision, etc. Entre sus ventajas destacan su flexibilidad para adaptarse a diferentes procesos, capacidad para realizar mediciones sin tener

contacto con el objetivo y su alta velocidad de respuesta. Entre sus desventajas encontramos: complejos algoritmos para el análisis de imágenes lo que conlleva a un alto costo computacional, dificultades en la calibración del sistema y la alta dependencia de ambientes controlados para su funcionamiento.

### *Radio frecuencia*

La estimación de distancia utilizando dispositivos inalámbricos es un campo de gran interés debido a la introducción de las redes inalámbricas en los procesos industriales. Este método presenta muchas ventajas así como inconvenientes. El bajo costo y consumo de las nuevas tecnologías basadas en el estándar 802.15.4 ha generado un incremento en los estudios en este campo. Gran parte de estos trabajos se encuentran orientados a la estimación de posición sin embargo estos pueden ser extrapolados a la estimación de distancia.

Varias características de las señales inalámbricas pueden ser utilizadas para este fin como: potencia de la señal recibida, la calidad del enlace, el tiempo de vuelo de la señal entre otras.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Radio Frecuencia

#### 2.1.1. Introducción.

La radio frecuencia es un término utilizado para denotar a una porción del espectro electromagnético que comprende longitudes de onda que van desde los  $10^4 [m]$  hasta los  $10^{-4} [m]$  (Serway, et al. 1999). Esta porción del espectro se utiliza principalmente para telecomunicaciones permitiendo el intercambio de información de forma inalámbrica mediante ondas de radio.

Las ondas de radio son ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin guía artificial. Se componen de campos magnéticos y eléctricos oscilantes perpendiculares entre sí como se aprecia en la Figura 2.1.

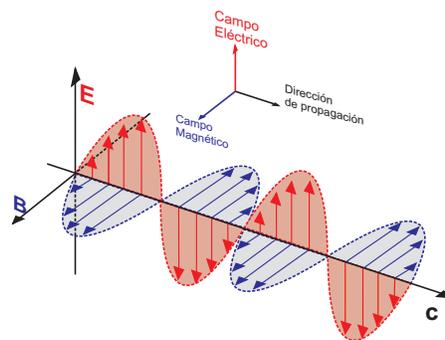


Figura 2.1. Representación onda electromagnética (E: Campo Eléctrico; B: Campo magnético).

El espectro que comprende a la radio frecuencia se encuentra subdividida en bandas de acuerdo a su frecuencia o longitud de onda. Esta subdivisión del espectro se encuentra normada por la UIT<sup>1</sup>. Cada banda posee características que permiten cierto tipo de usos o aplicaciones. Así por ejemplo la banda de HF (Alta frecuencia) se emplea para comunicaciones de todo tipo a media y larga

<sup>1</sup> Unión Internacional de Telecomunicaciones

distancia como radios de onda corta (SW). Una banda de interés en el presente trabajo es UHF (ultra alta frecuencia) usada para comunicaciones celulares, Wifi, Bluetooth, y otros estándares de comunicación digital.

Las ondas de radio permiten una gran cantidad de aplicaciones y usos. Uno de los principales es el envío y recepción de información ya sea digital o analógica como la voz. Sin embargo otras aplicaciones incluyen el estudio de cuerpos distantes a nuestro planeta, navegación y posicionamiento usada por los sistemas GPS, hasta la preparación de alimentos con los hornos de microondas.

### **2.1.2. Comportamiento de las Ondas de Radio.**

Al hablar de ondas de radio es difícil imaginar algo que no es posible ver, sin embargo, el medio está invadido por estas señales. Un fenómeno análogo al comportamiento de las ondas electromagnéticas puede ser observado en las ondas mecánicas como las generadas en un estanque de agua. Al perturbar este medio se generan ondas que se propagan en todas direcciones, a medida que se alejan de la fuente disminuyen en tamaño mientras aumenta su separación entre ellas. Este proceso continúa hasta que las ondas se disipan (Figura 2.2).



Figura 2.2. Ondas en el Agua.

Este tipo de ondas permite tener una visión de la forma en la cual se comportan las ondas de radio aun cuando la naturaleza de las primeras es mecánica y la segunda es electromagnética. Al igual que en el ejemplo las ondas de radio se propagan en todas direcciones desde la fuente (considerando el caso de una fuente isotrópica o ideal). La velocidad de propagación es constante. En condiciones ideales la onda se atenúa a medida que la distancia aumenta siguiendo un patrón lo cual hace predecible su comportamiento. Sin embargo, la presencia de obstáculos genera alteraciones en las ondas debido a fenómenos como la reflexión, difracción, absorción, etc. el nivel de incidencia de estos depende en gran medida de las propiedades de la onda.

El comportamiento de las ondas de radio está determinado por la longitud de onda y energía que posean las ondas electromagnéticas. Esto determina los efectos que se producen al interactuar estas ondas con diferentes objetos y el medio. Como se muestra en las ecuaciones Ec. 2.1 y Ec. 2.2

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$E = h \cdot \nu \quad \text{Ec. 2.2}$$

Dónde  $\lambda$  es la longitud de onda;  $f$  frecuencia,  $h = 6.62606810^{-34} [J \cdot s]$  constante de Planck,  $E$  energía de la onda y  $\nu$  velocidad de propagación. Al tratarse de una onda que electromagnética se considera su velocidad de propagación como la velocidad de la luz. De esta forma se puede observar que a mayor frecuencia la longitud de la onda disminuye y su energía aumenta. A medida que esto último ocurre la onda comienza a tener un comportamiento similar al de la luz lo cual dificulta que esta pueda atravesar estructuras y cubrir grandes distancia. Esto es mencionado por (Tomasi, 2003) al explicar la naturaleza de la luz como una onda electromagnética de alta frecuencia.

De esta forma ondas de baja frecuencia (30KHz a 300KHz) con grandes longitudes de onda permiten comunicaciones a cobertura global en contraparte ondas de ultra alta frecuencia (300MHz a 3GHz) requieren enlaces con repetidores o satelitales para lograr cubrir grandes distancias.

### **2.1.3. Atenuación de las Ondas.**

Las ondas electromagnéticas al propagarse por el espacio libre se atenúan a medida que estas se alejan de la fuente aun cuando no existan obstáculos u otro tipo de interferencias entre emisor y receptor. Los fenómenos que explican este comportamiento se detallan a continuación.

#### **Atenuación**

A medida que las ondas se propagan estas disminuyen su densidad de potencia según la **ley inversa cuadrática**. *Conforme se aleja un frente de onda de la fuente, el campo electromagnético continuo, que es radiado desde esa fuente, se dispersa. Es decir las ondas se alejan más unas de otras y, consecuentemente, el número de ondas por unidad de área disminuye (Tomasi, 2003). Cuando la disminución de densidad de potencia obedece a esta ley estamos en presencia de una atenuación de la onda.*

#### **Dispersión**

La dispersión o *Scattering* es la atenuación de la señal debido a la interacción de esta con las distintas partículas del medio por el cual se propaga. Parte de la energía de la onda es capturada por las partículas las que posteriormente pueden remitirla en cualquier dirección. El grado de incidencia que posee este fenómeno depende del medio por el cual se propaga y de la longitud de onda (Arbelo, 2002).

## Absorción

La absorción es un fenómeno similar a la dispersión sin embargo a diferencia de este último la absorción es un proceso selectivo que genera una pérdida de energía en la onda.

En este fenómeno las partículas adsorben una parte de la energía de la onda la cual no es devuelta al ambiente (Arbelo, 2002). El grado de absorción depende del tipo de partícula así como de las propiedades de la onda. Algunas partículas solo absorben una fracción del espectro electromagnético. Al propagarse las ondas por la atmósfera, éstas se atenúan en parte por la energía absorbida por los gases de la atmósfera. Los principales elementos que adsorben energía son las moléculas de  $O_2$  y  $H_2O$ , sin embargo, esta atenuación es considerable en distancias cercanas a kilómetros, para enlaces de corta distancia puede ser despreciado su efecto. (Hernando Rábanos, 2008).

### 2.1.4. Propiedades Ópticas de las Ondas.

Gran parte de las atenuaciones e interferencias que afectan a las ondas electromagnéticas son provocadas por los diferentes obstáculos y obstrucciones a los cuales debe enfrentarse la señal. El comportamiento de ésta frente a este tipo de escenarios puede explicarse mediante las propiedades de la luz, dada la naturaleza electromagnética de ésta. Las principales propiedades ópticas son: difracción, refracción y reflexión de las ondas.

#### Difracción

La difracción es un fenómeno físico que ocurre en todo tipo de ondas. Se caracteriza por la propagación anómala de las ondas en la proximidad de una abertura o un obstáculo (Tomasi, 2003). Bajo este escenario las ondas tienden a curvarse y esparcirse como se aprecia en la Figura 2.3. Este fenómeno ocurre cuando la longitud de onda es mayor que las dimensiones del objeto que enfrenta.

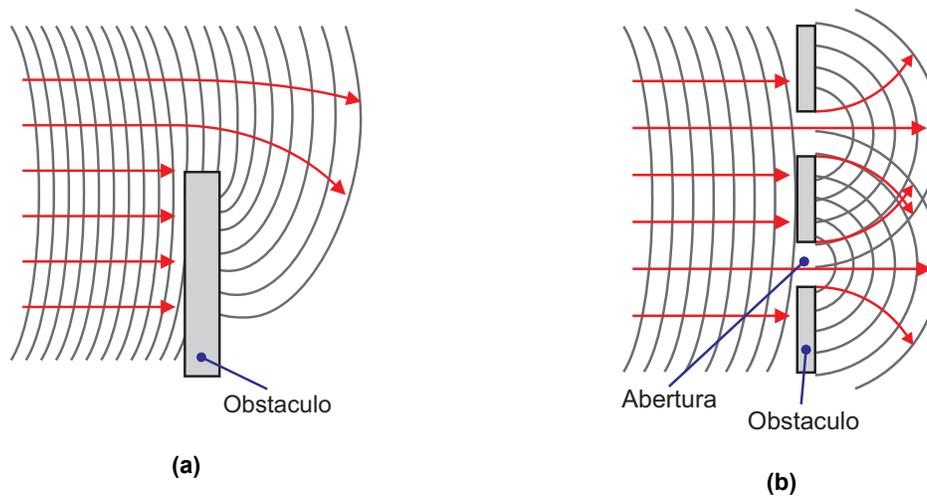


Figura 2.3. Difracción de una onda. (a) Próximo a un borde. (b) Ante una abertura.

## Refracción y reflexión

Cuando una onda que se propaga por el medio incide sobre un obstáculo como se ejemplifica en la Figura 2.4, se produce un cambio en el medio por el cual se propaga. Esto ocasiona que parte de la onda atraviese el obstáculo cambiando su dirección en el proceso. Este fenómeno se conoce como *refracción*. Otra parte de la onda rebota sobre la superficie con un ángulo igual al de incidencia fenómeno conocido como *reflexión*.

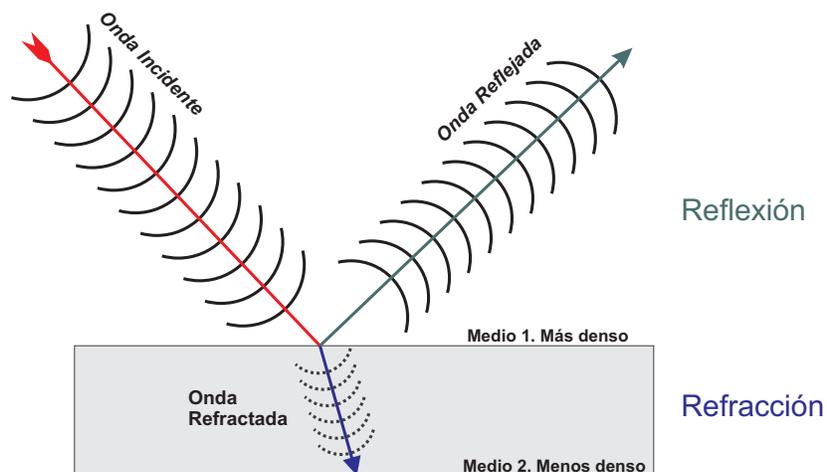


Figura 2.4. Reflexión y Refracción.

La refracción ocurre cuando una onda pasa desde un medio con un índice de refracción a otro con índice diferente. El fenómeno se origina en los cambios de velocidad que experimenta la onda al atravesar diferentes medios (Tomasi, 2003).

La reflexión es un cambio de dirección de la onda. Este cambio ocurre en la superficie de separación de los medios de forma que la onda vuelve al medio original.

### Interferencia

Cuando dos ondas que viajan por un medio se encuentran, estas se superponen produciéndose alteraciones y modificaciones en las ondas. Esto es conocido como interferencia, proceso en el cual dos o más ondas se combinan de forma indeseada produciendo un funcionamiento anormal en el sistema. La onda resultante es la secuela de la suma de las ondas originales (Tomasi, 2003). Si las ondas que se combinan poseen la misma frecuencia y amplitud pero diferente fase, pueden dar lugar a dos tipos de interferencias: constructiva y destructiva (Serway, et al. 1999).

Interferencia constructiva: Este tipo de interferencia suma las amplitudes de las ondas que interfieren originando una onda de mayor amplitud como se muestra en la Figura 2.5.a

Interferencia destructiva: En contraparte a la interferencia constructiva, la destructiva origina una onda de menor magnitud que las ondas originales. Inclusive pudiendo llegar a anularse entre sí como se observa en la Figura 2.5.b

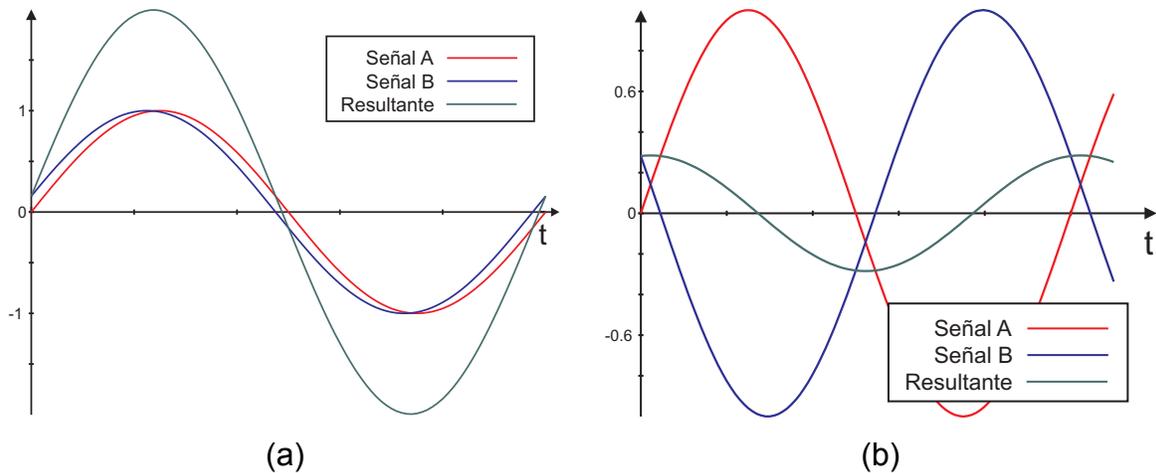


Figura 2.5. Tipos de interferencia: (a) Constructiva; (b) Destructiva.

### Interferencia Multitrayectoria (multipath).

Los fenómenos anteriormente descritos han sido expuestos de forma independiente sin embargo en un escenario real estos sucesos ocurren de forma simultánea. Esto provoca que la señal a medida que se propaga siga múltiples caminos hacia el receptor lo cual origina que estas se desfasen en el tiempo. Esto es lo que se conoce como Interferencia Multitrayectoria o multipath es decir la señal sigue múltiples trayectorias en su camino al receptor originando en el receptor interferencias que dificultan la recepción de la información (Frenzel, et al. 2010).

Al transmitir en interiores de edificaciones este fenómeno se ve incrementado debido a la gran cantidad de obstáculos que pueden existir. Como se ejemplifica en la Figura 2.6 la señal que finalmente recibe el receptor es una suma entre la señal original y múltiples señales reflejadas, difractadas, dispersadas, etc.

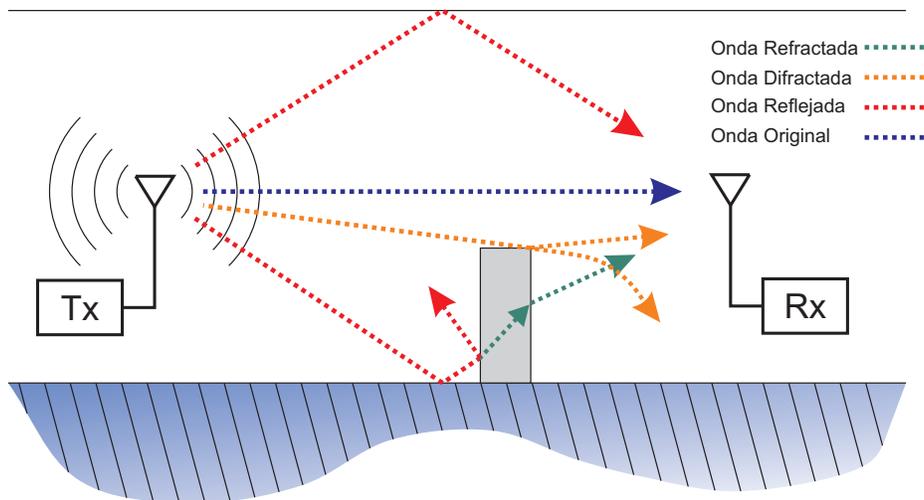


Figura 2.6. Interferencia Multitrayectoria

### 2.1.5. Modelamiento de Pérdidas por Trayectoria

Las ondas de radio a medida que se propagan por el ambiente sufren atenuación e interferencias por diversos factores. Predecir el comportamiento de la onda bajo condiciones reales de propagación es una tarea muy compleja dado el número de variables involucradas, sin embargo existen modelos matemáticos que permiten aproximar las pérdidas que afectan a las ondas de radiofrecuencia.

Si consideramos una onda electromagnética que se propaga en un medio ideal como el vacío, el único fenómeno que la afecta es la disminución en su densidad de potencia por la ley inversa cuadrática. Este fenómeno depende de la distancia y normalmente suele llamársele pérdida por trayectoria (Path loss). La ecuación que describe este comportamiento es la *ecuación de Friis de espacio libre* cuya fórmula se observa en las ecuaciones Ec. 2.3 y Ec. 2.4 (Holger & Andreas, 2005).

$$P_{rcvd}(d) = \frac{P_{tx} \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d_0^2 \cdot L} \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$P_{rcvd}(d) = P_{rcvd}(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde  $P_{tx}$  es la potencia a la cual transmite el emisor,  $P_{rcvd}$  es la potencia recibida a una distancia  $d$  entre transmisor y receptor,  $G_t$  y  $G_r$  son las ganancias de las antenas transmisoras y receptora respectivamente,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $d_0$  es una distancia de referencia tal que  $d \geq d_0$ . La ecuación Ec. 2.3 permite calcular la potencia recibida a partir de las especificaciones tanto de transmisor como de receptor. En tanto la ecuación Ec. 2.4 es una versión simplificada agregando el término  $P_{rcvd}(d_0)$ . Éste es un valor de potencia recibida conocido a una distancia de referencia. Este valor puede ser calculado o medido.

## 2.2. Estimación de Distancias en Sistemas Inalámbricos.

La estimación de distancia será uno de los temas de interés para el desarrollo del presente trabajo, una forma de lograr este cometido fue dilucidada durante el modelamiento de las pérdidas por trayectoria, fenómeno que depende de la distancia a la cual se encuentran transmisor y receptor. Esto nos permite ver la existencia de fenómenos físicos que involucran de forma indirecta la distancia de separación de los dispositivos de interés. A continuación se describen algunos métodos para estimación de distancia a partir de características o propiedades de la onda de radiofrecuencia.

### 2.2.1. Tiempo de Arribo (ToA)

Una onda que viaja a una velocidad constante desde un punto A al B como se ilustra en la Figura 2.7, demora un tiempo determinado en recorrer la distancia que separa estos puntos.

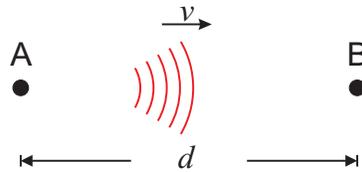


Figura 2.7. Onda viajando entre dos puntos.

La velocidad a la que viaja la onda está determinada por la ecuación Ec. 2.5. Si la velocidad de propagación es conocida y el tiempo puede ser medido entonces es posible determinar la distancia que recorrió la onda.

$$v = \frac{d}{t} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Este principio es el que emplean los sistemas de medición de distancia ultrasónicos y en sistemas de posicionamiento global o GPS.

En sistemas basados en ToA el emisor envía una señal mientras el receptor mide el tiempo que tarda esta en llegar a él. La sincronización entre ambas entidades puede lograrse incrustando una marca de tiempo en la señal o puede realizarla el propio emisor para el caso que este mismo sea el receptor de la señal (sistemas de medición por rebote de señal).

En sistemas con señales de radiofrecuencia la velocidad de propagación es igual a la velocidad de la luz, por tanto medir el tiempo que estas tardan en recorrer distancias pequeñas es una tarea compleja. Se requiere de osciladores de alta frecuencia y un mecanismo para sincronizar emisor y receptor.

### 2.2.2. Diferencia de Tiempo de Arribo (TDoA)

Este método se concibe como una variante del método anterior resolviendo el problema de sincronización y medición de tiempo mediante el uso de dos señales con diferente velocidad de propagación.

Una onda de radiofrecuencia al ser la más rápida se emplea como sincronización y sirve para establecer el inicio del envío de información. Una segunda señal con una velocidad más baja como una señal ultrasónica es transmitida al mismo instante que la señal inalámbrica. El receptor mide el tiempo que tarda en llegar la señal ultrasónica a partir del instante que este recibe la señal inalámbrica. (Holger & Andreas, 2005)

### 2.2.3. RSSI

El indicador de fuerza de la señal de recepción o RSSI por sus siglas en inglés está definido por el estándar IEEE 802.11 como: *un mecanismo por el cual la energía de la señal de RF es medido mediante los circuitos de una interface de red inalámbrica* (WildPackets, 2002). Básicamente es una medida de la potencia con la cual el receptor recibe una señal inalámbrica. Su unidad de medida es decibelios referidos a 1 miliwatt [dBm].

La mayor parte de los dispositivos inalámbricos puede medir este valor y ponerlo a disposición de otra entidad. Dado que el valor de RSSI no requiere hardware adicional es un medio económico para estimar distancia, sin embargo esta medida presenta la dificultad de ser inestable y verse afectada por los obstáculos y el medio.

### 2.2.4. Determinación de Ángulos

Un método alternativo para la estimación de distancia es el basado en trigonometría. Para este caso se introduce el concepto de nodo el cual es un nodo que posee una ubicación determinada y conocida.

Para este método se requieren dos nodos anclas cuya distancia de separación es conocida. Estos nodos poseen antenas especiales con las cuales es posible determinar el ángulo en el cual se recibe una señal enviada por el transmisor.

Luego mediante trigonometría es posible determinar la distancia a la cual se encuentra el transmisor (Figura 2.8). (Holger & Andreas, 2005). El inconveniente de esta técnica radica en la cantidad de nodos requeridos y la complejidad de las antenas utilizadas las cuales pueden ser del tipo rotativas (como antenas utilizadas en radares) o arreglos de antenas direccionales. Esto encarece el costo de este método.

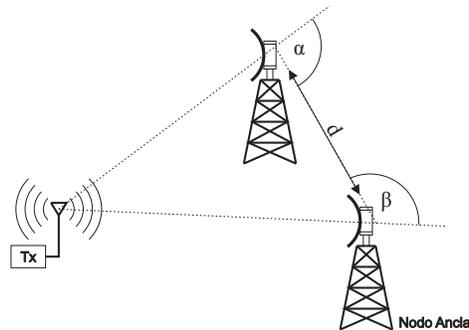


Figura 2.8. Determinación de distancia por trigonometría.

## 2.3. Estimación Mediante RSSI

### 2.3.1. Introducción

Las técnicas para estimación de distancia que permiten una mayor precisión en las estimaciones son las basadas en la medición de tiempos de vuelo de las ondas. Sin embargo la alta velocidad de propagación de éstas ocasiona que el hardware necesario para su realización sea muy costoso. Variaciones de esta técnica implican elementos adicionales los cuales influyen sobre el consumo de los nodos.

El desarrollo del presente sistema tiene como uno de sus fines la estimación de distancia reduciendo los costos por nodo sin requerir de hardware adicional. El método que permite esto último es el basado en la medición del RSSI por parte de un nodo receptor. Las dificultades que posee este método han de ser estudiadas para permitir una estimación adecuada de la distancia entre los nodos de interés.

### 2.3.2. Modelamiento

EL modelamiento del valor de RSSI en los nodos inalámbricos es un proceso que depende de múltiples factores debido a que este valor se ve fuertemente influenciado por el revote de la señal, obstáculos, etc. Como se estudió en el punto 2.1.5 una de las fuentes básicas de atenuación en la señal es la pérdida por trayectoria la cual puede ser modelada en espacio libre según la ecuación Ec. 2.4. Para un entorno diferente al ideal el modelo anterior puede ser generalizado como se muestra en Ec. 2.6.

$$P_{rcvd}(d) = P_{rcvd}(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde  $\gamma$  es el exponente de pérdida por trayectoria. Este valor generalmente varía entre 2 (para espacio libre) y 6 (para construcciones con obstáculos como edificios). La pérdida por trayectoria puede ser expresada en decibeles como:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde  $PL(d_0)$  es la potencia de referencia a una distancia conocida. Este modelo recibe el nombre de log-distance path loss. Una extensión de este modelo ampliamente usada es el modelo lognormal shadowing

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma[dB] \quad \text{Ec. 2.8}$$

En este modelo se incluye la constante  $X_\sigma$  la cual es una variable aleatoria gaussiana de media cero y varianza  $\sigma^2$ . Esta variable aleatoria modela los obstáculos e interferencias como ruido gaussiano. (Holger & Andreas, 2005; Seidel & Rappaport, 1992).

Otros modelos desarrollados para predecir el comportamiento de las señales de RF son:

- Two-Ray ground model (Benkic, et al. 2008).
- Modelo Hata (Orooji & Abolhassani, 2005).
- Modelo COST 231 Hata (Castro, et al. 2010).

Los últimos dos modelos son modelos empíricos para redes GSM (redes de telefonía celular). Existe una amplia variedad de modelos dependiendo del tipo de señal y el ambiente en el cual se desee transmitir.

### **2.3.3. Algoritmos de Estimación**

El uso de RSSI como medio para estimación de distancia es posible dada la relación que este guarda con la distancia de separación entre nodos de interés. El empleo de este valor puede realizarse mediante varias técnicas, que emplean esta relación como por ejemplo el uso de modelos de propagación, mapeo de señal o uso del alcance máximo de transmisión. Algunas de éstas son expuestas por (Holger & Andreas, 2005) en su libro “Protocols And Architectures For Wireless Sensor Networks”. A continuación se describe brevemente algunas de estas técnicas.

#### **2.3.3.1. Análisis de escena**

Esta técnica consiste en el análisis del entorno. Al igual que una huella digital cada lugar posee una característica casi única. Se miden valores de potencia recibida de los nodos ancla a intervalos regulares y en posiciones preestablecidas. Estos valores son almacenados en una base de datos para luego ser comparados con mediciones obtenidas de un nodo de ubicación desconocida y así inferir la distancia a la que se ubica.

### 2.3.3.2. Calibración de modelo

Este método permite obtener una buena aproximación de un modelo del sistema a partir de mediciones del mismo. Al igual que el método anterior es necesario un estudio previo del entorno. Es necesario tomar mediciones de RSSI desde un nodo de referencia a diferentes distancias y graficar estas mediciones. Sobre esta gráfica se realiza el ajuste de parámetros de un modelo esto con el fin de lograr un buen ajuste de éste. Otra alternativa es la generación de un modelo a partir de las mediciones obtenidas mediante regresión o ajuste de curva.

### 2.3.3.3. Filtrado de señal.

Las ondas de radio frecuencia son muy susceptibles a ser alteradas por las condiciones del medio. Esto se ve reflejado como ruido en la señal, el cual puede ser suprimido en algún grado, previo análisis de las características de éste.

#### ***Filtros Digitales***

Los filtros digitales son una categoría de filtros que aplican una función de transferencia discreta sobre una señal de igual naturaleza. Las características de estos son invariables en el tiempo, es decir, una vez diseñado el filtro sus coeficientes no cambian durante su operación.

Estos filtros pueden clasificarse de acuerdo al tipo de respuesta impulsiva que presentan:

- ***Filtro IIR (Respuesta al impulso infinita)***

Los Filtros IIR o también llamados filtros recursivos, debido a que su salida depende de valores anteriores de sí misma, es decir la salida es re-inyectada en la entrada del filtro. Esto permite el diseño de filtros con una respuesta compleja requiriendo un bajo número de coeficientes para su implementación, sin embargo, esta cualidad repercute en la estabilidad del filtro y en su fase la cual no es lineal.

- **Filtro FIR** (*Respuesta al impulso finita*)

En este tipo de filtro la salida puede ser representada como una combinación lineal de muestras presentes y pasadas de la entrada. Esto permite que el filtro sea siempre estable y su respuesta de fase sea lineal, sin embargo, el inconveniente que presenta es el mayor número de coeficientes necesarios para su implementación.

En un capítulo posterior se detalla la implementación de este filtro.

**Filtros Adaptativos**

Los filtros adaptativos son algoritmos que intentan modelar la relación entre señales en tiempo real de forma iterativa (Universidad Nacional de Córdoba, 2009). En este tipo de filtros los parámetros se ajustan constantemente en cada iteración de acuerdo a un algoritmo.

- **Filtro de Kalman**

El filtro de Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proveen una solución recursiva eficiente para la estimación del estado de un proceso, de manera de minimizar el error cuadrático medio. El filtro es muy poderoso en varios aspectos: se sustenta en estimaciones pasadas, presentes e incluso en estados futuros, puede funcionar inclusive cuando el modelo exacto del sistema es desconocido (Welch & Bishop, 2006).

Este filtro predice los valores de los estados del sistema a través de mediciones pasadas y presentes de la salida, la cual presenta ruido, minimizando la variancia del error. La aplicación del filtro supone que es posible describir el sistema de interés mediante un modelo estocástico lineal, un sistema real presenta varias No-linealidades lo que provoca que no sea posible aplicar de forma directa este filtro.

Para el caso de sistema No-lineales existe una modificación del filtro llamada filtro de Kalman extendido el cual linealiza el sistema entorno al estado estimado. Las ventajas y bondades de este filtro pueden verse en los trabajos realizados por

Latvala y otros (2005). “*Using Calibration in RSSI- based Location Tracking System*” y por Caceres y otros (2009). “*Adaptive Location Tracking by Kalman Filter in Wireless Sensor Networks*”. Ambos trabajos emplean el filtro de Kalman extendido (EKF) el segundo de ellos realiza una comparativa entre varios tipos de modelos para la estimación de posición, dos de ellos basados en observación y otros basados en técnicas adaptativas. Ambos métodos presentan una mejor respuesta que el estimador tradicional por mínimos cuadrados (LS), mostrando que este método es una buena estrategia en aplicaciones de posicionamiento y determinación de distancia.

En un capítulo posterior se explica el funcionamiento y la fundamentación de este filtro.

## **2.3.4. Sistemas Desarrollados.**

### **2.3.4.1. Proximidad**

Un nodo Beacon o faro, lo definiremos como un nodo de referencia el cual transmite constantemente una señal. Su ubicación podrá ser fija o móvil. Para este caso su posición será fija y conocida.

Con respecto a este nodo se realizarán las estimaciones de distancia. Éste transmite constantemente un mensaje el cual puede ser escuchado por cualquier nodo que se encuentre dentro del área de alcance del Beacon. Si un receptor escucha los mensajes emitidos por este nodo entonces dicho receptor se encontrará a una distancia igual o menor a ‘ $r$ ’ del nodo Beacon donde ‘ $r$ ’ es el radio de alcance del Beacon (ver Figura 2.9)

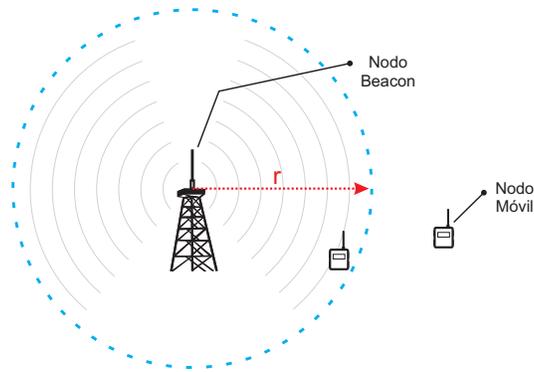


Figura 2.9. Determinaciones de distancia por proximidad.

Este método aun cuando es simple de implementar solo permite saber si el nodo de interés se encuentra dentro del radio de alcance del nodo Beacon, no es posible obtener una mayor resolución.

#### 2.3.4.2. Cricket

Este sistema hace uso de la Diferencia de tiempo de vuelo (TDoA). Un nodo que actúa como Beacon en una ubicación fija, emite simultáneamente una señal de radio y una señal ultrasónica. Con estas señales un nodo puede estimar su distancia midiendo el tiempo que tarda en llegar la señal ultrasónica esto a partir de la recepción de la señal de radiofrecuencia.

El inconveniente de este sistema es poseer un nodo Beacon que pueda transmitir ambas señales y nodos receptores que dispongan del hardware necesario para recibirlas esto repercute sobre el costo de estos nodos así como en su consumo energético.

#### 2.3.4.3. Radar

Este sistema utiliza técnicas de análisis de escena con el fin de estimar posición. Se realiza un estudio midiendo valores de RSSI desde un lugar de interés a diferentes distancias. Ésto permite obtener un patrón el cual es almacenado en una base de datos.

Una vez obtenido un patrón del lugar es posible estimar la distancia a la cual se encuentra un nodo de interés desde el nodo de referencia comparando el valor de RSSI medido con el patrón previamente obtenido.

Este tipo de sistema es empleado por la empresa (Onendis, 2008-2011) utilizando infraestructura Wi-Fi disponible.

#### **2.3.4.4. Basado en modelo de propagación**

Este sistema hace uso de un modelo de propagación que permite caracterizar de mejor forma el entorno donde se realiza la comunicación. Una forma de obtener este modelo es mediante una regresión a partir de mediciones realizadas del entorno. Esto es realizado en “An indoors wireless positioning system based on wireless local area network infrastructure”, (Wang, et al. 2003). Desarrollan un sistema de posicionamiento para interiores, parte del proceso de desarrollo incluye la determinación de un modelo de propagación. Obtiene un modelo empírico mediante una regresión cubica. Resultados experimentales con dicho modelo entregan una precisión de 1 a 3 metros al estimar posición.

Saxena y otros (2008) en “Experimental Analysis of RSSI-based Location Estimation in Wireless Sensor Networks” utiliza un enfoque diferente. Se plantea un modelo matemático para relacionar potencia recibida y distancia, los parámetros de dicho modelo son obtenidos de forma experimental. Se obtienen mediciones de RSSI desde el entorno y a partir de éstas, se determinan los parámetros del modelo que permitan un mejor ajuste de la curva. Los resultados de este método no resultan muy satisfactorios 10% de error en estimaciones en espacio abierto el cual aumenta a un 30% al interponerse un obstáculo

Barsocchi y otros (2007) en “Localization in Open Fields by using RSSI on IEEE 802.15.4” presenta una comparación entre dos modelos de propagación Log-normal y el modelo de dos rayos. Los resultados obtenidos muestran una mejor respuesta de modelo de dos rayos tanto en espacio libre como con pocos obstáculos. Sin embargo el error obtenido es considerable, hasta un 27% de error.

Como se mencionó anteriormente los modelos de propagación depende en gran medida del entorno. Los trabajos expuestos muestran como la eficacia de estos modelos se ve afectada ante cambios en el entorno además la selección de un buen modelo influye directamente en la calidad de la estimación.

#### 2.3.4.5. Multi-Hypotheses tracking

Es un algoritmo probabilístico desarrollado por la empresa (Ekahau, 2011). Este algoritmo es parte de un sistema de posicionamiento en tiempo real para redes con tecnología Wi-Fi. El algoritmo calcula constantemente todas las posibles ubicaciones del objeto de interés y asigna un puntaje a éstos. El cálculo de puntaje depende de factores ligados al entorno, diferencias entre los dispositivos, historial de movimiento y modelos de movimiento. La ubicación con mayor puntaje es considerada como la ubicación más probable del objeto.

#### 2.3.4.6. Mínima potencia de transmisión

Este sistema representa una forma alternativa de utilizar las mediciones de RSSI. El sistema desarrollado por Blumenthal y otros (2008) funciona de la siguiente forma: Un nodo que actúa como referencia transmite una señal la cual va incrementando en potencia a medida que esto ocurre el rango de alcance del nodo de referencia se incrementa. Al igual que en método de proximidad, el nodo receptor recibirá la señal del nodo de referencia cuando la potencia sea suficiente para alcanzarlo (Figura 2.10).

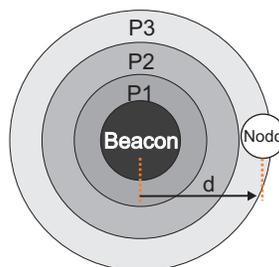


Figura 2.10. El nodo de referencia (circulo negro) incrementa su potencia por pasos  $P1 < P2 < P3$ . El nodo móvil almacena el mínimo valor de potencia con el que recibe el mensaje.

Los resultados experimentales de este sistema denotan que este método posee una mejor respuesta en comparación al modelo de propagación más utilizado (log-normal).

### **2.3.5. Consideraciones en el Uso de RSSI**

La estimación de distancia así como el posicionamiento en redes inalámbricas es un campo que adquiere un gran interés durante el siglo XXI debido a la fuerte penetración de las tecnologías inalámbricas en diversos campos como transporte, telecomunicaciones, industria, medicina, etc. Varios estudios realizados permiten obtener resultados aceptables bajo condiciones específicas ya sean tanto del entorno como de los equipos empleados. Una de las principales dificultades con la que nos encontramos al estimar distancia es la alta variabilidad del valor de RSSI, como fue expuesto anteriormente varios son los factores que influyen en la medición de este valor. Esto conlleva a tomar algunas consideraciones antes de realizar algún trabajo con este parámetro. El valor de RSSI no puede ser utilizado de forma directa para realizar una estimación de distancia es necesario realizar algún tipo de tratamiento previo; se debe considerar la orientación de la antena así también las características de los equipos y el entorno donde se desarrolle el estudio.

#### **Dificultades en estimación de distancia en dispositivos inalámbricos**

Existe una gran variedad de factores que influyen en las características de una comunicación de radio frecuencia. Entre ellas multipath, fading, shadowing, etc. Lymberopoulos y otros (2006) aborda este problema en su estudio. Definen los siguientes factores como los principales que afectan a la medición de RSSI.

Variabilidad del transmisor: ante la presencia de transmisores diferentes estos pueden transmitir a potencias ligeramente diferentes aun cuando ambos sean configurados de igual forma. Esto provoca errores en la lectura de RSSI por parte del receptor

Variabilidad del Receptor: de forma similar a la anterior la sensibilidad de los receptores varia de uno a otro esto también genera alteraciones en las lecturas de RSSI.

Orientación de la Antena: El patrón de radiación de una antena no es uniforme por tanto un cambio en la orientación de transmisor o receptor provocara variación en las lecturas de RSSI. Lo expuesto puede ser observado en la Figura 2.11. En ésta se aprecian los patrones de radiación de módulos XBee de Digi (MaxStream, September 2005).

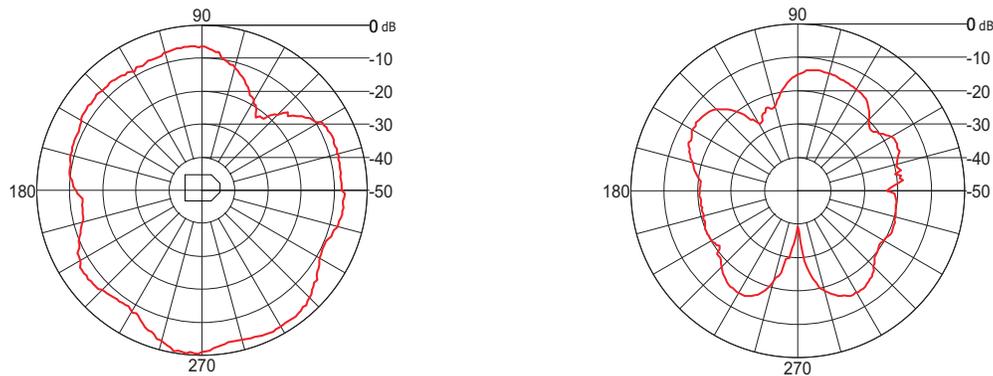


Figura 2.11. Patrones de radiación de antena (Izquierda) XBee Antena Dipolo (Derecha) XBee Antena Chip.

El estudio consideró pruebas para establecer el nivel de variación de RSSI a partir del uso de diferentes dispositivos. Tanto al variar los dispositivos transmisores como en los receptores se observaron diferencias que alcanzaban los 5[dbm].

El efecto generado por la orientación de la antena generalmente no es considerado dentro de los modelos junto con ser difícil de controlar debido a que la orientación entre transmisor y receptor puede cambiar repetidas veces. Esto es observado en los resultados obtenidos por LyMBERopoulos, et al. (2006) en su

investigación; en la cual se demuestra la alta variación que experimenta el valor de RSSI al cambiar la orientación de la antena.

Otro fenómeno, estudiado en “The ZigBee Experience”, (Hyncica, et al. 2006) hace alusión al efecto que provoca el aumento en la potencia de transmisión sobre el valor de RSSI. En espacio abierto el aumento de potencia de transmisión se refleja en un aumento en el valor de RSSI sin embargo en un ambiente cerrado puede ocurrir el efecto contrario. Parte del estudio muestra como el aumento de potencia hasta ciertos niveles comienza a generar el efecto opuesto, es decir a medida que se aumenta la potencia de transmisión el valor de RSSI disminuye.

## **2.4. Dispositivos IEEE 802.15.4**

### **2.4.1. Introducción**

El estándar IEEE 802.15.4 es definido por la IEEE Computer Society como: *estándar que define las especificaciones de la capa física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC) para la conectividad inalámbrica a bajas tasas de transferencia de dispositivos fijos, portátiles y móviles con requerimientos de consumo de batería muy limitados funcionando típicamente en el espacio de operación personal (POS) de 10[m].* (IEEE Computer Society, 2006) . *Algunas características de este estándar son las siguientes:*

- Utiliza una de tres posibles bandas de frecuencia de uso no regulado:
  - 868-915MHz Europa, con 3 canales de comunicación.
  - 902-928MHz Norte América, hasta 30 canales
  - 2450MHz Uso en todo el mundo, hasta 16 canales.
- Emplea el método de acceso al canal CSMA-CA (acceso múltiple por detección de portadora con anulación de colisiones).
- Permite direccionamiento corto de 16 bit o extendido de 64bit
- Soporte para tasas de transferencia hasta 250Kbps en la banda 2450MHz.
- Bajo consumo de potencia.
- Indicador de calidad del enlace (LQI).

## 2.4.2. Red Inalámbrica de Área Personal (WPAN)

Una red de área personal inalámbrica WPAN es una red para comunicación de diferentes dispositivos en distancias cercanas la cual no requiere necesariamente de infraestructura para su operación. Estas características permiten una red de bajo costos y energéticamente eficiente. La red está compuesta de dos tipos de dispositivos que entregan diferentes servicios a la red.

## 2.4.3. Tipos de Dispositivos

Se definen dos tipos de dispositivos de red en base a su funcionalidad.

Dispositivo de funcionalidad completa (FFD): pueden operar en tres modos de servicio: coordinador principal de una red de área personal, coordinador de red o nodo final. Los coordinadores de red se encargan de controlar la asociación de dispositivos a la red y de la retransmisión de mensajes hacia diferentes nodos que se encuentren asociados. El coordinador encargado de crear la red recibe el nombre de coordinador de la PAN, este será un dispositivo único en cada red PAN.

Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD): es un dispositivo con capacidades limitadas por lo cual no puede operar como un coordinador. Este dispositivo solo puede comunicarse con un coordinador de una red lo cual permite un uso reducido de recursos. Este tipo de dispositivos pueden ser muy simples generalmente destinados a captura de información desde sensores durante largos periodos de tiempo.

## 2.4.4. Topología

La conformación de una red inalámbrica de área personal puede ser realizada en una de las topologías disponibles bajo este estándar: Topología estrella o punto a punto como se muestra en la Figura 2.12.

Topología estrella: en esta topología toda comunicación entre dispositivos se realiza mediante el coordinador de la PAN. Este nodo es el encargado de iniciar la red y enrutar todos los paquetes de datos desde un punto de la red a su destino.

Topología punto a punto: en esta topología en contraparte a la anterior los nodos de la red pueden comunicarse de forma directa con cualquier nodo de la red que se encuentre dentro de su rango de alcance. Este tipo de red es mucho más compleja requiriendo el enrutamiento de los datos en caso que el nodo de destino este fuera de alcance del nodo de origen.

