

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

DOBLE TITULACIÓN  
CONVENIO DE INTERCAMBIO DE ESTUDIANTES  
PUCP - UPC de Barcelona



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

## ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE LOCALIZACIÓN UTILIZANDO EL KIT JN5148 CON EL ESTANDAR IEEE 802.15.4

Tesis para optar el Título de **Ingeniero de Telecomunicaciones**, que presenta:

**Oscar Orrillo Choy**

**ASESOR: Josep Paradells Aspas**

Lima, Noviembre del 2011

## RESUMEN

El presente documento comprende el análisis y diseño de un sistema de localización geográfica en una red inalámbrica de sensores que utilice el estándar IEEE 802.15.4.

Para un mejor entendimiento del proyecto, el trabajo realizado se divide en cuatro capítulos, los cuales son detallados a continuación:

- i. En el Capítulo 1 se realiza una introducción a la situación actual de las redes de sensores inalámbricos, la motivación de agregar una nueva funcionalidad a este tipo de redes y los objetivos del proyecto.
- ii. En el Capítulo 2 se explica el estándar IEEE 802.15.4 aplicado en este proyecto. Además, se explica diferentes técnicas de localización geográficas utilizadas en redes inalámbricas y se elige la más adecuada.
- iii. En el Capítulo 3 se detalla las características de los equipos utilizados en este proyecto, además del software del fabricante.
- iv. En el Capítulo 4 se realiza el análisis de estimación de distancia entre nodos utilizando la técnica del tiempo de vuelo y los diferentes medios para hacer estas mediciones.
- v. En el Capítulo 5 se detallan los resultados empíricos en diferentes escenarios de los métodos indicados en el capítulo 4.
- vi. En el Capítulo 6 se explica el diseño y desarrollo del sistema de localización geográfica con el kit de sensores inalámbricos después del análisis realizado en capítulos anteriores.
- vii. En el Capítulo 7 se desarrollan las conclusiones generales y se explica la línea futura del proyecto.



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## Acta d'Avaluació de Projecte

**Estudiant:** ORRILLO CHOY, OSCAR  
**Dni:** 04186826-  
**Títol:** Análisis y diseño de un sistema de localización utilizando el kit JN5148 con el estándar IEEE 802.15.4  
**Titulació:** ENGINYERIA DE TELECOMUNICACIÓ  
**Especialitat:** PFC SENSE ESPECIALITAT  
**Crèdits:** 36 **Modalitat:** A - Centre  
**Director:** PARADELLS ASPAS, JOSE

### QUALIFICACIÓ\*

9.5 EXCELENT

**El President:**

**El Vocal:**

**El Secretari:**





CASADEMONT SERRA, JORDI

ROMEU ROBERT, JORDI

PARADELLS ASPAS, JOSE

Barcelona, 22 de novembre de 2011

En cas de concedir Matricula d'Honor, cal la unanimitat dels 3 membres del tribunal, que ha de fer constar els mèrits pels quals atorga aquesta qualificació

(\*) Especifiqueu la nota numèrica, amb resolució de 0.5; i la nota descriptiva, d'acord amb les següents correspondències: 10, Matricula d'honor; 9 o 9.5, Excel·lent; de 7 a 8.5 Notable; de 5 a 6.5 Aprovat.



## Acta de Evaluación de Proyecto

**Estudiante:** Oscar Orrillo Choy

**DNI:** 04186826

**Título:** Análisis y diseño de un sistema de localización, utilizando el kit JN5148 con el estándar IEEE 802.15.4

**Titulación:** Ingeniería de Telecomunicación

**Especialidad:** PFC sin especialidad

**Créditos:** 36

**Modalidad:** A-Centro

**Director:** José Paradells Aspás

### CALIFICACIÓN\*

**Sobresaliente -9.5-**

**El Presidente**

**El Vocal**

**El Secretario**

Casademont Serra, Jordi

Romeu Robert, Jordi

Paradells Aspás, José

Barcelona. 22 de Noviembre 2011

En caso de conceder Matrícula de Honor, es necesaria la unanimidad de los 3 miembros del tribunal, que tienen que hacer constar los méritos por los cuales otorga esta cualificación