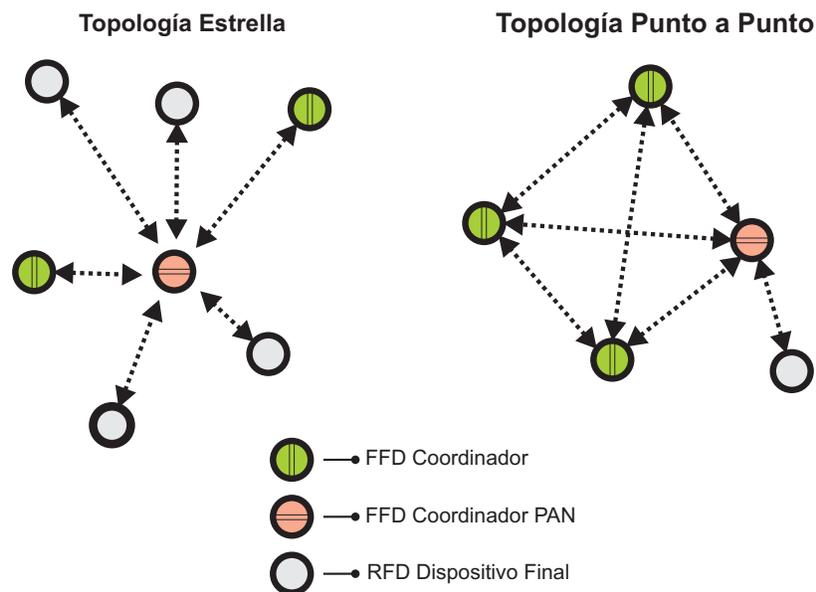


Figura 2.12. Esquema de Topologías estrella y punto a punto.

### 2.4.5. Arquitectura.

IEEE 802.15.4 define las primeras dos capas del modelo OSI: capa física y acceso al medio. La primera de estas contiene el transceptor de radio frecuencia implementando los mecanismos a bajo nivel para el control y operación de éste. La segunda capa proporciona acceso al canal físico para todo tipo de transferencia de datos. Un esquema con la interconexión de estas capas puede observarse en el a Figura 2.13

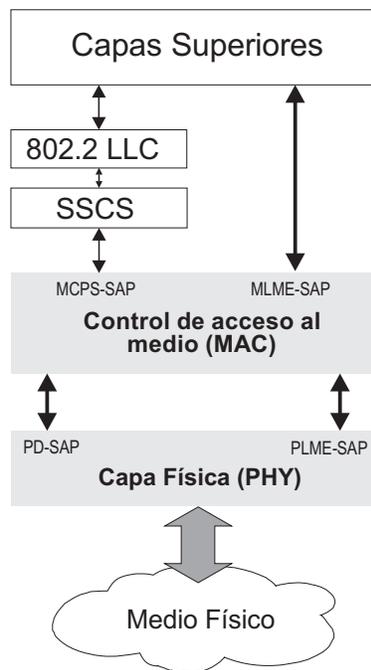


Figura 2.13. Arquitectura IEEE 802.15.4

Los servicios provistos por estas capas se detallan en la especificación del estándar "*Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*". (IEEE Computer Society, 2006).

## 3. Caso de Estudio

---

### 3.1. Problemática

La problemática de optimización de tiempos de proceso en el sector industrial utilizando como herramienta la estimación de distancia, permite abordar el problema desde el punto de vista de minimización de tiempos entre operación y llegada de material a las estaciones de trabajo. Esto llevado al caso particular de estudio dentro del sistema de manufactura flexible CIMUBB será el tema central a desarrollar. Para este cometido el sistema debe permitir acciones anticipativas por parte de un robot manipulador perteneciente a una célula de manufactura, dotándolo de la capacidad de estimar la distancia a la cual se encuentran los pallets con materia prima que se acercan a su célula de trabajo.

La estimación de distancia ha de ser realizada mediante dispositivos inalámbricos basados en el estándar IEEE 802.15.4 debido a la orientación de este estándar con dispositivos de bajo consumo energético y bajo costo.

El capítulo 2 presentó los conceptos básicos sobre transmisiones inalámbricas de información y plantea como método viable y de bajo coste la estimación de distancia mediante el indicador de fuerza de la señal de recepción o RSSI, planteamiento que se emplea como premisa a partir de los resultados obtenidos en “Experimenting with RSSI for the perception of moving units in intelligent flexible manufacturing systems” por (Duran-Faundez, et al. 2010), trabajo que centra sus experimentaciones en la misma línea de trabajo del presente proyecto.

La estimación de distancia mediante el uso del valor de RSSI obtenido desde nodos inalámbricos es un proceso que requiere de un estudio previo del entorno de trabajo para la determinación de las condiciones óptimas de operación en post de los algoritmos a desarrollar.

## Problemática CIM

El sistema de manufactura flexible cuenta con tres células como se muestra en la Figura 3.1. Cada una de estas cuenta con un robot manipulador encargado de manejar diferentes tipos de materiales desde un sistema de transporte constituido por una correa transportadora, hacia su estación de trabajo y viceversa.

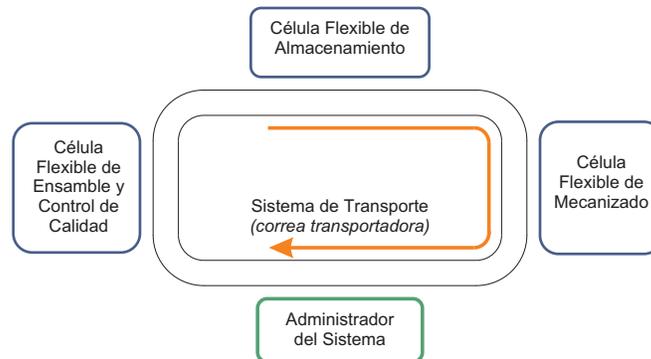


Figura 3.1. Esquema general sistema CIM

En el caso particular de una de estas células de manufactura flexible (FMC). Un robot inteligente que opera en la célula de mecanizado y torneado. Puede mejorar su respuesta integrado la estimación de distancia a la cual se aproximan los pallets que viajan por el sistema de transporte. (Ver Figura 3.2)

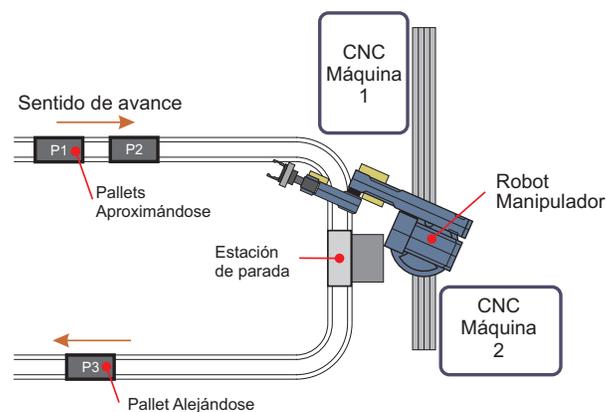


Figura 3.2. Pallet Acercándose y alejándose a una célula de manufactura flexible.

En el caso tradicional, una secuencia de instrucciones es pre-programada en el brazo robot. Este comienza a ejecutar esta secuencia de movimientos sólo cuando un evento es reportado. Por ejemplo cuando un pallet llega a la estación y éste es

detenido por el controlador PLC de la correa transportadora. Existen varias mejoras que se pueden implementar en esta materia. Mediante la aplicación de algoritmos de control, el conocimiento sobre la aproximación de los pallet por parte de las maquinas en el FMC puede ser usado con múltiples fines, sin embargo, el objeto de interés para el presente trabajo es: *Igualar el tiempo en el que un pallet arriba con el tiempo que debe emplear el brazo robot para aproximarse a la posición en la que puede tomar el pallet.* Esto para lograr un tiempo de espera mínimo.

El presente proyecto utilizará un robot manipulador, el cual opera en una de las FMC. Para implementar y comparar algoritmos de control que permitan una reacción anticipada del robot ante la llegada de un pallet a su celda. Los algoritmos incorporarán una estimación de la distancia que existe entre el robot y los pallet. Esta estimación será obtenida en base a los datos de RSSI que se reciben desde dispositivos inalámbricos basados en el estándar IEEE 802.15.4 ubicados en los pallet que circulan en la correa transportadora.

## **3.2. Descripción del Entorno**

El desarrollo del presente proyecto como ha sido mencionado anteriormente, se realiza dentro de las instalaciones del laboratorio de sistemas automatizados de producción CIMUBB. En este se encuentra el sistema de manufactura flexible constituido por tres células de manufacturas. La disposición original del laboratorio se observa en la Figura 3.3 (ESHED ROBOTEC , 2000). Esta disposición ha sufrido algunas variaciones a través del tiempo encontrándose actualmente como se muestra en la Figura 3.4.

Todo el sistema de producción es controlado de forma centralizada por un computador personal (Morales O., 2003). El sistema también brinda la opción de ser operado de forma manual permitiendo que las células puedan actuar de forma independiente.

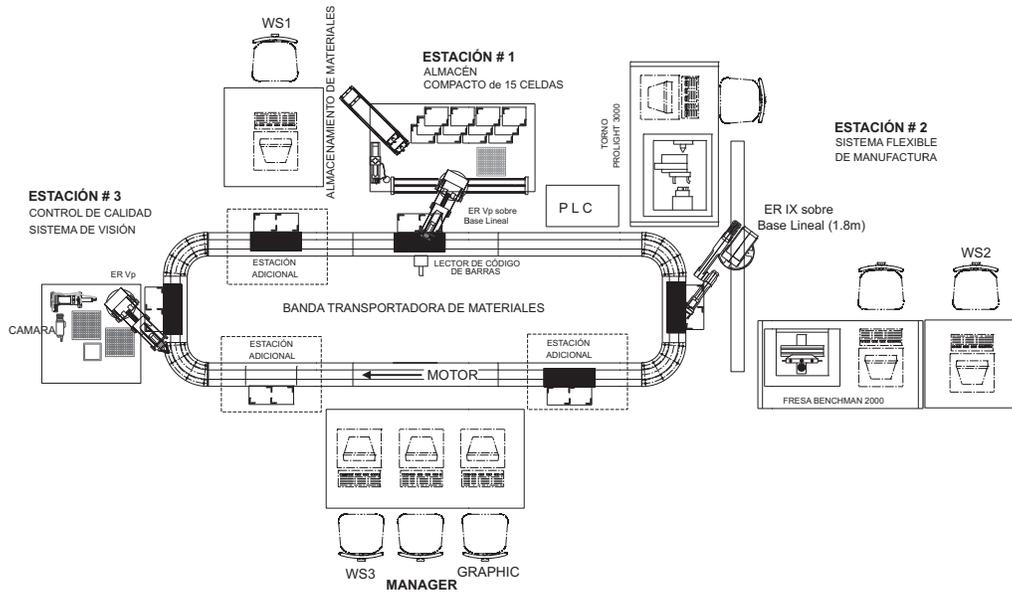


Figura 3.3. Disposición Original sistema de manufactura flexible. Laboratorio CIMUBB



Figura 3.4. Sistema de manufactura flexible. Laboratorio CIMUBB.

Las células que conforman el sistema están constituidas de la siguiente forma:

### Célula flexible de almacenamiento

Esta célula es la encargada de suministrar al sistema los materiales necesarios para la producción y almacenar los productos procesados. Está constituida por los siguientes elementos:

- *Almacén matricial*: Cuenta con 15 posiciones y 3 niveles. Contiene las bandejas para transporte de material (templates) o productos.
- *Alimentadores (feeder)*: Se disponen de tres alimentadores. Dos estructuras rectangulares las cuales contienen la materia prima para el sistema y un alimentador neumático de cilindros. provee de cilindros al sistema.

- *Lector código de barras*: Ubicado cerca de la correa transportadora permite la lectura de los códigos de los templates.
- *Robot SCORBOT-ER 5 Plus*: Robot manipulador de carácter educativo.
- *Estación de trabajo*: computador destinado al control de la célula.

### **Célula flexible de mecanizado**

Esta célula es la encargada del procesamiento de la materia prima. Para ello se emplean máquinas de control numérico disponible en esta estación. Sus componentes son:

- *Torno CNC ProLIGHT 3000*
- *Fresadora CNC BENCHMAN 2000*
- *Robot SCORBOT-ER 9*: Robot manipulator industrial. Encargado de la manipulación de la materia prima y productos dentro de la célula. Suministra de material a las maquinas CNC y retira los productos terminados.
- *Estación de trabajo*: Computador destinado al control de la célula.
- *Controladores CNC*: Son computadores destinados a la operación de las maquinas CNC.

### **Célula flexible de ensamble y control de calidad.**

Esta célula es la encargada de comprobar mediante visión, el correcto estado de las piezas mecanizadas por la estación anterior y de ensamblar el producto final de ser necesaria. Se compone de los siguientes elementos:

- *Cámara de video.*
- *Robot SCORBOT-ER 5 Plus*
- *Prensa neumática.*

Gran parte del sistema de manufactura está montado sobre estructuras modulares de aluminio. Los robots así como el sistema de transporte están contruidos a base de metal.

Alrededor del sistema se encuentran otros objetos como muebles y sillas que cumplen funciones de mobiliario. Estos están constituidos principalmente de madera y plástico.

La composición de los diferentes elementos presentes en el laboratorio debe ser un punto a considerar, debido a la gran influencia que ejercen los objetos metálicos sobre las ondas inalámbricas.

### **3.3. Dispositivos Empleados**

La optimización de tiempos en la FMC aplicado al caso del sistema CIMUBB se centra en la minimización del tiempo de espera entre la llegada de la materia prima a la célula y la manipulación de estos por parte del robot. Para dicho desarrollo se emplean algunos elementos de la FMS junto con nodos inalámbricos sobre los cuales se realizarán las estimaciones de distancia.

A continuación, se describen los principales elementos a utilizar para el presente desarrollo.

#### **3.3.1. SCORBOT-ER 9**

SCORBOT-ER 9 Es un brazo robot industrial de 6 grados de libertad, el cual opera sobre una base de desplazamiento lineal (Figura 3.5). Esto permite que el robot pueda manipular objetos entre las maquinas CNC y el sistema de transporte. El robot cuenta con una unidad de control central. Esta posee un sistema operativo propietario el cual controla y administra todos los aspectos funcionales del robot, junto con brindar una plataforma de programación para el mismo. La comunicación con este controlador se realiza mediante comunicación serial (RS-232).

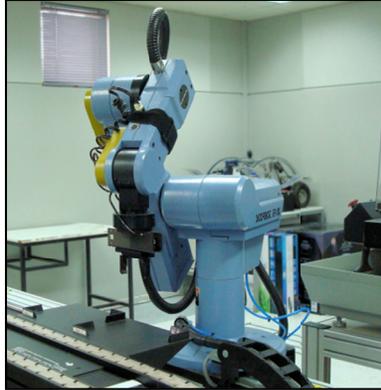


Figura 3.5. SCORBOT-ER 9

### 3.3.2. Sistema de Transporte

El sistema de transporte del FMS recibe el nombre de *conveyor* (cinta transportadora). Está constituido por una cinta transportadora sin fin, que recorre las tres células flexibles. El sistema cuenta con estaciones de detención provistas de accionamientos neumáticos y sensores magnéticos (ver Figura 3.6). El conveyor es controlado por un PLC. Éste se encarga de la lectura de los códigos magnéticos que poseen los pallets y de la retención o liberación de estos en las estaciones habilitadas.

El conveyor puede ser controlado mediante el PLC que lo gobierna a través de una interface serial disponible para tal efecto. Éste dispone de comandos específicos para la operación de las estaciones de detención.



Figura 3.6. Conveyor y estaciones de parada.

### 3.3.3. Módulos Inalámbricos

Los módulos inalámbricos empleados para el presente desarrollo son los módulos XBee fabricados por Digi International. Permiten Proveer conectividad inalámbrica a un gran número de dispositivos electrónicos. Estos módulos emplean protocolos de comunicaciones basados en el estándar de comunicaciones para redes inalámbricas IEEE 802.15.4. Su uso está orientado a aplicaciones que requieren bajo consumo de potencia así como redes flexibles y extensibles.

Los módulos XBee / XBee-Pro operan en la banda de 2.4GHz utilizando un único canal entre 16 disponibles. Su velocidad máxima de transmisión de datos es de 256Kbps con una interface de comunicación serial. El protocolo ZigBee permite que estos dispositivos puedan formar redes para el intercambio de información. Las redes permiten un máximo teórico de 65535 nodos conectados. La topología y la configuración de la red dependen de la versión del módulo.

Existen dos series para los XBee: serie 1 y serie 2. Las diferencias entre ambos son tanto a nivel de hardware como los stack de protocolos que soportan. A nivel de protocolo la serie 1 emplea un firmware<sup>2</sup> 802.15.4 en tanto la serie 2 emplea un firmware ZigBee. De las versiones disponibles se favorece el uso de la Serie 1 de XBee debido a la menor dificultad que presenta en la obtención del valor de RSSI.

A lo largo del presente trabajo se emplean tres tipos de nodos XBee:

- XBee Antena Chip (Figura 3.7.a)
- XBee Antena Wire (Figura 3.7.b)
- XBee Pro Antena Wire (Figura 3.7.c)

Los nodos presentados anteriormente son alimentados con bajo voltaje (3.2V) suministrados por una base con interface USB o mediante un regulador de voltaje

---

<sup>2</sup> Firmware: es un programa que establece la lógica a más bajo nivel para el control de un dispositivo electrónico. Este programa se encuentra almacenado generalmente en una memoria del tipo ROM (memoria de solo lectura) que forma parte del dispositivo.

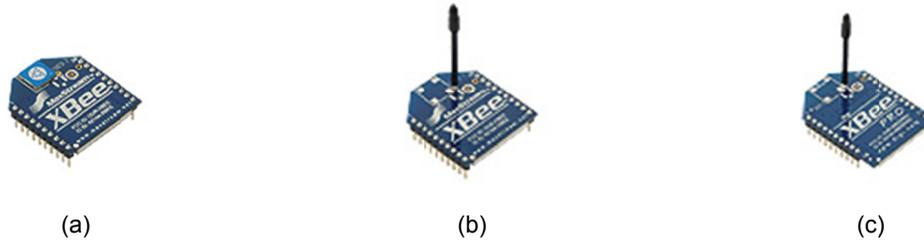


Figura 3.7. Nodos inalámbricos: (a) XBee AtenaChip, (b) XBee Antena Wire, (c) XBee Pro Antena Wire.

## 3.4. Estudio Comportamiento RSSI

El indicador de fuerza de la señal de recepción o RSSI es un valor determinado por los dispositivos inalámbricos a partir de la señal de información que reciben. Como se planteó en el capítulo anterior, este valor es inestable y susceptible a los obstáculos y cambios que se generan en el entorno. Debido a estas razones se hace necesario un previo análisis del comportamiento de este valor a través de experimentación bajo diferentes condiciones y ambientes.

### 3.4.1. Objetivo de los Experimentos

Los experimentos desarrollados y expuestos en esta sección tienen como fin establecer las mejores condiciones bajo las cuales el valor de RSSI presenta una mayor estabilidad y comprobar la viabilidad de estimar las pérdidas por trayectoria mediante algún modelo matemático, bajo un escenario cerrado como es el interior de una edificación.

#### Objetivos específicos

- Establecer los efectos que provoca el ambiente sobre la transmisión inalámbrica.
- Determinar la influencia de la altura y la distancia sobre los nodos.
- Determinar la influencia de la orientación de los nodos.
- Verificar la estabilidad de la medición ante la presencia de objetos.
- Verificar estabilidad de la medición ante diferentes frecuencias y potencias de transmisión.

### 3.4.2. Descripción de los Experimentos

Previo al desarrollo de los experimentos es importante identificar las variables de interés cuyo posible efecto sobre la respuesta se desea estudiar (Marín Diazaraque, 2006). Los factores de tratamiento así como sus respectivos niveles a estudiar se observan en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1. Factores de Tratamiento

<b>Factores Tratamiento</b>	<b>Niveles</b>
Lugar	Interior edificación, exterior
Distancia entre Transmisor y Receptor	Diferentes distancias entre nodos
Altura nodo receptor	Diferentes alturas para nodo receptor
Potencia de transmisión	Transmisión a potencias: Baja, Media y Alta
Frecuencia de transmisión	Transmisión en cuatro canales diferentes
Orientación nodo	Diferentes orientaciones para nodo transmisor
Presencia de objetos	Objeto en diferentes ubicaciones

El detalle de los diferentes niveles aplicados a los tratamientos se especificará posteriormente.

De igual forma, se identifican los factores que no son de interés para el estudio pero pueden generar variabilidad en la respuesta (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Fuentes de variación en los experimentos.

<b>Fuentes de variación</b>
Otros equipos inalámbricos transmitiendo en la misma banda de frecuencia: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Infraestructura de red y dispositivos basados en Wi-Fi.</li> <li>- Teléfonos inalámbricos.</li> <li>- Dispositivos basados en Bluetooth.</li> </ul>
Disposición del lugar de operación
Personas
Sistema de iluminación del lugar (Tubos fluorescentes)

A partir de los factores tratamiento se determina la realización de los siguientes experimentos:

- RSSI vs Distancia entre nodos vs Altura receptor.
- RSSI vs Orientación emisor.
- RSSI vs frecuencia de transmisión vs Distancia entre nodos.
- RSSI vs Potencia de transmisión vs ubicación objeto.

#### 3.4.2.1. Lugar de trabajo

Se dispone de dos ambientes para la realización de los experimentos. El primer ambiente es un entorno abierto situado al aire libre. El segundo ambiente es un entorno cerrado dentro de una edificación.

Los lugares seleccionados que cumplen con las características nombradas anteriormente son los siguientes:

- Entorno Abierto (Exterior): Este lugar estará constituido por un espacio abierto ubicado frente al laboratorio CIM. (Figura 3.8.a)
- Interior Edificación: Este lugar contempla el uso de dos espacios en el interior del laboratorio CIM. Uno ubicado a un costado del FMS con un largo aproximado de 11[m] y otro que contempla el uso de la FMS como tal. (Figura 3.8.b y Figura 3.8.c)



(a)



(b)



(c)

Figura 3.8. Lugar de experimentación. (a) Exterior laboratorio. (b) Costado FMS. (c) FMS.

### 3.4.2.2. Dispositivos y configuración

Para la realización de los experimentos se utilizarán los módulos inalámbricos XBee Serie 1 descritos anteriormente (XBee Pro Antena Wire, XBee Antena Wire, XBee Antena Chip). La configuración de estos módulos varía dependiendo del experimento sin embargo algunos parámetros se mantienen comunes en todas las experiencias. La configuración inicial de estos se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Parámetros comunes para los módulos.

Parámetro	Valor
Velocidad comunicación	57600 [Bps]
Hibernación	Desactivada
Tasa de captura de datos	50[ms]
Modo de operación	API
Potencia de Transmisión	Por defecto (XBee/XBee Pro 0[dBm]/16[dBm] respectivamente).
Canal de comunicación	12 (frecuencia 2.41GHz)

Cada experimento utiliza dos módulos inalámbricos configurados con diferentes roles. Los dispositivos encargados de transmitir información tendrán el rol de *dispositivo final*. Los dispositivos encargados de la recolección de información o puntos de colecta se configuran con el rol de *coordinador de red*.

Las configuraciones específicas de cada módulo así como su rol se detallarán posteriormente.

**Nota: Los dispositivos mantendrán esta configuración base durante todos los experimentos a menos que se especifique un valor diferente para alguno de los parámetros mencionados.**

### 3.4.2.3. Experimentos

En la siguiente sección se detalla la configuración de los experimentos realizados.

#### A) RSSI vs distancia entre nodos vs altura receptor.

En este experimento tanto emisor como receptor se ubican sobre una recta de 8 metros de largo demarcada a intervalos regulares. El nodo coordinador se ubica en uno de los extremos sobre una plataforma que permite variar su altura en tanto el nodo final mantiene una altura fija de 1 metro. Para todo el experimento ambos nodos mantienen una misma orientación y una línea de vista sin obstáculos entre ellos.

La prueba se realiza en el interior del laboratorio a un costado del FMS y en el exterior del laboratorio.

Se emplean dos tipos de módulos XBee A. Chip y XBee Pro A. Wire con las siguientes configuraciones:

Tabla 3.4. Configuración Experimento A.

Rol	Coordinador	Dispositivo Final 1	Dispositivo Final 2
Modulo	XBee Pro A. Wire	XBee A. Chip	XBee Pro A. Wire
Altura	0.5 a 2.5[m]	1[m]	
Distancia	Fija en origen	0.5 [m] a 8 [m]	

Tanto la altura como la distancia entre los nodos se incrementa a intervalos de 0.5[m]. Un esquema de la configuración puede ser observado en la Figura 3.9.

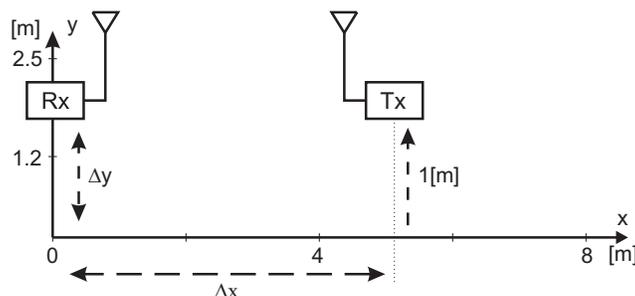


Figura 3.9. Esquema Experimento A.

## B) RSSI vs orientación emisor.

En esta experiencia ambos dispositivos se ubican a igual distancia y altura. Se varía la orientación del emisor desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$  en incrementos de  $20^\circ$ . Durante todo el experimento existe línea de vista entre ambos dispositivos sin obstáculos entre ellos.

Se emplean los mismos dispositivos utilizados en el experimento A. la configuración es la siguiente.

Tabla 3.5. Configuración Experimento B.

Rol	Coordinador	Dispositivo Final 1	Dispositivo Final 2
Modulo	XBee Pro A. Wire	XBee A. Chip	XBee Pro A. Wire
Altura	1 [m]		
Distancia	Fija en origen	5 [m]	
Orientación	$0^\circ$	$0^\circ$ a $360^\circ$	

La prueba se realiza en el interior del laboratorio a un costado del FMS. La Figura 3.10 muestra un esquema del experimento realizado.

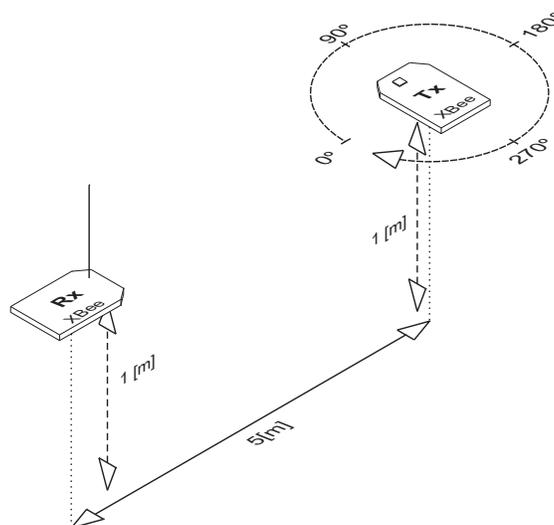


Figura 3.10. Esquema Experimento B.

### C) RSSI vs frecuencia de transmisión vs distancia entre nodos.

En este experimento se prueba la estabilidad del valor de RSSI ante cambios en la frecuencia de transmisión. La experiencia se divide en dos etapas

#### Etapa 1

Para esta prueba se sitúan dos nodos a dos distancias prefijadas y se procede a variar la frecuencia y registrar el valor de RSSI. Las mediciones se realizan dentro del Laboratorio CIM con los nodos ubicados sobre el conveyor del FMS.

Se emplean tres tipos de dispositivo XBee Pro Antena Wire, XBee Antena Wire y XBee Antena Chip. La configuración del experimento se resume a continuación:

Tabla 3.6. Configuración Experimento C.

Rol	Coordinador	Disp. Final 1	Disp. Final 2	Disp. Final 3
Modulo	XBee A. Chip	XBee A. Chip	XBee A. Wire	XBee Pro A. Wire
Frecuencia	2.4 a 2.48GHz			
Altura	1.1 [m]			
Distancia	Fija en origen	1 y 2 [m]		

La distancia de transmisión fue fijada a 1 y 2 metros. El valor de frecuencia se varía cambiando el canal de transición de los dispositivos. Los valores de frecuencia seleccionados son los siguientes:

Tabla 3.7. Canales Seleccionados para Etapa 1 del Experimento C.

XBee		XBee Pro	
Canal	Frecuencia	Canal	Frecuencia
11	2.405 GHz	12	2.41 GHz
16	2.430 GHz	16	2.430 GHz
21	2.455 GHz	21	2.455 GHz
26	2.480 GHz	23	2.465 GHz

La Figura 3.11 muestra un esquema de la situación.

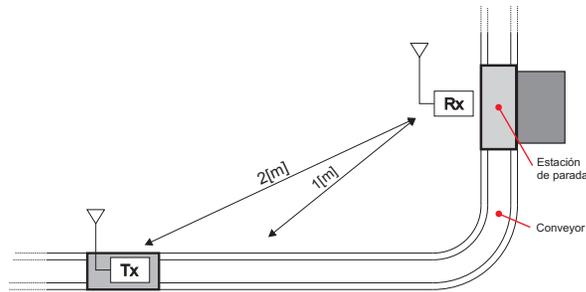


Figura 3.11. Esquema Experimento C.

## Etapa 2

En esta etapa se mide el valor de RSSI bajo condiciones dinámicas, para esto los nodos transmisores son montados sobre los pallets del sistema de transporte permitiendo que estos circulen por el sistema. Cada dispositivo completará 3 vueltas por el convector del sistema. En cada ocasión se registra el valor de RSSI para un canal de transmisión de los seleccionados. Estos canales serán:

Tabla 3.8. Canales Seleccionados para Experimento C Etapa 2.

Canal	Frecuencia	Nivel
12	2.410 GHz	Bajo
16	2.430 GHz	Medio
23	2.465 GHz	Alto

### **D) RSSI vs Potencia de transmisión vs ubicación objeto.**

Esta prueba mide el comportamiento del valor de RSSI ante la variación de potencia y la presencia de objetos en las cercanías u obstaculizando la línea de visión entre ambos dispositivos. El experimento se divide en dos etapas.

#### Etapa 1

Durante este experimento uno de los nodos permanece fijo en uno de los extremos del convector mientras otro nodo circula por el sistema. Cada nodo completa 3 vueltas en el convector. En cada vuelta se configura un determinado nivel de potencia para el nodo transmisor y se registra el valor de RSSI para ese recorrido. Se repite el proceso para diferentes combinaciones de roles de los dispositivos.

Se utilizan 2 tipos de módulos: XBee A. Chip y XBee Pro A. Wire. La configuración del experimento se resume de la siguiente forma:

Tabla 3.9. Configuración del Experimento D Etapa 1.

Rol	Coordinador 1	Coordinador 2	Disp. Final 1	Disp. Final 2
Modulo	XBee A. Chip	XBee Pro A. Wire	XBee A. Chip	XBee Pro A. Wire
Potencia	Por Defecto		3 Niveles	
Altura	1.1 [m]			

Los niveles de potencia seleccionados para los dispositivos son los siguientes:

Tabla 3.10. Potencias seleccionadas para el experimento.

Nivel	Dispositivo	XBee	XBee Pro
	Bajo	-10 [dBm] (0.1 [mW])	10 [dBm] (10 [mW])
Medio	-4 [dBm] (0.4 [mW])	14 [dBm] (25.1 [mW])	
Alto	0 [dBm] (1 [mW])	18 [dBm] (63.1 [mW])	

## Etapa 2

En esta etapa se ubican los nodos a una distancia de 2 metros de separación sobre el conveyor del FMS. Bajo esta configuración se procede a ubicar en diferentes posiciones un objeto cercano al nodo receptor. El objeto empleado para perturbar el sistema es el robot manipulador SCORBOT-ER 9. Este se ubica en 4 posiciones diferentes sin interrumpir la línea de vista entre emisor y receptor. La Figura 3.12 muestra las diferentes posiciones que adoptará el robot.

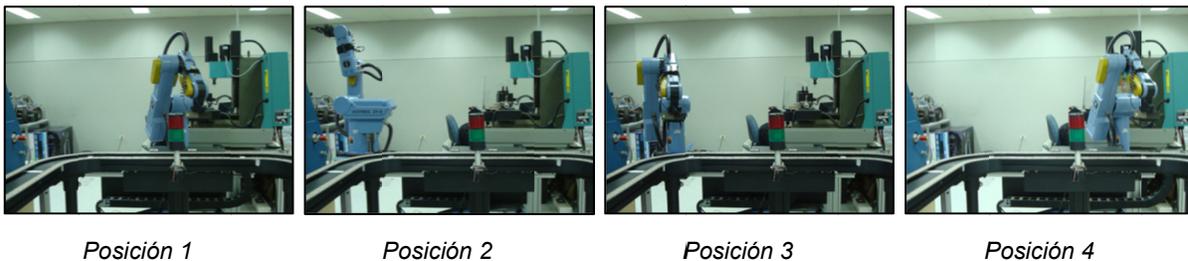


Figura 3.12. Posiciones SCORBOT-ER 9 en Experimento D.

Los dispositivos empleados en esta oportunidad son: XBee Pro Antena Wire, XBee Antena Wire y XBee Antena Chip.

La configuración utilizada en el experimento es la siguiente:

Tabla 3.11. Configuración del Experimento D Etapa 2.

<b>Rol</b>	<b>Coordinador</b>	<b>Disp. Final 1</b>	<b>Disp. Final 2</b>	<b>Disp. Final 3</b>
<b>Modulo</b>	XBee A. Chip	XBee A. Chip	XBee A. Wire	XBee Pro A. Wire
<b>Potencia</b>	3 Niveles (alto, medio y bajo) definidos en la Etapa 1			
<b>Altura</b>	1.1 [m]			
<b>Distancia</b>	Fija en origen	2 [m]		

El experimento considera dos instancias de medición:

- A) En la primera instancia, la potencia de transmisión de los nodos se configura al valor que posee por defecto. Luego el robot asume diferentes posiciones mientras se registra el valor de RSSI. Este proceso se repite para cada nodo.
- B) En la segunda instancia el experimento es repetido, sin embargo en esta ocasión se varía la potencia de transmisión. Registrándose el valor de RSSI para cada posición del robot bajo los tres niveles de potencia mencionados anteriormente.

### 3.4.3. Resultados y Observaciones

A continuación se exponen los resultados obtenidos en los experimentos realizados. Los gráficos expuestos en esta sección, representan solo una pre-visualización de los datos obtenidos. Los gráficos con mayor detalle pueden ser observados en el Anexo A.

#### A) RSSI vs Distancia entre nodos vs Altura receptor.

<b>Transmisor</b>	XBee Antena Chip	XBee Antena Chip
<b>Receptor</b>	XBee Pro Antena Wire	XBee Pro Antena Wire
<b>Lugar</b>	Exterior Laboratorio	Interior Laboratorio
<b>Medición</b>		

<b>Transmisor</b>	XBee Pro Antena Wire	XBee Pro Antena Wire
<b>Receptor</b>	XBee Pro Antena Wire	XBee Pro Antena Wire
<b>Lugar</b>	Exterior Laboratorio	Interior Laboratorio
<b>Medición</b>		

La secuencia de gráficos agrupados por dispositivo muestra como se ve afectada la medición de RSSI bajo diferentes ambientes.

En las secuencias para ambiente exterior se puede observar claramente el efecto de la distancia sobre los nodos provocando la atenuación de la señal. Este fenómeno es más evidente en las mediciones del módulo XBee Antena Chip debido a la menor potencia de transmisión que este posee, observándose una

disminución en el valor de RSSI cercana a 20 [dBm] en ambiente abierto y una disminución de 15 [dBm] en el interior del laboratorio. En el módulo XBee Pro la atenuación rodea los 13 y 7 [dBm] para un ambiente exterior e interior respectivamente. Si bien este último dispositivo presenta una menor atenuación ocurre un efecto contrario con la estabilidad de su señal. La desviación de los datos respecto a su media es cercana a 1.3 [dBm] en interior en contraparte el módulo XBee Ant, Chip bajo las mismas condiciones presenta una desviación cercana a 0.3 [dBm]. Las mediciones realizadas en el exterior muestran una media de 3 [dBm] de desviación para ambos dispositivos. Sin embargo este valor no se considera representativo de la situación debido a la alta desviación que muestran algunos valores. Esto puede ser observado en la Figura 3.13 donde se resumen las desviaciones estándar de los datos obtenidos versus la altura.

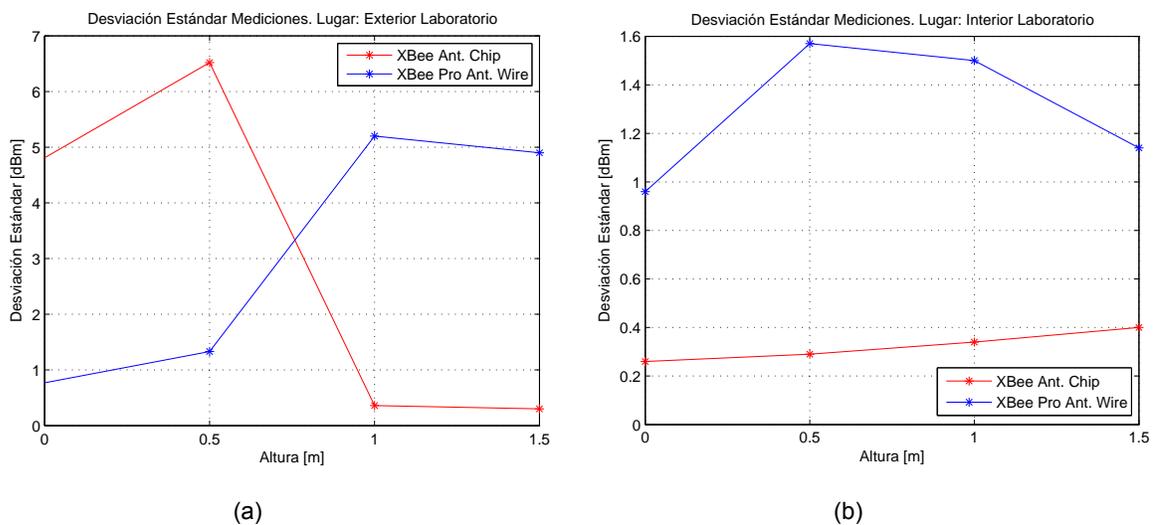


Figura 3.13. Promedio desviaciones estándar según altura. (a) Exterior Laboratorio (b) Interior Laboratorio.

En las mediciones obtenidas en el interior del laboratorio se puede apreciar la distorsión en la señal medida. Esto se observa en un mayor grado en las mediciones del XBee Antena Chip. Sin embargo aún bajo estas condiciones es posible apreciar la tendencia de la señal a atenuarse con la distancia.

**B) RSSI vs orientación emisor.**

<b>Transmisor</b>	XBee Antena Chip	XBee Pro Antena Wire
<b>Receptor</b>	XBee Pro Antena Wire	
<b>Lugar</b>	Interior Laboratorio	
<b>Medición</b>	<p>RSSI Vs Orientación Receptor: XBee Ant. Chip Lugar: Lab. CIM</p> <p>RSSI [dBm]</p>	<p>RSSI Vs Orientación Receptor: XBee Pro Ant. Wire Lugar: Lab. CIM</p> <p>RSSI [dBm]</p>

La secuencia de gráficos expuesta, resume el efecto que provoca el cambio de orientación del nodo transmisor sobre la intensidad de potencia que recibe el nodo coordinador. En las gráficas se observa un comportamiento similar para ambos módulos inalámbricos. El cambio de orientación no genera una distorsión significativa sobre el valor de RSSI medido pero se observa una atenuación de la señal que alcanza los 12 [dBm] durante el inicio del experimento, instancia en la cual los nodos se ven enfrentados. Esta atenuación disminuye al invertir la orientación de los nodos.

**C) RSSI vs frecuencia de transmisión vs distancia entre nodos.**

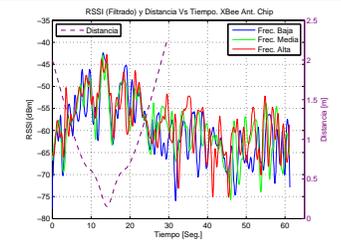
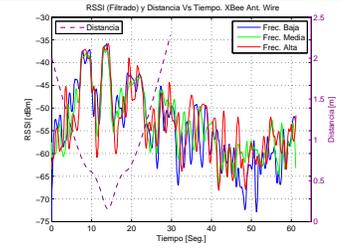
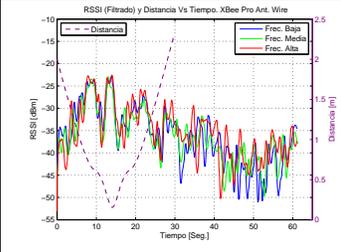
Etapa 1

<b>Tx:</b>	XBee Antena Chip	XBee Antena Wire	XBee Pro Antena Wire
<b>Rx:</b>	XBee Antena Chip		
<b>Lugar:</b>	Interior Laboratorio		
<b>Medición</b>			
<b>Desviación Estándar</b>			

Esta primera etapa del experimento la cual tiene por objetivo comprobar la estabilidad de la señal inalámbrica, arroja comportamientos anómalos por parte de los módulos inalámbricos. Si bien la frecuencia es un factor a considerar al momento de estimar la atenuación que provoca el medio, el grado de incidencia no es predominante en transmisiones a cortas distancias. La atenuación en la señal a diferentes frecuencias puede ser provocada por una baja regulación en la potencia de transmisión o a factores ligados al ambiente. Otro aspecto a observar es que estas diferencias en las mediciones de RSSI se ven incrementadas al aumentar la separación entre los dispositivos.

La estabilidad de la señal es mayor en los dispositivos XBee tanto en antena Chip como Wire observándose desviaciones en las mediciones bajo los 0.5 [dBm]. Una situación opuesta es la registrada en el módulo XBee Pro el cual posee valores de desviación cercanas a los 1.5 [dBm] en ambas mediciones.

Etapa 2

<b>Tx:</b>	XBee Antena Chip	XBee Antena Wire	XBee Pro Antena Wire
<b>Rx:</b>	XBee Antena Chip		
<b>Lugar:</b>	Interior Laboratorio		
<b>Medición</b>			

En la etapa anterior se pudo observar como bajo condiciones estáticas la señal se ve afectada a atenuaciones ante el cambio de frecuencia de transmisión. Situación parcialmente diferente bajo condiciones dinámicas. Existe un área cercana al nodo coordinador comprendida en un radio de 2 metros alrededor de este, como se aprecia en la Figura 3.14. Dentro de esta área se registran los primeros 30 segundos de los gráficos. En estos se observa que las diferencias en las formas de onda registradas son despreciables. Mediciones fuera de esta área presentan diferencias en un mayor grado. A pesar de esto a diferentes frecuencias todas las mediciones siguen una misma tendencia.

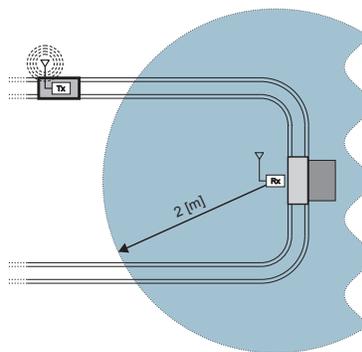
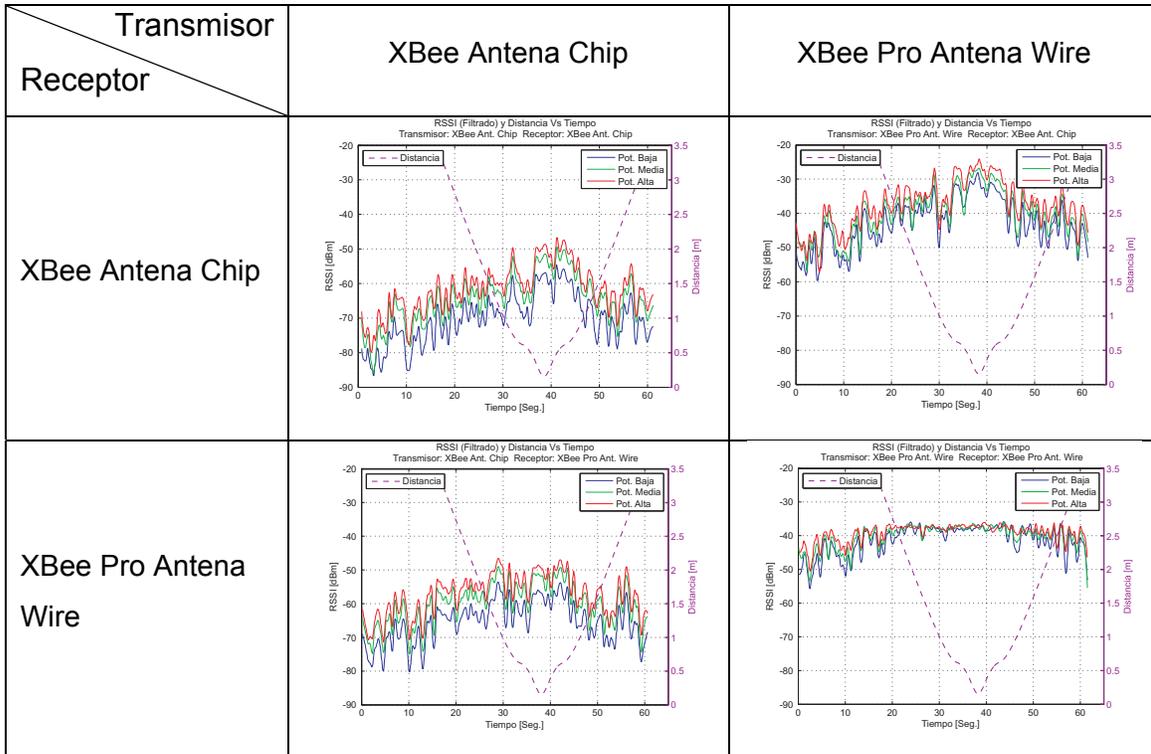


Figura 3.14. Área cercana a nodo coordinador (demarkado en Verde azulado).

**D) RSSI vs potencia de transmisión vs ubicación objeto.**

Etapa 1



La primera parte de este experimento permite realizar una comparación entre las señales medidas utilizando coordinadores diferentes. Bajo este punto de análisis se puede observar como el módulo XBee Pro presenta una saturación en su medición, para señales con niveles de potencia mayores a  $-35$ [dBm]. Este efecto no fue observado en el coordinador XBee antena Chip bajo las diferentes condiciones de potencia a las cuales fue expuesto.

Los cambios en el nivel de potencia bajo los cuales se desarrolló este experimento no generan un cambio significativo en las formas de onda obtenidas. Solo apreciándose un cambio de nivel de la señal acorde a la potencia de transmisión fijada en el nodo transmisor.

Etapa 2-A

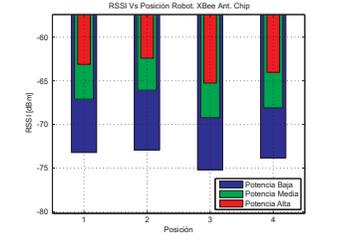
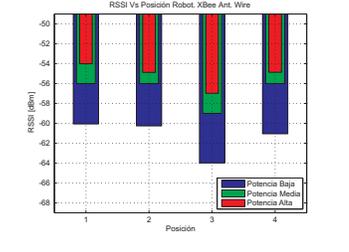
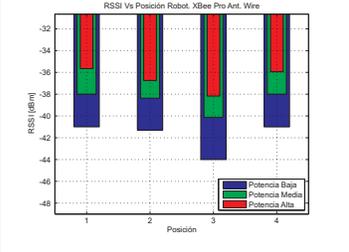
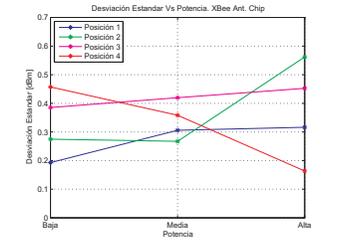
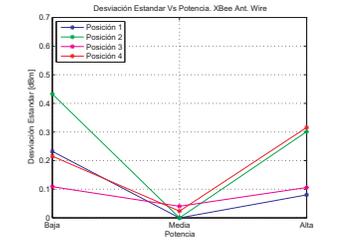
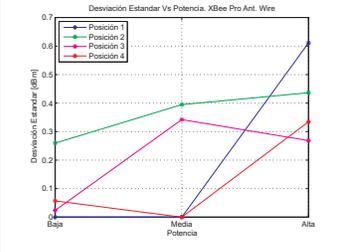
<b>Tx:</b>	XBee Antena Chip	XBee Antena Wire	XBee Pro Antena Wire
<b>Rx:</b>	XBee Antena Chip		
<b>Lugar:</b>	Interior Laboratorio		
<b>Medición</b>			

El resultado de esta etapa grafica el efecto que produce la alteración del medio en la intensidad de potencia recibida. Para este caso el objeto seleccionado es el robot de interés para el presente desarrollo. Este robot es de tipo industrial por lo cual se encuentra cerrado por una estructura metálica. Esto ocasiona que el robot represente un gran objeto de metal que cambia constantemente de lugar y posición. En las gráficas se puede apreciar como estos cambios afectan la recepción de la señal de forma similar para los 3 módulos probados. La posición 3 del robot provoca una mayor atenuación aun cuando esta última se encuentra alejada del nodo coordinador.

Para los dispositivos las diferentes posiciones que adopta el robot generan diferencias en las mediciones de RSSI que pueden alcanzar los 4 [dBm] no observándose inestabilidades significativas en la señal (las desviaciones en las mediciones se mantienen cercanas a los 0.3 [dBm]).

En el análisis de los resultados cabe destacar la comparación entre los resultados obtenidos dependiendo del tipo de antena que utilizan los dispositivos. Tanto XBee Antena Chip como Wire comparten el mismo hardware variando el tipo de antena que utilizan. Los datos transmitidos por este último son recibidos con mayor intensidad por el nodo coordinador. La diferencia con el modulo antena chip es en promedio de 10 [dBm].

Etapa 2-B

<b>Tx:</b>	XBee Antena Chip	XBee Antena Wire	XBee Pro Antena Wire
<b>Rx:</b>	XBee Antena Chip		
<b>Lugar:</b>	Interior Laboratorio		
<b>Medición</b>			
			

Como continuación al ítem anterior se prosigue con el experimento incorporando la variación en la potencia de transmisión de los módulos involucrados. Bajo este escenario se observa un comportamiento similar al registrado en la prueba anterior en los niveles de atenuación de las señales. De los resultados obtenidos se destacan dos aspectos: Los niveles de potencia registrados y la estabilidad de la señal.

En los 3 casos probados los niveles de potencia se incrementan en pasos de 4 [dBm] echo que debe reflejarse en las mediciones. En el caso del XBee Antena Chip esta premisa se cumple. Sin embargo en los módulos restantes el incremento de potencia media a alta no se refleja totalmente en las mediciones, observándose incrementos de solo 1 o 2 [dBm] en las distintas mediciones.

Respecto a la estabilidad de las mediciones. El transmisor XBee Antena Chip mantiene en un mayor grado sus niveles de estabilidad para los 3 niveles de potencia. Por otra parte el XBee Antena Wire registra un incremento de estabilidad al transmitir a potencia media. Por último el XBee Pro registra valores relativamente opuestos considerando un tipo de posición del objeto u otra.

### 3.4.4. Conclusiones

A partir de los experimentos y pruebas realizadas con los dispositivos inalámbricos XBee pueden determinarse las condiciones óptimas sobre las cuales desarrollar el sistema de interés. Las conclusiones y consideraciones a tener presente se detallan a continuación:

- Área de trabajo. Durante el experimento de variación de frecuencia pudo observarse como los cambios en frecuencia generan una menor distorsión de la señal dentro de un rango cercano a los 2 metros desde el punto de coleta de igual forma las mediciones de dispersión corroboran que a menor separación entre los nodos la estabilidad de la señal aumenta. De esta forma se establece este rango como un área óptima para el modelamiento de la señal.
- Nodo coordinador. La comparación entre nodos coordinadores solo fue realizada entre los nodos XBee Ant. Chip y XBee Pro Ant. Wire debido a la no disponibilidad del módulo XBee Ant. Wire para dicha prueba. Por tanto las conclusiones obtenidas en este aspecto serán acotadas a los nodos participantes del experimento.

Durante las pruebas de potencia realizadas queda de manifiesto el inconveniente de utilizar un nodo XBee Pro como nodo coordinador debido a la saturación que presenta en sus mediciones bajo señales de alta potencia. Si bien este dispositivo presenta una mayor sensibilidad esta puede ser mejor aprovechada en aplicaciones con mayores distancias de transmisión. El nodo XBee Antena Chip presenta un mejor comportamiento bajo el rol de coordinador del sistema por lo cual se considera el empleo de este dispositivo para dicha tarea.

- Frecuencia de transmisión. De las observaciones de los resultados obtenidos se determina que la frecuencia de transmisión no afecta significativamente la estabilidad de la señal, exceptuando el caso del módulo XBee Pro el cual registra una menor desviación en frecuencias de transmisión cercanas a 2.41GHz frecuencias superiores registran desviaciones que superan los 2 [dBm]. Esto sumado a la baja diferencia entre las señales medidas dentro del área cercana al nodo coordinador permiten establecer la frecuencia de operación como la citada anteriormente la cual corresponde al canal por defecto en el que operan estos dispositivos.
- Nodo transmisor. A partir de las observaciones realizadas en los experimentos de potencia y frecuencia puede inferirse que la utilización del módulo XBee Antena Wire permitirá obtener mejores resultados al momento de modelar la atenuación de la señal y predecir la distancia a la que se encuentra este módulo. Esto basado en la mayor estabilidad que presenta la señal transmitida con este dispositivo.

De las pruebas realizadas en el interior del laboratorio CIM se puede observar la distorsión que sufre la señal dentro de este medio, como se aprecia en el experimento A. Sin embargo estas mediciones continúan siguiendo una tendencia. De igual forma las pruebas dinámicas realizadas sobre el conveyor confirman esta tendencia en las mediciones por lo cual se considera factible la utilización de estos datos para la estimación de distancia de los nodos.

## 4. Desarrollo del Sistema

---

### 4.1. Introducción

El presente capítulo tiene por objetivo describir el diseño del sistema de reacción Anticipada encargado de la estimación de distancia y control tanto del brazo robot como del conveyor del sistema.

En una primera instancia se realiza un modelamiento de la trayectoria de los pallet a fin de obtener su característica de distancia versus tiempo para ser usada como un patrón de calibración y comparación para el sistema desarrollado. Posteriormente se describe el diseño del sistema detallando sus componentes y forma de operación.

### 4.2. Alcances

El presente desarrollo posee un carácter investigativo como continuación del trabajo realizado en (Duran-Faundez, et al. 2010) cuya finalidad es la estimación de distancia con dispositivos inalámbricos. El sistema desarrollado es una prueba de concepto de un sistema de estimación de distancia mediante radiofrecuencia aplicado a la solución de un problema de minimización de tiempos muertos en una de las células de manufactura flexible. Razón por la cual no se contempla en esta etapa la integración del sistema creado con el sistema OpenCIM que actualmente gobierna el funcionamiento del FMS.

El sistema se desarrolla tomando como escenario el laboratorio de sistemas integrados de manufactura CIM, específicamente, la célula de manufactura del FMS. Bajo este ambiente se realizan las estimaciones y ajustes del sistema, por tanto los resultados de las pruebas que se realicen sobre el sistema desarrollado no son directamente extrapolables en su totalidad a otro tipo de ambientes debido a las propiedades físicas de las ondas de radio frecuencia.

### 4.3. Estudio Sistema CIM

En capítulos anteriores se ha realizado una caracterización de las ondas electromagnéticas permitiendo comprender la forma en la cual se comportan. Luego de este paso es necesario caracterizar el comportamiento del objeto de interés al cual se desea estimar su distancia.

La caracterización del objeto de interés viene dada por el modelamiento matemático de su posición con respecto al tiempo. Para esto es necesario conocer los detalles técnicos del conveyor del sistema.

#### Especificaciones Conveyor

El conveyor del FMS es un sistema de transporte construido en metal. Este se apoya sobre pilares que elevan el sistema un metro por sobre el piso del laboratorio. Los pallet que circulan por el conveyor son arrastrados por una correa transportadora constituida por dos cadenas plásticas que corren paralelas e impulsadas por un motor alterno. Este gira a una velocidad constante otorgándole a los pallets una velocidad de avance igual a  $0.19[m/s]$ <sup>3</sup> en línea recta, velocidad que decae a  $0.18[m/s]$  durante las curvas. La correa transportadora es activada de forma manual mediante un interruptor lo cual hace que esta opere de forma independiente del FMS.

Las dimensiones del conveyor pueden ser observadas en la Figura 4.1 en esta se ve una vista superior del sistema y el detalle de sus medidas: en verde el ancho, en rojo el largo y en negro el ancho de la correa transportadora. El área de interés se delimita por un recuadro verde degradado y su largo se especifica con color azul.

A partir de estos datos técnicos es posible modelar la trayectoria de los pallets dentro del área de interés.

---

<sup>3</sup> Velocidad estimada a partir de mediciones realizadas sobre el conveyor.

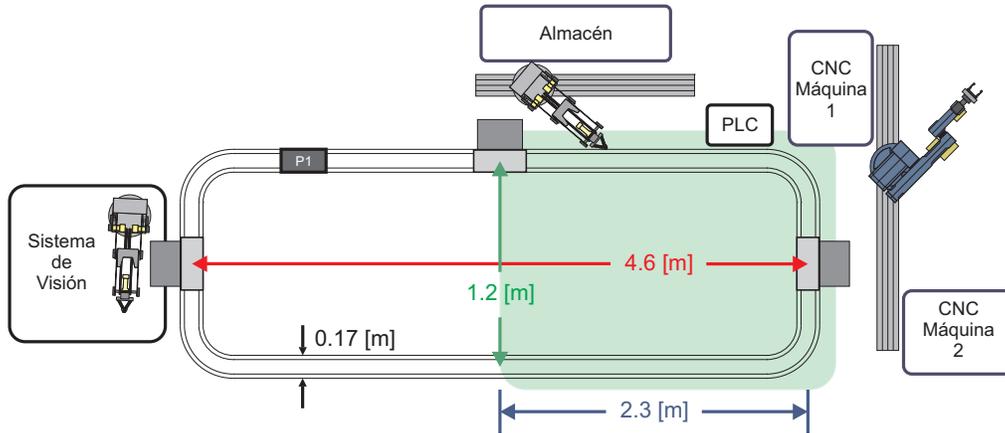


Figura 4.1. Dimensiones conector.

## Modelamiento

El modelamiento de la trayectoria de los pallet puede ser dividido en cinco secciones como se muestra en la Figura 4.2.a. Tres de ellas en las que se realiza un movimiento recto sin cambio de trayectoria y otras dos en las cuales se realiza un desplazamiento circular.

Las ecuaciones que describen la posición de los pallet con respecto al tiempo pueden definirse de la siguiente forma:

- Movimiento recto (Figura 4.2.b)

$$\vec{r}_k = \vec{r}_{k-1} + \vec{V} \cdot \Delta T \quad \text{Ec. 4.1}$$

- Movimiento circular (Figura 4.2.c)

$$\theta = \text{arcTan} \left( \frac{P_{k-1,y} - P_{cen,y}}{P_{k-1,x} - P_{cen,x}} \right) \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$\omega = \frac{|\vec{V}|}{R} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$\vec{r}_k = R \cdot \left[ (\cos(-\omega \cdot \Delta T + \theta) + P_{cen,x}) \hat{i} + (\sin(-\omega \cdot \Delta T + \theta) + P_{cen,x}) \hat{j} \right] \quad \text{Ec. 4.4}$$

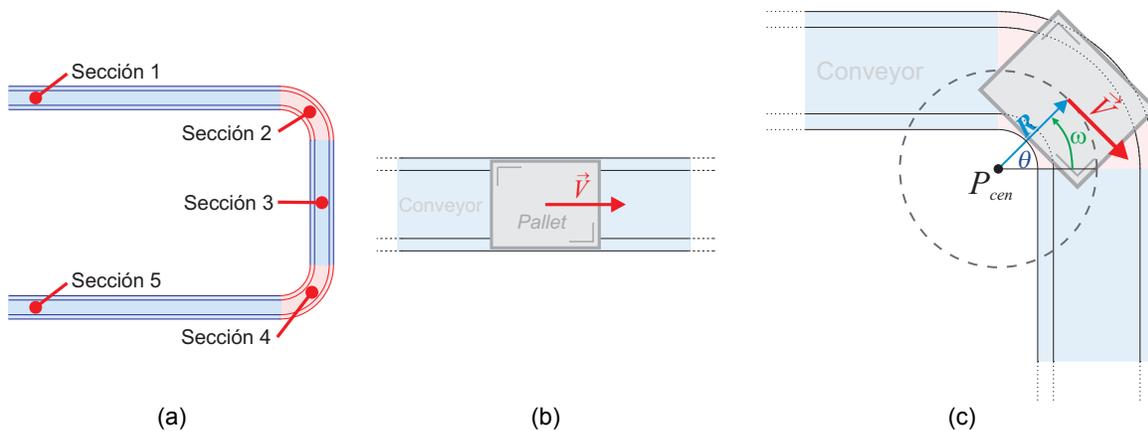


Figura 4.2. División del conveyor en secciones. (a) Esquema general (b) Sección Recta (c) Sección curva.

Para ambos tipos de movimientos  $\vec{r}$  y  $\vec{V}$  representan respectivamente el vector de posición y velocidad del pallet. Los vectores unitarios  $i, j$ , toman la dirección del sistema de referencia cartesiano  $xy$ .  $\Delta T$  es un incremento en el tiempo. De esta forma las ecuaciones entregan la nueva posición del pallet en un incremento de tiempo determinado a partir de la posición en la cual se encuentra ( $r_{k-1}$ ). Particularmente en el movimiento circular.  $\omega$  es la velocidad angular del pallet calculada a partir de su rapidez y el radio de la curva ( $R$ ). La posición en la cual se encuentra el pallet se ve reflejada en el ángulo  $\theta$  que posee respecto del centro de rotación  $P_{cen}$ .

Se establece un sistema de referencia en el plano  $xy$ , cuyo origen se ubica en el extremo inferior derecho del conveyor (punto final de la sección 5). A partir de este se fijan puntos de referencia para demarcar el inicio y termino de cada sección del recorrido. Junto con estas referencias se establece la ubicación del punto de colecta de datos. Punto que servirá como referencia para la estimación de distancia. Este nodo se ubica a 24 centímetros de la estación de parada.

## Simulación

La simulación del sistema de transporte se realiza mediante una rutina que permite generar un vector de puntos  $xy$  en el tiempo para un pallet, de esta forma se puede conocer la ubicación del pallet en los instantes de interés.

La rutina toma como referencia una serie de puntos  $P_n$  que determinan el inicio y termino de cada una de las secciones del recorrido (Figura 4.3). El cálculo de posición se realiza de forma secuencial determinando los puntos de una sección a la vez, es decir, primero se calculan las posiciones de la sección 1, luego se determinan los puntos de la sección 2 tomando como inicio la última posición determinada para el pallet. La rutina sigue la misma lógica hasta terminar todo el recorrido.

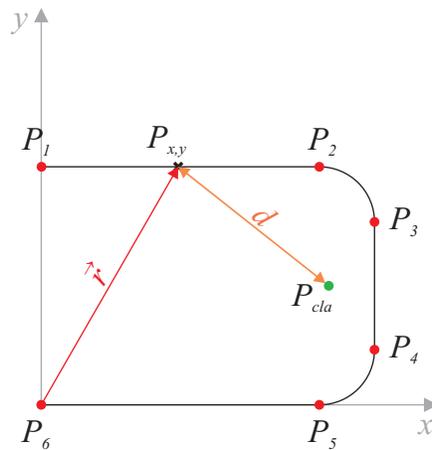


Figura 4.3. Puntos de referencia para simulación.

La rutina implementada se resume a continuación. Considérese la nomenclatura  $d(P_{x,y}, P_n)$  como el cálculo de distancia entre un punto de referencia y la posición actual determinada:

(1)	<b>Calcular</b> posición Sección 1( ) Ecuación <i>Movimiento recto</i> [Ec. 4.1] <b>Mientras</b> $d(P_{x,y}, P_2) > 0$
(2)	<b>Calcular</b> posición Sección 2( ) Ecuación <i>Movimiento circular</i> [Ec. 4.4] <b>Mientras</b> $d(P_{x,y}, P_3) > 0$
(3)	<b>Calcular</b> posición Sección 3( ) Ecuación <i>Movimiento recto</i> [Ec. 4.1] <b>Mientras</b> $d(P_{x,y}, P_4) > 0$
(4)	<b>Calcular</b> posición Sección 4( ) Ecuación <i>Movimiento circular</i> [Ec. 4.4] <b>Mientras</b> $d(P_{x,y}, P_5) > 0$
(5)	<b>Calcular</b> posición Sección 5( ) Ecuación <i>Movimiento recto</i> [Ec. 4.1] <b>Mientras</b> $d(P_{x,y}, P_6) > 0$

Generado el vector de posiciones para el pallet la rutina determina la distancia entre cada punto y el nodo de colecta  $P_{cla}$ . La Figura 4.4.a y Figura 4.4.b muestran respectivamente, la posición y distancia para un pallet.

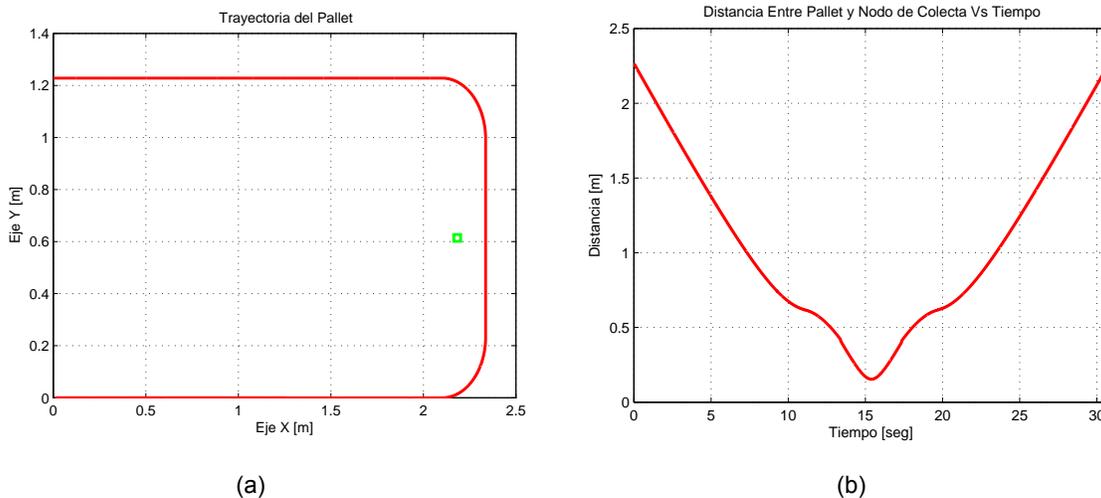


Figura 4.4. Simulación Recorrido Pallet. (a) Trayectoria en el plano. (En verde punto de colecta) (b) Distancia del pallet respecto a ubicación nodo coordinador.

## 4.4. Requisitos

El sistema desarrollado representa una mejora con respecto al mecanismo de respuesta existente en la célula de manufactura. OpenCIM actúa o ejecuta acciones cuando las ordenes precedentes son concluidas o en el momento que un evento es detectado por un sensor. Esto ocasiona que algunas tareas presenten retardos en su ejecución.

En el caso particular del robot manipulador. Será requisito del presente sistema lograr un tiempo de respuesta menor al existente. Considerando que está tarda 3 segundos desde la llegada de un pallet a una estación de parada hasta que el robot inicia el retiro de éste desde la correa trasportadora.

El requerimiento anterior debe contemplar un tiempo de espera mínimo por parte del robot respecto a la llegada de un pallet a la estación. Es decir, la llegada del

pallet a la estación de parada debe ser sincrónica con el movimiento que realiza el robot para el retiro de este desde el conveyor.

La estimación de distancia por parte del sistema desarrollado deberá ser realizada íntegramente mediante los valores de RSSI obtenidos desde los nodos sin intervención de sensores externos durante el funcionamiento de éste.

## 4.5. Diseño del Sistema

La presente sección expone el diseño del “**Sistema de Reacción Anticipada**” en adelante llamado “SRA”. Este será el encargado de detectar la aproximación de los pallet a la célula de manufactura y estimar el instante en el que el robot debe actuar para anticiparse a su llegada.

El sistema descrito con anterioridad, realiza una estimación de proximidad a partir de información de RSSI disponible suministrada por el nodo de colecta. Estos valores son calculados por dicho nodo previa recepción de datagramas enviados de forma recurrente por nodos inalámbricos situados sobre los pallet del FMS. Estos actúan como balizas indicando constantemente su presencia. La intensidad con la cual se recibe su señal puede ser relacionada con la distancia a la cual transmiten mediante un modelo matemático que describe su comportamiento. Sin embargo esta señal no está libre de interferencia. Como fue expuesto anteriormente, diferentes factores afectan a las ondas de radiofrecuencia como la distribución del entorno, orientación de los transmisores, rebote de señales, etc. Estas interferencias y alteraciones en la señal fueron analizadas observándose que dichos fenómenos no afectan totalmente la tendencia de la señal recibida respecto a los modelos estudiados.

Por tanto se procede al desarrollo del sistema usando como base la estimación mediante un modelo matemático que aproxime la pérdida por trayectoria de las ondas electromagnéticas y un algoritmo que permita el filtrado del ruido o la estimación considerando este tipo de alteraciones. Para esta última tarea se emplea como herramienta el filtro Kalman extendido.

Junto con la tarea de estimar la proximidad de los pallet el sistema se encarga de la operación del robot manipulador SCORBOT-ER 9 y el control del conveyor del FMS. Además se implementa una interface que permite a un usuario la interacción con el sistema.

#### 4.5.1. Visión General

La Figura 4.5 muestra una vista general del sistema en el cual se aprecian los diferentes componentes y elementos con los cuales el SRA interactúa.

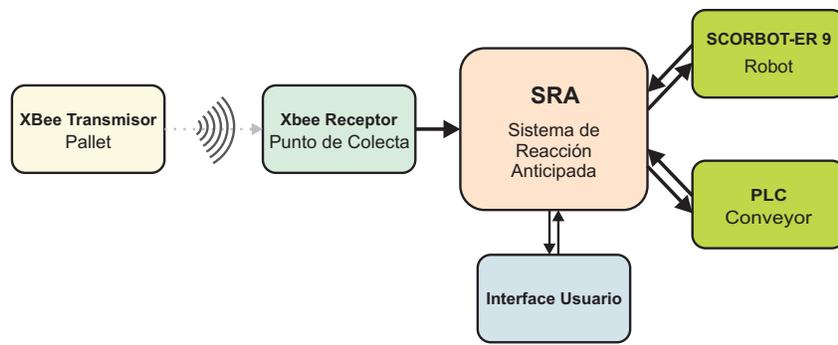


Figura 4.5. Esquema general del SRA.

#### 4.5.2. Modelo del Sistema

##### Modelo de pérdida por propagación

Uno de los aspectos centrales dentro del desarrollo del SRA es la obtención de un modelo matemático de pérdida por propagación de la señal inalámbrica. Fenómeno ligado a la distancia que separa a los nodos emisor y receptor. Este tipo de sistema puede ser modelado considerándolo como un “Sistema de Caja Gris” dado a que parte de la dinámica de las señales de radiofrecuencia son conocidas existiendo diferentes modelos para su predicción. Sin embargo, algunas de sus variables así como su interacción con el medio se desconocen.

Uno de los modelos más empleados para describir la pérdida por propagación es el modelo “Log-Normal Shadowing”. Cuya ecuación fue expuesta en la sección 2.3.2. Esta se observa a continuación:

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma [dB] \quad \text{Ec. 4.5}$$

En ésta, la pérdida por propagación incorpora además de la atenuación que afecta a la señal producto de la distancia, la variable  $X_\sigma$  que modela el ruido e interferencias. Este término modela el ruido como una variable aleatoria gaussiana. Para conocer el valor de potencia que es recibido por el nodo receptor se debe sustraer esta atenuación a la potencia de transmisión de la señal. Reemplazando  $PL(d)$  desde Ec. 4.5 en Ec. 4.6. Se obtiene el valor de potencia recibida ( Ec. 4.8).

$$PL_{rcvd}(d)[dBm] = Pt[dBm] - PL(d)[dB] \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$PL_{rcvd}(d)[dBm] = Pt[dBm] - \left( \overline{PL}(d_0)[dB] + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \right) \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$PL_{rcvd}(d)[dBm] = -10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + (Pt - \overline{PL}(d_0)) - X_\sigma \quad \text{Ec. 4.8}$$

En donde:

- $PL_{rcvd}(d)$ : Potencia recibida en [dBm].
- $Pt$ : Potencia de transmisión en [dBm].
- $PL(d)$ : Pérdida por propagación en [dB].

Usando parámetros arbitrarios junto a una medición real se realiza una simulación piloto usando el modelo expuesto. Este se observa en la Figura 4.6. Los parámetros empleados en la simulación son los siguientes:

- *Exponente de pérdida por propagación (Interior – Línea de vista (LOS))*: 1.6
- *Varianza variable Gaussiana*: 2
- *Potencia recibida a distancia de referencia*:  $-54.84$ [dBm]
- *Distancia de referencia*: 1.5 [m]

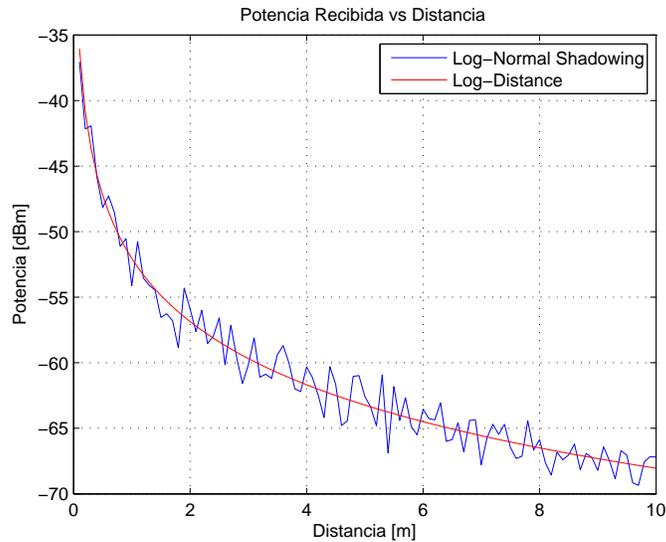


Figura 4.6. Simulación modelos de propagación log-normal y log-distance.

### Modelado dinámica del pallet

Mediante el modelo de propagación se posee una relación entre la potencia recibida y la separación entre los nodos. Además de esta variable es necesario conocer la rapidez con la cual se aproxima el pallet. Por tanto se debe buscar una relación entre la rapidez que posee el pallet y la distancia. Una alternativa es la derivación del valor de rapidez a partir de las estimaciones de distancia sin embargo se debe considerar que este valor representa sólo una medida de la tasa de cambio de la distancia y no la rapidez real que posee el pallet. A pesar de esto ambos valores se encuentran relacionados por tanto puede ser usado como un indicador de la rapidez que posee este último.

Mediante derivación se obtiene la rapidez instantánea con la que se acerca el pallet (Ec. 4.9):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = v$$

Ec. 4.9

Se discretiza esta expresión mediante aproximación tustin

$$\frac{d(tk+1) - d(tk)}{T} \approx v(tk) \quad \text{Ec. 4.10}$$

Finalmente despejando desde Ec. 4.10 la distancia para el instante  $kt+1$

$$d(tk+1) \approx v(tk)T + d(tk) \quad \text{Ec. 4.11}$$

La velocidad del pallet para el instante  $tk+1$  se considera como:

$$v(tk+1) \approx v(tk) \quad \text{Ec. 4.12}$$

### Identificación de parámetros

En un sistema discreto una forma básica de relacionar su entrada y salida es mediante una ecuación en diferencias lineal:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) \quad \text{Ec. 4.13}$$

Donde  $u(t)$  representa la entrada del sistema e  $y(t)$  su salida,  $a_n$  y  $b_m$  son parámetros del sistema. Se asume un tiempo de muestreo igual a la unidad para efectos de facilitar la notación de las expresiones. En la Ec. 4.13 se puede observar que es posible determinar el valor de la próxima salida a partir de las observaciones anteriores

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_n y(t-n) + b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) \quad \text{Ec. 4.14}$$

Se puede simplificar la notación de la expresión anterior definiendo los siguientes vectores:

$$\theta = [a_1 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad \dots \quad b_m]^T \quad \text{Ec. 4.15}$$

$$m(t) = [-y(t-1) \quad \dots \quad -y(t-n) \quad u(t-1) \quad \dots \quad u(t-m)]^T \quad \text{Ec. 4.16}$$

Donde  $\theta$  se define como vector de parámetros y  $m$  vector de mediciones. De esta forma la expresión Ec. 4.14 queda de la siguiente forma:

$$y(t) = m(t)^T \theta \quad \text{Ec. 4.17}$$

De la ecuación Ec. 4.17 se puede observar que es posible predecir la salida del sistema a partir de mediciones observadas del mismo y de los parámetros del sistema (Ljung, 1999). Considerando un sistema de  $N$  ecuaciones y  $n$  incógnitas, la salida estimada puede plantearse de la siguiente forma:

$$\hat{\mathbf{Y}}(N) = \mathbf{M}(N) \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad \text{Ec. 4.18}$$

Donde las variables poseen la siguiente estructura:

$$\mathbf{Y}(N) = [y(1) \quad y(2) \quad \dots \quad y(N)]^T \quad \text{Ec. 4.19}$$

$$\hat{\mathbf{Y}}(N) = [\hat{y}(1) \quad \hat{y}(2) \quad \dots \quad \hat{y}(N)]^T \quad \text{Ec. 4.20}$$

$$\mathbf{M}(N) = [m(1) \quad m(2) \quad \dots \quad m(N)]^T \quad \text{Ec. 4.21}$$

Para realizar la estimación de parámetros de una función en la forma de la Ec. 4.18 existen diversos métodos. Uno de estos es el método de *mínimos cuadrados*.

#### *Método de identificación por mínimos cuadrados*

Un sistema en el cual se desconocen sus parámetros pero es posible observar y registrar los valores de sus entradas y salidas. Estas pueden ser usadas para estimar el valor de los parámetros desconocidos y posteriormente predecir el valor de salida del sistema mediante Ec. 4.18.

Las predicciones realizadas usando parámetros estimados, tendrán un error asociado definido como:

$$E = \mathbf{Y}(N) - \hat{\mathbf{Y}}(N) \quad \text{Ec. 4.22}$$

El método de mínimos cuadrados reduce este error. Para esto minimiza un funcional  $J$  el cual es una sumatoria de los errores al cuadrado.

$$\min(J(\hat{\theta}) = E^T(N) \cdot E(N)) \quad \text{Ec. 4.23}$$

$$J(\hat{\theta}) = \sum_{k=1}^N e^2(k) \quad \text{Ec. 4.24}$$

Para que el error sea mínimo se debe cumplir:

$$\frac{\partial J(\hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} = 0 \quad \text{Ec. 4.25}$$

Desarrollando para  $\hat{\theta}$  a partir de las ecuaciones anteriores. Se obtiene una expresión para obtención de los parámetros que minimiza el error en la predicción:

$$\hat{\theta} = [M(N)^T \cdot M(N)]^{-1} \cdot M(N)^T \cdot Y(N) \quad \text{Ec. 4.26}$$

Esta es la ecuación de identificación y se emplea en la estimación de parámetros del modelo de pérdida por propagación.

#### *Identificación de parámetros en el modelo de propagación*

Considérese el modelo de propagación mostrado en la ecuación Ec. 4.8 éste puede ser desarrollado para adoptar la estructura de la ecuación Ec. 4.18.

$$PL_{rcvd}(d) = -10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + (Pt - \overline{Pl}(d_0)) - X_{\sigma}$$

$$PL_{rcvd}(d) = -10 \cdot \gamma \cdot G(tk) + W \quad \text{Ec. 4.27}$$

Dónde:

$$G(tk) = \log_{10} \left( \frac{d(tk)}{d_0} \right)$$

$$W = (Pt - \overline{Pl}(d_0))$$

Para el modelamiento se consideró la variable aleatoria  $X_{\sigma}$  como cero obteniéndose un modelo de tipo Log-Normal. Finalmente expresando Ec. 4.27 en su forma matricial tenemos:

$$PL_{rcvd}(d) = [G(tk) \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} -10 \cdot \gamma \\ W \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4.28}$$

De esta forma las variables serán:

- Salida del sistema  $Y(N): PL_{rcvd}(d)$
- Vector de mediciones  $M(N): [G(tk) \ 1]$
- Vector de parámetros  $\theta: \begin{bmatrix} -10 \cdot \gamma \\ W \end{bmatrix}$

Para generar datos útiles para la estimación se realizan experimentos de forma sucesiva. En estos los pallet circulan por el conveyor mientras el robot adopta una de las posiciones prefijadas usadas en experimentos anteriores. Estos experimentos se realizan con cada uno de los nodos transmisores.

A continuación se exponen los resultados de parte del proceso de estimación realizado para cada uno de los nodos empleados:

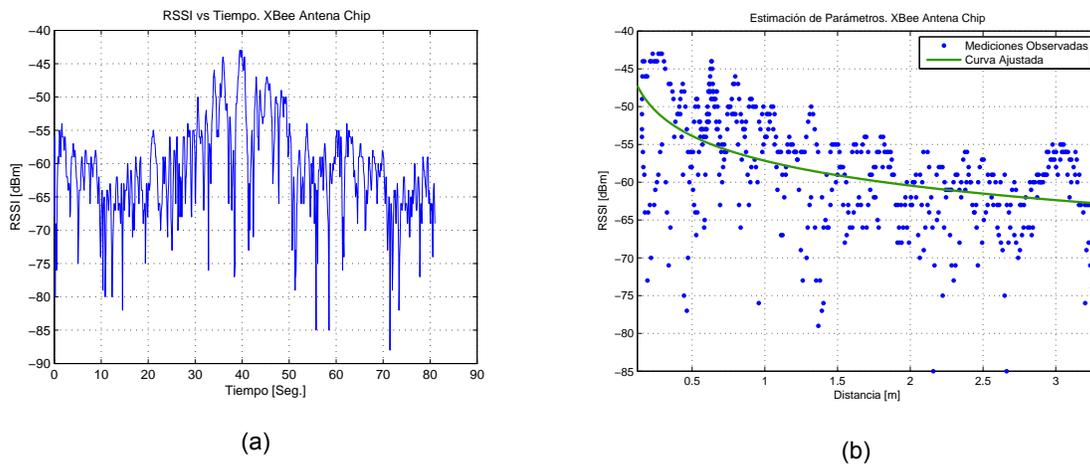


Figura 4.7. Estimación de parámetros XBee Antena Chip. (a) RSSI Medido. (b) Curva Ajustada

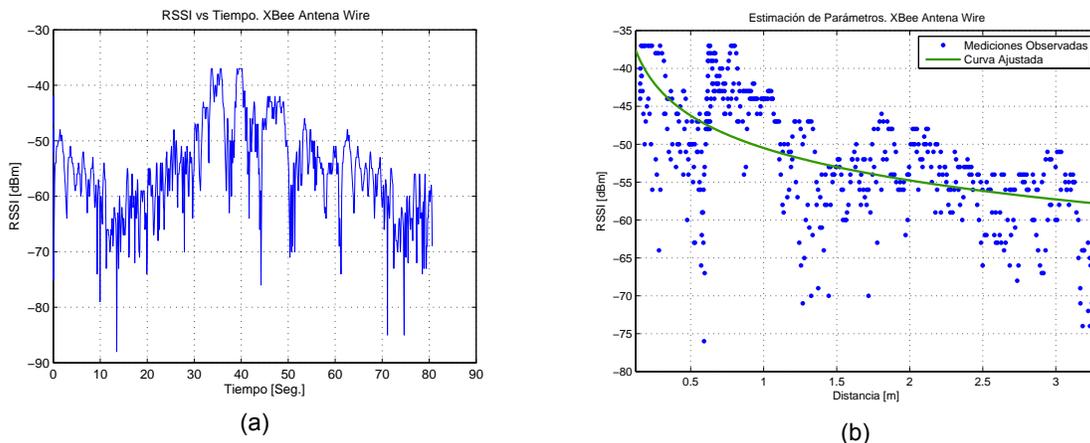


Figura 4.8. Estimación de parámetros XBee Antena Wire. (a) RSSI Medido. (b) Curva Ajustada

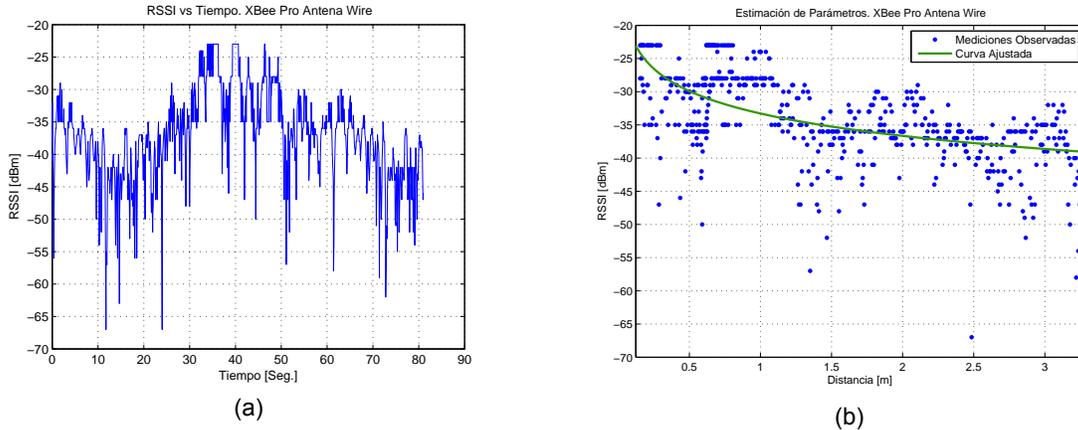


Figura 4.9. Estimación de parámetros XBee Pro Antena Wire. (a) RSSI Medido. (b) Curva Ajustada

En la Tabla 4.1 se exponen los parámetros estimados para cada nodo:

Tabla 4.1. Parámetros Nodos Transmisores

Nodo	$P_t$	$\overline{P_l}(1.5[m])$	$\gamma$
XBee Ant. Chip	0[dBm]	59.156[dBm]	1.142
XBee Ant. Wire	0[dBm]	53.0017[dBm]	1.438
XBee Pro Ant. Wire	16[dBm]	51.376[dBm]	1.065

El tiempo de muestreo configurado en los dispositivos fue de 54[ms] sin embargo el tiempo observado durante las mediciones no es constante. Éste posee una media de 82[ms] con una desviación de 34[ms], por tanto, el tiempo de muestreo empleado en el modelo será estimado durante la ejecución del algoritmo, mediante la diferencia de tiempo entre una medición de RSSI y la anterior.

De esta forma el modelo del sistema queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 d(tk + 1) &= v(tk)T + d(tk) \\
 v(tk + 1) &= v(tk) \\
 PL_{rcvd}(d) &= -10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left( \frac{d(tk)}{d_0} \right) + (P_t - \overline{P_l}(d_0))
 \end{aligned}$$

Ec. 4.29

### 4.5.3. Filtrado de la Señal

#### Filtro de Kalman extendido.

EL filtro de Kalman extendido es una variante del filtro de Kalman que aborda el problema de estimación de estados en sistemas no-lineales mediante la linealización del sistema entorno al estado estimado. Dada la naturaleza del problema enfrentado, es decir, a las no linealidades que presenta, es necesario emplear esta extensión del filtro.

Considere el modelo no-lineal del proceso representado en forma de variables de estado en tiempo discreto:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, v_{k-1}) \quad \text{Ec. 4.30}$$

$$z_k = h(x_k, n_k) \quad \text{Ec. 4.31}$$

En este  $x_k$  es el estado desconocido del sistema,  $u_k$  es la entrada conocida del sistema y  $z_k$  es la salida observable del mismo. Las variables aleatorias  $v_k$  y  $n_k$  representan el ruido de proceso y el ruido de medición respectivamente. El ruido de proceso representa aspectos no modelados en la dinámica del proceso y perturbaciones que pueden afectarla. En cambio el ruido de medición modela las perturbaciones resultantes del proceso de observación de los datos salida.

Se asume que las densidades de distribución son gaussianas y tanto  $v_k$  como  $n_k$  son variables aleatorias independientes entre ellas.

$$p(x_{k-1} | z_{1:k-1}) = N(x_{k-1|k-1}, P_{k-1|k-1}) \quad \text{Ec. 4.32}$$

$$p(v_{k-1}) = N(0, Q) \quad \text{Ec. 4.33}$$

$$p(n_k) = N(0, R) \quad \text{Ec. 4.34}$$

Sin embargo al ser un modelo no-lineal las densidades de distribución  $p(x_k | z_{1:k-1})$  y  $p(x_k | z_{1:k})$  para el siguiente instante  $k$  puede que no sean gaussianas, por lo tanto, éstas se aproximan a una densidad gaussiana. En las densidades de

distribución de  $v_{k-1}$  e  $n_k$ ,  $Q$  y  $R$  son las matrices de covarianza de perturbación de proceso y covarianza de perturbación de medición respectivamente (Welch & Bishop, 2006).