(\*) Especificad la nota numérica, con resolución de 0.5; y la nota descriptiva de acuerdo con las siguientes correspondencias: 10, Matrícula de Honor, 9 o 9.5 Excelente, de 7 a 8.5 Notable; de 5 a 6.5, Aprobado.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres en primer lugar, por todo el esfuerzo realizado y el apoyo brindado en todos los proyectos de mi vida, han sido la mayor fuente de confianza y ejemplo de vida, por los cuales estaré siempre agradecido.

A mi hermano y mi familia más cercana, especialmente a mi tía Consuelo, por darme un nuevo hogar y hacerme sentir como en casa. Su interés, apoyo y consejos han sido fundamentales para realizar mis estudios y formarme a nivel personal.

Al profesor Josep Paradells por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto, por su orientación y enseñanzas a lo largo de todo este tiempo. Así como las demás personas del grupo de Redes Inalámbricas, como Marisa Catalán, que brindaron su ayuda e interés en los momentos requeridos.

A mis amigos, tanto a los de toda la vida como a los que conocí y estreche amistad en Barcelona. Especialmente a María Elena por su constante compañía, apoyo y ánimos durante todo este tiempo. A Jesús por su amistad y apoyo en esta etapa.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>Resumen .....</b>	<b>3</b>
<b>Tabla de Contenidos .....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla de Figuras .....</b>	<b>10</b>
<b>Tablas .....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>13</b>
1.1 Motivación .....	13
1.2 Objetivos .....	13
<b>Capítulo 2: Estado del Arte .....</b>	<b>15</b>
2.1 Estándar IEEE 802.15.4 .....	15
2.1.1 Arquitectura .....	15
2.1.2 Funciones de la Capa Física IEEE 802.15.4 .....	17
2.1.3 Funciones de la Sub-Capa MAC IEEE 802.15.4 .....	17
2.1.3.1 CSMA/CA.....	18
2.1.3.2 Acuse de recibo.....	18
2.1.4 Elementos de una red 802.15.4 .....	18
2.1.5 Topología de Red .....	19
2.1.6 Canales y Frecuencias de Trabajo.....	20
2.1.7 SuperTrama.....	21
2.1.8 Administración de dispositivos .....	22
2.1.9 Seguridad .....	23
2.2 Técnicas de Localización .....	24
2.2.1 Sistema de Localización Basado en la Atenuación de la Señal .....	24
2.2.1.1 Modelos de Propagación para Estimar de Distancias.....	26
2.2.2 Sistema de Localización Basado en Tiempo de Propagación .....	29
2.2.2.1 Medición del Tiempo de Propagación.....	31
2.2.3 Conclusiones .....	34
<b>Capítulo 3: Contexto de Trabajo .....</b>	<b>36</b>
3.1 Kit de Evaluación JN5148-EK010 de Jennic.....	36
3.1.1 Placas de Sensores .....	37
3.1.1.1 Placa de Sensores Jennic DR1048 .....	37
3.1.1.2 Placa Controladora Jennic DR1047.....	38
3.1.1.3 Consideraciones de Funcionamiento.....	39