El funcionamiento del filtro se puede dividir en dos etapas:

a) Predicción

$$x_{k|k-1} = f(x_{k-1}, u_k, 0) \quad \text{Ec. 4.35}$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1}^x \cdot P_{k-1} \cdot (F_{k-1}^x)^T + F_{k-1}^v \cdot Q_{k-1} \cdot (F_{k-1}^v)^T \quad \text{Ec. 4.36}$$

En esta etapa se genera una predicción a priori del estado  $x_{k|k-1}$  (Ec. 4.35) y de la covarianza del error  $P_{k|k-1}$  (Ec. 4.36) considerando toda la información disponible hasta ese instante de tiempo.

b) Corrección

$$K_k = P_{k|k-1} \cdot (H_k^x)^T \cdot [H_k^x \cdot P_{k|k-1} \cdot (H_k^x)^T + H_k^\eta \cdot R_k \cdot (H_k^\eta)^T]^{-1} \quad \text{Ec. 4.37}$$

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k \cdot (z_k - h(x_{k|k-1}, 0)) \quad \text{Ec. 4.38}$$

$$P_{k|k} = (I - K_k \cdot H_k^x) \cdot P_{k|k-1} \quad \text{Ec. 4.39}$$

En esta etapa se corrigen las estimaciones realizadas anteriormente para generar estimaciones a posteriori de  $x_{k|k}$  y  $P_{k|k}$ . Para esto se calcula la ganancia de Kalman (Ec. 4.37). Este es un factor que minimiza la covarianza del error de la nueva estimación del estado.

Las matrices  $F_{k-1}^x$ ,  $F_{k-1}^v$ ,  $H_k^x$  y  $H_k^\eta$  se obtienen como jacobianos de la función del sistema y de la función de salida. Esto es:

$$F_{k-1}^x = \frac{\partial f}{\partial x}(x_{k-1|k-1}, u_{k-1}, 0) \quad \text{Ec. 4.40}$$

$$F_{k-1}^v = \frac{\partial f}{\partial v}(x_{k-1|k-1}, u_{k-1}, 0) \quad \text{Ec. 4.41}$$

$$H_k^x = \frac{\partial h}{\partial x}(x_{k|k-1}, 0) \quad \text{Ec. 4.42}$$

$$H_k^\eta = \frac{\partial h}{\partial \eta}(x_{k|k-1}, 0) \quad \text{Ec. 4.43}$$

El filtro extendido de Kalman es un algoritmo recursivo. Por tanto las etapas de predicción y corrección se suceden de forma cíclica mientras se ejecuta el algoritmo. Su implementación se grafica en la Figura 4.10

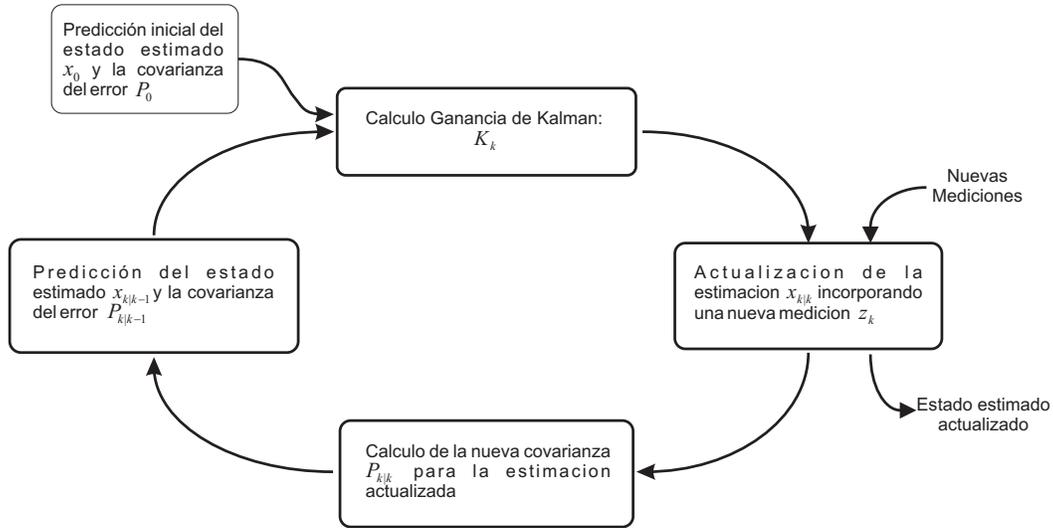


Figura 4.10. Esquema implementación y funcionamiento recursivo del EKF (Grover Brown & Y. C. Hwang , 1997).

En la aplicación del filtro al sistema desarrollado es necesario la obtención de las matrices  $F_{k-1}^x$ ,  $F_{k-1}^v$ ,  $H_k^x$  y  $H_k^\eta$  respecto modelo expuesto en Ec. 4.29

$$F_{k-1}^x = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial v} & \frac{\partial f_1}{\partial d} \\ \frac{\partial f_2}{\partial v} & \frac{\partial f_2}{\partial d} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial d(tk+1)}{\partial v(tk)} & \frac{\partial d(tk+1)}{\partial d(tk)} \\ \frac{\partial v(tk+1)}{\partial v(tk)} & \frac{\partial v(tk+1)}{\partial d(tk)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \quad \text{Ec. 4.44}$$

$$F_{k-1}^v = \frac{\partial f}{\partial v} = \mathbf{I} \quad \text{Ec. 4.45}$$

$$H_k^x = \begin{vmatrix} \frac{\partial h}{\partial v} & \frac{\partial h}{\partial d} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial PL_{rcvd}(tk)}{\partial v(tk)} & \frac{\partial PL_{rcvd}(tk)}{\partial d(tk)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -\frac{10 \cdot \gamma}{d(tk) \cdot \ln(10)} \end{vmatrix} \quad \text{Ec. 4.46}$$

$$H_k^\eta = \frac{\partial h}{\partial \eta} = \mathbf{I} \quad \text{Ec. 4.47}$$

Para inicializar el algoritmo es necesario designar valores iniciales para la matriz de estados estimados y la matriz de covarianza del error. En el caso de  $x_{k|k-1}$  se considera que durante el inicio del sistema el pallet se encuentra alejado de la estación de parada y fuera de la zona de interés es decir a una distancia mayor a  $2[m]$ . La velocidad inicial para el pallet se considerara nula. Para el caso de la matriz  $P_{k|k-1}$  se inicializa en un valor pequeño cercano pero distinto a cero debido a que si la covarianza es igual a cero el filtro mantendrá el último valor estimado sin innovar.

Las matrices de covarianza de perturbación de proceso y medición se asumen constantes aun cuando en la práctica esto no suceda así. La matriz  $Q$  relacionada al proceso generalmente es más difícil obtener sus valores pero se presume que los valores de varianza del proceso son bajos. La matriz  $R$  relacionada a las mediciones puede ser predicha a partir de los valores observables de salida. A partir de experimentación se observa una desviación estándar de las mediciones menores a  $0.5[dBm]$  para el caso de los nodos XBee y menores a  $2.5[dBm]$  en el caso de los XBee Pro. Sin embargo estos valores medidos en un régimen cuasi estacionario, es decir, sin movimientos por parte del nodo de interés y controlando la mayor cantidad de variables ambientales posibles, aumentan en condiciones dinámicas alcanzando una desviación de  $5[dBm]$ . Debido a esta inestabilidad en las mediciones se considera un valor intermedio para la desviación de  $2[dBm]$ . De esta forma las varianzas seleccionadas de forma arbitraria para las variables de proceso y mediciones serán  $\sigma_d^2 = \sigma_v^2 = 0.002$  y  $\sigma_{PL_{recv}}^2 = 4$ . Las matrices de covarianza de perturbaciones serán las siguientes:

$$Q = \begin{vmatrix} 0.002 & 0 \\ 0 & 0.002 \end{vmatrix} \quad \text{Ec. 4.48}$$

$$R = 4 \quad \text{Ec. 4.49}$$

## Filtro FIR

Los filtros de respuesta infinita son un tipo de filtro digital que depende solamente de los valores de entrada. Como se mencionó en capítulos anteriores, este tipo de filtro presenta una respuesta en fase lineal lo cual implica que la señal filtrada no presentara distorsión de fase.

Debido a esta última característica se selecciona este filtro para su implementación y posterior comparación contra el desempeño que se obtiene mediante el uso de un filtro adaptativo como es el filtro de Kalman, diseñado anteriormente.

Se puede representar el filtro FIR mediante una ecuación de diferencias lineales como:

$$y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + b_2 x(n-2) + \dots + b_{M-1} x(n-M+1) \quad \text{Ec. 4.50}$$

En donde  $y(n)$  es la salida del filtro y  $x(n)$  es su entrada, los factores  $b_i$  son los coeficientes del filtro a determinar. El orden filtro es  $M - 1$  donde  $M$  es el largo del mismo (Ingle & Proakis, 1997).

Para el diseño del filtro es necesario determinar las especificaciones que poseerá. Con este motivo se realiza un examen sobre la composición en frecuencia de la señal de RSSI medida a fin de determinar sus principales componentes. Este puede ser observado en la Figura 4.11

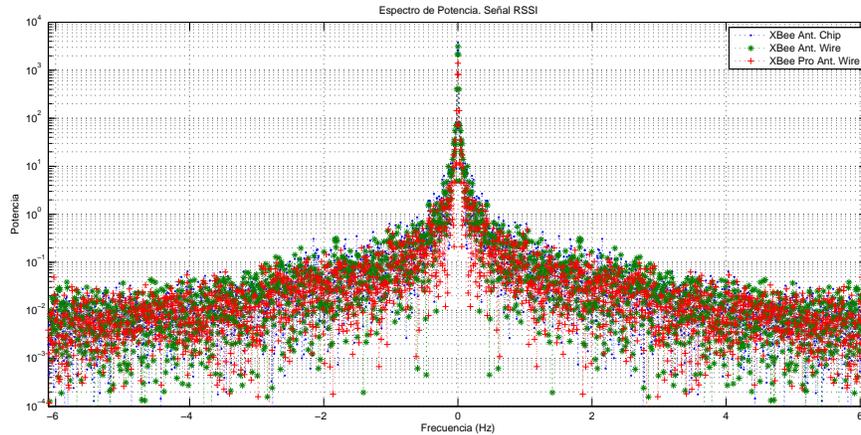


Figura 4.11. Espectro de potencia de la señal de RSSI para los tres nodos empleados.

Del análisis espectral se determina que el espectro de interés se encuentra comprendido por las señales de frecuencia inferior a 1[Hz]. Por tanto se determina el diseño de un filtro de tipo pasa bajos con una frecuencia de corte cercana a la mencionada anteriormente.

Los requisitos del filtro se establecen en el dominio de la frecuencia mediante la especificación de las bandas de tolerancia. En la Figura 4.12 se muestra las bandas de tolerancia para el filtro pasa bajos.

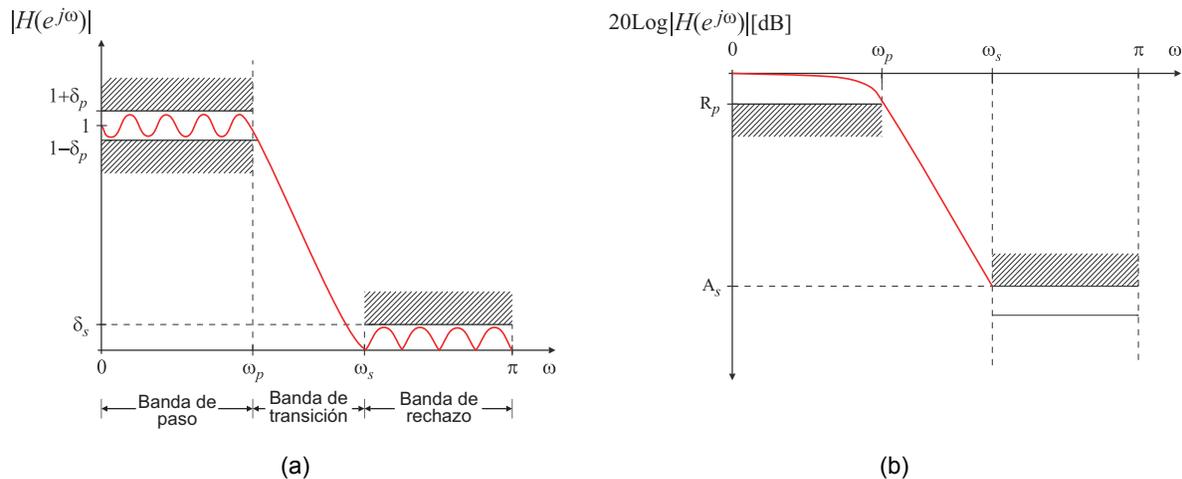


Figura 4.12. Especificaciones Filtro FIR pasa bajos. (a) Absolutas (b) Relativas.

En la figura anterior los parámetros representan lo siguiente:

- $\delta_p$  : Desviación en la banda de paso.
- $\delta_s$  : Desviación en la banda de rechazo.
- $\omega_p$  : Frecuencia normalizada de corte de la banda de paso.
- $\omega_s$  : Frecuencia normalizada de corte de la banda de rechazo.
- $R_p$  : Ripple en la banda de paso.
- $A_s$  : Atenuación de la banda de rechazo:

Para el problema de interés se desea un filtro con las siguientes especificaciones:

Tabla 4.2. Especificaciones del filtro

$F_s$	Frecuencia de corte de la banda de rechazo:	1.5 [Hz]
$F_p$	Frecuencia de corte de la banda de paso:	0.5 [Hz]
$F_s$	Frecuencia de Muestreo:	(82[ms]) 12.2 [Hz]
$R_p$	Ripple en la banda de paso.	0.4 [dB]
$A_s$	Atenuación de la banda de rechazo:	30 [dB]

Los parámetros para las desviaciones se determinan a partir de las ecuaciones para el *Ripple en la banda de paso* (Ec. 4.51) y la ecuación de *atenuación de la banda de rechazo* (Ec. 4.52).

$$R_p = -20 \text{Log}_{10}(1 - \delta_p) > 0 (\approx 0) \quad \text{Ec. 4.51}$$

$$A_s = -20 \text{Log}_{10}(\delta_s) > 0 (>> 1) \quad \text{Ec. 4.52}$$

Determinado  $\delta_p$  y  $\delta_s$  desde las ecuaciones anteriores se tiene:

$$R_p = 0.4 = -20 \text{Log}_{10}(1 - \delta_p) \Rightarrow \delta_p \approx 0.045 \quad \text{Ec. 4.53}$$

$$A_s = 30 = -20 \text{Log}_{10}(\delta_s) \Rightarrow \delta_s \approx 0.0316 \quad \text{Ec. 4.54}$$

Para el cálculo de los coeficientes del filtro FIR existen varios métodos, entre estos se emplea el método de diseño por ventanas. En particular se emplea para el diseño la ventana de káiser.

El largo del filtro se determina mediante las siguientes expresiones:

$$\Delta\omega = \omega_s - \omega_p \quad \text{Ec. 4.55}$$

$$M = \frac{A_s - 7.95}{2.285 \cdot (\Delta\omega)} \quad \text{Ec. 4.56}$$

Resolviendo para  $M$  se obtiene el largo del filtro  $M \approx 18.73$ , este valor se redondea obteniéndose un filtro de largo 19.

Finalmente los parámetros del filtro mediante el uso de la ventana Kaiser se determinan mediante la ecuación Ec. 4.57

$$w(n) = \frac{I_0 \left[ \beta \sqrt{1 - \left( \frac{2n}{M-1} \right)^2} \right]}{I_0[\beta]} \quad 0 \leq n \leq M-1 \quad \text{Ec. 4.57}$$

Donde  $I_0$  es la función de Bessel de primer tipo de orden cero y  $\beta$  es un parámetro de la ventana que depende del largo del filtro (Ec. 4.58).

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(A_s - 8.7) & A_s > 50 \\ 0.5842(A_s - 21)^{0.4} + 0.07886(A_s - 21) & 50 \geq A_s \geq 21 \\ 0 & A_s \leq 21 \end{cases} \quad \text{Ec. 4.58}$$

Este último cálculo se realiza mediante el apoyo de funciones implementadas en Matlab para esta tarea. De esta forma se obtienen los coeficientes del filtro:

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$
-0,0133	-0,0177	-0,0166	-0,0068	0,0135	0,0435	0,0797	0,1159	0,1453	0,1618
$b_{10}$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{14}$	$b_{15}$	$b_{16}$	$b_{17}$	$b_{18}$	$b_{19}$
0,1618	0,1453	0,1159	0,0797	0,0435	0,0135	-0,0068	-0,0166	-0,0177	-0,0133

La respuesta en frecuencia del filtro puede verse en la Figura 4.13.

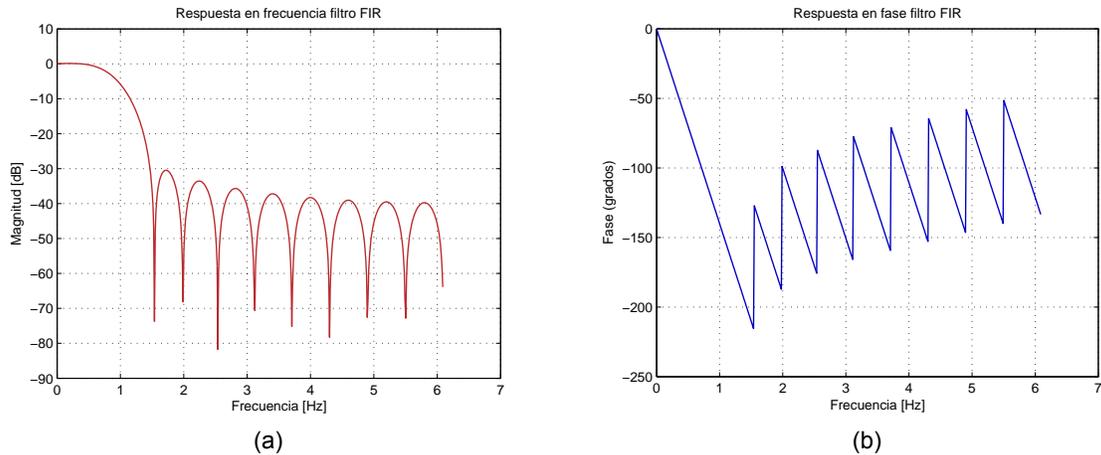


Figura 4.13. Respuesta en frecuencia del filtro FIR. (a) Módulo, (b) fase.

#### 4.5.4. Estimación Tiempo de Arribo

El filtro de Kalman extendido en conjunto con el modelo del sistema permite la estimación de los estados ocultos del sistema. Para nuestro caso serán las variables de distancia (entre el pallet y la estación de parada) y la rapidez a la cual cambia esta. Estimar el momento en el cual debe actuar el robot manipulador solo con la información de distancia podría resultar adecuado bajo el entorno estudiado el cual considera una velocidad de avance constante. Sin embargo una alteración sobre este parámetro induciría a una reacción errónea del sistema. Por lo tanto es necesario determinar el instante en el cual el manipulador opera considerando tanto la estimación de distancia como de rapidez del pallet.

##### *Estimación tiempo de arribo*

Las estimaciones de distancia y rapidez pueden usarse en conjunto para determinar el tiempo que tardara el pallet en arribar a la célula de interés. Dicha estimación se le asigna el nombre de “Tiempo de arribo”.

El modelamiento de la variable anterior se realiza a partir de datos experimentales y datos obtenidos mediante simulación de la trayectoria del pallet. La Figura 4.14 resume lo planteado anteriormente.

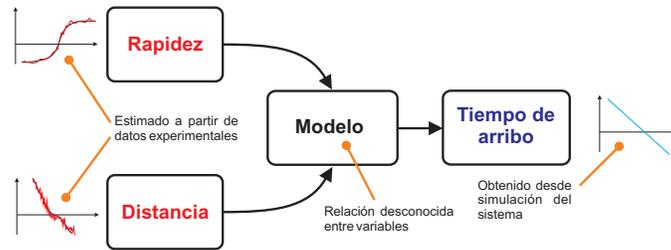


Figura 4.14. Obtención variable "Tiempo de Arribo"

Mediante el toolbox de ajuste de superficies de Matlab se obtiene la superficie que mejor se ajusta a los datos disponibles. Este es un polinomio de orden 2 definido como:

$$T_{Arribo}(tk) = p_{00} + p_{10} \cdot d(tk) + p_{01} \cdot v(tk) + p_{20} \cdot d^2(tk) + p_{11} \cdot d(tk) \cdot v(tk) + p_{02} \cdot v^2(tk) \quad \text{Ec. 4.59}$$

Donde  $T_{Arribo}$  es el tiempo de arribo, mientras  $d$  y  $v$  son distancia y rapidez del pallet respectivamente.  $p_{xx}$  son los parámetros de la superficie. Estos parámetros se obtienen para cada módulo utilizado en los pallet.

### 4.5.3. Controlador Sistema.

Como se estableció anteriormente, el instante en el cual el robot manipulador debe actuar está determinado por el tiempo de arribo del pallet. La operación del robot debe realizarse en el instante en el cual el tiempo que éste emplea en ejecutar la rutina de acercamiento al pallet se iguala con el tiempo de llegada de éste.

Para lograr lo anterior se implementan dos controladores:

- Controlador PI en lazo abierto.
- Controlador por lógica difusa.

El detalle de su implementación se describe a continuación.

## Controlador PI

El primer control implementado en el sistema se realiza mediante un controlador simple como es el controlador PI en lazo abierto (controlador todo o nada). Esto último debido a la falta de realimentación que posee el sistema. Su implementación se realiza a partir de la discretización del controlador PI, cuya ecuación es:

$$y(t) = K_p e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int e(t) \quad \text{Ec. 4.60}$$

Donde  $y(t)$  es la salida y  $e(t)$  el error calculado entre la entrada del controlador y una referencia. Derivando a ambos lados se tiene:

$$\frac{dy(t)}{dt} = K_p \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_c}{T_i} e(t) \quad \text{Ec. 4.61}$$

Reemplazando la derivada por su aproximación como una “diferencia hacia atrás”

$$\frac{y(tk) - y(tk-1)}{T_s} = K_p \frac{e(tk) - e(tk-1)}{T_s} + \frac{K_c}{T_i} e(tk) \quad \text{Ec. 4.62}$$

$$y(tk) = K_c (e(tk) - e(tk-1)) + \frac{K_c}{T_i} T_s e(tk) + y(tk-1) \quad \text{Ec. 4.63}$$

Reemplazando  $K_c = K_p$  y  $K_i = \frac{K_c}{T_i} T_s$  se tiene:

$$y(tk) = K_p (e(tk) - e(tk-1)) + K_i \cdot e(tk) + y(tk-1) \quad \text{Ec. 4.64}$$

Donde  $K_p$ ,  $K_i$  son la ganancia proporcional e integral respectivamente.

La implementación se realiza de forma recursiva utilizando como referencia el tiempo de operación del robot ( $T_{Op\_Robot}$ ) y como entrada el tiempo de arribo del pallet ( $T_{Arribo}$ ). De esta forma el controlador se realiza de la siguiente forma:

$$e(k) = T_{Op\_Robot} - T_{Arribo} \quad \text{Ec. 4.65}$$

$$a(k) = K_p \cdot e(k) \quad \text{Ec. 4.66}$$

$$b(k) = K_i \cdot e(k) \quad \text{Ec. 4.67}$$

$$y(k) = a(k) - a(k-1) + b(k) + y(k-1) \quad \text{Ec. 4.68}$$

$$a(k-1) = a(k) \quad \text{Ec. 4.69}$$

$$y(k-1) = y(k) \quad \text{Ec. 4.70}$$

Durante la operación del algoritmo la ecuación Ec. 4.68 representa una actualización de la salida del controlador. Las ecuaciones Ec. 4.69 y Ec. 4.70 son actualizaciones de las variables.

### Controlador por lógica difusa

El controlador por lógica difusa o controlador difuso tiene sus bases en la teoría de conjuntos difusos desarrollada por Lotfi A. Zadeh. Este tipo de lógica trata de representar el pensamiento lógico humano permitiendo a un sistema trabajar con información que no es exacta como por ejemplo: “el pallet está muy cerca”. El grado de pertenencia que posee una variable  $x$  a una “variable lingüística” (“El pallet está lejos”) está determinada por una función de pertenencia que puede tomar valores en el rango 0 a 1.

La variable lingüística o etiqueta va asociada a un conjunto difuso el cual puede definirse de la siguiente forma:

$$A = \{x, u_A(x) | x \in U\} \quad \text{Ec. 4.71}$$

En donde  $u_A(x)$  es la función de pertenencia de  $x$  y  $U$  es el universo del discurso o los valores exactos que puede tomar la variable (Ibrahim, 1997).

La función de pertenencia puede ser de diversos tipos, una de las más empleadas es la tipo Triangular. Ésta se describe por la ecuación Ec. 4.72, su representación gráfica se muestra en la Figura 4.15

$$u_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & m < x \leq b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad \text{Ec. 4.72}$$

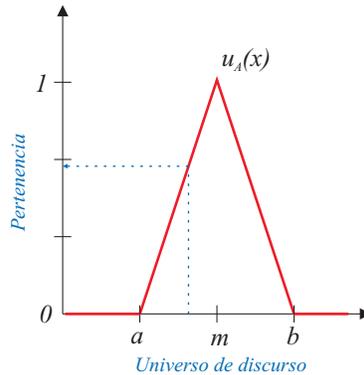


Figura 4.15. Función de pertenencia triangular.

### Controlador

El controlador difuso permite el control de un sistema sin la necesidad de contar con un modelo matemático del mismo, empleando solo un conjunto de reglas ambiguas obtenidas a partir de la experiencia de un operador. Los componentes del controlador se muestran en la Figura 4.16.

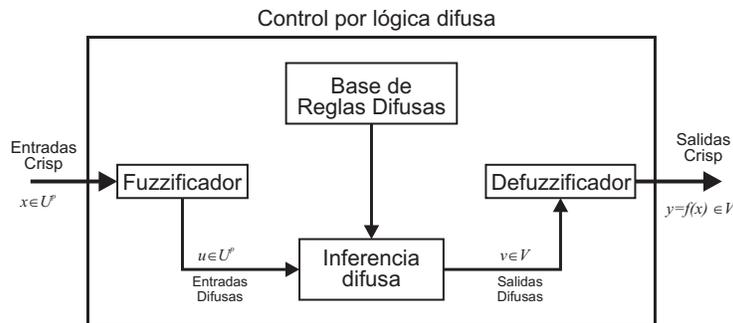


Figura 4.16. Componentes de un controlador por lógica difusa.

En esta figura la etapa de 'fuzzificación' permite convertir las entradas *Crips* o valores del mundo real a un grado de pertenencia de una variable lingüística. Posteriormente esta variable se evalúa mediante un conjunto de reglas de tipo:

**SI** {conjunto de condiciones a satisfacer} **Entonces** {conjunto de consecuencias}

Finalmente el resultado difuso obtenido debe pasar por un proceso inverso o 'defuzzificación' para obtener una salida *Crisp* o una salida con valores útiles para el proceso. En esta etapa se emplea nuevamente una función de pertenencia para los valores de salida.

Para el diseño del controlador se considerara solo una entrada de igual forma que el controlador anterior. Esta entrada será el error de seguimiento  $e(tk)$  descrito anteriormente. Se establece un rango de entrada para ésta variable de 0 a 10 [Seg]. Junto a lo anterior se defienden 3 variables lingüísticas dentro del universo de discurso establecido: "lejos", "medio" y "cerca". Las funciones de pertenencia poseen los siguientes parámetros:

Tabla 4.3. Parámetros del 'fuzzificador'.

Etiqueta	Función de pertenencia	Parámetros
"Lejos"	Trapezoidal	$a = 3; b = 5; c = d = +\infty$
"Medio"	Triangular	$a = 0.5; m = 2; b = 4.5$
"Cerca"	Triangular	$a = -\infty; m = 0; b = 1$

Para la etapa de 'defuzzificación' se establecen nuevamente 3 tipos de variables lingüísticas, estas serán: "Esperar", "Preparar" y "Capturar". El universo de discurso establecido corresponde al rango 0 a 12. Las funciones de pertenencias determinadas poseen los siguientes parámetros:

Tabla 4.4. Parámetros 'defuzzificador'

Etiqueta	Función de pertenencia	Parámetros
"Espera"	Trapezoidal	$a = b = -\infty; c = 0.5; d = 3$
"Prepara"	Trapezoidal	$a = 1; b = 5; c = 6; d = 10$
"Captura"	Trapezoidal	$a = 7.5; b = 10.5; c = d = +\infty$

La Figura 4.17 muestra las funciones de pertenencia implementadas.

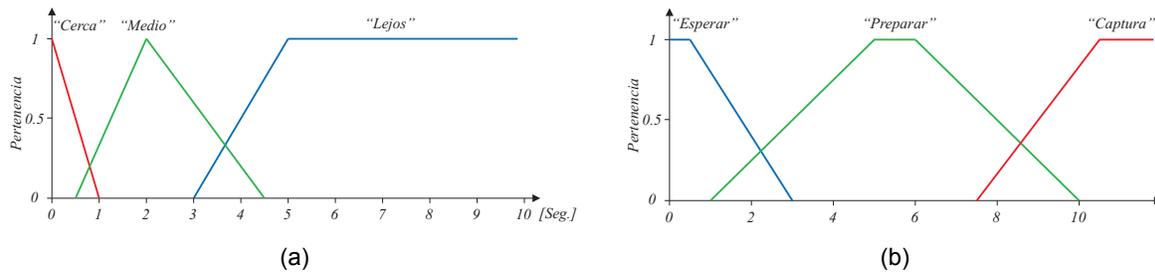


Figura 4.17. Funciones de pertenencia implementadas. (a) 'Fuzzificador'; (b) 'Defuzzificador'.

Para la etapa de inferencia difusa se implementa el siguiente conjunto de reglas:

- (1) **Si**  $e(tk)$  **es** "Lejos" **Entonces** Salida **es** "Espera"
- (2) **Si**  $e(tk)$  **es** "Medio" **Entonces** Salida **es** "Prepara"
- (3) **Si**  $e(tk)$  **es** "cerca" **Entonces** Salida **es** "captura"

Los diferentes parámetros del controlador han sido seleccionados a partir de la experiencia adquirida de la operación del sistema. El ajuste de las funciones de pertenencia fue realizado mediante diferentes ensayos en el sistema.

#### 4.5.4. Obtención de RSSI desde Dispositivos XBee

Durante el transcurso del presente documento se exponen diversas muestras de mediciones de RSSI desde nodos inalámbricos XBee sin profundizar la forma en la cual estos valores son obtenidos. Lo anterior se debe a que este tema es un aspecto técnico del dispositivo. Con el fin de desarrollar de forma general este tópico se procede a explicar la forma de operación de los nodos XBee. Detallando la forma en que estos interactúan con el usuario y su entorno así como los set de instrucciones de interés para el presente sistema.

Los módulos XBee son dispositivos que permiten el envío y recepción de información con sus pares formando redes de dispositivos inalámbricos. Para identificar a los nodos dentro de una red cada uno de estos posee su propia identificación. Esto se conoce como direccionamiento. Este puede ser de dos

tipos: Direccionamiento de 16 bit y Direccionamiento de 64 bit. Para ambos casos las direcciones son de tipo numérico y se expresan en formato hexadecimal. Una vez conocido el sistema de individualización de los nodos es necesario entender el lenguaje en el cual estos se comunican.

### Modos de operación

XBee permite dos modos de interacción con el usuario u otros sistemas: modo Transparente y modo API. En ambos modos los datos son enviados de forma serial desde y hacia las interfaces disponibles (Estas pueden ser interface inalámbrica o interface serie de lógica digital). La estructura que poseen estos datos es diferente entre ambos modos llegando a ser incompatibles entre sí.

- Modo Transparente

En esta modalidad todos los datos enviados a la interface serie son automáticamente retransmitidos por la interface inalámbrica hacia el nodo especificado en la dirección de destino del XBee (Figura 4.18). En esta modalidad no existen mecanismos para la detección de errores durante la transmisión. La interacción con el dispositivo se realiza mediante una serie predefinida de comandos ASCII

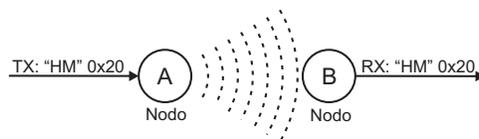


Figura 4.18. Envío de datos modo Transparente

- Modo API.

En esta modalidad los datos requieren ser formateados bajo una estructura específica impuesta. Esto genera una mayor complejidad al momento de transmitir información sin embargo esta complejidad se compensa con la flexibilidad que presenta este modo. El modo API permite incluir en la propia trama la dirección de destino o de origen según sea el caso, fragmentación de la información a transmitir, configuración remota de los nodos, detección de errores, etc. cada

paquete de información puede poseer una configuración diferente dependiendo de las necesidades de la aplicación. La Figura 4.19 muestra un esquema de la constitución de estas tramas.



Figura 4.19. Estructura general Trama API.

La estructura API específica es un formato que depende del tipo de trama a emplear. Cada estructura se identifica por un número en hexadecimal denominado “API ID”. Todos los tipos de tramas soportados por XBee así como sus identificadores se detallan en el manual de usuario del módulo.

### Trasmisión automática de estado y RSSI

Dentro de las configuraciones que dispone XBee se encuentra un modo de operación que permite el envío automático del estado de todas las entradas y salidas del módulo y transmitirlo a una dirección de destino previamente seleccionada. Este modo de operación es útil para la generación de “cables virtuales” entre dispositivos permitiendo replicar el estado de un pin en otro dispositivo de forma inalámbrica.

Para acceder a esta modalidad de operación es necesario prefijar la dirección del XBee de destino mediante los comandos de direccionamiento, configurar al menos una puerta digital como entrada y finalmente configurar la tasa de muestreo del modem que permite la lectura de las puertas y envío del estado. La configuración mencionada se realiza mediante los siguientes comandos AT:

Tabla 4.5. Comandos AT de direccionamiento.

Comando AT	Descripción
DH	Dirección de destino alta
DL	Dirección de destino baja
IR	Tasa de muestreo
Dx	Configuración de puerta x

Mientras XBee opera bajo esta modalidad envía constantemente una trama con información del estado de las puertas. Esta trama enviada en modo API posee el identificador 0x83. Se encuentra definida en el manual como “RX (Receive) Packet: 16-bit address I/O” (Digi International Inc., 2008). Su estructura se expone en la Figura 4.20.

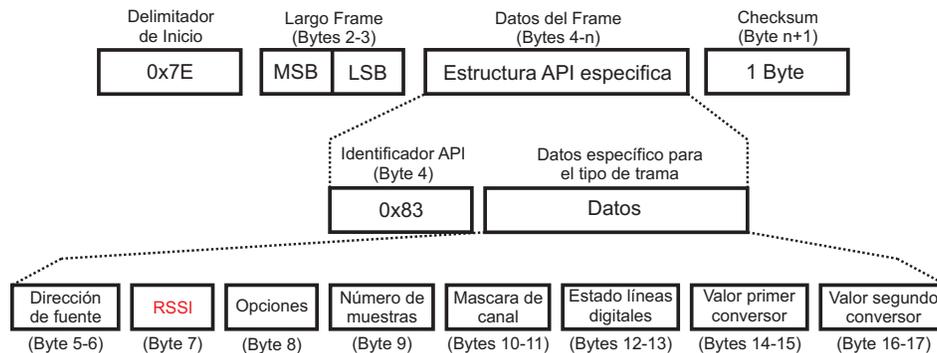


Figura 4.20. Estructura trama API ID: 0x83

Dentro de esta estructura se destaca el dato “RSSI” (Byte 7). Este valor indica el nivel de potencia recibida en  $[dBm]$  pero debe ser multiplicado por “-1” para obtener su valor real. El valor recibido está comprendido entre 0x00 y 0xFF.

Mediante esta trama y previo procesamiento y decodificación de la misma se obtiene el valor útil de RSSI.

#### 4.5.5. Configuración Dispositivos Inalámbricos

El sistema de reacción Anticipada emplea dos tipos de dispositivos inalámbricos para su operación: nodo de colecta y nodo beacon o faro. Cada uno de estos nodos posee tareas determinadas:

*Nodo de colecta:* esta tarea es realizada por un módulo inalámbrico XBee antena Chip configurado con el rol de coordinador del sistema. Será el encargado de recibir los datos provenientes de los nodos beacon y suministrarlos al sistema incorporando en el datagrama información de intensidad de recepción de los datos. Este nodo se ubica en uno de los extremos del conveyor cercano a la estación de parada.

*Nodos Beacon*: estos nodos serán los encargados de suministrar de forma constante información hacia los nodos de colecta. Tres tipos de dispositivos serán los encargados de esta tarea:

- XBee Antena Chip.
- XBee Antena Wire.
- XBee Pro Antena Wire.

Estos nodos se ubican sobre los pallet del sistema de forma que estos circulen por el conveyor del sistema. Cada módulo es configurado con el rol de “dispositivo final”.

La Figura 4.21 muestra un esquema de la situación donde se ve la disposición de los nodos.

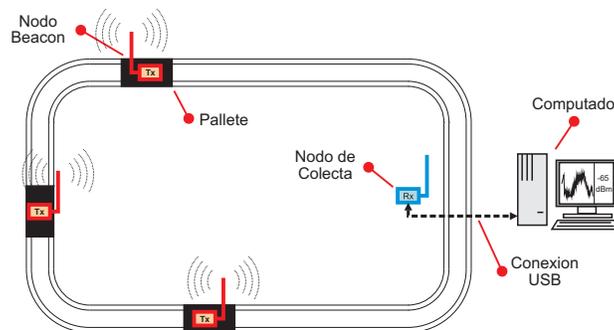


Figura 4.21. Disposición nodos del Sistema.

### Configuración de los nodos

La configuración de los principales parámetros empleados en los dos grupos de nodos se detalla en la Tabla 4.6. Se asume el resto de las configuraciones con los valores por defecto que el fabricante recomienda.

Tabla 4.6. Configuración módulos XBee

	<b>Nodo de Colecta</b>	<b>Nodo Beacon</b>
Dispositivo	XBee Ant. Chip	XBee Ant. Chip/Wire - XBee Pro
Rol	Coordinador	Dispositivo Final
Velocidad interface	57600[bps]	
Tasa de muestreo	N/A	54[ms]
Modo Operación	API	
Potencia Transmisión	0 [dBm]	0 [dBm] - 16[dBm]

## Configuración del Hardware

Las configuraciones de hardware necesarias para los módulos se dividen en dos categorías:

- Dispositivos móviles

Dentro de esta categoría se encuentran los módulos que desempeñan la función de nodos Beacon. Estos módulos no poseen conexión física con una estación base. Todos los datos son transmitidos de forma inalámbrica mientras el nodo se desplaza. La alimentación de este nodo se realiza mediante un conjunto de batería y regulador lineal considerando el requerimiento de movilidad y el carácter experimental del sistema. La Figura 4.22 esquematiza el sistema de alimentación del módulo y los voltajes empleados.



Figura 4.22. Configuración de hardware. Nodo Beacon.

- Dispositivo Base

Este tipo de dispositivo posee una ubicación fija y un enlace físico con un computador. El enlace se realiza mediante conexión USB obteniendo desde este medio la alimentación necesaria para su tarea. La conversión y adaptación de niveles de voltaje desde la interface USB hacia la interface serie del módulo

inalámbrico es realizada mediante la tarjeta “XBee Explorer USB” (Figura 4.23). Esta basa su funcionamiento sobre un chip puente USB a UART<sup>4</sup>.



Figura 4.23. XBee Explorer USB.

En la Figura 4.24 se muestra un esquema con el hardware utilizado por el Nodo de Colecta.



Figura 4.24. Configuración de hardware. Nodo de Colecta.

#### 4.5.6. Configuración manipulador y transporte

El sistema desarrollado hace uso de un robot manipulador scorbobot ER9 junto con el sistema de transporte del FMS. Ambos son gobernados por el software del SRA a través de mensajes intercambiados por puertos serie. Estos elementos son dispositivos que solo ejecutan órdenes o realizan tareas predeterminadas como es el caso del robot manipulador el cual requiere de una programación previa de los movimientos que realizara.

A continuación se detallan algunos aspectos de la configuración de estos elementos:

##### Robot Manipulador

El robot SCORBOT-ER9 cuenta con su propio sistema operativo. Este administra sus recursos y proporciona una plataforma de programación para el usuario la cual cuenta con un conjunto de funciones y operaciones para la operación del robot. Mediante este sistema se programan tres rutinas para el robot:

<sup>4</sup> UART: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

- **Posición de espera:** esta rutina ubica al robot en una de cuatro posiciones previamente registradas. Como parámetro para su funcionamiento se debe indicar el número de la posición. Las posiciones registradas son las empleadas en el capítulo “3.4.2.3. Experimentos“. pueden ser observadas en la figura 3.12.
- **Acercamiento a objetivo:** La rutina de acercamiento permite que el robot se mueva desde cualquier posición de origen hacia una posición cercana al punto de captura del pallet. Esta ubicación de acercamiento se encuentra sobre la estación de parada de la célula.
- **Captura de objetivo:** previa ejecución de la rutina de acercamiento. La ejecución de esta rutina permite que el robot manipule un template detenido en la estación retirándolo desde el conveyor y depositándolo sobre uno de los buffer<sup>5</sup> de la célula. Esta rutina recibe como parámetro de operación el número de buffer sobre el cual depositar el pallet.

Las rutinas programadas en el controlador del robot son llamadas mediante comandos ASCII enviados a la puerta serie disponible.

### **Sistema de transporte**

El sistema de transporte del FMS es gobernado por un PLC con un programa residente. Este ejecuta los servicios de control de pallet en las estaciones de parada (retención o liberación) e identificación de los pallet que circulan por las estaciones. Estos servicios son suministrados mediante comunicación serie hacia el software SRA. Este último debe extraer la información de interés desde las tramas enviadas por el PLC y generar las secuencia de comandos necesarios para la ejecución de las acciones requeridas.

---

<sup>5</sup> Buffer: Lugar temporal o transitorio donde se ubican los objetos que son empleados por el sistema.

#### 4.5.7. Software del Sistema

En los diferentes ítems de este capítulo se ha detallado la operación e implementación de los diferentes componentes del sistema de reacción Anticipada. Sin embargo es necesaria la operación en conjunto de estos elementos para alcanzar el objetivo deseado.

EL software del SRA administra y gestiona los diferentes componentes del sistema. Entre estos se incluyen la interface con el usuario, funciones de comunicación y los algoritmos de control.

El sistema obtiene información desde el nodo de colecta para ser procesada. A partir de estos datos se determina el instante en el cual debe operar el robot comunicándose esta instrucción mediante un canal establecido. Este a su vez informa al sistema el término de la rutina ejecutada. La Figura 4.25 muestra un diagrama con los principales componentes del sistema implementado.

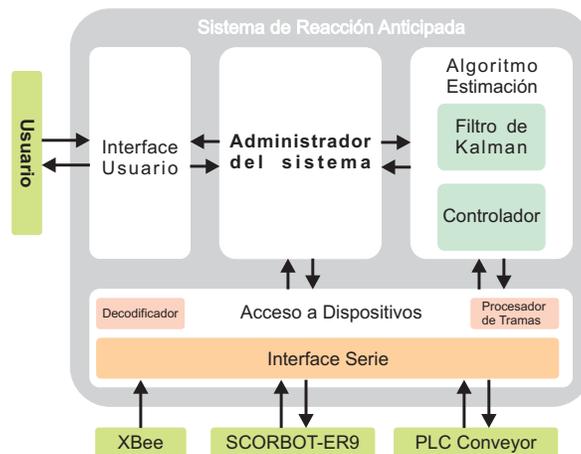


Figura 4.25. Componentes del SRA

La implementación del sistema se realiza mediante el software matemático Matlab en su versión R2011a. Una de las ventajas de este entorno de programación es la rápida creación de prototipos y el fácil manejo de operaciones con matrices que presenta, sin embargo, su lenguaje de programación es interpretado haciendo que su ejecución sea más lenta.

Anteriormente se mencionó que la obtención del valor de RSSI desde los módulos XBee se realiza previa decodificación de las tramas enviadas por éstos. Este proceso debe realizarse con el menor retraso posible razón por la cual no es recomendable su implementación en Matlab. Debido a este motivo se opta por la implementación de la etapa de decodificación en un lenguaje que permita la compilación en lenguaje de máquina nativo como C++. Se escoge el entorno de programación libre QT para la implementación de esta etapa del código.

De esta forma el software del sistema se divide en dos aplicaciones, éstas se resumen en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. División SRA

Aplicación	IDE
Software SRA	Matlab R2011a
Decodificador RSSI	QT

### Decodificador RSSI

El software de decodificador tiene la función de extraer el valor de RSSI desde la trama de información de estado enviada por el nodo beacon (ver Figura 4.20) y permitir el envío de dicho valor hacia otra aplicación. El diagrama en bloques del software se muestra en la Figura 4.26

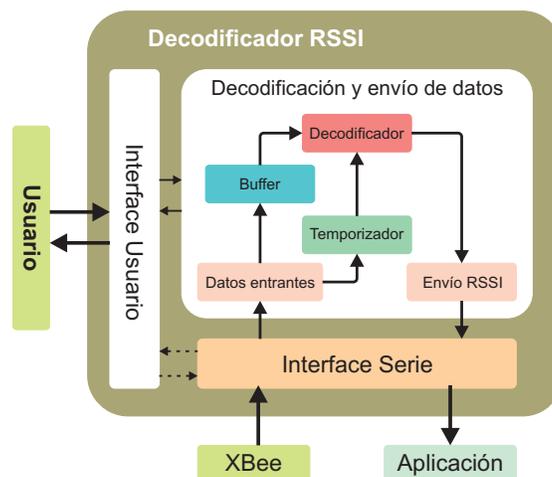


Figura 4.26. Diagrama de operación. Decodificador RSSI.