3.1.2 Módulos JN5148-001-Myy .....	39
3.2 Kit de Desarrollo de Software .....	41
3.2.1 Arquitectura de una Aplicación .....	42
3.2.2 Creación de Aplicaciones.....	44
<b>Capítulo 4: Análisis de Métodos para Estimación de Distancias entre Nodos ....</b>	<b>46</b>
4.1 Medición de Tiempo de Propagación sin el Motor de Tiempo de Vuelo.....	46
4.1.1 Resolución Temporal y Espacial .....	47
4.1.2 Tiempo de Transmisión y Recepción de un mensaje .....	48
4.1.3 Tiempo de arribo del mensaje ACK .....	50
4.2 Motor de Tiempo de Vuelo .....	52
4.2.1 Esquema de medición .....	52
4.2.2 Licencia .....	54
4.2.3 Time of Flight API .....	54
4.2.4 Patente de Jennic .....	55
4.2.4.1 Error en la Frecuencia de los Relojes .....	55
4.2.3.2 Error de Detección .....	58
4.2.5 ToF API Demo .....	61
<b>Capítulo 5: Mediciones para la Estimación de Distancia.....</b>	<b>65</b>
5.1 Comunicación 1.0.....	65
5.2 Mediciones sin el Motor de Tiempo de Vuelo .....	66
5.2.1 Mediciones 1.....	66
5.2.1.1 Tipo de Modulo.....	66
5.2.1.2 Distancia 0 metros.....	67
5.2.2 Mediciones 2.....	75
5.2.2.1 Varias Distancias.....	75
5.2.3 Conclusiones .....	77
5.3 Mediciones con el Motor de Tiempo de Vuelo .....	78
5.3.1 Mediciones 1.....	78
5.3.2 Mediciones 2.....	82
5.3.3 Mediciones 3.....	82
5.3.4 Conclusiones .....	84
<b>Capítulo 6: Desarrollo de un Sistema de Localización .....</b>	<b>86</b>
6.1 Método de Localización: Trilateración .....	86
6.1.1 Ajuste por Mínimos Cuadrados No Lineales .....	87



6.1.2 Intersección de Círculos .....	90
6.1.3 Conclusiones .....	92
6.2 Implementación de un Sistema de Localización .....	94
6.2.1 Programación de los MicroControladores .....	94
6.2.2 Interfaz Gráfica de Usuario con MATLAB .....	97
6.3 Análisis de Resultados .....	101
<b>Capítulo 7: Conclusiones Generales.....</b>	<b>105</b>
7.1 Conclusiones y Apuntes .....	105
7.2 Líneas Futuras .....	106
<b>Bibliografía.....</b>	<b>107</b>





## TABLA DE FIGURAS

Figura 1 : Arquitectura en Capas de IEEE 802.15.4.....	16
Figura 2: Topología Estrella .....	19
Figura 3: Topología Par a Par .....	20
Figura 4: Estructura de la SuperTrama .....	21
Figura 5: Esquema de un Sistema de Localización.....	25
Figura 6: Ley del Cuadrado Inverso .....	27
Figura 7: Potencia Recibida según la distancia utilizando la ley del cuadrado inverso .	28
Figura 8: Valor RSSI según la distancia.....	29
Figura 9: Propagación entre dos nodos.....	30
Figura 10: Medición en un sentido calculado por un solo nodo.....	31
Figura 11: Medición en ambos sentidos calculado por un solo nodo .....	32
Figura 12: Frecuencia necesaria según la resolución espacial deseada.....	34
Figura 13: Placa Jennic DR1048 .....	37
Figura 14: Placa Jennic DR1047 .....	38
Figura 15: Módulo JN5148-001-Myy .....	40
Figura 16: Arquitectura de una Aplicación con el Kit JN5148 .....	43
Figura 17: Pasos para poner en funcionamiento una red 802.15.4 .....	44
Figura 18: Ciclos de reloj (62.5 ns) según la distancia.....	47
Figura 19: Tiempos en el envío y recepción de una trama .....	49
Figura 20: Tiempos en el arribo de un mensaje ACK.....	51
Figura 21: Esquema de medición utilizando el motor de tiempo de vuelo de Jennic.....	52
Figura 22: Esquema de medición en ambos sentidos .....	57
Figura 23: Error de detección (Delta).....	58
Figura 24: Aparato Receptor de un módulo.....	59
Figura 25: Proceso para la transmisión de datos.....	59
Figura 26: Correlador presentado en el documento de patente de Jennic.....	60
Figura 27: Esquema de conexión del ToF API Demo .....	62
Figura 28: Mediana TXRX y ACK para varias distancias .....	76
Figura 29: Moda TXRX y ACK para varias distancias.....	77
Figura 30: Valores Procesados vs Sin Procesar.....	80