La operación del decodificador se resume de la siguiente forma: La información enviada por el módulo XBee se recibe y almacenada en una variable llamada "Buffer". Paralelo a este proceso se ejecuta un temporizador cuyo objetivo es determinar el término de recepción de la trama. A medida que se reciben los datos el temporizador es reiniciado, al terminar la recepción el temporizador se activa llamando una subrutina que decodifica la trama recibida. Terminado este proceso el valor de RSSI extraído se envía hacia un puerto serial para ponerlo a disposición de otra aplicación o dispositivo. La Figura 4.27 muestra una imagen de la interface de usuario del software implementado.

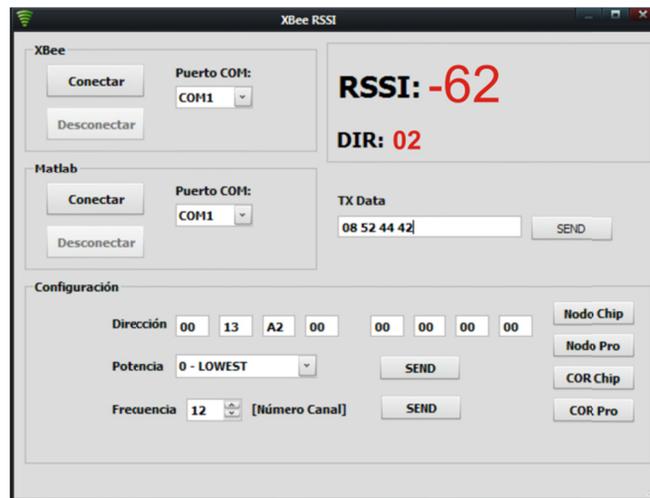


Figura 4.27. Interface Usuario. Decodificador RSSI.

## Software SRA

El software de reacción anticipada tiene por objetivo estimar la proximidad de los objetos de interés y determinar el instante en el cual el sistema debe actuar generando las órdenes necesarias para anticipar la llegada del pallet. Todo lo anterior a partir de los datos de RSSI disponibles. Los componentes del software se resumen en la Figura 4.28 en esta se presenta un diagrama en bloques con la operación del software el cual se procederá a explicar.

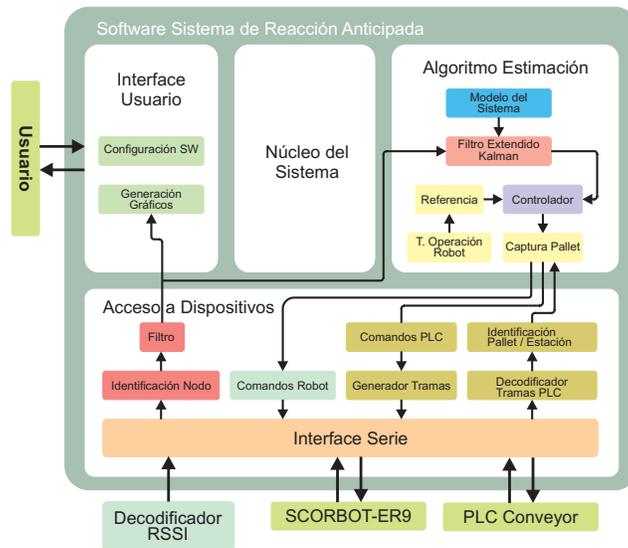


Figura 4.28. Diagrama de operación. SW. Sistema de Reacción Anticipada.

El software del SRA es programado en lenguaje de Matlab siendo una programación de tipo imperativa. Es decir se describen todos los pasos necesarios para solucionar el problema. Representa un funcionamiento diferente al empleado por el decodificador de RSSI el cual realiza operaciones a partir de los eventos que se generan en el sistema. Esto implica que la secuencia de operaciones debe ejecutarse de forma cíclica de la siguiente forma: lectura de dispositivos, ejecución de algoritmo de estimación y actualización estado de dispositivos. La secuencia se repite hasta lograr la captura del pallet objetivo.

El ciclo de operación del programa se inicia mediante un requerimiento del usuario. El software inicia el ciclo leyendo el valor de RSSI e identificación del nodo transmisor, desde el puerto serie asignado. Luego el dato es filtrado para luego ser procesado por el algoritmo de estimación. Obtenida la estimación del tiempo de arribo se ingresa este valor al controlador del sistema. Si el tiempo estimado no iguala al tiempo de referencia se mantiene el estado de salida del sistema y se repite el ciclo. Por el contrario si el tiempo de arribo iguala al tiempo de referencia el controlador da la orden para iniciar las operaciones de anticipo a la llegada del pallet. Esto incluye:

- Ejecución rutina “Acercamiento a objetivo” por parte del robot.
- Ordenar la detención del pallet en la estación.

Una vez llegado un pallet a la estación de manufactura se procede a determinar su número de identificación si este no coincide con el pallet esperado se le libera y se retiene el próximo hasta detener al pallet indicado. Cuando esto último ocurre se procede con las siguientes operaciones:

- Ejecución rutina “Captura de objetivo” por parte del robot.
- Liberación del pallet retenido por parte del PLC

Capturado el pallet se da término a la ejecución del algoritmo y el software entra en un estado de espera mientras aguarda la nueva tarea a realizar por parte del usuario.

La Figura 4.29 representa una captura de la interface de usuario del software del SRA.

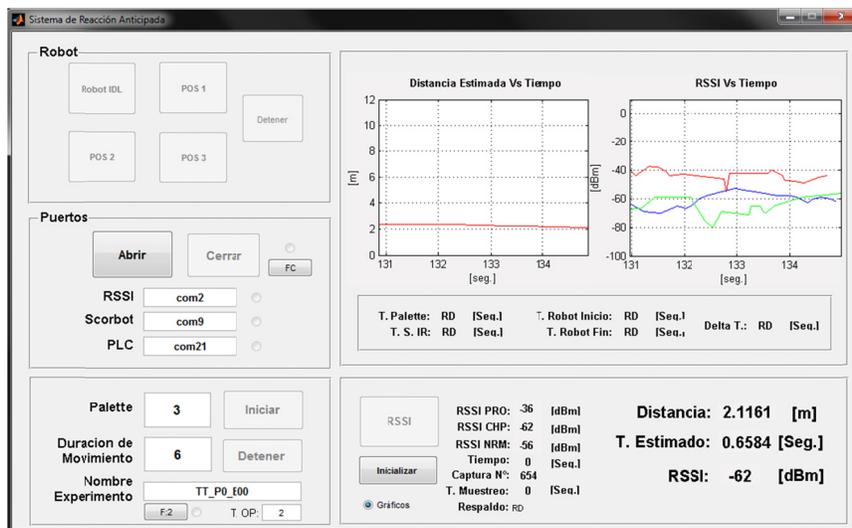


Figura 4.29. Interface Usuario. Software SRA

#### 4.5.8. Esquema del Sistema Implementado

Luego del desarrollo de las diferentes etapas que constituyen el sistema finalizando con la implementación del software central. Se concluye la etapa de diseño resumiendo en la Figura 4.30 la operación del algoritmo central del sistema de reacción anticipada. Diagrama que constituye el núcleo operacional del sistema.

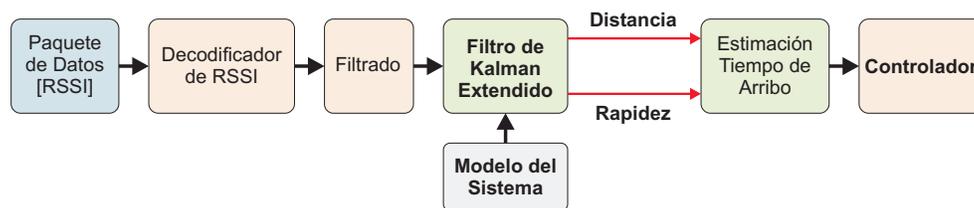


Figura 4.30. Esquema general del algoritmo del SRA

En este los paquetes de datos suministrados por el nodo de colecta son decodificados para obtener el valor de RSSI. Este es filtrado para ser empleado por el filtro de Kalman. Este junto al modelo del sistema estima la distancia y rapidez que posee el pallet, valores empleados posteriormente para la estimación del tiempo de arribo. Finalmente este valor es utilizado por el controlador para determinar el momento en el cual el sistema debe anticiparse a la llegada del pallet.

## 5. Pruebas de Sistema

---

### 5.1. Introducción

El presente capítulo expone de forma resumida la puesta en funcionamiento del sistema de reacción anticipada diseñado en el capítulo anterior. Proceso que contempla la calibración del algoritmo de estimación, comparación del sistema de filtrado empleado y posterior descripción de las diferentes pruebas realizadas al sistema para finalizar exponiendo los resultados obtenidos y realizar algunas observaciones sobre estos.

### 5.2. Calibración del Sistema

Concluida la etapa de desarrollo del sistema, el siguiente paso es realizar la puesta en funcionamiento del sistema. Esta etapa consiste en el ajuste de los parámetros del sistema para lograr una adecuada operación del mismo.

La calibración del sistema se realiza mediante el contraste de información obtenida de forma experimental y simulaciones mediante modelos del sistema.

Para la obtención de datos reales del sistema, se registran los valores de RSSI para cada nodo considerando diferentes posiciones del robot manipulador. Situación similar a la expuesta en capítulos anteriores. A partir de estos datos se simula el comportamiento del algoritmo de estimación y control bajo los parámetros ajustados del sistema. Los parámetros sometidos a estos ajustes son los siguientes:

- Potencia de referencia  $PL(d_0)$
- Exponente de pérdida por trayectoria  $\gamma$
- Desviación estándar de la perturbación de proceso  $\sigma_{pp}$
- Desviación estándar de la perturbación de medición  $\sigma_{pm}$

El ajuste de parámetros del sistema se realiza mediante el algoritmo Greedy. Este algoritmo busca solucionar un problema de optimización mediante la búsqueda de la mejor opción en cada momento. Para esto el algoritmo selecciona un óptimo local en cada iteración del algoritmo con la esperanza de alcanzar el óptimo global. (H. Cormen, et al. 2009).

La Figura 5.1 esquematiza la forma de operación de este algoritmo. En esta se tiene una solución inicial al problema con los parámetros determinados inicialmente. Luego se realizan variaciones de estos parámetros buscando disminuir los errores en las estimaciones del sistema. La opción que logra disminuir el error es seleccionada y el algoritmo vuelve a repetirse buscando nuevamente un óptimo local.

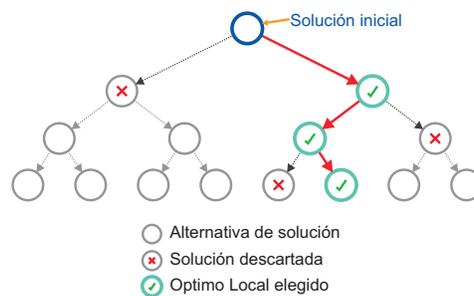


Figura 5.1. Operación algoritmo Greedy.

Una de las desventajas de este algoritmo implica que Greedy no asegura la obtención de una solución óptima global para el problema, sin embargo es un algoritmo simple y rápido de implementar que permite el ajuste de los parámetros del sistema.

Luego de aplicar el algoritmo de optimización se obtienen los nuevos parámetros para el sistema. Estos se observan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Parámetros Ajustados del Sistema

Nodo	$P_t$	$\overline{P_l}(1.5[m])$	$\gamma$	$\sigma_{pp}$	$\sigma_{pm}$
XBee Ant. Chip	0[dBm]	59.490[dBm]	1.949	0.0034	4.090
XBee Ant. Wire	0[dBm]	53.838[dBm]	3.186	0.0025	4.818
XBee Pro Ant. Wire	16[dBm]	52.160[dBm]	2.720	0.0023	6.0

Calibrado el sistema se realiza una prueba piloto para verificar los parámetros del algoritmo de estimación para cada nodo Beacon. Durante la prueba sólo se verifica la estimación realizada por el sistema por tanto no se realiza la captura de los pallets dejando que estos circulen de forma libre. La Figura 5.2.a muestra el valor de RSSI registrado para cada nodo. La Figura 5.2.b y Figura 5.2.c muestran las estimaciones de tiempo de arribo y distancia para cada ejemplar.

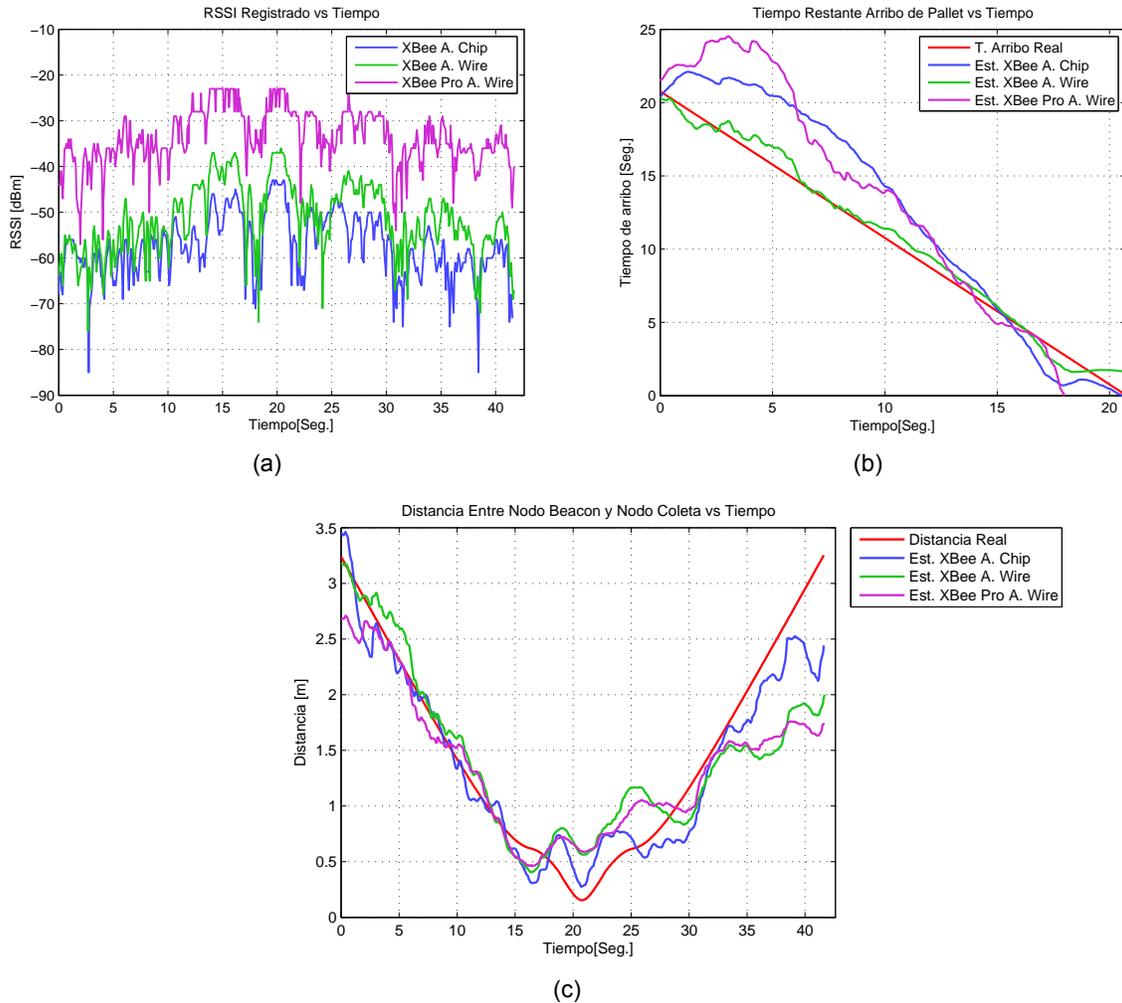


Figura 5.2. Estimación con valores calibrados. (a) Datos de entrada. (b) Estimación tiempo de arribo. (c) Estimación Distancia

La mejor estimación de distancia se realiza sobre la primera mitad del área de trabajo representado por los primeros 21 segundos en la Figura 5.2.c. En este tramo el pallet se acerca a la estación de parada alcanzando la menor distancia entre nodo transmisor y nodo coleta (aproximadamente 15[cm] ) para posteriormente alejarse en el caso de no ser detenido.

### 5.3. Comparación de Filtros

Este punto tiene como finalidad comparar el desempeño que obtiene el filtro adaptativo utilizado en el sistema SRA versus el desempeño que puede lograr un filtro digital como es filtro FIR. Lo anterior utilizando como métrica el error en la estimación de distancia que el sistema comete ante el empleo de uno u otro filtro.

La prueba considera el empleo de los filtros de forma directa, es decir sin utilizar otra etapa que permita una mejora de la señal medida de RSSI. Ambos filtros hacen uso del modelo del sistema para la estimación de distancia.

La prueba consiste en un recorrido completo en el sistema de transporte. El robot mantendrá una posición fija mientras un pallet circula por el sistema y se registran los valores de RSSI obtenidos. Durante la prueba los nodos utilizan la configuración por defecto para experimentación expuesta en la Tabla 3.3. La prueba se repite para cada uno de los nodos disponibles.

A partir de las pruebas realizadas se obtienen los siguientes resultados:

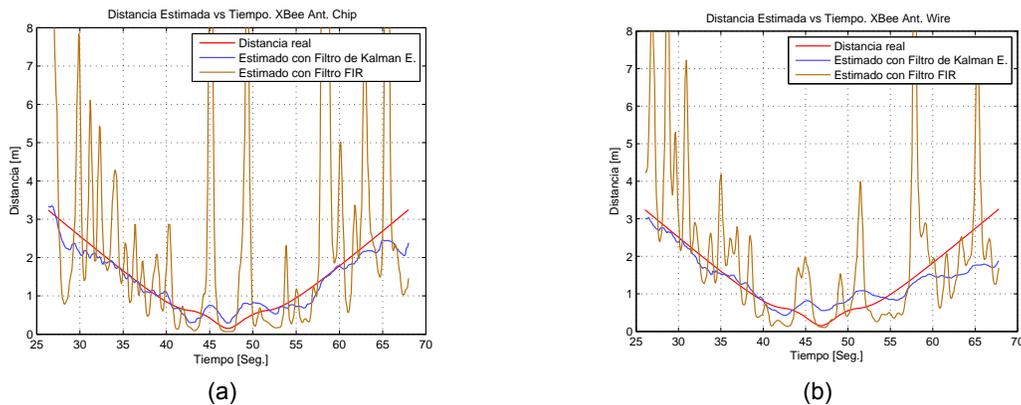


Figura 5.3. Estimación de distancia diferentes filtros. (a) XBee Ant. Chip (b) XBee Ant. Wire.

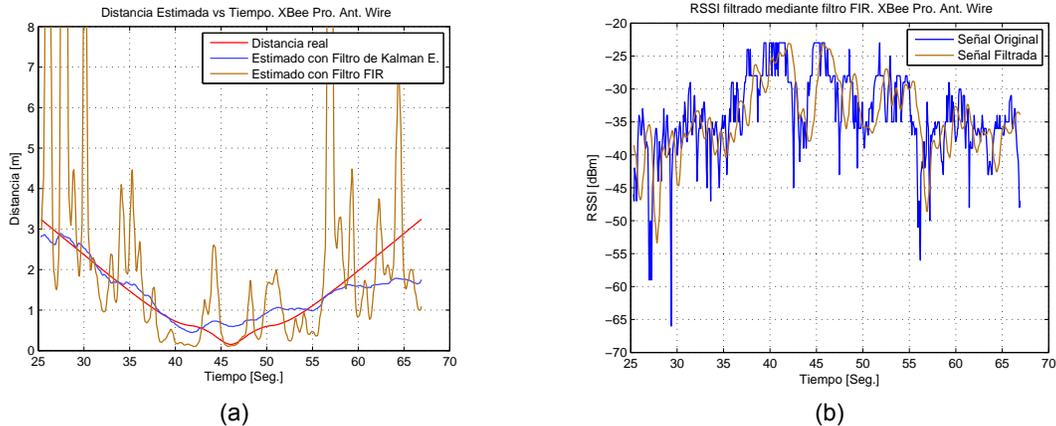


Figura 5.4. (a) Estimación de distancia diferentes filtros. Xbee Pro Ant. Wire. (b) Filtrado de señal RSSI. Xbee Pro Ant. Wire.

Examinando la Figura 5.3 y Figura 5.4.a puede observarse el desempeño inferior del filtro FIR ante este tipo de señal. Si bien logra eliminar gran parte del ruido presente en la misma como se observa en la Figura 5.4.b no permite obtener datos útiles para generar una estimación aceptable.

La Tabla 5.2 muestra el promedio de los errores absolutos en distancia cometidos por ambos filtros.

Tabla 5.2. Resultados prueba comparativa.

Nodo	Filtro de Kalman E.	Filtro FIR
XBee Ant. Chip	0.2205 [m]	1.8203 [m]
XBee Ant. Wire	0.3495 [m]	1.3766 [m]
XBee Pro Ant. Wire	0.3496 [m]	1.7734 [m]

La tabla anterior muestra el mayor error que se comete mediante el uso de un filtro FIR sin embargo no permite apreciar la dispersión de los datos medidos. Para esto es necesario recurrir a las figuras anteriores.

Pruebas anexas con un filtro FIR de mayor orden y bandas de transición más angosta demostró que si bien el error promedio disminuye a valores cercanos a 1.2 [m] el retardo en la señal se incrementa de forma considerable y las estimaciones generadas siguen siendo similares a las mostradas en las figuras anteriores.

## 5.4. Descripción Pruebas de Sistema Realizadas

Con el fin de medir el desempeño del sistema de reacción anticipada, se realiza una serie de pruebas bajo diferentes condiciones de operación. Estas pruebas tienen los siguientes objetivos:

- Comparar desempeño del sistema para diferentes nodos transmisores
- Comparar desempeño del sistema bajo diferente inicialización de la matriz de covarianza de error.
- Medir desempeño global del sistema.
- Observar efecto que provoca la variación de la tasa de muestreo en las estimaciones del sistema.

Para llevar a cabo estos objetivos se realizan las siguientes pruebas:

- *Prueba de desempeño individual.*
- *Prueba de desempeño global.*
- *Degradación de estimación por disminución de tasa de muestreo.*

En cada prueba se registran las estimaciones de distancia, tiempo de arribo y tiempo de captura del pallet. Este último valor se define como el tiempo transcurrido entre la llegada del pallet a la estación de destino y el tiempo que tarda el robot en aproximarse a la posición de captura del pallet. Un valor ideal para el tiempo de captura será un valor cercano a cero segundos.

Las métricas de desempeño del sistema serán:

- Error Absoluto Estimación de distancia.
- Error Absoluto Estimación Tiempo de Arribo.
- Error Absoluto Tiempo de Captura.

### 5.4.1. Prueba de Desempeño Individual

Esta prueba contrasta el desempeño del SRA considerando el uso de diferentes nodos Beacon. La prueba se desarrolla de la siguiente forma:

Se ubica un nodo Beacon sobre un Template, este a su vez sobre un pallet del sistema. El SRA inicia su operación y el pallet circula por el sistema hasta ser capturado por el robot manipulador.

La prueba se realiza para cada nodo Beacon disponible de forma individual. Cada uno es probado con diferentes posiciones del robot (se emplean las posiciones almacenadas anteriormente. Ver Figura 3.12). Se realizan 10 pruebas por configuración del sistema.

Junto con lo anterior se observa el efecto que provoca en los resultados la forma en la cual se inicializa la matriz de covarianza de error ( $P$ ). Para esto se ejecutan dos versiones del algoritmo de estimación:

- **Ver. A:** versión original del algoritmo. En esta la matriz de covarianza del error se inicializa en un valor cercano a cero y su valor se modifica a medida que las pruebas se suceden.
- **Ver. B:** algoritmo modificado. En esta versión la matriz de covarianza del error se inicializa con un valor predefinido. Dicho valor se obtiene luego de ejecuciones sucesivas del algoritmo original. Durante cada ejecución del experimento el valor de la matriz es inicializado en este valor.

### 5.4.2. Prueba de Desempeño Global

En esta prueba se observa el desempeño del sistema ante condiciones normales de operación. Esto consiste en la captura de alguno de los tres Pallet disponibles para el sistema a partir de una posición aleatoria como punto de inicio para el robot manipulador.

Para esta prueba se hacen uso de los 3 nodos Beacon disponibles (XBee Ant. Chip, XBee Ant. Wire y XBee Pro Ant. Wire) transmitiendo de forma simultánea. Se compara el desempeño de cada nodo de forma individual con el desempeño del sistema ante una selección aleatoria del nodo objetivo. La selección de la posición inicial del robot se realiza de forma aleatoria para cada prueba realizada.

Al igual que en la prueba anterior se observa el efecto de la inicialización de la matriz  $P$ .

Por cada configuración del experimento se realizan 10 pruebas de forma consecutiva.

#### **5.4.3. Degradación de Estimación por Disminución de Tasa de Muestreo.**

Esta prueba mide el efecto que provoca la disminución en la tasa de muestreo de la señal de RSSI (aumento de tiempo de muestreo) en las estimaciones del sistema. Como la prueba evalúa un factor específico se bloquean el resto de los factores. Por tanto la prueba se realiza utilizando un tipo de nodo Beacon (XBee Ant. Chip) mientras el robot manipulador adopta una misma posición inicial para cada una de las pruebas.

Los experimentos consideran incrementos de  $100[ms]$  en la tasa de muestreo dado un valor inicial de  $100[ms]$  y un valor final de pruebas de  $1100[ms]$ .

## 5.5. Resultados

### 5.5.1. Prueba de Desempeño Individual.

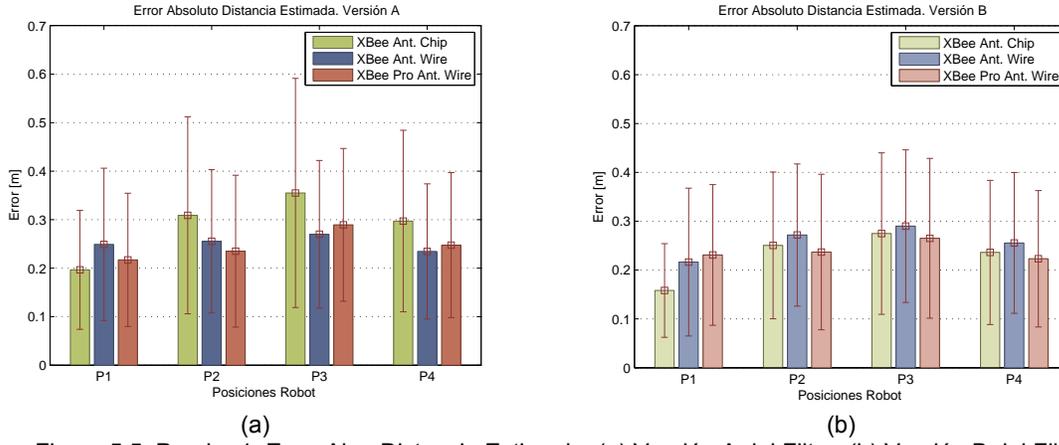


Figura 5.5. Prueba 1. Error Abs. Distancia Estimada. (a) Versión A del Filtro. (b) Versión B del Filtro.

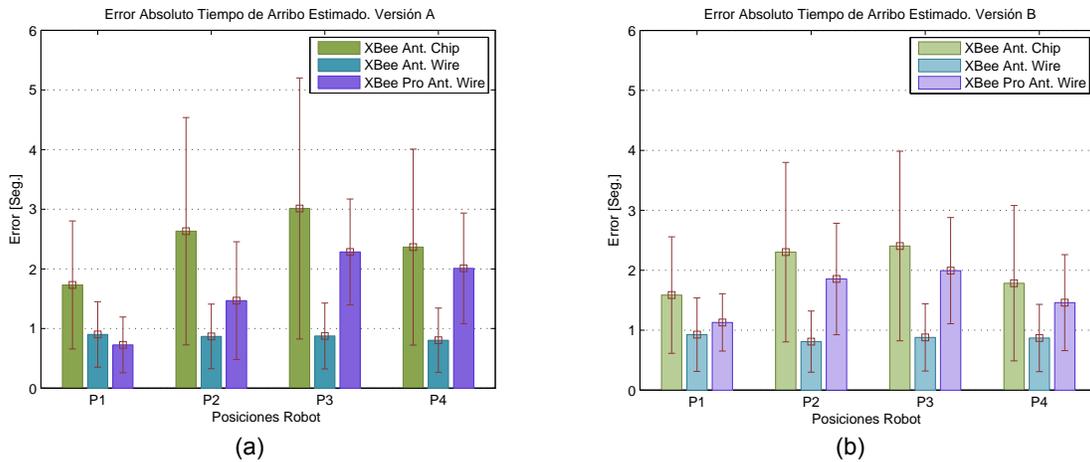


Figura 5.6. Prueba 1. Error Abs. Tiempo de Arribo Estimado. (a) Versión A del Filtro. (b) Versión B del Filtro.

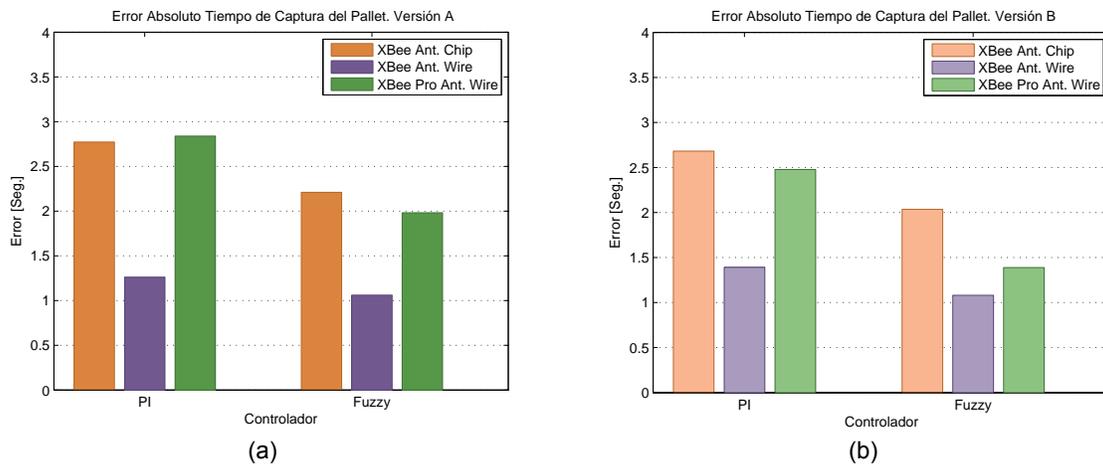


Figura 5.7. Prueba 1. Error Absoluto Tiempo de Captura. (a) Versión A del Filtro. (b) Versión B del Filtro.

### 5.5.2. Prueba de Desempeño Global.

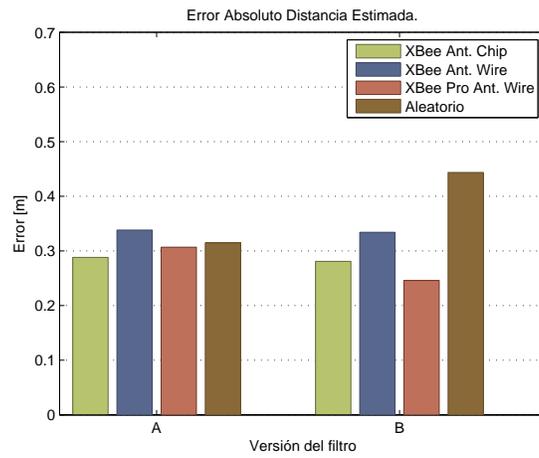


Figura 5.8. Prueba 2. Error Absoluto Distancia Estimada.

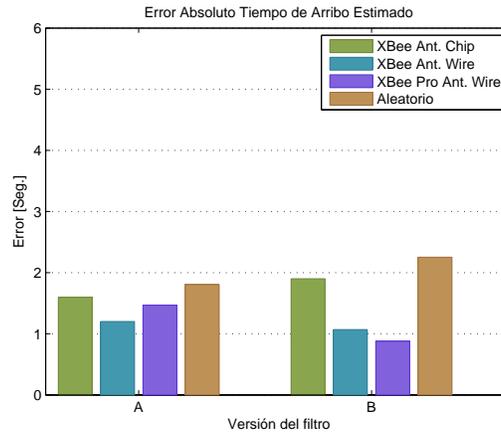
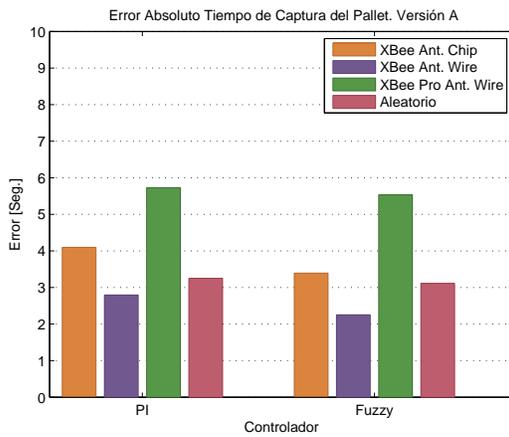
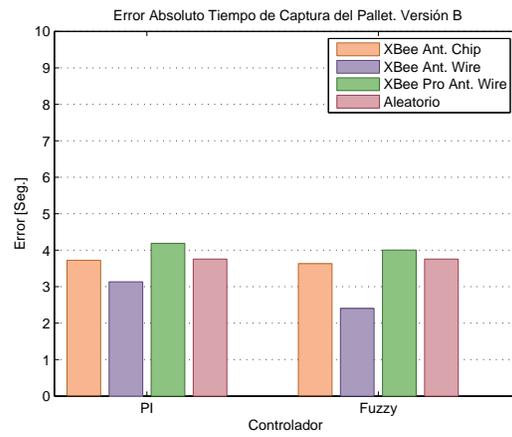


Figura 5.9. Prueba 2. Error Absoluto Tiempo de Arribo Estimado



(a)



(b)

Figura 5.10. Prueba 2. Error Absoluto Tiempo de Captura. (a) Versión A del Filtro. (b) Versión B del Filtro.

### 5.5.3. Degradación de Estimación por Disminución de Tasa de Muestreo.

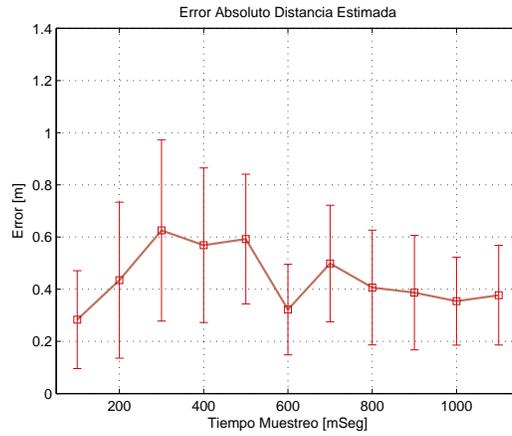


Figura 5.11. Prueba 3. Error Absoluto Distancia Estimada.

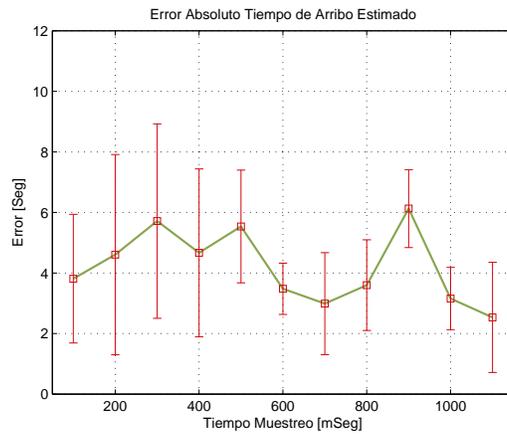


Figura 5.12. Prueba 3. Error Absoluto Tiempo de Arribo Estimado.

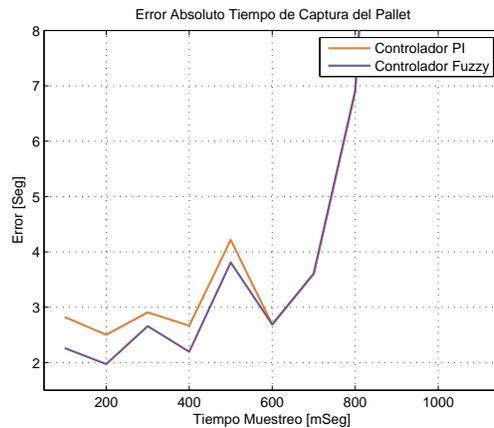


Figura 5.13. Prueba 3. Error Absoluto Tiempo de Captura.

## 5.6. Observaciones

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño del sistema, se puede observar una merma en el desempeño de éste al incluir un mayor número de nodos transmisores operando de forma simultánea (ver Figura 5.5 y Figura 5.8). Cabe destacar que el modo de operación de los nodos transmisores ocasiona una suerte de disputa por el medio de transmisión. La información recibida desde estos nodos es en forma aleatoria, no existiendo un orden en la forma de envío. Esto ocasiona inestabilidad y disminución en la tasa de muestreo de RSSI. Dando como resultado un aumento de error en la estimación de distancia el cual crece en un 18.3%. La Figura 5.14 ejemplifica lo planteado. En esta figura se observa la tasa de muestreo para XBee Antena Chip funcionando de forma independiente y la tasa obtenida en un escenario con 3 nodos transmitiendo de forma simultánea.

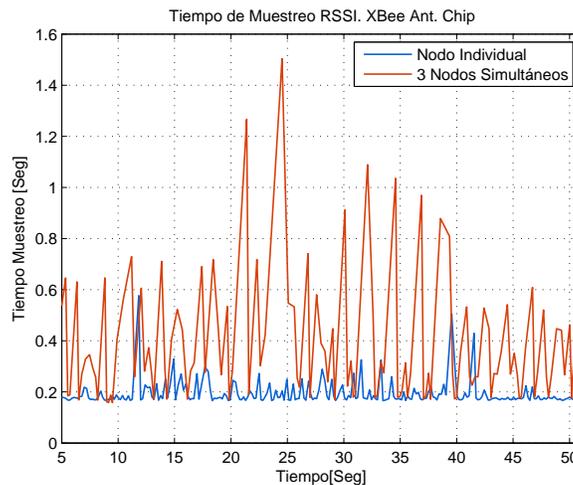


Figura 5.14. Tiempo de muestreo nodo XBee Ant. Chip

Respecto al desempeño del sistema. Este se mantiene dentro de los parámetros aceptables al emplear solo un nodo Beacon. Observándose errores en la estimación de distancia de alrededor de 25[cm] y errores en la estimación de tiempo de arribo de alrededor de 1.5[seg]. Esto permite que el sistema cumpla con los requisitos de diseño al obtener un tiempo de Captura del pallet objetivo menor a 3[seg] (en promedio 2[seg]).

La última prueba realizada al sistema permite determinar la tasa de muestreo máxima soportada por el sistema. Esta es de  $600[ms]$  para el caso de un nodo individual. Para el caso de emplear un mayor número de nodos esta tasa debe permitir el aumento de nodos sin mermar de forma significativa el desempeño del sistema. Sin embargo se hace necesario una forma de sincronizar los nodos transmisores para ordenar el envío de datos al nodo de colecta.

Un Tiempo de muestreo mayor al determinado ocasiona que el sistema no pueda determinar de forma adecuada la zona de operación del controlador. Lo anterior repercute en el algoritmo de captura del pallet, ocasionando que éste no se detenga de forma oportuna, por lo cual el pallet circula sin detenerse en la estación de interés debiendo esperar a una nueva aproximación de éste para ser capturado. Este es el efecto observado en la Figura 5.13 en la cual valores mayores al establecido generan un incremento desmedido del tiempo de captura del pallet.

Otro punto al cual debe hacerse referencia es el resultado obtenido por el sistema considerando ambas versiones del algoritmo de estimación. Los resultados de esta comparación denotan que existe una apreciable mejora en los resultados obtenidos mediante el empleo de una matriz de covarianza de error inicializada en un valor prefijado (Versión B del algoritmo). En los resultados se aprecia en general una disminución del error en las estimaciones que bordea el 8%, en el caso del tiempo de captura se observa una mejoría del 10% al emplear la versión B del algoritmo.

Respecto al desempeño de los controladores empleados en el sistema se observan mejores resultados mediante el uso del controlador difuso en la totalidad de las pruebas implementadas. El controlador difuso presenta reducción en los tiempos de captura respecto al controlador PI de un 27% en la prueba de desempeño individual y un 10% en la prueba de desempeño global.

Finalmente se observa el desempeño del sistema considerando los tres nodos empleados. De estos los mejores resultados considerando estimación de tiempo de arribo y tiempo de captura del pallet los obtiene el módulo XBee Antena Wire. La Figura 5.6 y Figura 5.7 demuestran lo anterior.

## 6. Conclusiones

---

EL sistema de reacción anticipada SRA del cual se expuso su desarrollo permite demostrar el potencial que poseen las emergentes tecnologías inalámbricas que día a día se están incorporando al sector industrial. A continuación, se exponen las conclusiones obtenidas del presente trabajo.

A partir del estudio realizado sobre el comportamiento del Indicador de fuerza de la señal recibida o RSSI se puede afirmar lo siguiente. Las ondas de radio frecuencia en ambientes abiertos siguen un comportamiento según lo predicho por el modelo de propagación de espacio abierto. Lo cual permite una adecuada modelación bajo este ambiente. Bajo un escenario cerrado como el interior del laboratorio CIM el comportamiento de las señales se ve fuertemente afectado por fenómenos de rebote de señal, dispersión, interferencias por multi-trayectorias, etc; producto de la morfología del medio. A pesar de lo anterior, es posible observar a una distancia cercana entre los nodos, un comportamiento que sigue los modelos de propagación establecidos, por lo cual, es posible su modelación.

Bajo el mismo contexto se establece que el modelo de propagación log-normal es adecuado para su uso en ambos ambientes. Sin embargo en un ambiente cerrado es necesario considerar restricciones sobre la disposición del lugar de trabajo y la distancia en la cual se consideran válidas las estimaciones.

Durante el diseño del sistema fue necesaria una etapa de experimentación con el fin de obtener datos útiles para realizar la calibración del sistema. A partir de dichos experimentos se desprende lo siguiente. Debido a la inestabilidad de la señal de RSSI se debe procurar la realización de los experimentos bajo una misma disposición del lugar de trabajo. En caso de existir dispositivos que requieran cambiar de ubicación o posición será necesario considerar la mayor cantidad de escenarios posibles sobre los cuales experimentar con el sistema a fin

de obtener una relación adecuada entre distancia y RSSI que se adapte al entorno de operación de interés.

Desde la implementación del sistema en sus etapas tempranas se pudo determinar que el uso del filtro adaptativo en el algoritmo de estimación permite obtener buenas estimaciones ante señales con un alto componente de ruido. Su comparación contra un filtro de coeficientes estáticos como fue el caso del filtro FIR demostró que estos últimos no son adecuados para este tipo de tareas siendo necesario el uso de filtrado adaptativo como es el caso del filtro de Kalman.

La implementación del algoritmo con el filtro de Kalman permite atenuar en gran medida el ruido presente en la señal de RSSI. Sin embargo, el algoritmo no genera correcciones ante distorsiones de la señal producto del ambiente. Este tipo de corrección debe ser llevado a cabo mediante la incorporación de una realimentación al sistema.

Realizadas pruebas al sistema implementado se demuestra que el SRA consigue obtener un tiempo de respuesta menor al tiempo empleado por el sistema CIM original (tiempo de respuesta menor a 3[seg.]). Las condiciones bajo las cuales se logran estos resultados implican limitar el número de nodos con los que opera el sistema. A pesar de lo anterior las pruebas realizadas sobre frecuencia de muestreo admisible demuestran que es posible realizar una estimación adecuada de distancia incorporando nodos adicionales, pero es necesaria la incorporación de un sistema que permita asegurar una tasa de muestreo constante de los datos.

Finalmente el desarrollo del presente trabajo concluye que es viable la estimación de distancia a partir de datos de RSSI y su aplicación en problema de optimización para la reducción de tiempos de proceso. Lo anterior bajo ciertas condiciones: funcionar dentro de un medio de operación estable (no se generen grandes cambios en su distribución espacial) y establecer un rango de alcance sobre el cual el sistema puede realizar una estimación de distancia. De esta forma se logra que el SRA pueda estimar de forma adecuada la distancia a la que se encuentran

los pallet que se acercan a la estación y permitir que el robot pueda anticiparse a su llegada.

## 7. Trabajo Futuro

---

### 7.1. Mejoras al Sistema

El sistema de reacción anticipada es un sistema que posee sólo una entrada y una salida sin realimentación alguna. Como entrada al sistema tenemos los datos de RSSI obtenidos desde los nodos Beacon y como salida la acción de control ejercida sobre el PLC del sistema y el robot manipulador. Internamente el sistema estima la distancia de los pallet apoyándose sobre un modelo matemático. Los parámetros de este modelo así como el resto de los parámetros de operación deben ser determinados para el medio en el cual el SRA se desenvuelve. Un cambio en el ambiente afecta a los parámetros del sistema y consecuentemente deteriora las estimaciones. Este punto representa una de las principales falencias del sistema y un tema sobre el cual avanzar. Una mejora en las estimaciones que realiza el sistema puede lograrse a partir de la incorporación de un sistema de realimentación que permita el ajuste y la corrección de los parámetros del sistema. Se estima que este punto es posible de lograr mediante la incorporación de un nodo que actúe como Faro situado en un punto fijo y sirva como referencia.

Otros aspectos a mejorar en el sistema es la falta de regulación en el envío de datos hacia el punto de colecta por parte de los nodos Beacon. Este punto fue mencionado en el apartado 6.5 donde se expusieron observaciones al sistema posterior a las pruebas aplicadas a éste. En dicha instancia se menciona el efecto negativo que genera la inclusión nodos Beacon transmitiendo de forma simultánea. Esto ocasiona una disminución e inestabilidad en la tasa de muestreo de la señal. La corrección de este problema puede lograrse mediante un mecanismo de consulta (Polling) a cada nodo trasmisor presente en el sistema o mediante el uso de un método de QoS (Calidad de Servicio) como GTS (Slot de tiempo garantizado) implementado en el modo de operación "Super-Frame" definido en IEEE 802.15.4

## 7.2. Estudios Restantes al Sistema

Las pruebas realizadas al sistema para comprobación de su desempeño solo abarcaron aspectos como la tasa de muestreo máxima soportada, el efecto de inicialización de la matriz de covarianza de errores y desempeño bajo condiciones normales. Uno de los aspectos que influyó en el diseño del sistema y no logró ser medido es la velocidad de avance del pallet y el efecto que provoca un cambio en esta variable. Dado que el conveyor del sistema CIM opera a una velocidad constante mediante alimentación directa, se hace necesario hardware adicional para generar una variación en la velocidad de operación de este elemento.

Otro aspecto a comprobar posee relación con el problema de inestabilidad y disminución de la tasa de muestreo. Este es la determinación del número máximo de nodos transmisores soportados por el sistema y la pérdida de desempeño que genera la inclusión de cada nodo adicional.

Un último estudio a realizarse sobre el sistema es el aspecto energético del mismo. Colocando especial énfasis en el consumo y duración de los nodos transmisores. Esto debido al carácter móvil que presentan y al hecho de estar alimentados por baterías. Un dato interesante de conocer sería el consumo de los nodos bajo diferentes tasas de muestreo de la señal.

## 8. Bibliografía

---

- Arbelo, M. (2002). Tutorial de Teledetección - Fundamentos Físicos. Canarias, España: Universidad de La Laguna .
- Barsocchi, P., Bonito, A. B., & Chessa, S. (2007). Location in Open Fields by using RSSI on IEEE 802.15.4. *Proc. 15th IEEE IMEKO TC4 Symposium on Novelties in Electrical Measurements and Instrumentation*, (págs. 1154 - 1160). Iasi, Romania.
- Benkic, K., Malajner, M., Planinsic, P., & Cucej, Z. (2008). Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee. *15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, 2008. IWSSIP 2008*. (págs. 303 - 306). Bratislava: SPaRC Lab., UM-FERI Maribor, Maribor.
- Blumenthal, J., Reichenbach, F., & Timmermann, D. (2008). Minimal Transmission Power vs Signal Strength as Distance Estimation for Localization in Wireless Sensor Networks. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008.*, (págs. 1537 - 1542).
- Caceres, M. A., Sottile, F., & Spirito, M. A. (2009). Adaptive Location Tracking by Kalman Filter in Wireless Sensor Networks. *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*.
- Castro, B., Gomes, I., Ribeiro, F., & Cavalcante, G. (2010). COST231-Hata and SUI Models Performance Using a LMS Tuning Algorithm on 5.8GHz in Amazon Region Cities. *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2010*, (págs. 1-3).
- Digi International Inc. (4 de Septiembre de 2008). *XBee®/XBee-PRO® RF Modules*. Recuperado el 10 de Octubre de 2010, de Digi International Inc.: [http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982\\_A.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_A.pdf)

- Durán Faúndez, C. R. (2005). *Control Distribuido Auto-organizado para un Sistema Flexible de Manufactura*. Universidad Del BÍO-BÍO, Departamento De Sistemas De Información, Concepción.
- Duran-Faundez , C., Aguilera-Carrasco, C., & Norambuena, A. (2010). Experimenting with RSSI for the perception of moving units in intelligent flexible manufacturing systems. *IEEE-ICIT 2010 International Conference on Industrial Technology*. Viña del Mar, Chile.
- Ekahau. (2011). Recuperado el 25 de 08 de 2011, de Ekahau - Wi-Fi Tracking Systems, RTLS and WLAN Site Survey: <http://www.ekahau.com/>
- ESHED ROBOTEC . (2000). OpenCIM Universidad Bío-Bío. Concepción.
- Frenzel, A., Carrasco, A., Monachesi, E., & Chaile, M. (2010). *Física De Las Ondas Radioeléctricas Dentro Del Estándar IEEE 802.11b*. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán. Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
- Frenzel, L. (2003). *Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*. México: ALFAOMEGA.
- Goñi Grandmontagne, A., de Eguino Gamarra-Mayor, M. R., & de Miguel Arnáiz, J. L. (1997). Sociabilidad y buenos modales. *Revista Electrónica Interuniversitaria de Formación del Profesorado*.
- Grover Brown, R., & Y. C. Hwang , P. (1997). *Introduction to random signals and applied kalman filtering with matlab exercises and solution* (Tercera ed.). Estados Unidos: JOHN WILEY & SONS.
- H. Cormen, T., E. Leiserson, C., L. Rivest, R., & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms* (Tercera ed.). Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Hernando Rábanos, J. M. (2008). *Transmisión por Radio* (6 ed., Vol. 1). Madrid, España: Centro de Estudios Ramón Areces.

- Holger, K., & Andreas, W. (2005). *Protocols And Architectures For Wireless Sensor Networks*. England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Hyncica, O., Kacz, P., Fiedler, P., Bradac, Z., Kucera, P., & Vrba, R. (2006). The ZigBee Experience. *Second International Symposium on Communications, Control, and Signal Processing*, (págs. 0-3). Marrakech, Marocco.
- Ibrahim, A. M. (1997). *Introduction to Applied Fuzzy Electronics*. Prentice Hall.
- IEEE Computer Society. (8 de septiembre de 2006). Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York, NY, USA.
- Ingle, V. K., & Proakis, J. G. (1997). *DIGITAL SIGNAL PROCESSING USING MATLAB V.4*. Boston: PWS Publishing Company.
- Latvala, J., Helén, M., Ikonen, H., & Niittylahti, J. (2005). Using Calibration in RSSI-based Location Tracking System.
- Liker, J. (2004). *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Ljung, L. (1999). *System Identification Theory for the User*. Prentice Hall PTR.
- Lymberopoulos, D., Lindsey, Q., & Savvides, A. (2006). An Empirical Characterization of Radio Signal Strength Variability in 3-D IEEE 802.15.4 Networks Using Monopole Antennas. *Proceedings of the 3rd Workshop on European Wireless Sensor Networks (EWSN'06)*, (págs. 326-341).
- Marín Diazaraque, J. M. (2006). *Introducción al Diseño de Experimentos*. Recuperado el 7 de Septiembre de 2011, de Sitio Web Universidad Carlos III de Madrid:  
<http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Disenno/IntroDE.pdf>

- MaxStream. (September 2005). *XBee & XBee-PRO OEM RF Module Antenna Considerations*. Recuperado el 11 de marzo de 2011, de [http://ftp1.digi.com/support/images/XST-AN019a\\_XBeeAntennas.pdf](http://ftp1.digi.com/support/images/XST-AN019a_XBeeAntennas.pdf)
- Melcón Álvarez, Á. (2003). La cortesía: precepto racional. *Complutense de Educación*, 14 (2), 603-606.
- Morales O., F. (2003). *Modelamiento orientado a objetos del CIM-UBB*. Tesis de título de ingeniero civil en informática, Universidad del Bío-Bío, Facultad de ciencias empresariales, Concepción.
- Onendis. (2008-2011). *Onendis Systems*. Recuperado el 26 de 08 de 2011, de <http://www.onendis.com>
- Orooji, M., & Abolhassani, B. (2005). New Method for Estimation of Mobile Location Based on Signal Attenuation and Hata Model Signal Prediction. *Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, (págs. 6025 - 6028). Shanghai, China.
- Pascual, A. (Mayo de 2006). *EKF y UKF: dos extensiones del filtro de Kalman para sistemas no lineales aplicadas al control de un péndulo invertido*. Recuperado el 20 de Marzo de 2011, de Universidad de la República : [http://www.fing.edu.uy/iie/ense/asign/tes/materiales/monografias/TES2004\\_pascual.pdf](http://www.fing.edu.uy/iie/ense/asign/tes/materiales/monografias/TES2004_pascual.pdf)
- Protech Systems. (2011). *Protech Series26 Hawk Eye Brochure*. Recuperado el 20 de 11 de 2011, de Sterling Machinery: <http://www.sterlingmachinery.com/db-files/protech%20series26%20hawkeye%20brochure.pdf>
- Ramírez Ramos, O. (2008). *Simulación en simmechanics de un sistema de control difuso para el robot udlap*. Tesis profesional, Universidad de las Américas Puebla, Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica, Cholula, Puebla, México.

- Saxena, M., Gupta, P., & Nath Jain, B. (2008). Experimental Analysis of RSSI-based Location Estimation in Wireless Sensor Networks. *COMSWARE 2008 - 3rd International ICST Conference on COMmunication System SoftWAre and MiddlewaRE*, (págs. 503 - 510). Bangalore.
- Seidel, S. Y., & Rappaport, T. S. (1992). 914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 40, págs. 207 - 217.
- Serway, R., Beichner, R., & Jewett, J. (1999). *Physics: For Scientists and Engineers* (5th ed.). Brooks Cole.
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: Pearson Educación.
- Transmilenio S.A. (2011). *Sistema de Transporte Público Masivo de Bogotá D.C.* Recuperado el 20 de 11 de 2011, de [www.transmilenio.gov.co](http://www.transmilenio.gov.co)
- Universidad Nacional de Cordoba. (2009). Filtros Adaptativos – LMS – RMS – Filtro Kalman. (L. d. Señales, Ed.) Córdoba, Argentina.
- Wang, Y., Jia, X., & Lee, H. K. (2003). An indoors wireless positioning system based on wireless local area network infrastructure. *The 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services*. Melbourne, Australia.
- Welch, G., & Bishop, G. (2006). *An Introduction to the Kalman Filter*. Reference Material, University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science., Chapel Hill.
- WildPackets, I. (Noviembre de 2002). Converting Signal Strength Percentage to dBm Values.

# Anexo

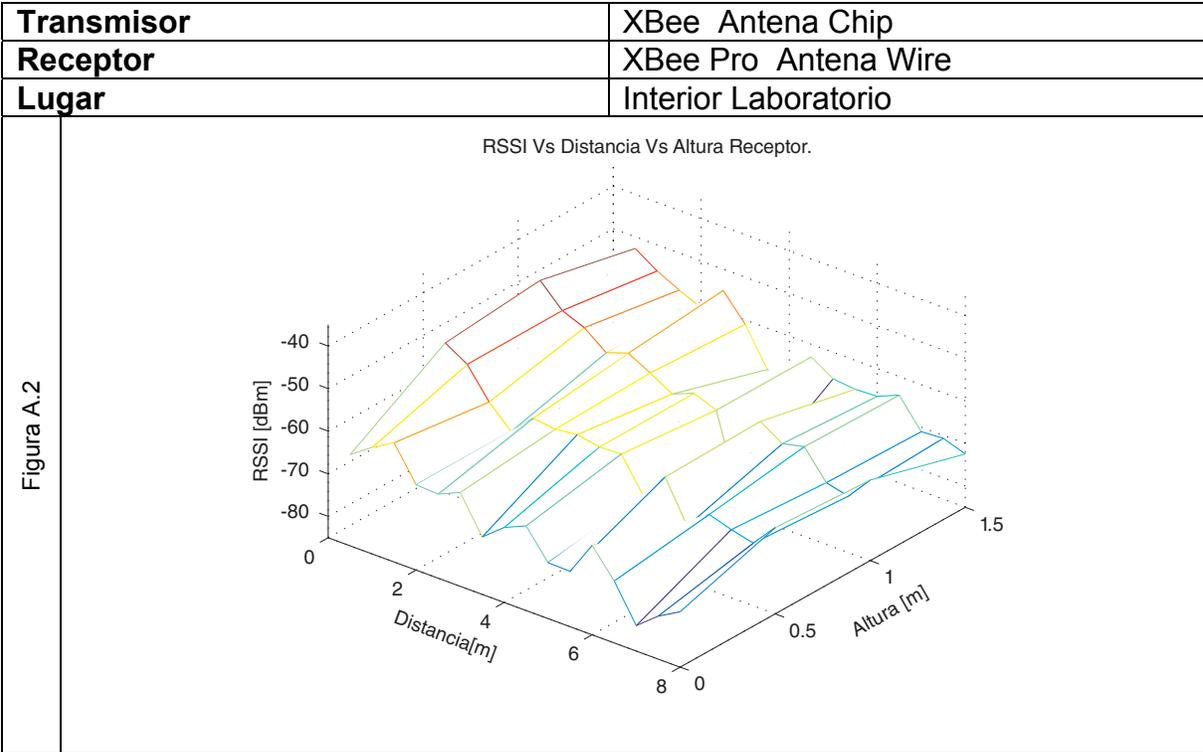
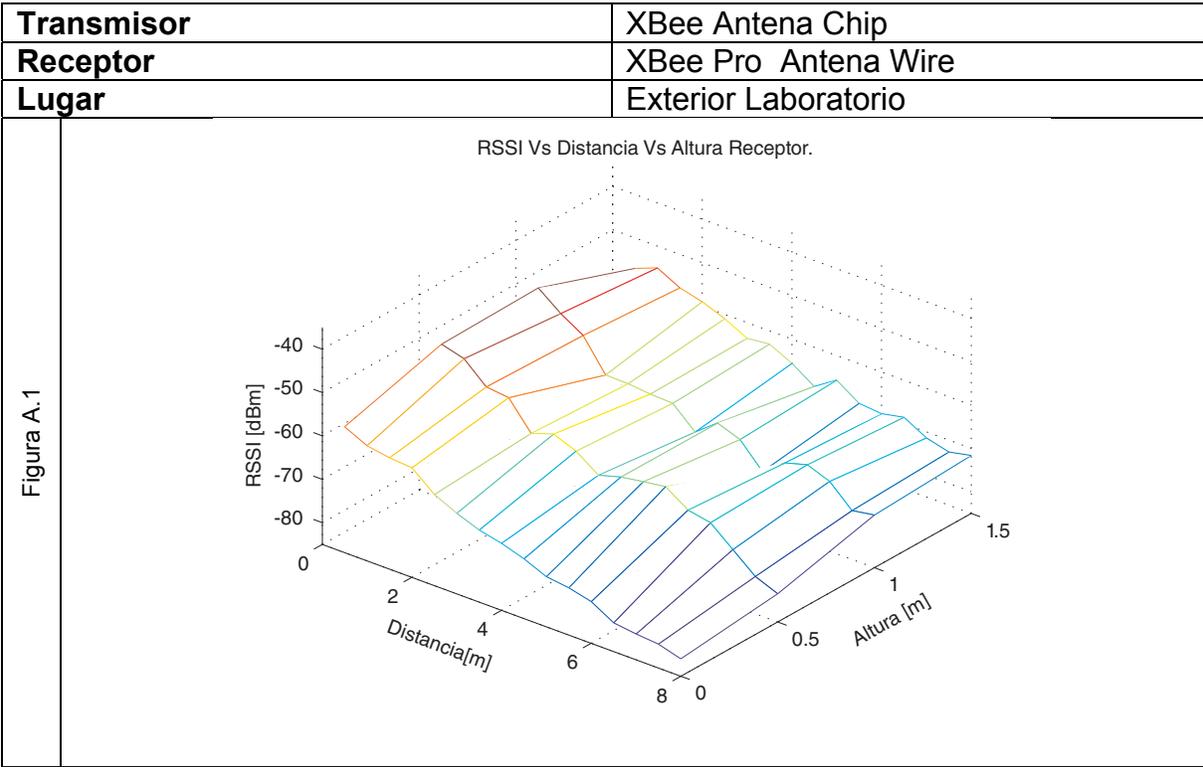
---

# A. Resultados Experimentos

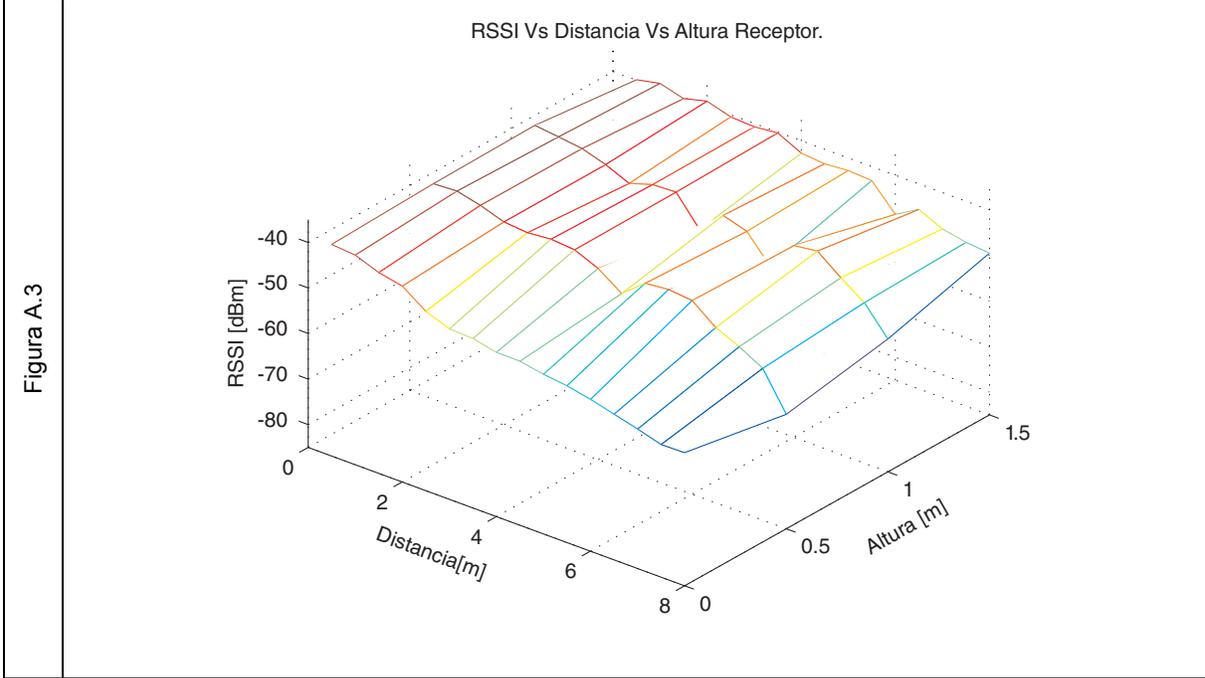
---

Este anexo recopila los resultados obtenidos durante los experimentos especificados en el punto 4.4

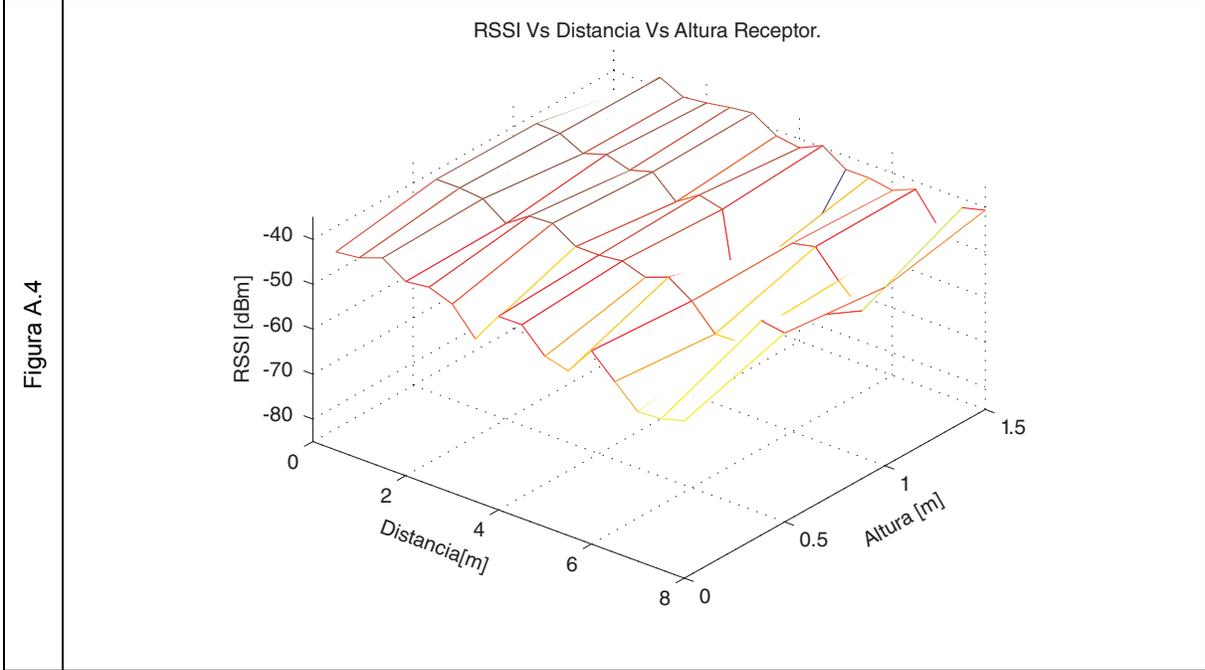
E) RSSI vs Distancia entre nodos vs Altura receptor.



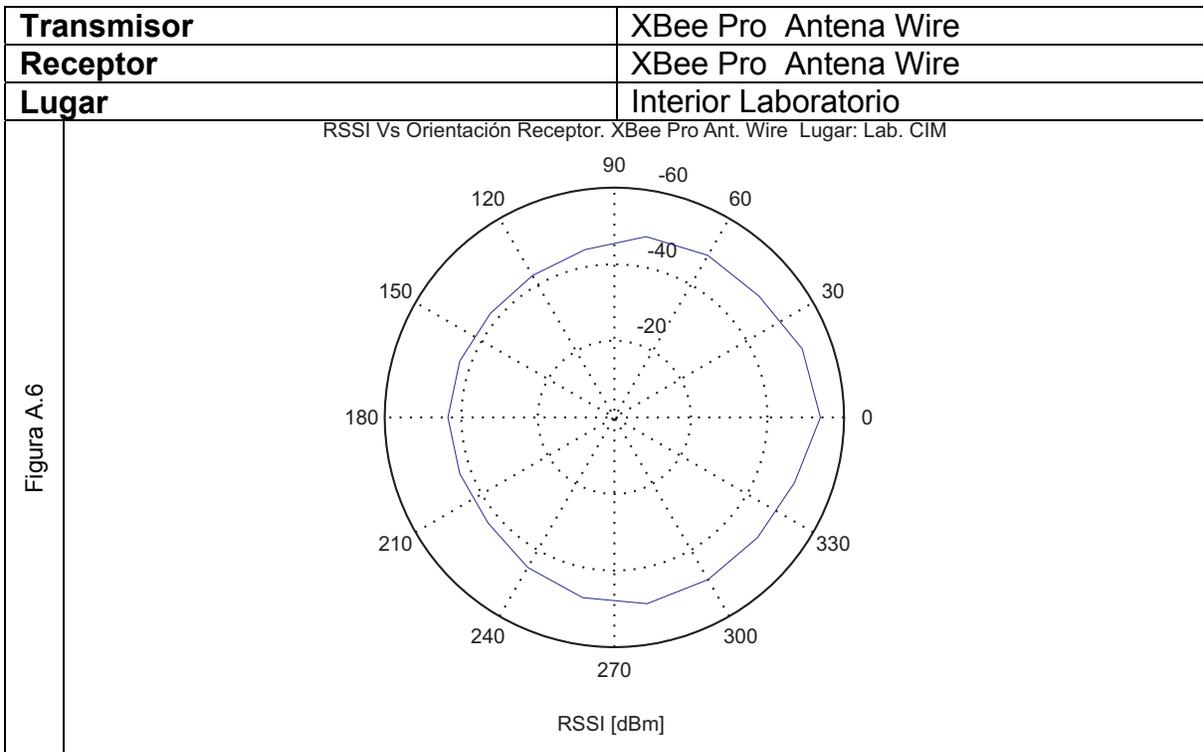
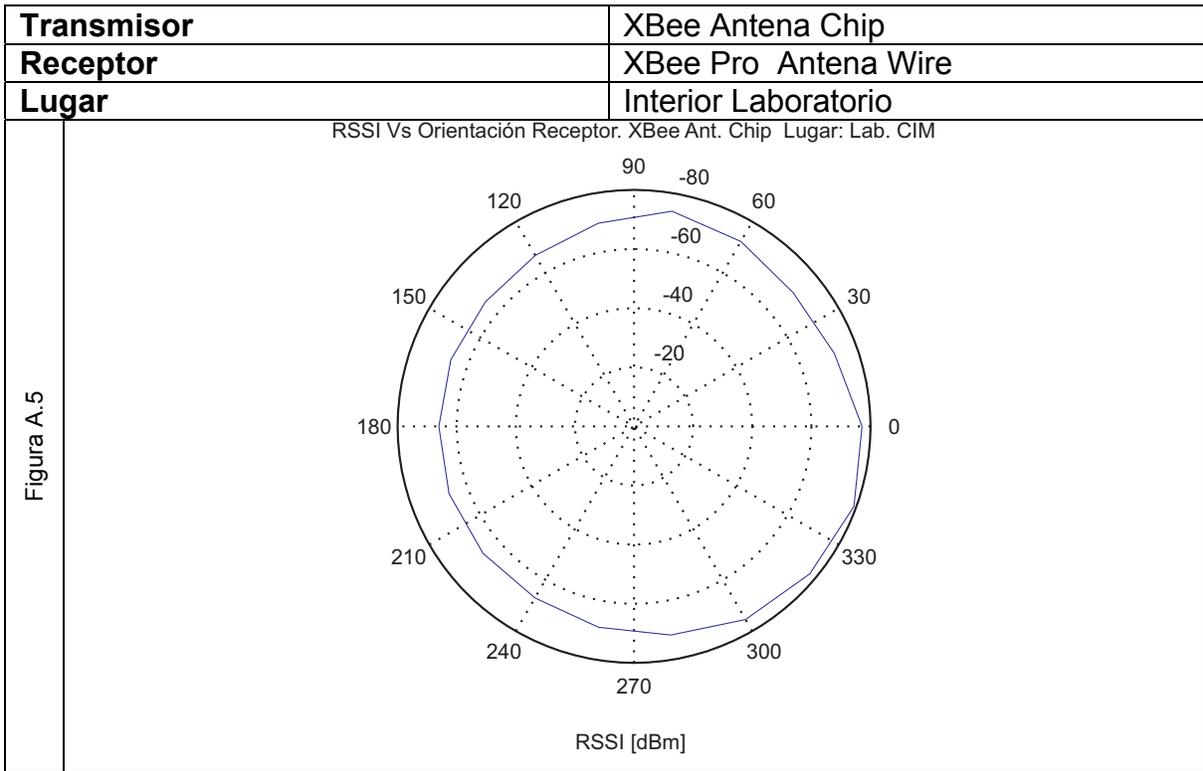
<b>Transmisor</b>	XBee Pro Antena Wire
<b>Receptor</b>	XBee Pro Antena Wire
<b>Lugar</b>	Exterior Laboratorio



<b>Transmisor</b>	XBee Pro Antena Wire
<b>Receptor</b>	XBee Pro Antena Wire
<b>Lugar</b>	Interior Laboratorio



**F) RSSI vs Orientación Emisor.**



**G) RSSI vs frecuencia de transmisión vs Distancia entre nodos.**

Etapa 1

<b>Transmisor</b>	XBee Antena Chip
<b>Receptor</b>	XBee Antena Chip
<b>Lugar</b>	Interior Laboratorio

Figura A.7

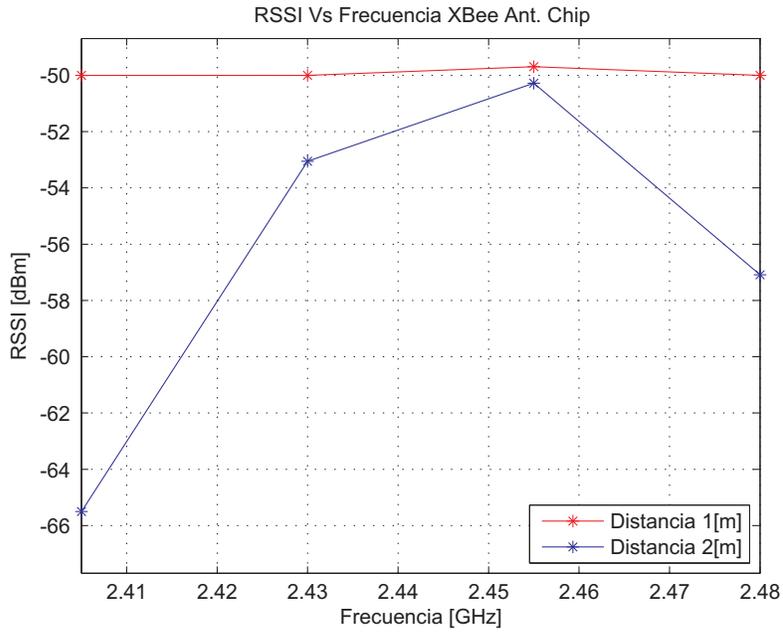
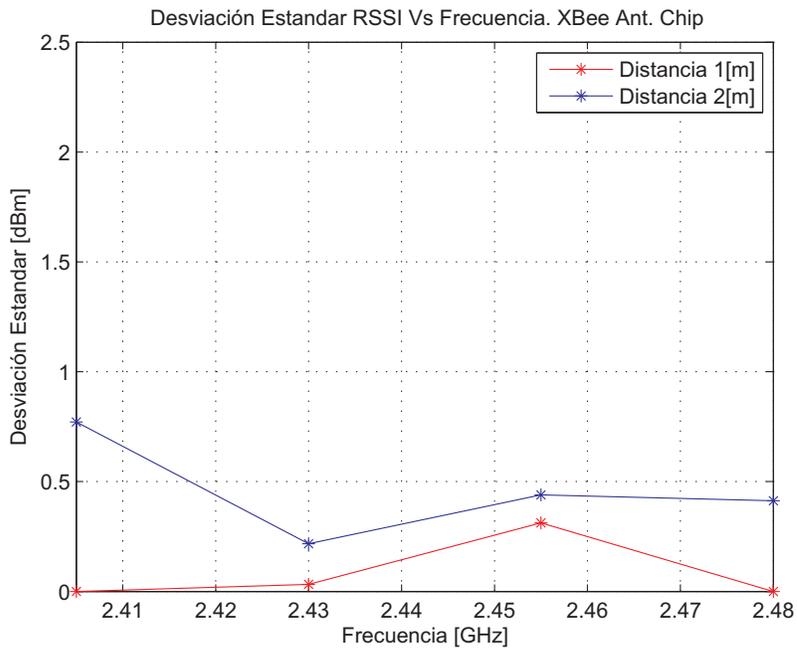


Figura A.8



<b>Transmisor</b>	XBee Antena Wire
<b>Receptor</b>	XBee Antena Chip
<b>Lugar</b>	Interior Laboratorio

Figura A.9

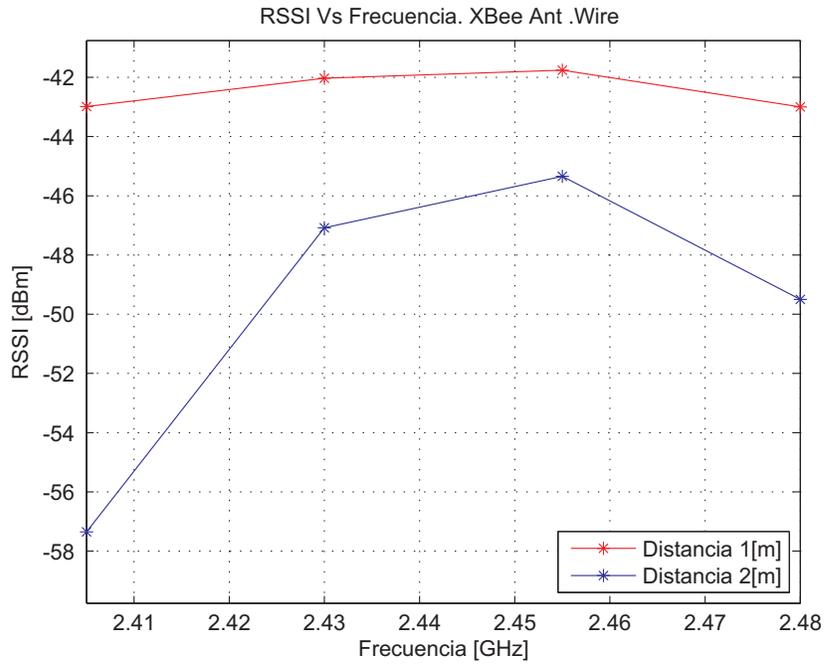
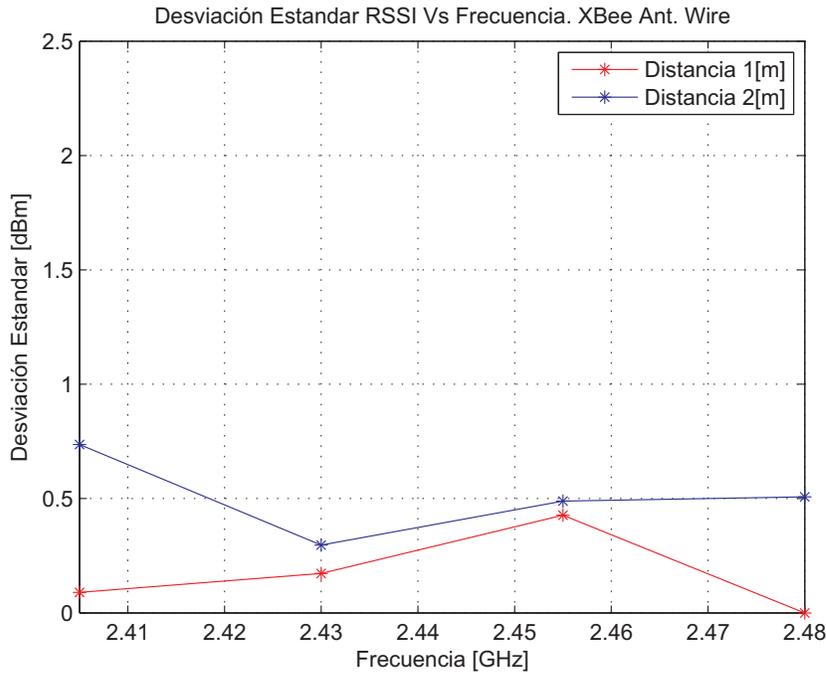


Figura A.10



<b>Transmisor</b>	XBee Pro Antena Wire
<b>Receptor</b>	XBee Antena Chip
<b>Lugar</b>	Interior Laboratorio

Figura A.11

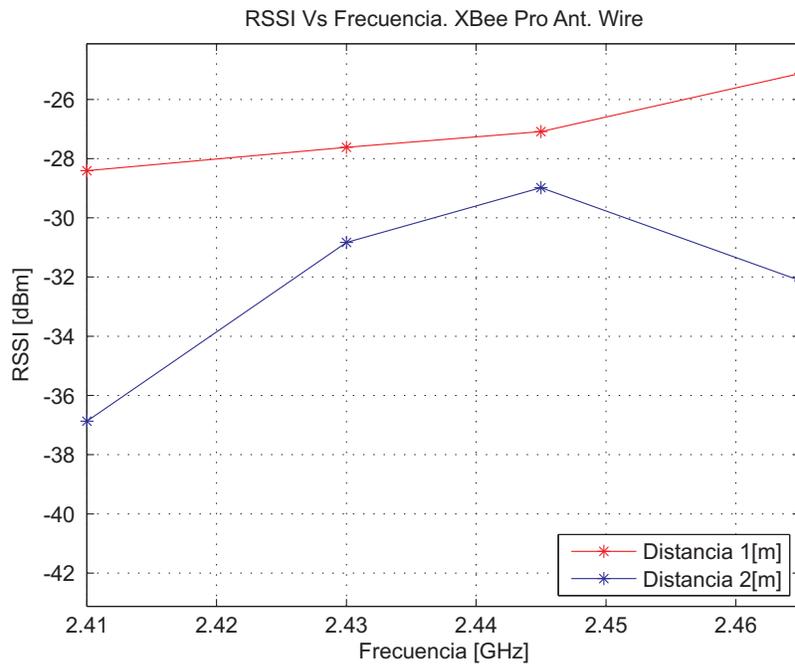
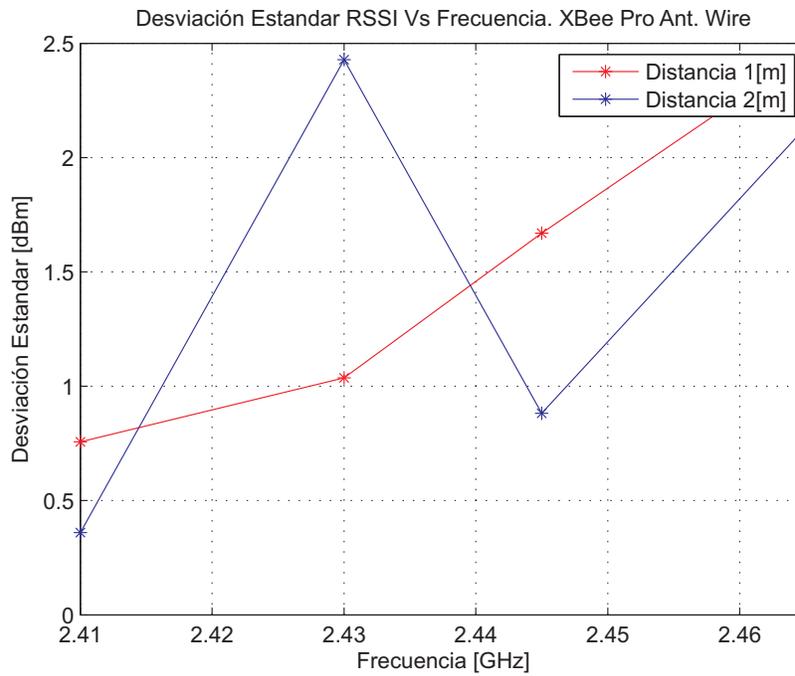
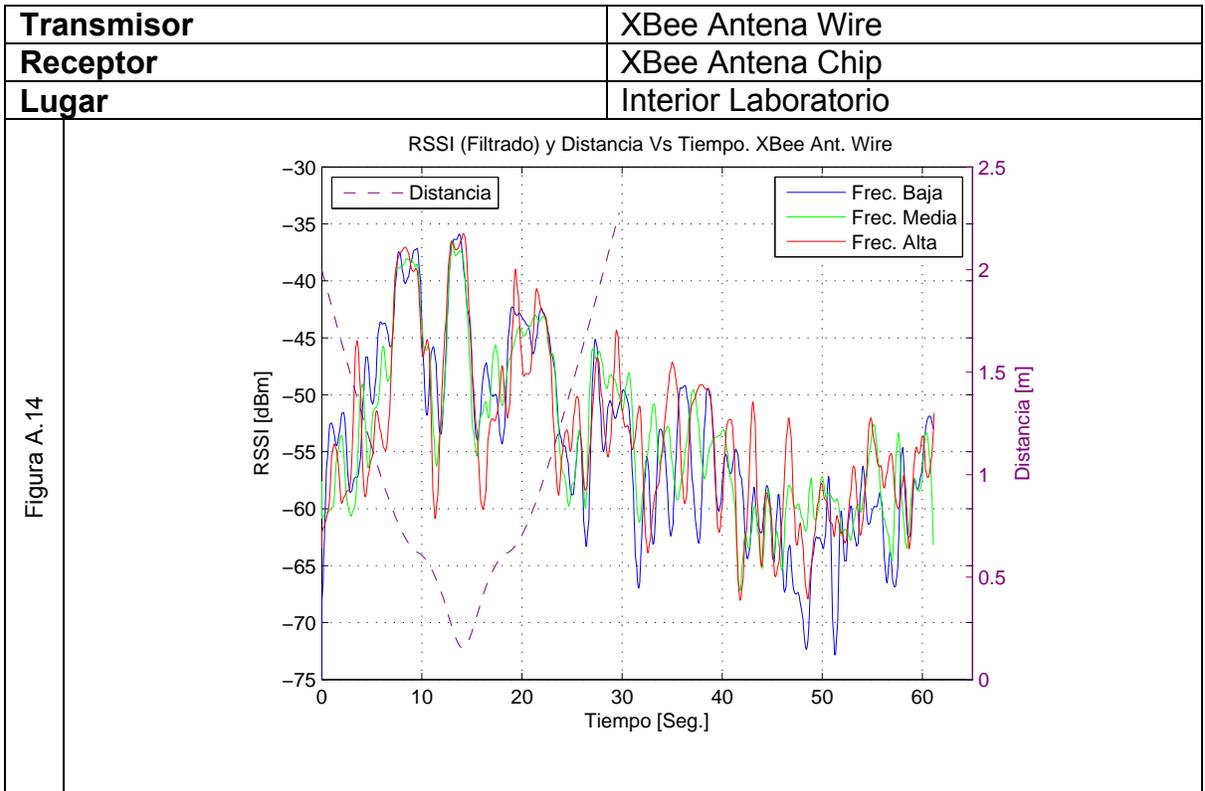
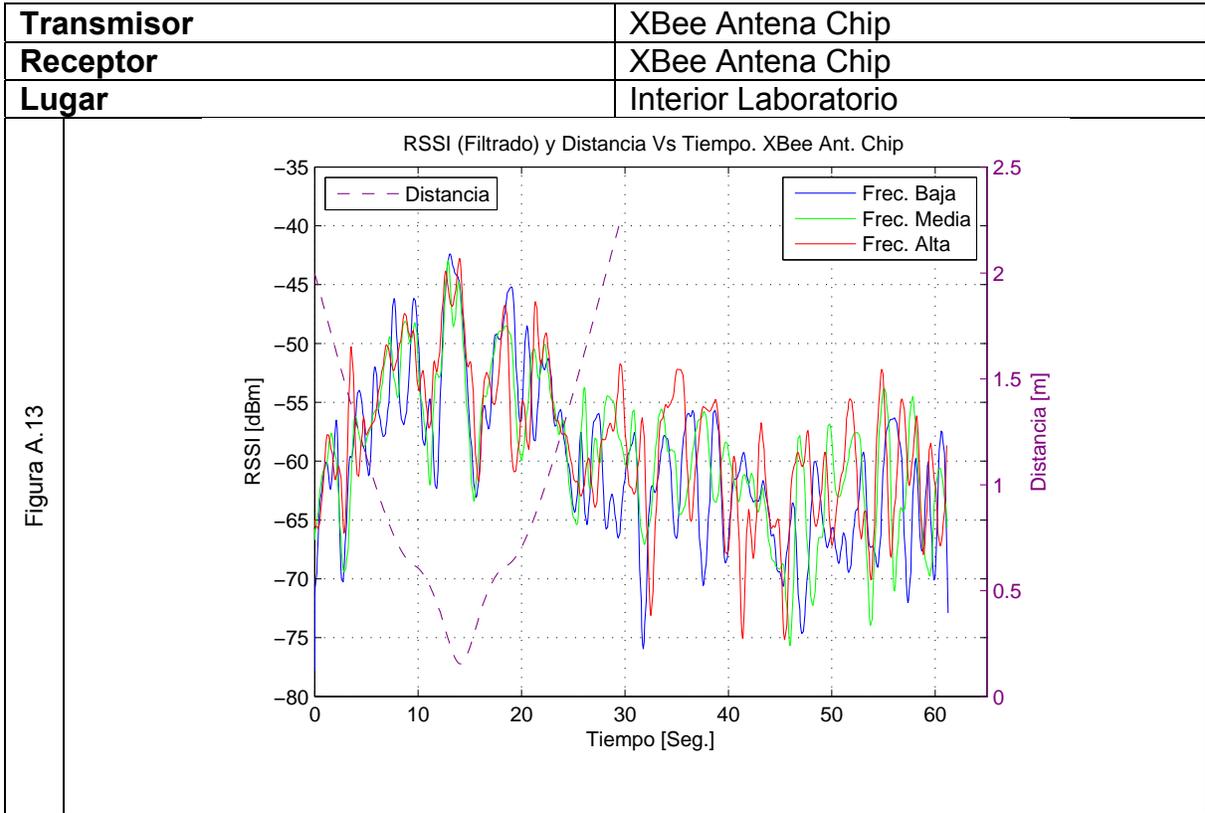
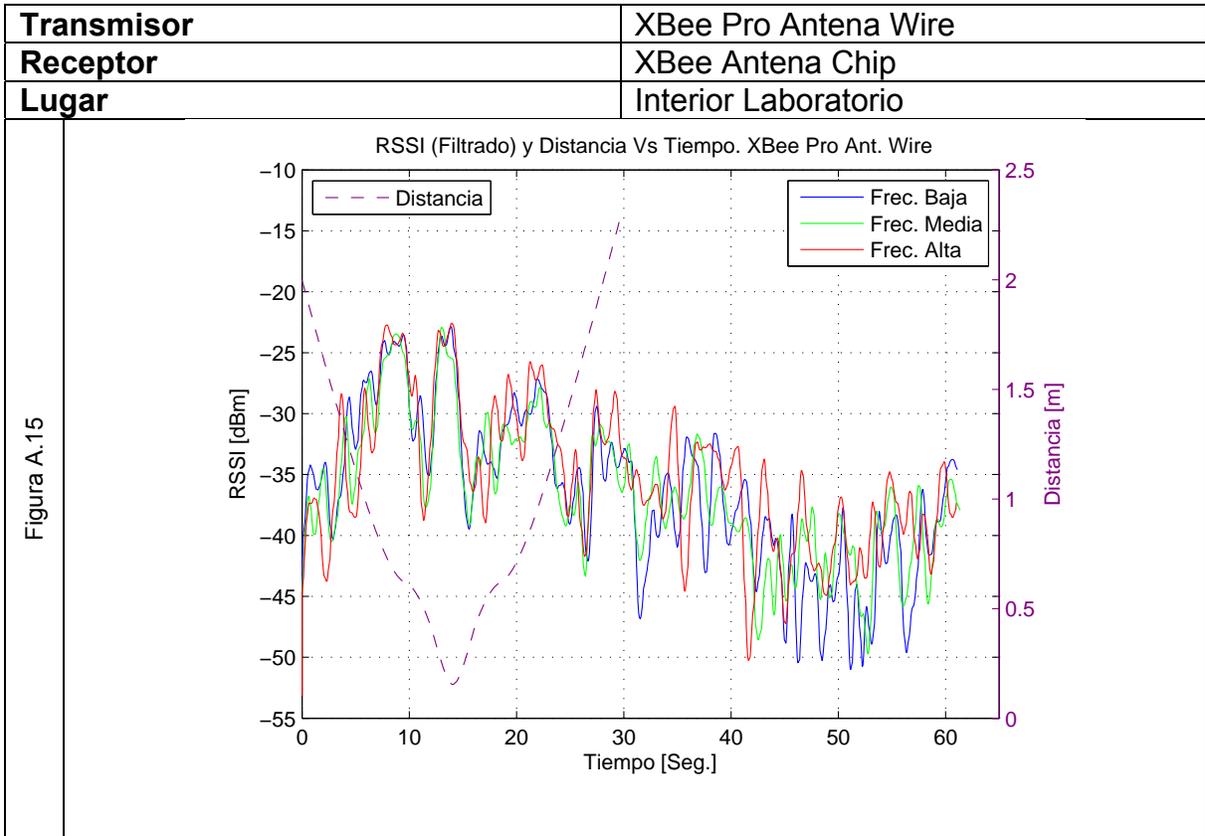


Figura A.12



Etapa 2





H) RSSI vs Potencia de transmisión vs ubicación objeto.