Figura 31: Error de valores procesados y sin procesar 1 .....	80
Figura 32: Error de valores procesados y sin procesar 2 .....	81
Figura 33: Plano del escenario de medición con obstáculos (distancias en cm).....	83
Figura 34: Trilateración ideal .....	86
Figura 35: Diferentes resultados de mediciones en la trilateración .....	87
Figura 36: Localización con ajuste por mínimos cuadrados .....	89
Figura 37: Intersección de círculos.....	91
Figura 38: Centroide obtenido con la intersección de círculos .....	92
Figura 39: Mínimos Cuadrados vs Intersección de Círculos.....	93
Figura 40: Topología del Sistema de Localización .....	94
Figura 41 : Aplicación de Localización Geográfica en MATLAB .....	98



## TABLAS

Tabla 1: Características según la banda de trabajo .....	20
Tabla 2: Conjuntos de seguridad del modo seguro .....	24
Tabla 3 : Datos de un submedición.....	63
Tabla 4 : Datos de una medición .....	63
Tabla 5 : Error según Antena .....	66
Tabla 6: Indicadores estadísticos para mediciones TXRX y ACK .....	73
Tabla 7: Indicadores estadísticos para varias distancias grupo 1.....	75
Tabla 8: Indicadores estadísticos para varias distancias grupo 2.....	76
Tabla 9: Valores ToF para varias distancias .....	79
Tabla 10: Valores ToF y RSSI .....	82
Tabla 11: Valores ToF y RSSI con obstáculos.....	84
Tabla 12 : Medición de distancias en 3 nodos .....	89
Tabla 13 : Coordenadas reales y estimadas .....	101
Tabla 14: Localización Con Ubicación Estimada .....	102
Tabla 15: Localización Con Ubicación Real.....	103
Tabla 16: Error para los métodos de solución de la trilateración .....	104

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En la actualidad el estilo de vida se ha modificado en muchos aspectos debido a la voluntad de desarrollo de la tecnología. Se busca aplicaciones para mejorar o automatizar tareas relacionadas a la vida cotidiana y laboral. El desarrollo en la industria de los diferentes estándares IEEE 802.15, especialmente los grupos de trabajo con redes inalámbricas, permiten ampliar la gama de utilización de las redes PAN (Personal Area Network).

La empresa de microcontroladores Jennic, adquirida por NXP Semiconductors en Julio del año 2010, ofrece una serie de kits de desarrollo para implementar aplicaciones para redes PAN. El kit JN5148 de Jennic trabaja con el estándar IEEE 802.15.4-2003<sup>[1]</sup>, son un conjunto de placas de bajo consumo que permiten la creación redes inalámbricas.

Si a una aplicación de red inalámbrica le agregamos la función de localización geográfica y ampliamos su alcance, sus posibilidades se multiplican y se obtienen sistemas capaces de realizar diferentes tareas relacionándolas a una posición geográfica.

### **1.1 Motivación**

Al presentar siempre un interés por las redes inalámbricas, el estudio, entendimiento y puesta en práctica del estándar IEEE 802.15.4, que implica este proyecto, es una motivación para desarrollarlo. Además, la posibilidad de ampliar las funcionalidades que actualmente se relacionan a las redes 802.15.4, agregando la posibilidad de cumplir sus tareas en un sistema móvil con la ventaja de la geo localización, se convierte en la principal motivación.

### **1.2 Objetivos**

- Estudio de Estándar IEEE 802.15.4.
- Explicar las condiciones, alcances y limitaciones de trabajar con las placas del kit JN5148.

- Realizar un análisis de la implementación de un sistema de localización, mencionando diferentes maneras de hacerlo y eligiendo la más adecuada según los recursos disponibles.
- Implementar un sistema de localización listo para ser puesto en funcionamiento en un escenario real, además de explicar sus características y prestaciones.



## CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hace un breve resumen del estándar IEEE 802.15.4-2003, el cual se utiliza como norma de comunicación en los equipos de este proyecto. Después se presentan diferentes maneras para medir distancias en un sistema de localización.

### **2.1 Estándar IEEE 802.15.4**

El Estándar IEEE 802.15.4 se refiere a la capa física y la capa MAC (Media Access Control) para redes inalámbricas personales (WPAN). Publicado en el año 2003, el grupo de trabajo 4b se encargó de sustituirlo por el estándar IEEE 802.15.4-2006<sup>[2]</sup>, documento publicado con el fin de explicar y aclarar algunos puntos específicos del documento original.

El estándar nace de la necesidad de tener una norma que defina la comunicación en una red de múltiples nodos, los cuales deben tener una baja tasa de datos, baja complejidad, bajo consumo de energía, corto alcance y bajo coste, además de ser sencillos de instalar y hacer uso de bandas no licenciadas.

Las aplicaciones de este tipo de redes giran en torno al monitoreo y automatización gracias a los sensores que suelen ser agregados a los nodos. Por ejemplo, monitoreo de temperatura, humedad y luminosidad en una habitación; automatización de las cerraduras de una casa o monitoreo de las condiciones climatológicas en un campo de cultivo.

Para más detalles ver el documento <sup>[1]</sup>.

#### **2.1.1 Arquitectura**

Se presenta las diferentes capas de la arquitectura como bloques para facilitar su explicación, refiriéndose a cada bloque como una capa. Este sistema está basado en el modelo de las 7 capas OSI.

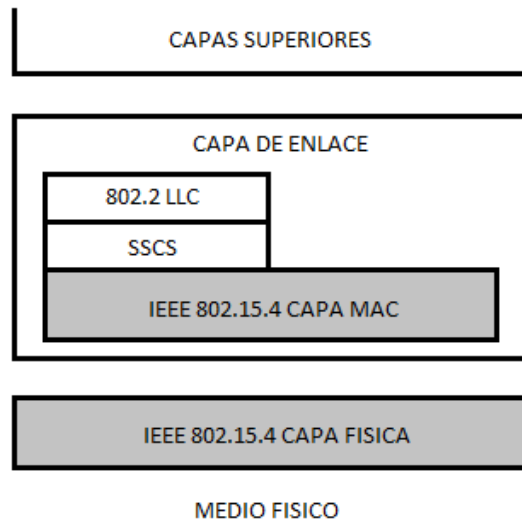


Figura 1 : Arquitectura en Capas de IEEE 802.15.4

La capa física se encarga de interactuar con el medio físico de transmisión así como con la capa MAC. Esta capa provee dos servicios a la capa MAC: Servicio de Datos PHY, que habilita la transmisión y recepción de Unidades de Datos de Protocolo PHY (PPDU) a través del canal de radio; y el Servicio de Administración, el cual brinda mecanismos para el control y configuración de la interfaz de radio desde la capa MAC. La información de configuración de la capa Física es almacenada en la base de información de PAN (PHY PIB).

La Capa MAC, una sub-capa de la Capa de Enlace, se encarga de brindar acceso a los canales físicos para todo tipo de comunicación. En la figura se ve que la Capa de Enlace está formada por el IEEE 802.2 LLC (Logical Link Control), el SSCS (Service Specific Convergence Sublayer) y la Sub-Capa MAC. El IEEE 802.2 LLC es común en todos los estándares 802 y accede a la sub-capa MAC a través del SSCS, sin embargo su explicación está fuera del alcance del estándar IEEE 802.15.4.

La sub-capa MAC ofrece los siguientes servicios a las capas superiores: Servicios de Datos MAC (MCPS), el cual permite enviar y recibir datos a la siguiente capa superior; y el Servicio de Administración MAC (MLME), el cual brinda mecanismos para el control y configuración de comunicaciones, interfaz de radio y creación de redes desde la siguiente capa superior.