Etapa 1

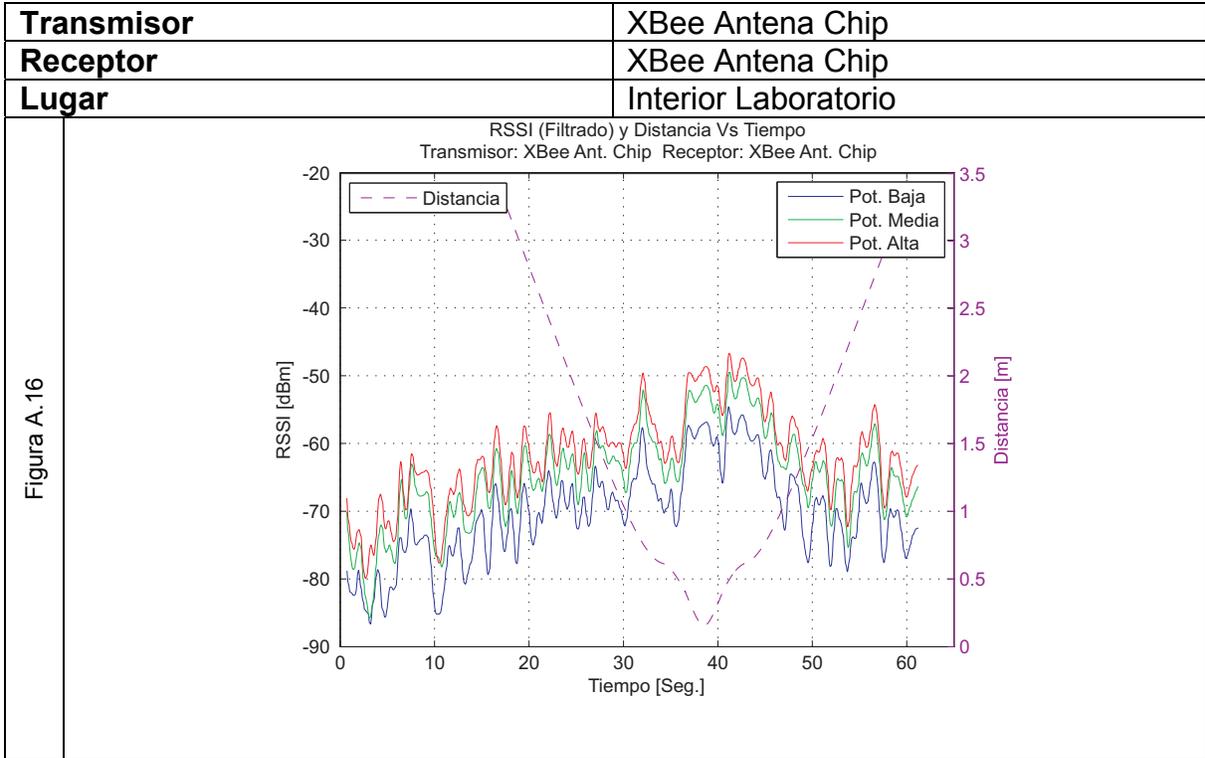


Figura A.16

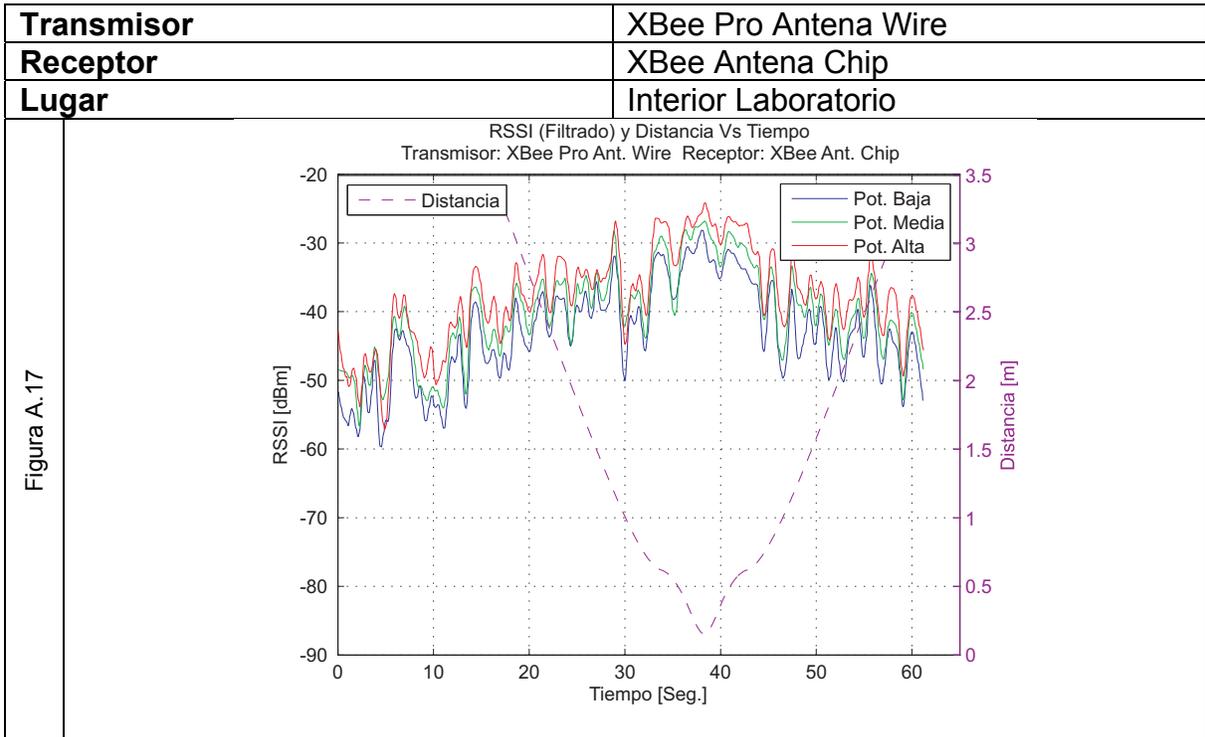
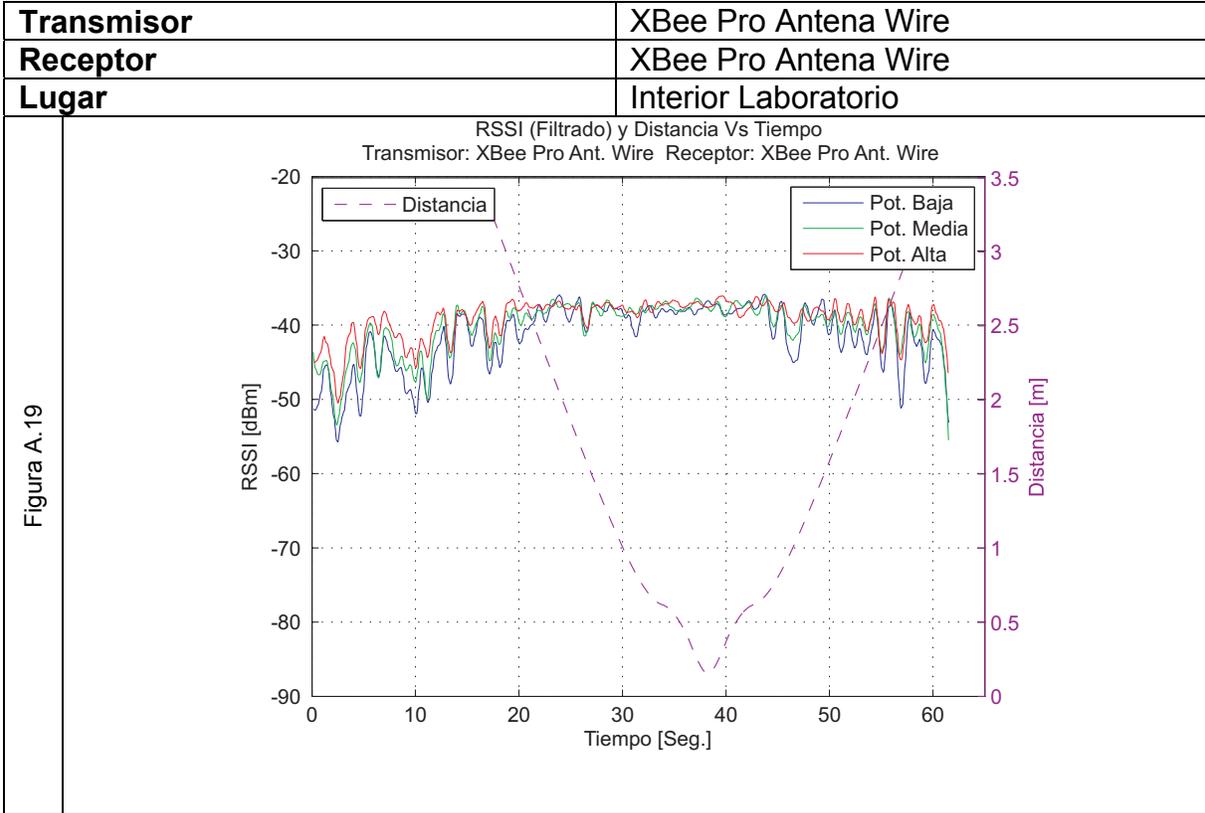
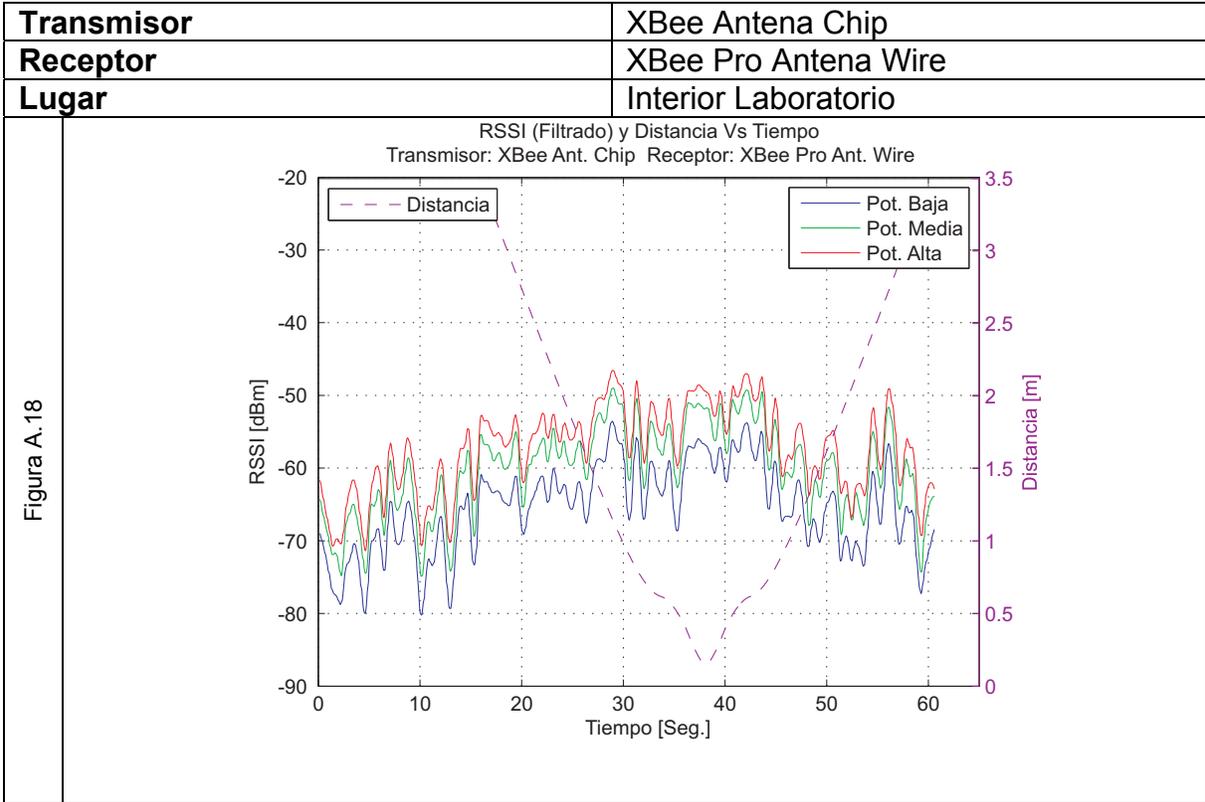
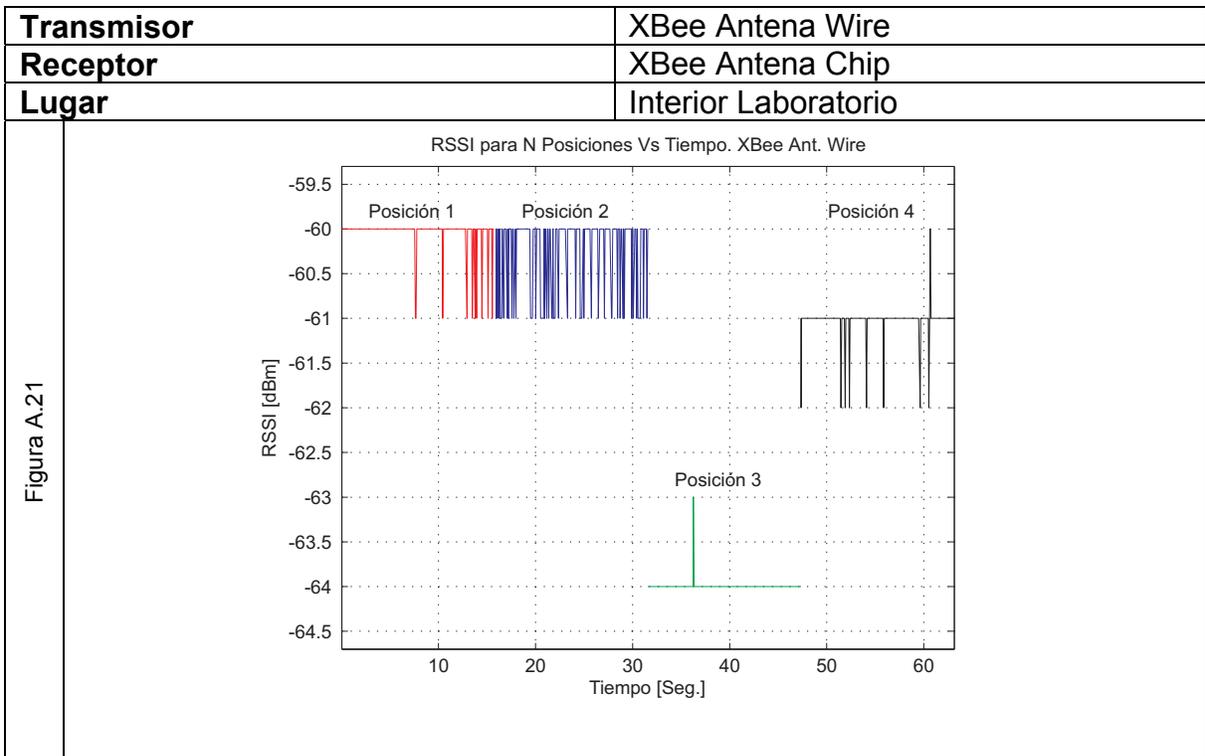
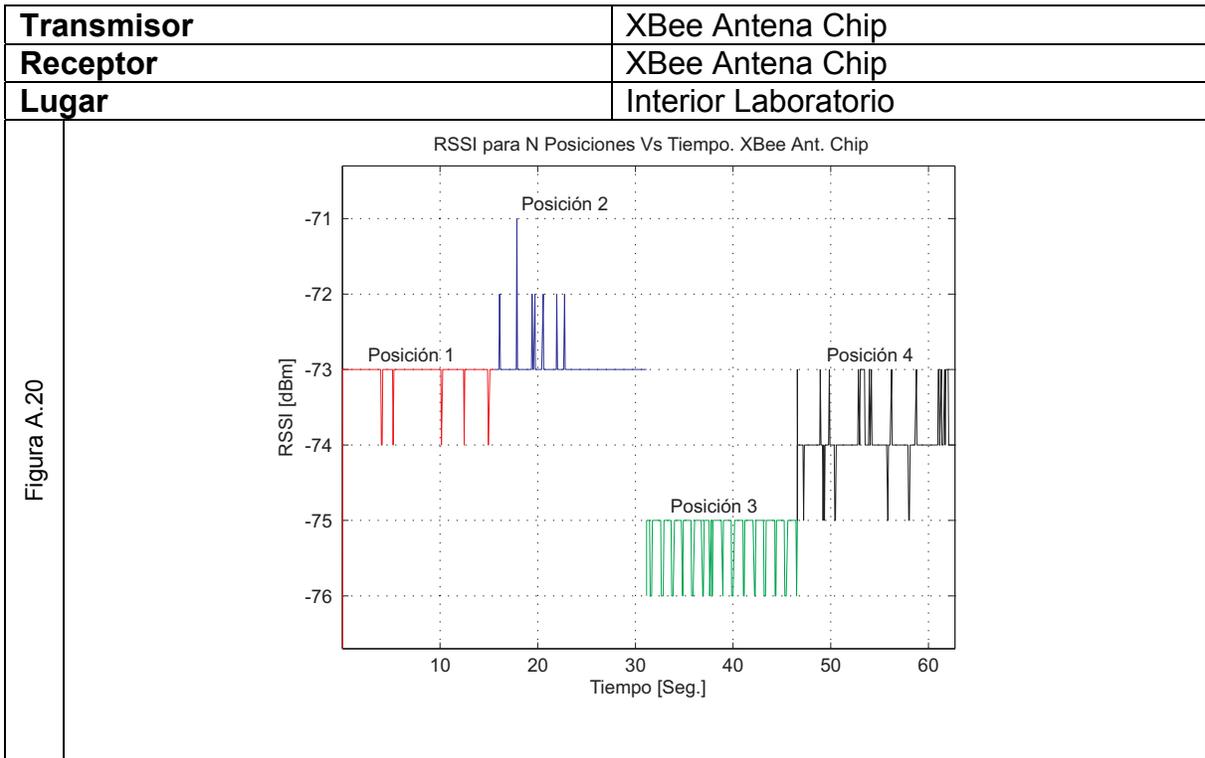


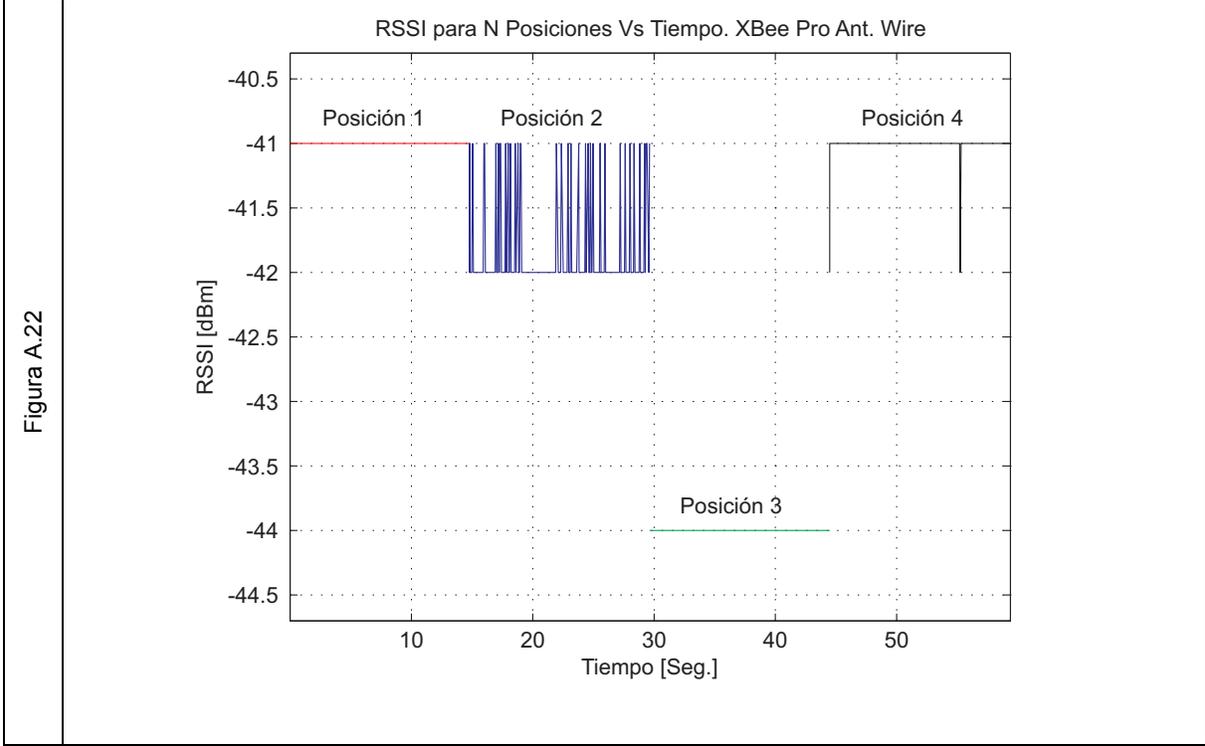
Figura A.17



Etapa 2A



<b>Transmisor</b>	XBeePro Antena Wire
<b>Receptor</b>	XBee Antena Chip
<b>Lugar</b>	Interior Laboratorio



Etapa 2B

<b>Transmisor</b>	XBee Antena Chip
<b>Receptor</b>	XBee Antena Chip
<b>Lugar</b>	Interior Laboratorio

Figura A.23

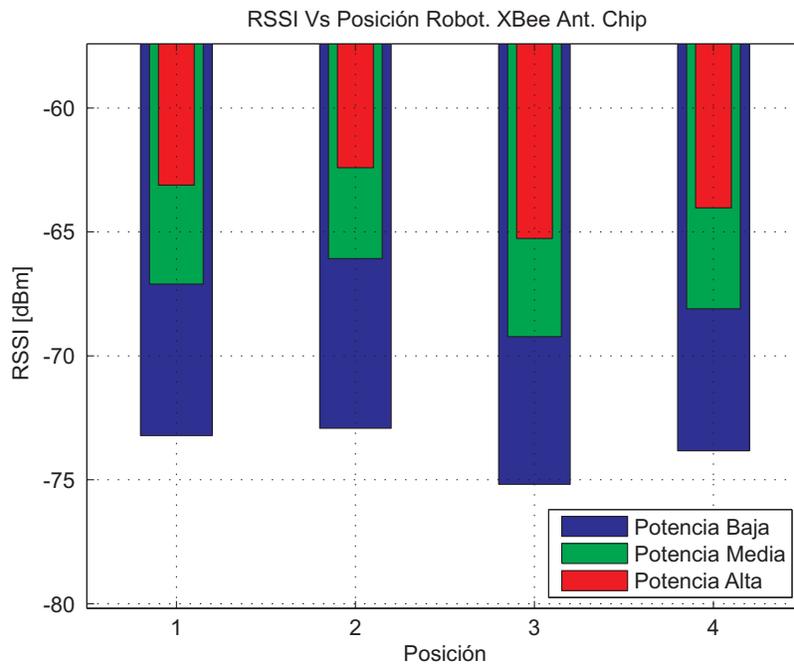
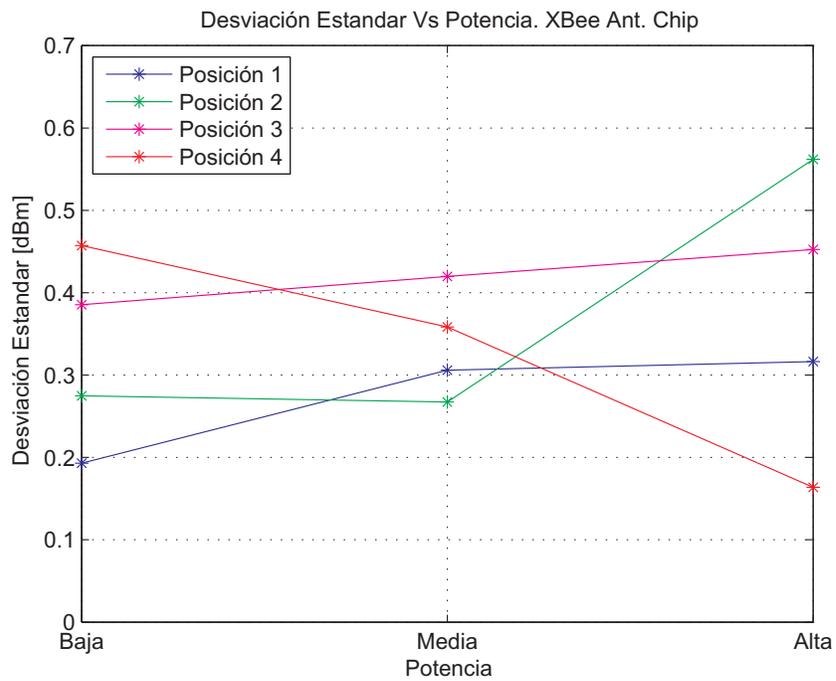


Figura A.24



<b>Transmisor</b>	XBee Antena Wire
<b>Receptor</b>	XBee Antena Chip
<b>Lugar</b>	Interior Laboratorio

Figura A.25

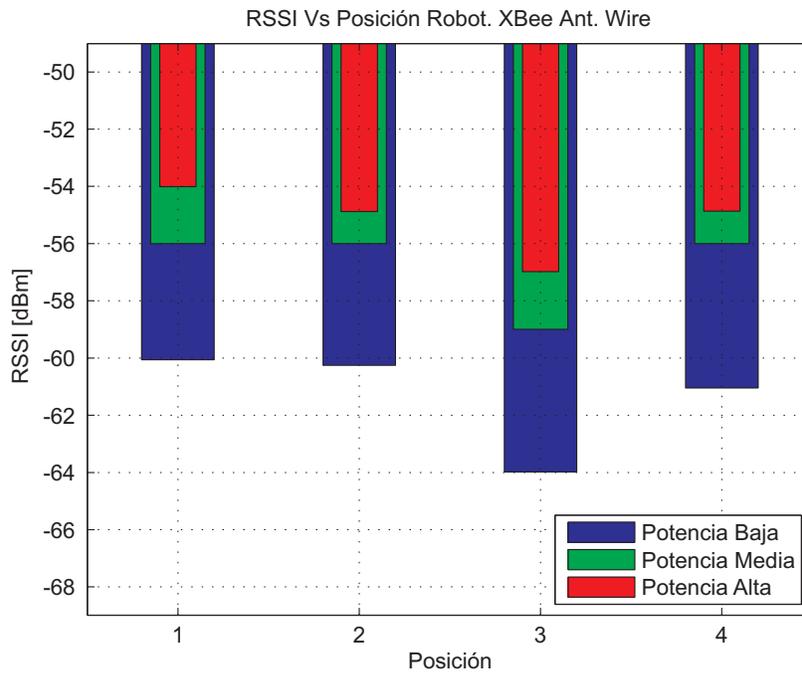
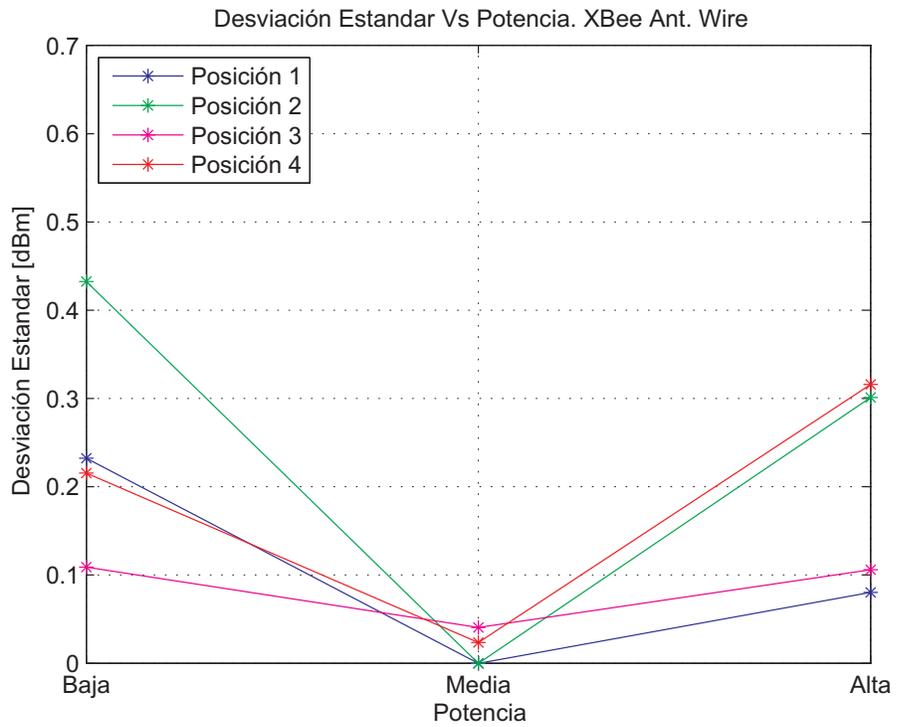


Figura A.26



<b>Transmisor</b>	XBeePro Antena Wire
<b>Receptor</b>	XBee Antena Chip
<b>Lugar</b>	Interior Laboratorio

Figura A.27

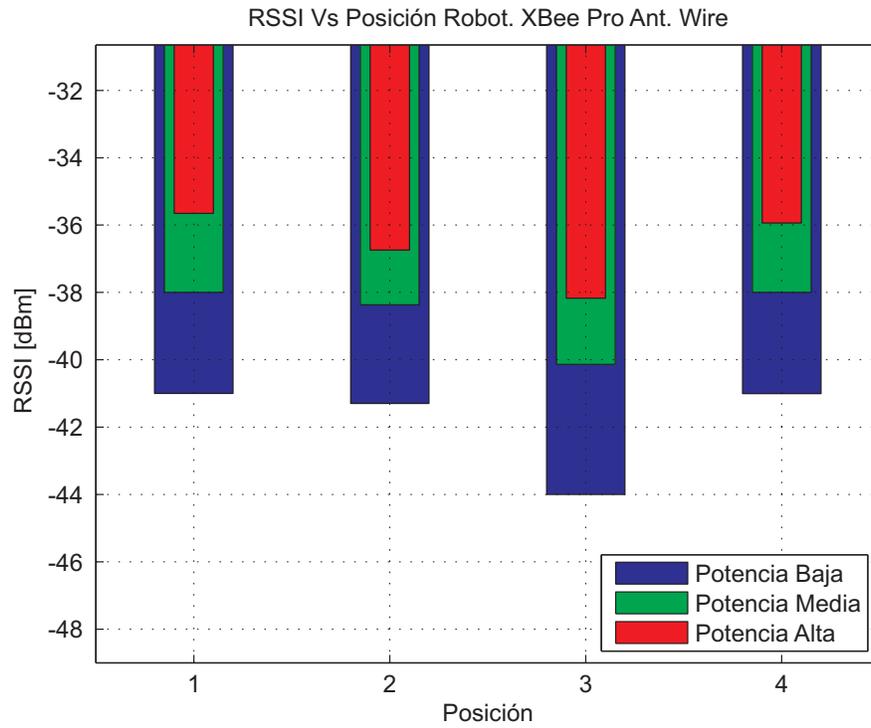
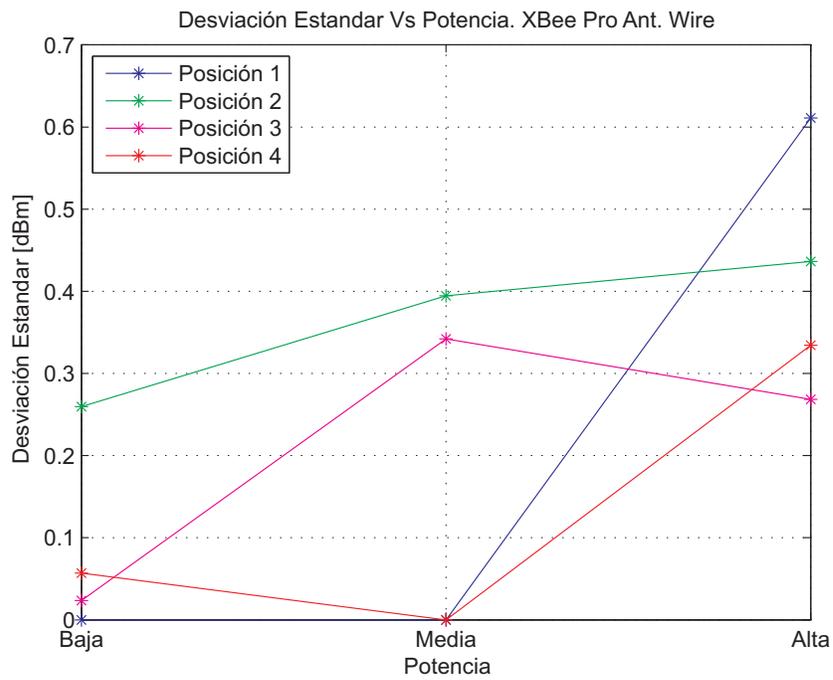


Figura A.28



## **B. Módulos Inalámbricos XBee**

---

### **1. Introducción.**

XBee son módulos inalámbricos fabricados por Digi International. Permiten Proveer conectividad inalámbrica a un gran número de dispositivos electrónicos. Estos módulos emplean el protocolo de comunicaciones ZigBee basado en el estándar de comunicaciones para redes inalámbricas IEEE 802.15.4. Su uso está orientado a aplicaciones que requieren bajo consumo de potencia así como redes flexibles y extensibles.

Los módulos XBee / XBee-Pro operan en la banda libre de 2.4GHz utilizando un único canal entre 16 disponibles. Su velocidad máxima de transmisión de datos es de 256Kbps. El protocolo ZigBee permite que estos dispositivos puedan formar redes para el intercambio de información. Las redes permiten un máximo teórico de 65535 equipos conectados. La topología y la configuración de la red dependen de la versión del módulo.

Existen dos series para los XBee serie 1 y serie 2. Las diferencias entre ambos son tanto a nivel de hardware como el protocolo que emplean. La serie 1 se basa en el chip Freescale permite redes punto a punto y punto a multipunto por otra parte la serie 2 se basa en el chip Ember permite redes del tipo Mesh.

El usuario de estos dispositivos debe tener presente que los XBee de serie 1 y serie 2 no pueden comunicarse inalámbricamente entre sí.

## 2. Características

En una red ZigBee los nodos pueden asumir uno de los 3 tipos de funciones disponibles: coordinador, router o dispositivo final. Dentro de la red puede existir un gran número de router y dispositivos finales sin embargo solo podrá existir un solo nodo que realice la función de coordinador.

### 2.1. Tipos de dispositivos.

#### **Coordinador**

La función de este nodo es la de establecer el canal de comunicación de la red y fijar el número que la identificara (PAN ID). Una vez realizada esta tarea el coordinador toma las funciones de un router.

#### **Router**

Los Router son nodos encargados de crear y mantener información sobre la red con el objeto de determinar la mejor ruta para la transmisión de los paquetes de información. Estos nodos retransmiten la información desde otros router o dispositivos finales. En la serie 1 solo el coordinador asume esta tarea en cambio la serie 2 permite la existencia de múltiples routers lo que posibilita la creación de redes Mesh.

#### **Dispositivo Final**

Estos nodos poseen funcionalidad reducida por lo cual no tienen la capacidad para enrutar paquetes. Solo pueden comunicarse con su nodo padre (un coordinador o router) lo cual les impide el envío de información de forma directa a otro dispositivo final. Al poseer funciones reducida su consumo es menor. Suelen utilizarse para la toma de mediciones desde sensores.

## 2.2. Topología de red

Como se ha mencionado anteriormente el tipo de red que es posible confirmar con los módulos XBee dependerá de la serie de este. Así los XBee que pertenezcan a la serie 1 podrán operar en las siguientes topologías:

### Punto a Punto



Figura B.1. Topología Punto a Punto.

### Punto a Multipunto

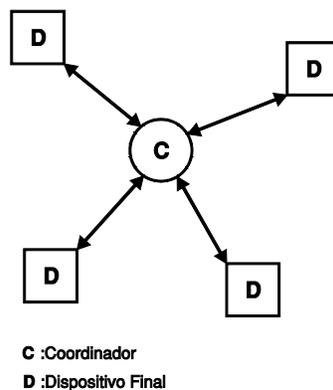


Figura B.2. Topología Punto a Multipunto.

Los XBee Serie 2 pueden soportar las topologías de red de la serie 1 además dan de la topología Mesh.

## Mesh (Red tipo malla)

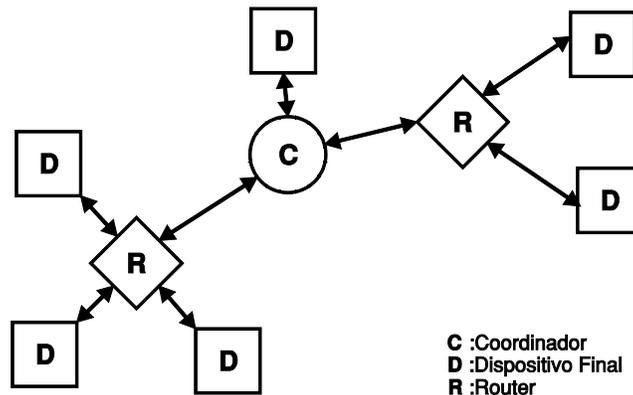


Figura B.3. Red tipo Mesh.

## 2.2. Direccionamiento

Los Módulos XBee permiten dos tipos de direccionamiento 16 bit y 64 bit. Ambos modos son seleccionables por software mediante comandos AT. La principal ventaja de uno por sobre otro es la cantidad de direcciones que puede administrar.

### Direccionamiento de 16 bit

Las direcciones en 16 bit pueden ser definidas de forma arbitraria por el usuario dentro del rango 0x00 a 0xFFFE (la dirección 0xFFFF deshabilita el direccionamiento de 16 bit). Para definir una dirección de 16 bit se utiliza el comando MY. Para usar este tipo de direccionamiento se configura la dirección de destino usando el comando DL y se configura el comando DH en 0x00.

### Direccionamiento de 64 bit

A diferencia del direccionamiento de 16 bit las direcciones de 64 bit no pueden ser fijadas de forma arbitraria. La dirección del módulo es obtenida a partir del número de serie del mismo utilizando los comandos SH y SL. Para utilizar este tipo de direccionamiento se recomienda desactivar la recepción de paquetes direccionados en 16 bit mediante el comando MY configurado en 0xFFFF. Las direcciones de destino se configuran utilizando los comandos DH y DL para

configurar los 32 bit más significativos y los 32 bit menos significativos respectivamente.

### 2.3. Modos de operación

XBee permite dos modos de interacción con el usuario u otros sistemas: modo Transparente y modo API. En ambos modos los datos son enviados de forma serial desde y hacia las interfaces. La estructura que poseen estos datos es diferente entre ambos modos llegando a ser incompatibles entre sí.

#### Modo Transparente

En esta modalidad todos los datos enviados a la interface serie son automáticamente retransmitidos por la interface inalámbrica hacia el nodo especificado en la dirección de destino del XBee (Figura 4.18). En esta modalidad no existen mecanismos para la detección de errores durante la transmisión.

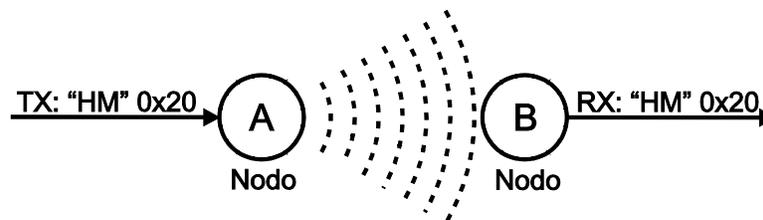


Figura B.4. Envío de datos modo Transparente

#### Modo API.

En esta modalidad los datos requieren ser formateados bajo una estructura específica impuesta. Esto genera una mayor complejidad al momento de transmitir información sin embargo esta complejidad se compensa con la flexibilidad que presenta este modo. El modo API permite incluir en la propia trama la dirección de destino o de origen según sea el caso, fragmentación de la información a transmitir (mediante la identificación de los frames), configuración remota de los nodos, etc. Todo lo anterior sin realizar cambios de parámetros mediante

comandos AT. Estas opciones se configuran “al vuelo” cada paquete de información puede poseer una configuración distinta dependiendo de las necesidades de la aplicación. La Figura 4.19 muestra un esquema de la constitución de estas tramas.



Figura B.5. Estructura general Trama API.

La estructura API específica es un formato que depende del tipo de trama a emplear. Cada estructura se identifica por un número en hexadecimal. Todos los tipos de tramas soportados por XBee así como sus identificadores se encuentran disponibles en el manual de usuario del módulo.

## 2.4. Especificaciones técnicas.

A continuación se muestra un breve resumen con las principales especificaciones técnicas de los módulos XBee.

Tabla B.1. Especificaciones técnicas módulos XBee.

	Serie 1		Serie 2	
	XBee	XBee-Pro	XBee	XBee-Pro
<b>Alcance en interiores</b>	10 [m]	60[m]	40[m]	100[m]
<b>Alcance en exterior con línea de vista</b>	90[m]	750[m]	120[m]	1.6[km]
<b>Potencia de transmisión</b>	1mW (0dBm)	10mW (10dBm)	2mW(3dBm) Boost habilitado 1.25mw(1dBm)	10mW(10dBm)
<b>Voltaje alimentación</b>	2.8-3.4V	2.8-3.4V	2.1-3.6V	3.0-3.4V

## C. Configuración Módulos XBee

---

Los módulos XBee se configuran mediante comandos AT enviados de forma serial ya sea a través de su interface serie o inalámbrica; esto quiere decir que es posible su configuración de forma remota. Para operar cada XBee posee un firmware específico dependiendo de la función del dispositivo y tipo modem que posea.

La configuración puede realizarse de forma directa enviando comandos AT específicos o utilizando el software X-CTU desarrollado por Digi para este propósito.

### 1. Driver

Los XBee que funcionan junto con la base USB-Explorer requieren de la instalación de un driver para esta última. Las bases fabricadas por Sparkfun Electronic y Olimex utilizan el chip FTDI que permite la conversión de serie a USB.