### 2.1.2 Funciones de la Capa Física IEEE 802.15.4

Las tareas que realiza la capa física IEEE 802.15.4 son:

- Activación y Desactivación del transceptor de radio.
- Detección del nivel de energía en el canal de trabajo.
- Brindar un Indicador de Calidad de Enlace (LQI) de los paquetes recibidos, basados en su nivel de potencia.
- Realizar la valoración de canal libre (CCA), el cual será utilizado por la Sub-Capa MAC para el algoritmo de Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evitación de Colisiones (CSMA/CA).
- Elegir el canal de frecuencia de trabajo.
- Transmisión a través del canal físico de los mensajes.

### 2.1.3 Funciones de la Sub-Capa MAC IEEE 802.15.4

Las tareas que realiza la sub-capas MAC IEEE 802.15.4 son:

- En el caso de nodo coordinador, debe generar las señales guía.
- Brindar diferentes servicios de seguridad.
- Utilizar el mecanismo CSMA/CA para el acceso al canal.
- Envío de tramas de acuse de recibo.
- Administrar el mecanismo de las ranuras de tiempo dedicadas.
- Administrar la asociación y des asociación de nodos en la red PAN.

### 2.1.3.1 CSMA/CA

Es necesario resaltar la implementación del mecanismo de CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) en la transmisión de mensajes para evitar colisiones con otros mensajes que están siendo transmitidos en el mismo canal por otro nodo.

Cuando se transmite un mensaje, la sub-capas MAC solicita a la Capa Física que realice una Valoración de Canal Libre (CCA), si se detecta que el medio está libre entonces se procede a transmitir, de lo contrario, si el medio está siendo utilizado, la sub-capas MAC espera un periodo de tiempo aleatorio (Random Back-Off Period) y después reinicia el proceso.

### 2.1.3.2 Acuse de recibo

Cuando se envía un mensaje y se ha recibido satisfactoriamente, el nodo receptor se encarga de notificar al origen que el mensaje se recibió con éxito, esto se hace mediante un mensaje de acuse de recibo (acknowledgment frame o simplemente ACK). Estos mensajes son enviados sin utilizar CSMA/CA.

### 2.1.4 Elementos de una red 802.15.4

Existen dos tipos de dispositivos según su hardware y software, los Dispositivos de Función Completa (FFD), que son capaces de hacer uso de todos los servicios de la MAC IEEE 802.15.4; y los Dispositivos de Función Reducida (RFD), que no pueden hacer uso de todos los servicios de la MAC porque tienen hardware limitado.

Los nodos de la red pueden ser clasificados según el rol que cumplen:

- Coordinador PAN: Se encarga de asignar un ID a la red, encontrar el canal de trabajo adecuado, asignarse una dirección corta, administrar la asociación de nuevos nodos y según la topología retransmitir mensajes entre nodos. Tiene que ser necesariamente un FFD.

- Coordinador: En una red con topología de árbol, aparte del coordinador PAN, también puede existir un Coordinador, que se encarga de administrar las solicitudes de asociación a la red y retransmitir mensajes entre nodos. También debe ser un FFD.
- Dispositivo: Es un nodo que no cumple funciones de coordinador, puede ser FFD o RFD.

### 2.1.5 Topología de Red

El estándar especifica dos topologías de red dependiendo de los requerimientos de esta, la topología Estrella y la topología Par a Par.

La topología estrella, como se muestra en la figura, cuenta con un nodo central (FFD) que cumple la función de coordinador PAN. En este tipo de red la comunicación se realiza a través del coordinador, el cual se encarga de iniciar, terminar o direccionar los mensajes.