El driver correspondiente puede ser encontrado en:

<http://www.ftdichip.com/FTDrivers.htm>

### 2. Configuración de XBee con X-CTU

X-CTU es un software que provee una interface gráfica para la configuración y escritura del firmware en los XBee. La Figura C.1 muestra la ventana inicial del X-CTU esta permite la selección y configuración del puerto en el cual se encuentra el XBee.

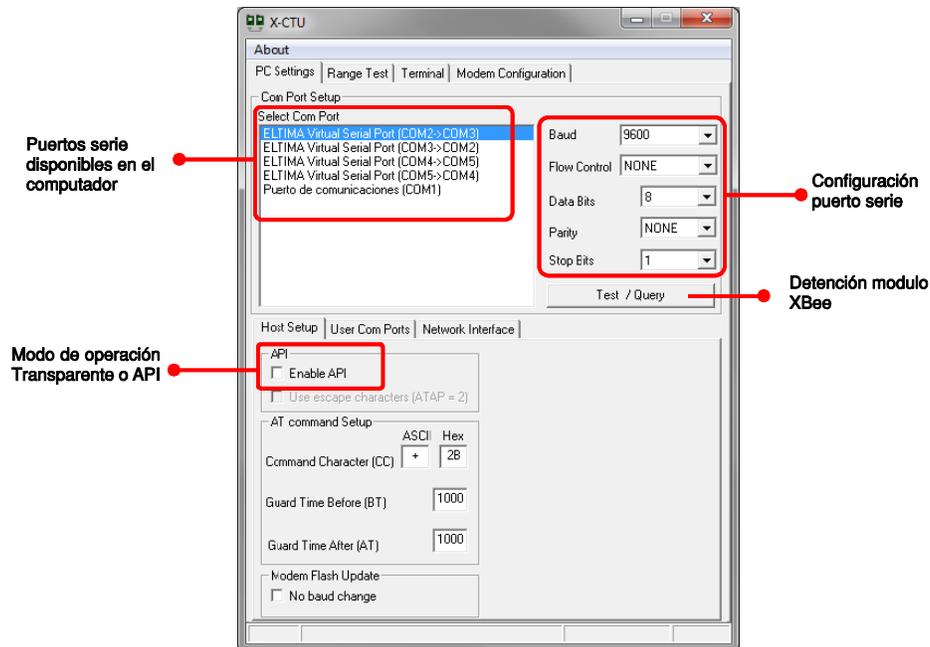


Figura C.1. Ventana principal X-CTU

El programa al inicio busca los puertos serie que dispone el sistema estos son desplegados en una lista. Esta no será actualizada mientras el programa se encuentre abierto por lo cual será necesario el reinicio del X-CTU cada vez que se conecta al computador una base USB-Explorer.

El puerto en el cual se encuentra el XBee debe ser configurado de tal forma que posea los mismos parámetros de comunicación que posee la interface serie del módulo, de lo contrario no será posible comunicarse con él. Una vez configurado el puerto se procede a detectar el dispositivo usando el botón "Test/Query". Si la configuración es correcta se obtendrá como resultado un mensaje indicando el modelo del XBee y la versión del firmware como se muestra en la Figura C.2.

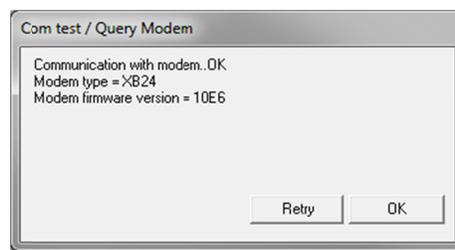


Figura C.2. Detección XBee serie 1.

Realizada la comprobación del XBee es posible proceder a su configuración. Para esto se ingresa a la pestaña “Modem Configuration”.

La sección “Modem Parameters and Firmware” posee las opciones de lectura (“Read”), escritura (“Write”) y restauración (“Restore”) de las opciones o Firmware. La lectura del XBee permite ver la configuración actual del módulo como se muestra en la Figura C.3.

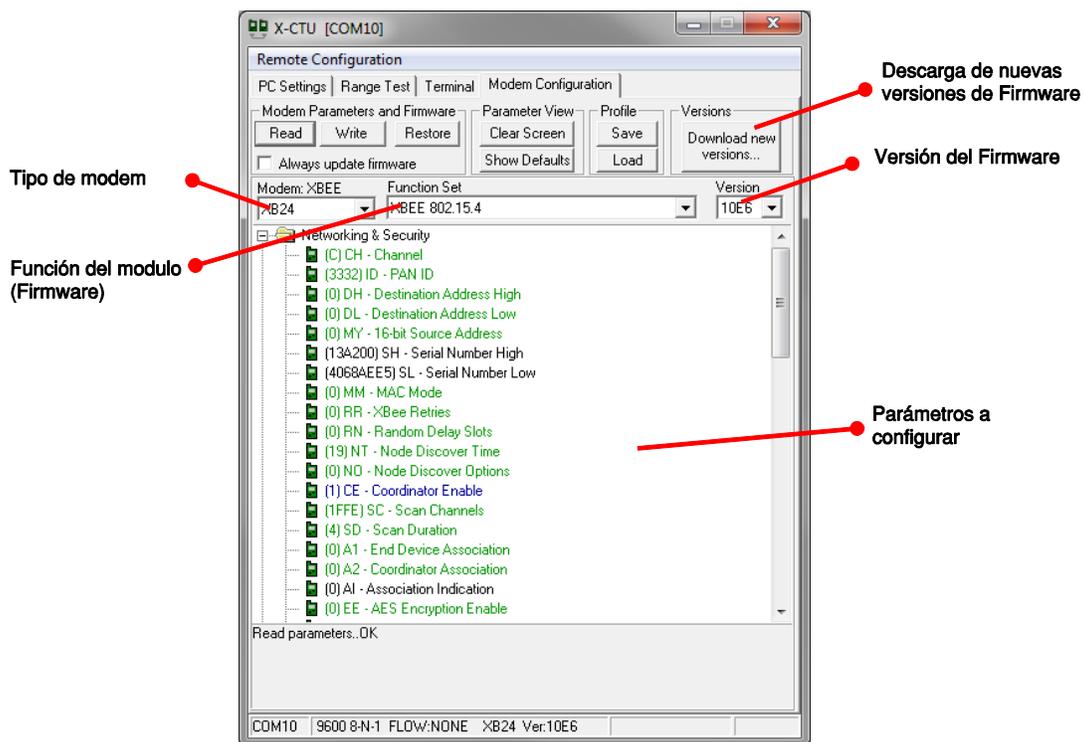


Figura C.3. Configuración XBee Serie 1

La lista de parámetros que dispone XBee se encuentra en el manual técnico del mismo. A continuación se detallan los parámetros más relevantes disponibles para la serie 1.

Tabla C.1. Principales parámetros XBee Serie 1

<b>Red y seguridad</b>	
CH [Canal]	Número de canal de transmisión (Hexadecimal)
ID [ID PAN]	Numero identificador de la red.
DH y DL [Dirección de destino]	Dirección del módulo de destino. Esta dirección se separa en 32 bits más significativos (H) y 32 bits menos significativos (L). en modo de direccionamiento de 64 bit se emplean ambos comandos (DH y DL). En el modo de direccionamiento de 16bit solo se emplea DL dejando DH en 0x00
MY [Dirección de 16bit del módulo]	Dirección manual del dispositivo en modo direccionamiento de 16bit.
SH y SL [Dirección del módulo]	Dirección propia del módulo, corresponde al número de serie del dispositivo en 64bits. Esta dirección se separa en 32 bits más significativos (H) y 32 bits menos significativos (L).
CE [Habilitación de coordinador]	Permite habilitar la función de coordinación si se encuentra deshabilitada el modulo operar como dispositivo final.
<b>Modos de descanso</b>	
SM [Modo de descanso]	Establece el modo de hibernación del módulo.
<b>Interface serie</b>	
BD [Tasa de transferencia de la interface]	Velocidad de transmisión de la interface serie. Existen 8 modos prefijados.
NB [ Paridad]	Paridad de la transmisión.
AP [Habilitación modo API]	Permite seleccionar el modo de operación del módulo Transparente o API (por defecto se encuentra desactivado).

<b>Configuración Entradas/Salidas</b>	
Dx (x desde 0 a 8) [Configuración de la puerta x]	Establece el modo de operación de la puerta Digital, analógica u otra dependiendo del número de puerta
IR [Tasa de muestreo]	Intervalo de muestreo de las puertas activas. El valor muestreado será transmitido de forma inalámbrica al destinatario especificado con los parámetros DH y DL

Presionando sobre cada parámetro a configurar se despliegan las opciones que este dispone. El método de entrada variara dependiendo del tipo de parámetro. Así los parámetros prefijados desplegaran una lista o si requieren un valor numérico desplegaran un cuadro de entrada como se muestra en la Figura C.4.

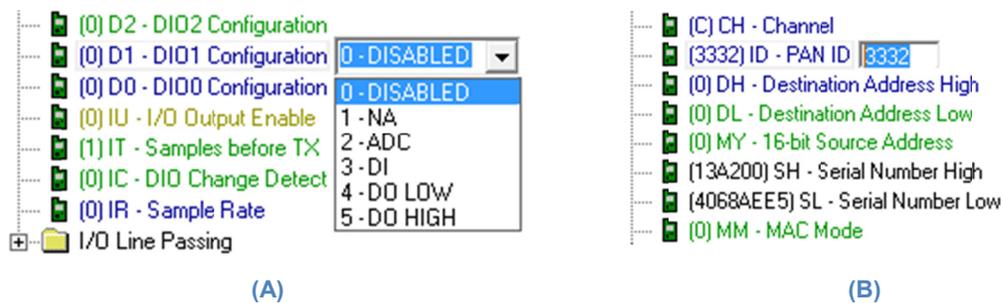


Figura C.4. (A) Configuración Puerta 1. (B) Configuración PAN ID.

Configurado el XBee se procede a escribir la configuración con el botón “Write”. El tiempo de escritura dependerá del tipo de cambios a realizar. Los cambios de firmware en el módulo (“Funtion Set”) suelen emplear un mayor tiempo de escritura.

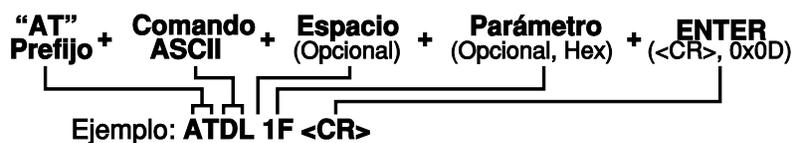
### 3. Configuración en modo de comandos.

La herramienta X-CTU permite una configuración fácil y rápida de los módulos XBee enviado de forma automática los comandos AT necesarios para la configuración. Sin embargo es posible realizar esta configuración de forma manual utilizando comunicación serie con el modulo. Esta configuración puede ser realizada a través de un microcontrolador, mediante un programa terminal, etc. la forma en la cual se realiza la configuración manual dependerá del modo de operación en el que se encuentre el XBee

#### 3.1. Configuración modo transparente.

En modo transparente toda información enviada hacia la interface serie es transmitida automáticamente por la interface inalámbrica. Sin embargo existe una secuencia de caracteres los cuales no son transmitidos y permiten el ingreso al modo de comandos del módulo.

Para el ingreso al modo de comandos es necesario el envío del carácter “+” tres veces de forma seguida (“+++”). El sistema responde “OK” para confirmar el ingreso al modo de comandos. Luego es posible configurar el modulo utilizando algunos de los comandos disponibles en el manual de usuario siguiendo la siguiente estructura:



En el ejemplo se utilizó el comando “DL” el cual permite establecer los bytes menos significativos de la dirección de destino. Todos los comandos que requieren parámetros numéricos deberán ser ingresados en formato hexadecimal. En el caso del ejemplo el parámetro adicional fue 0x1F.

A continuación se muestra un ejemplo para configurar la dirección de destino de un XBee con el valor 0x13A2004068AEE5

Tabla C.2. Ejemplo configuración XBee

Comandos AT Enviados	Respuesta del sistema	
+++	OK <CR>	Ingreso al modo de comandos
ATDL 4068AEE5 <Enter>	OK <CR>	Modificación parte baja dirección de destino
ATDH 13A200 <Enter>	OK <CR>	Modificación parte alta dirección de destino
ATWR <Enter>	OK <CR>	Escribe la configuración en memoria no volátil
ATCN <Enter>	OK <CR>	Salida del modo de comando

La Figura C.5 muestra la operación realizada en el terminal de X-CTU.



Figura C.5. Configuración mediante comandos AT.

### 3.2. Configuración en modo API.

La configuración manual en este modo requiere el envío de comando AT en tramas específicas para este efecto. La ventaja de configurar los XBee mediante este método es la posibilidad de configurar de forma remota los módulos. Los tipos de tramas empleados para configuración son las siguientes:

Tabla C.3. Tipos de tramas empleadas por XBee

Tramas de configuración		Tramas de respuesta	
API ID	Descripción	API ID	Descripción
0x08	Permite consultas o cambio de valores en los parámetros del módulo. Los valores son inmediatamente aplicados	0x88	Respuesta local a un comando AT. La respuesta contiene entre otros datos el comando empleado y los valores solicitados.
0x09	Permite consultas o cambio de valores en los parámetros del módulo. Los valores no son aplicados de forma inmediata quedan en espera del comando "AC" para la aplicación de los cambios		
0x17	Permite la configuración de XBee de forma remota. Es necesario conocer la dirección del módulo configurar	0x97	Respuesta remota a un comando AT. La respuesta contiene entre otros datos el comando empleado, los valores solicitados y la dirección de origen.

Por ejemplo: Para configurar el XBee con una dirección 1F usando el comando AT “DL” se emplea la trama tipo 0x08 de la siguiente forma:

API ID 0x08 Estructura:

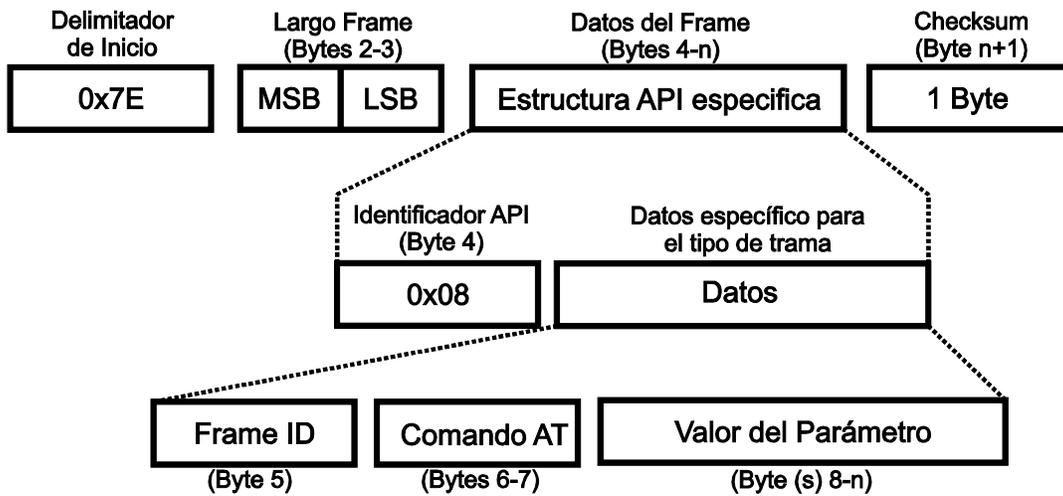


Figura C.6. Estructura Trama 0x08.

Utilizando la estructura se tiene:

Inicio	MSB	LSB	API ID	Frame ID	Comando AT		Parámetro	CHK
0x7E	0x00	0x08	0x08	0x01	0x44 (D)	0x4C (L)	0x0000001F	0x47

Enviando la trama anterior al XBee se obtiene como respuesta:

**0x7E 0x00 0x05 0x88 0x01 0x44 0x4C 0x00 0xE6**

Esta es una trama tipo 0x88 se genera como respuesta a un comando AT. Esta indica que el comando ha sido recibido exitosamente.

## 4. Aplicaciones

### 4.1. Transmisión de datos en modo Transparente.

#### 4.1.1 Punto a Punto

En esta aplicación se emplearan 2 Módulos XBee serie 1. Un XBee antena Chip y un XBee-PRO antena Wire. Ambos módulos utilizan sus respectivas bases USB-Explorer. Se operara utilizando direccionamiento de 16bits. La configuración de ambos dispositivos es la siguiente:

Tabla C.4. Configuración dispositivos: transmisión punto a punto.

Parámetro	Coordinador (XBee)	Dispositivo Final (XBee-PRO)	Observación
<b>CH</b>	C	C	Canal de transmisión 12d
<b>ID</b>	3332	3332	ID de la Red
<b>MY</b>	12	13	Dirección de 16bit del modulo
<b>CE</b>	1	0	Solo puede existir un Coordinador en la red
<b>DH</b>	0	0	Desactivado en direccionamiento de 16bit
<b>DL</b>	13	12	Dirección de destino
<b>SM</b>	0	0	Desactivado descanso de XBee
<b>BD</b>	3	3	Velocidad transmisión 9600 Baud
<b>NB</b>	0	0	Paridad Ninguna
<b>AP</b>	0	0	XBee en modo transparente

Para la prueba, primero se enviaran datos desde el coordinador hacia el dispositivo final. La información a enviar será "1234". Después el dispositivo final

enviara información en el sentido contrario. La información será “ABCD”. El esquema de la aplicación se muestra en la Figura C.7.

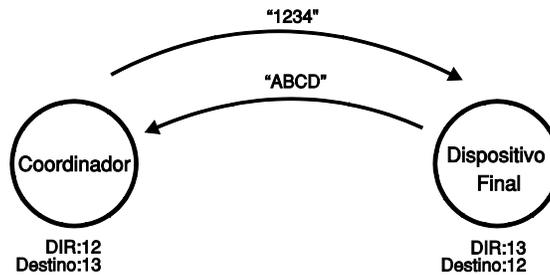


Figura C.7. Transmisión de datos. Direccionamiento de 16bit.

Una vez Configurados los XBee es posible ingresar a la pestaña “Terminal” del X-CTU y enviar datos entre los módulos. La Figura C.8 muestra los datos que fueron transmitidos entre ambos módulos.

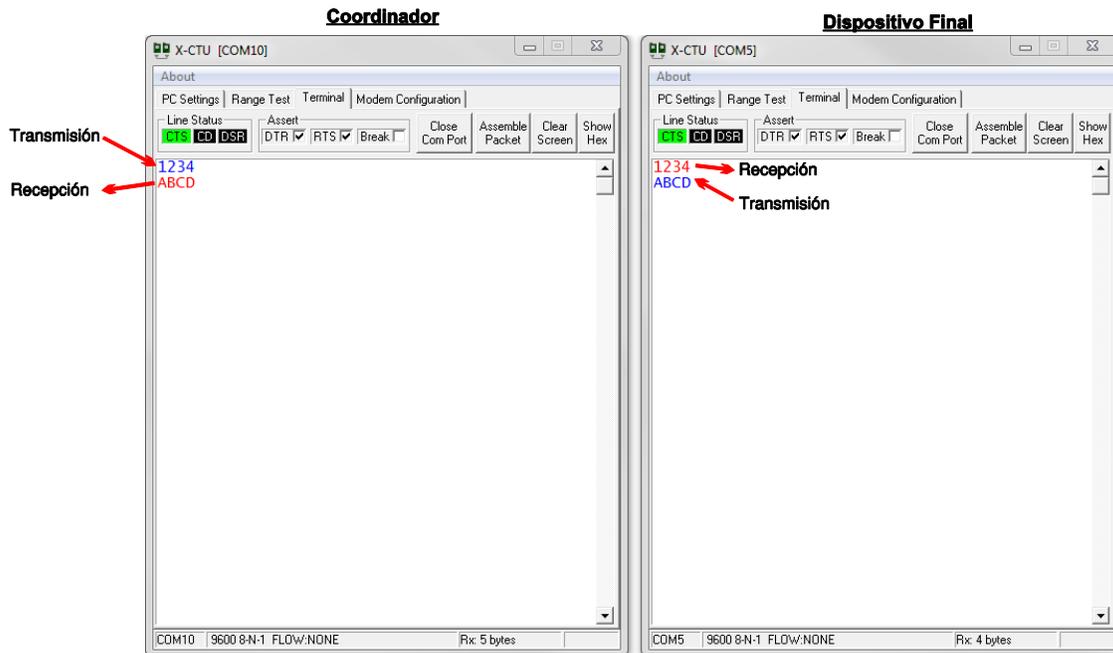


Figura C.8. Transmisión entre coordinador y dispositivo final.

El mismo ejercicio puede ser realizado utilizando direccionamiento de 64bit para esto se emplea el número de serie del módulo al cual se desea transmitir como dirección de destino. Los parámetros a modificar serían los siguientes:

Tabla C.5. Parámetros modificados. Transmisión punto a punto con direccionamiento de 64 bits

Parámetro	Coordinador (XBee)	Dispositivo Final (XBee-PRO)	Observación
SH	13A200	13A200	32bit más significativos del número de serie del módulo (valores propios del módulo)
SL	4068AEE5	4060841C	32bit menos significativos del número de serie del módulo (valores propios del módulo)
MY	0	0	Dirección de 16bit del modulo
DH	13A200	13A200	Dirección de destino parte alta
DL	4060841C	4068AEE5	Dirección de destino parte baja

El esquema de esta aplicación se muestra en la Figura C.9.

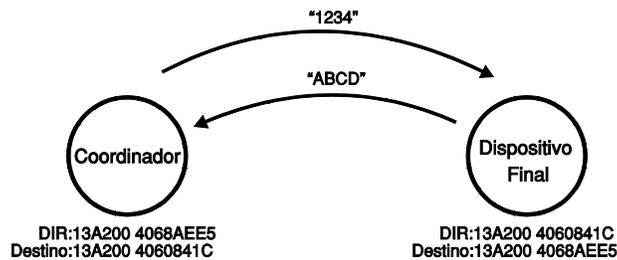


Figura C.9. Transmisión de datos. Direccionamiento de 64 bit.

#### 4.1.2. Punto a Multipunto

Para esta aplicación se utiliza el esquema anterior (punto a punto con direccionamiento de 64bit) y se procede a agregar un tercer dispositivo a la red. Este será un XBee-PRO

La configuración de los tres dispositivos será la siguiente:

Tabla C.6. Configuración dispositivos: transmisión punto a multipunto.

Parámetro	Coordinador (XBee)	Dispositivo Final (XBee-PRO) 1	Dispositivo Final (XBee-PRO) 2
<b>CH</b>	C	C	C
<b>ID</b>	3332	3332	3332
<b>CE</b>	1	0	0
<b>SH</b>	13A200	13A200	13A200
<b>SL</b>	4068AEE5	4060841C	4064213F
<b>MY</b>	0	0	0
<b>DH</b>	13A200	13A200	13A200
<b>DL</b>	4060841C	4068AEE5	4068AEE5
<b>SM</b>	0	0	0
<b>BD</b>	3	3	3
<b>NB</b>	0	0	0
<b>AP</b>	0	0	0

En la configuración mostrada el coordinador envía datos hacia el dispositivo final 1 puesto que la dirección de destino apunta hacia ese modulo. Por otra parte ambos dispositivos finales transmitirán información hacia el coordinador. Los datos enviados por los módulos serán los siguientes:

- Coordinador: "CD"
- Dispositivo Final 1: "DF1"
- Dispositivo Final 2: "DF2"

El esquema de la aplicación se muestra en la Figura C.10.

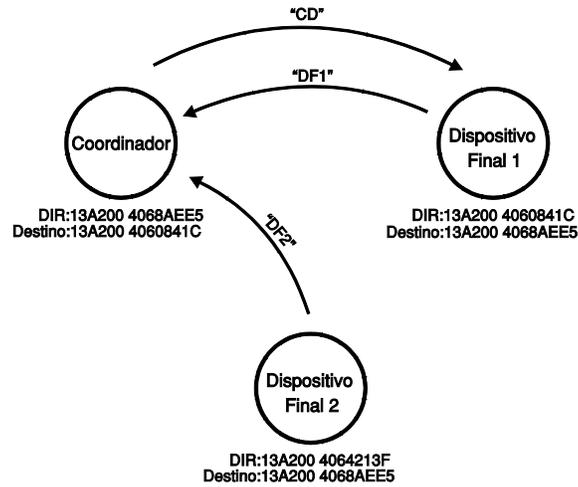


Figura C.10. Red punto a multipunto. Direccionamiento de 64 bit.

El resultado de la prueba se describe a continuación:

Tabla C.7. Resumen transmisión punto a multipunto

	Modulo	Operación	Datos
(1)	Coordinador	Trasmite	"CD"
(2)	Dispositivo Final 1	Recibe	"CD"
(3)	Dispositivo Final 1	Trasmite	"DF1"
(4)	Coordinador	Recibe	"DF1"
(5)	Dispositivo Final 2	Trasmite	"DF2"
(6)	Coordinador	Recibe	"DF2"

Cambiando la dirección de destino de los módulos (DH y DL) es posible que los XBee envíen información hacia un receptor determinado.

### 4.1.3. Broadcast

Hasta este momento las aplicaciones realizadas solo envían información a módulos específicos determinados por su dirección. Pero en algunos casos esta dirección es desconocida o se desea enviar información a todos los nodos de la red. Para estos casos se emplea el Broadcast.

El modo de transmisión Broadcast permite que cualquier modulo RF que pertenezca a la red y se encuentre dentro del alcance del transmisor pueda recibir el mensaje que este transmite. Los XBee que empleen este método deben fijar su dirección de destino en 0xFFFF independiente del modo de direccionamiento empleado.

Dirección de destino para Broadcast.

<b>DH</b>	0x00000000
<b>DL</b>	0x0000FFFF

Usando el esquema de la aplicación anterior y cambiando la dirección de destino del dispositivo final 1 será posible que este último transmita información a todos los nodos de la red. El nuevo esquema se observa en la Figura C.11.

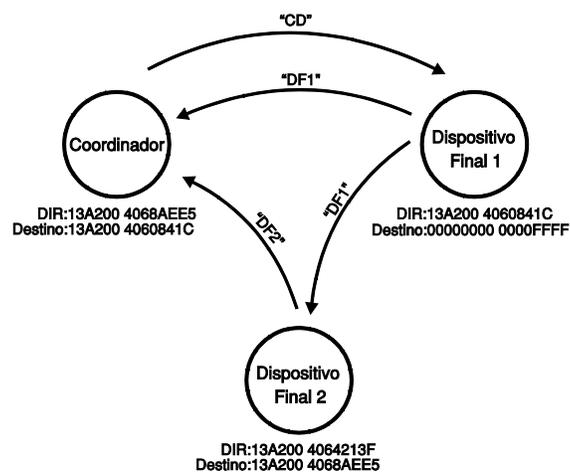


Figura C.11. Broadcast desde Dispositivo Final 1.

El resultado de la prueba se describe a continuación:

Tabla C.8. Resumen transmisión Broadcast

	<b>Modulo</b>	<b>Operación</b>	<b>Datos</b>
(1)	Coordinador	Trasmite	“CD”
(2)	Dispositivo Final 1	Recibe	“CD”
(3)	Dispositivo Final 1	Trasmite	“DF1”
(4)	Coordinador	Recibe	“DF1”
(5)	Dispositivo Final 2	Recibe	“DF1”
(6)	Dispositivo Final 2	Trasmite	“DF2”
(7)	Coordinador	Recibe	“DF2”

## 4.2. Transmisión de datos en modo API.

El modo de transmisión API requiere el encapsulamiento de la información a transmitir en una trama. La forma de esta dependerá del tipo de información o de los datos a solicitar.

La estructura básica de las tramas API es la siguiente:

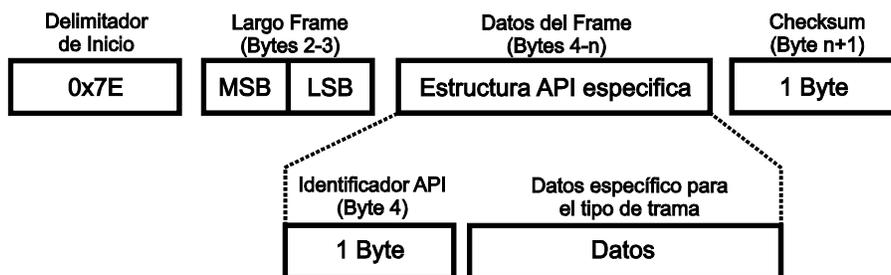


Figura C.12. Formato trama API.

La estructura específica de una trama dependerá del tipo de trama. Cada una de estas se identifican por número de 1 byte llamado identificador API. Por ejemplo para la transmisión de información utilizando direccionamiento de 64 bit se emplea una trama con identificador 0x00. su estructura se muestra en la Figura C.13.

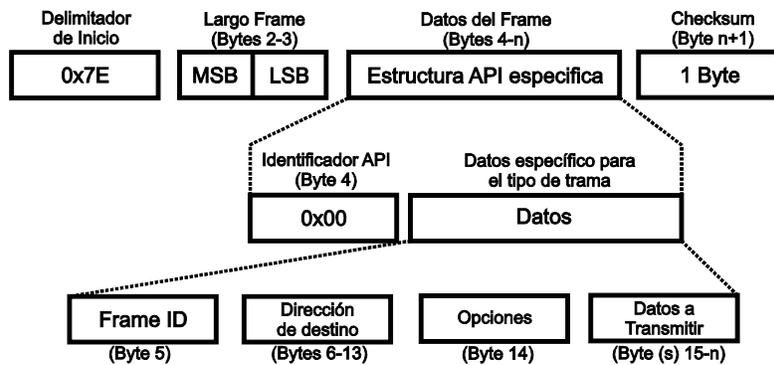


Figura C.13. Formato trama API tipo 0x00.

Para habilitar el modo API se debe configurar el parámetro **AP** en el XBee fijándolo en **1** (Habilitado).

#### 4.2.1. Checksum y Largo de Frame

El Checksum o suma de verificación permite proteger la integridad de los datos verificando que estos no hayan sido corrompidos durante la transmisión. En cambio el Largo de Frame especifica como su nombre lo indica la cantidad de bytes que posee el Frame. Ambos valores se determinan a partir de los datos del Frame.

Considérese la siguiente trama

Inicio	Largo Frame		Datos del Frame										Checksum	
	MSB	LSB	0x01	0x00	0x12	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00		0x00
0x7E	MSB	LSB	0x01	0x00	0x12	0x01	0x00	CHK						

##### - Largo del Frame

A partir de la trama se contabiliza el número de bytes que posee el frame para el caso del ejemplo son 10 bytes. El largo de frame es un valor en 16 bit el que se separa en 8 bit más significativos (MSB) y 8 bit menos significativos (LSB). Por lo tanto el valor queda de la siguiente forma.

MSB	LSB
0x00	0x0A

\* 10d=0x0A (Hexadecimal)

### - Checksum

Para el cálculo del checksum es necesario sumar todos los bytes que componen los datos del frame y restárselos a 0xFF. Del resultado solo se consideran los 8 bit menos significativos.

$$CHK = 0xFF - \sum(\text{Datos del Frame})$$

Para el ejemplo planteado:

$$CHK = 0xFF - (0x01 + 0x00 + 0x12 + 0x01 + 0x0C + 0x00 + 0x00 + 0x00 + 0x00 + 0x00)$$

$$CHK = 0xFF - 0x20$$

$$CHK = 0xDF$$

Finalmente la trama a transmitir quedara de la siguiente forma

Inicio	Largo Frame		Datos del Frame										Checksum	
0x7E	0x00	0x20	0x01	0x00	0x12	0x01	0x0C	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0xDF

#### 4.2.2. Punto a Punto en API: direccionamiento de 64 bit.

El modo de operación API resulta mucho más complejo que el modo transparente sin embargo el modo API presenta una mayor flexibilidad al momento de transmitir información. Parte de esta viene dada por la inclusión de la dirección de destino en la propia trama a transmitir.

Para realizar la transmisión en este modo es requisito que todos los nodos destinatarios se encuentren operando en dicho modo, de lo contrario no será posible la transmisión de información. Considerando lo anterior se configuran los módulos para que operen en esta modalidad.

<b>Parámetro</b>	<b>Coordinador (XBee)</b>	<b>Dispositivo Final (XBee-PRO)</b>
<b>CH</b>	C	C
<b>ID</b>	3332	3332
<b>MY</b>	0xFFFF*	0xFFFF*
<b>SH</b>	13A200	13A200
<b>SL</b>	4068AEE5	4060841C
<b>CE</b>	1	0
<b>DH</b>	0	0
<b>DL</b>	0	0
<b>SM</b>	0	0
<b>BD</b>	3	3
<b>NB</b>	0	0
<b>AP</b>	1	1

*\*MY:0xFFFF. Esta configuración desactiva la recepción paquetes de información con direccionamiento de 16bit.*

Configurados los módulos se procede a preparar las tramas a transmitir. Se enviarán los mismos datos que fueron enviados en la actividad 3.1.1.

- Coordinador: "1234"
- Dispositivo Final: "ABCD"

Los datos a enviar son caracteres ASCII sin embargo la trama API solo está compuesta de datos numéricos por lo tanto será necesario buscar el equivalente hexadecimal de estos caracteres.

<b>Mensaje Coordinador</b>				
Caracteres ASCII	"1"	"2"	"3"	"4"
Hexadecimal	0x31	0x32	0x33	0x34

<b>Mensaje Dispositivo Final</b>				
Caracteres ASCII	"A"	"B"	"C"	"D"
Hexadecimal	0x41	0x42	0x43	0x44

Los datos serán transmitidos empleando direccionamiento en 64 bit por lo tanto se utilizara una trama tipo 0x00. La estructura de esta trama se observa en la Figura C.13.

Inicio	Largo Frame	API ID	Frame ID	Dirección de destino	Opciones	Datos a transmitir	Checksum
--------	-------------	--------	----------	----------------------	----------	--------------------	----------

Comenzaremos por el mensaje que transmite el coordinador:

- Inicio: El delimitador de inicio está determinado por el valor 0x7E para las tramas API
- API ID: depende del tipo de trama a transmitir. para este caso 0x00
- Frame ID: permite asignar un número a las tramas enviadas. esto es útil cuando es necesario fragmentar los datos y enviarlos en varios paquetes. Para este caso se asignara arbitrariamente el valor 0x01.
- Dirección de destino: corresponde a la dirección de 64 bit del destinatario 0x0013A2004060841C
- Opciones: entre las opciones disponibles se encuentra la deshabilitarían del acuse de recibo (ACK) 0x01; envió del paquete con Broadcast hacia la PAN 0x04; ninguna de las anteriores 0x00. Se deja esta última opción.
- Datos a transmitir: permite un máximo de 100 Bytes a transmitir por paquete. En nuestro caso solo se transmitirán 4: 0x31 0x32 0x33 0x34

Ordenando los datos anteriores en la trama tenemos:

Inicio	Lrg. Fr.	API ID	Fr. ID	Dir. Destino	Op.	Datos				CHK
0x7E	0x?? ??	0x00	0x01	0x00 13 A2 00 40 60 84 1C	0x00	0x31	0x32	0x33	0x34	0x??

- Largo del Frame: los datos que componen el Frame son 15 Bytes. Por lo tanto el largo será 0x00 0F
- Checksum:

$$CHK = 0xFF - (0x00 + 0x01 + 0x00 + 0x13 + 0xA2 + 0x00 + 0x40 + 0x60 + 0x84 + 0x1C + 0x00 + 0x31 + 0x32 + 0x33 + 0x34)$$

$$CHK = 0xFF - 0x2C0$$

$$CHK = 0xFF - 0xC0^*$$

$$CHK = 0x3F$$

\* En el cálculo del checksum la suma de los datos obtuvo como resultado 0x2C0 sin embargo el cálculo solo considera los 8 bits menos significativos de la operación, por lo cual el valor es truncado dejándose el LSB: 0xC0.

Finalmente la trama que enviara el coordinador será:

Inicio	Lgr. Fr.	API ID	Fr. ID	Dir. Destino	Op.	Datos				CHK
0x7E	0x00 0F	0x00	0x01	0x00 13 A2 00 40 60 84 1C	0x00	0x31	0x32	0x33	0x34	0x3F

Para el dispositivo final se sigue el mismo procedimiento:

- Inicio: 0x7E
- API ID: 0x00
- Frame ID: 0x01.
- Dirección de destino: 0x00 13 A2 00 40 68 AE E5
- Opciones: 0x00.
- Datos a transmitir: 0x41 0x42 0x43 0x44
- Largo del Frame: 0x00 0F

- Checksum: 0x04

La trama que enviara el dispositivo final será:

Inicio	Lgr. Fr.	API ID	Fr. ID	Dir. Destino	Op.	Datos				CHK
0x7E	0x00 0F	0x00	0x01	0x00 13 A2 00 40 68 AE E5	0x00	0x41	0x42	0x43	0x44	0x04

Configurados los módulos XBee y construidas las tramas se procede al envío de la información. Primero desde el coordinador hacia el dispositivo final.

En X-CTU nos dirigimos a la pestaña “Terminal”. En esta activaremos la opción “Show Hex” para visualizar los datos en bruto que son enviados y recibidos por el modulo. Para el envío de las tramas se utiliza el botón “Assemble Packet” (ver Figura C.14).

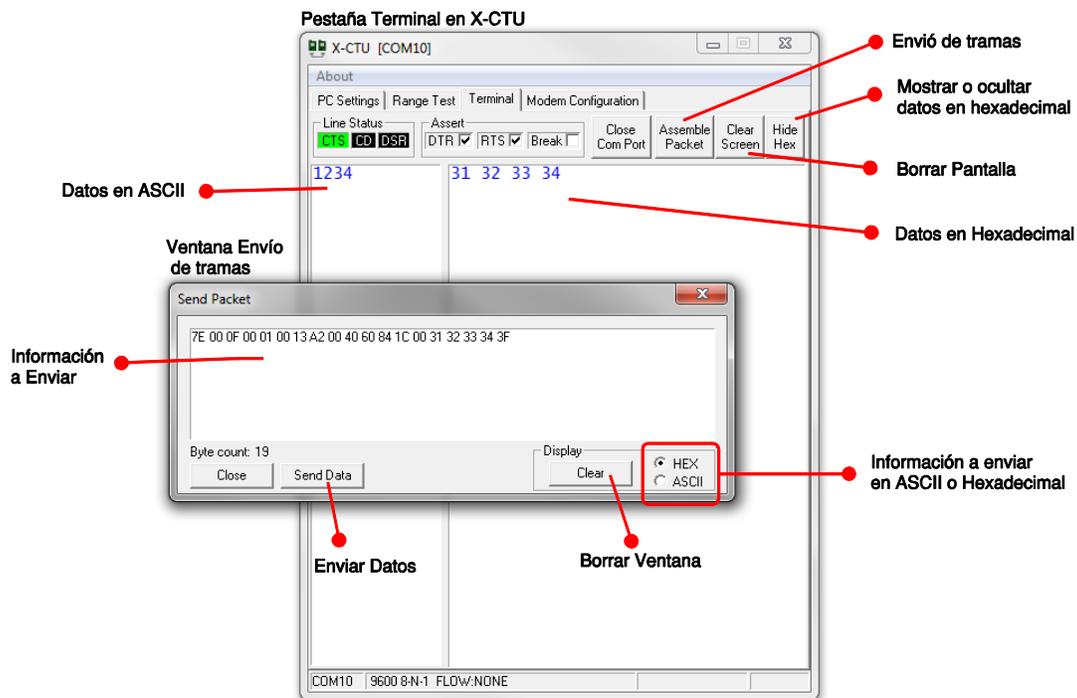
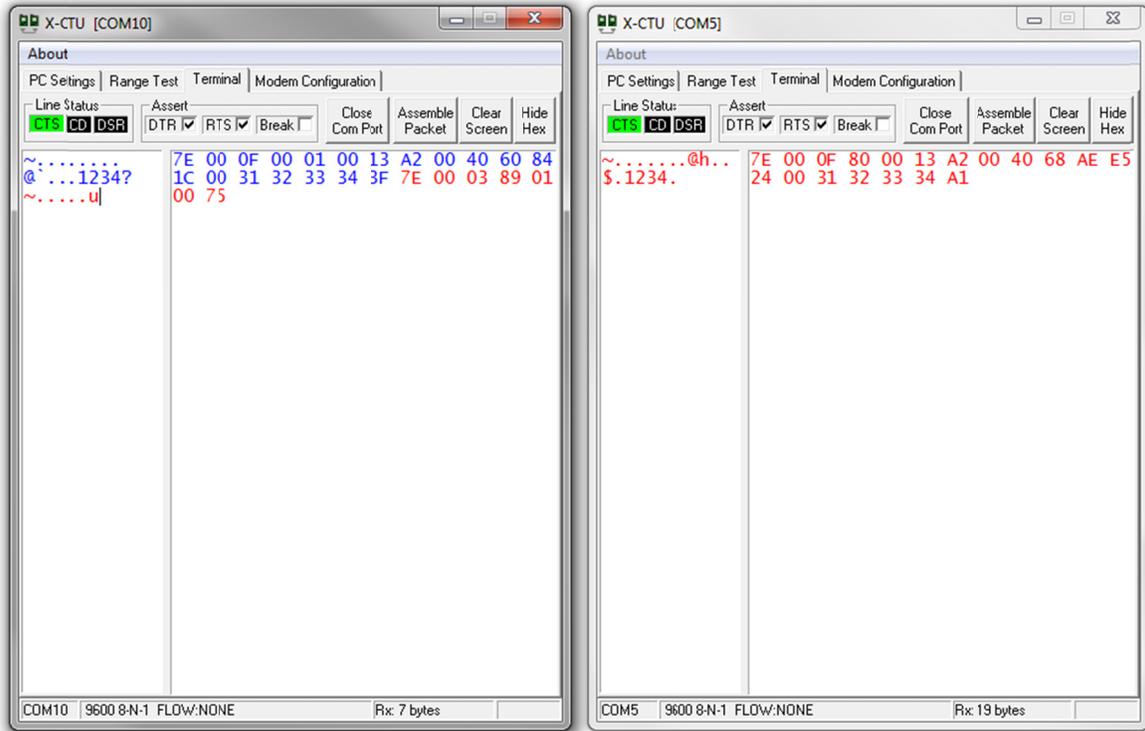


Figura C.14. Terminal en X-CTU

La Figura C.15 muestra el resultado de la operación. En esta se observa que en el terminal del dispositivo final se ha recibido una trama de igual forma el coordinador recibe una trama de respuesta ante la información transmitida.



(A) Terminal Coordinador. (B) Terminal Dispositivo Final.

Primero analizaremos los datos de la ventana del coordinador. En esta se muestra de color azul los datos que han sido enviados estos corresponden a la trama previamente construida. En Rojo se destacan los datos que el dispositivo ha recibido estos son:

7E 00 03 89 01 00 75

Los datos recibidos corresponden a una trama de estado del tipo 0x89 su estructura es:

D. Inicio	MSB	LSB	API ID	Frame ID	Estado	Checksum
0x75	0x00	0x03	0x89	0x01	0x00	0x75

Cuando se transmite una trama el modulo genera esta respuesta la cual indica si el mensaje fue enviado satisfactoriamente u ocurrió algún problema en el envío. El byte “Estado” puede tomar una de las siguientes opciones:

- 0x00: Envió Exitoso.
- 0x01: ACK no recibido.
- 0x02: Fallo en CCA.
- 0x03: Purgado.

El valor de este byte es 0x00 por lo cual la trama fue correctamente enviada.

Ahora se procede a analizar los datos recibidos por el dispositivo final estos son:

**7E 00 0F 80 00 13 A2 00 40 68 AE E5 24 00 31 32 33 34 A1**

Esta trama corresponde a un Paquete recibido con direccionamiento de 64 bit cuyo ID es 0x80, su estructura es:

D. Inicio	Largo		API ID	Dirección Fuente	RSSI	Opciones	Datos	CHK
	MSB	LSB						
0x7E	0x00	0x0F	0x80	0x00 13 A2 00 40 68 AE E5	0x24	0x00	0x31 32 33 34	0xA1

Del análisis de los datos recibidos podemos determinar lo siguiente:

- La dirección de origen de los datos es: 0x00 13 A2 00 40 68 AE E5
- Los datos recibidos son: 0x31 0x32 0x33 0x34 en hexadecimal cuyo equivalente en ASCII es “1234”
- Los datos fueron recibidos con un RSSI de: -36[dBm]\*.

*\*Los valores en el parámetro RSSI tienen como unidad de medida [dBm] y signo negativo.*

Es posible comprobar la suma de verificación de la trama recibida para asegurar la integridad de los datos. Este cálculo debe dar como resultado 0XA1.

El mismo procedimiento es posible de realizar para la información enviada desde el dispositivo final hacia el coordinador. Queda como ejercicio para el lector el

análisis que las tramas involucradas en la operación. A continuación solo se exponen los resultados de la transmisión:

	<b>Modulo</b>	<b>Operación</b>	<b>Datos</b>
(1)	Dispositivo Final	<b>Trasmite</b>	7E 00 0F00 01 00 13 A2 00 40 68 AE E5 00 41 42 43 44 04
(2)	Dispositivo Final	<b>Recibe</b>	7E 00 03 89 01 00 75
(3)	Coordinador	<b>Recibe</b>	7E 00 0F 80 00 13 A2 00 40 60 84 1C 17 00 41 42 43 44 69