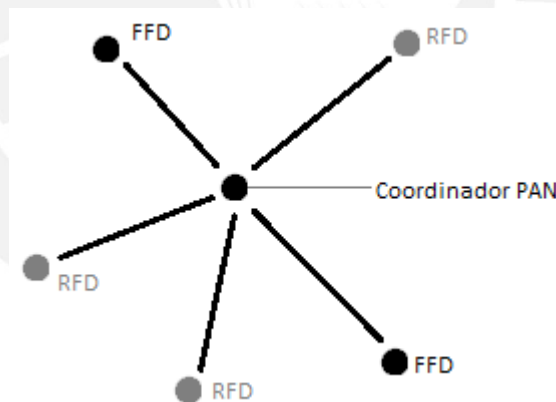


Figura 2: Topología Estrella

En la topología Par a Par, cualquier nodo se puede comunicar con otro directamente, aunque sigue necesitando un coordinador PAN. Su formación es más compleja, pero permite crear una red con topología de árbol. El direccionamiento de los mensajes es manejado por las capas superiores, como la capa red, lo cual escapa las normas presentadas por este estándar.

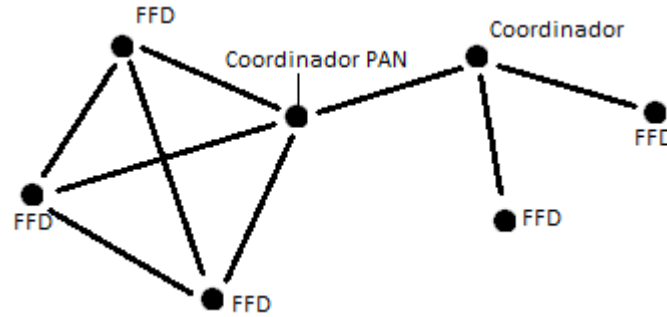


Figura 3: Topología Par a Par

### 2.1.6 Canales y Frecuencias de Trabajo

Como se mencionó anteriormente, una característica de este tipo de redes es que trabajan en bandas no licenciadas, según la región geográfica se eligió las bandas que se muestran a continuación.

Frecuencia Central (MHz)	Banda de Frecuencia (MHz)	Tasa de Datos (Kbps)	Numeración de Canales	Modulación	Región
868.3	868–868.6	20	0	BPSK	Europa
915	902–928	40	1-10	BPSK	Norteamérica, Australia
2400	2400–2483.5	250	11-26	O-QPSK	Mundo

Tabla 1: Características según la banda de trabajo

Se tienen 27 canales, 16 para la banda 2400 MHz, 10 en la banda 915 MHz y 1 en la banda 868 MHz. En el documento, publicado en 2006, se introduce la modulación ASK en las bandas 868 y 915 MHz.

El coordinador PAN de una red se encarga de escoger el canal adecuado, para esto realiza un escaneo de todos los canales y elige el mejor, que por lo general es el canal con menos interferencias.

### 2.1.7 SuperTrama

Las redes IEEE 802.15.4 operan en dos modos, con Guía y sin Guía. A continuación se explicara el funcionamiento y beneficio de cada modo.

En el modo con Guía, el nodo coordinador se encarga de transmitir señales guía que se utilizan como referencia para sincronizar las comunicaciones e informar sobre datos pendientes para algunos nodos. Entre guía y guía se forma la SuperTrama, la cual se divide en un Periodo de Contención de Acceso (CAP) y un periodo muerto, este último es opcional. El Periodo de Contención de Acceso se divide en 16 ranuras de tiempo, cuando un nodo necesita comunicarse debe hacer uso de CSMA/CA con ranuras para poder acceder al medio. Durante el periodo muerto, la red puede pasar a un estado de baja-potencia lo cual sirve para ahorrar energía.

Dependiendo de los requerimientos de ancho de banda de un nodo, este puede solicitar ranuras de tiempos dedicadas (GTS), que pueden estar formadas por una o más ranuras de tiempo de la supertrama. Como máximo pueden haber siete GTS, y vienen después del CAP con el nombre de Periodo de Contención Libre (CFP), como son ranuras dedicadas no necesitan utilizar CSMA/CA para acceder al medio.

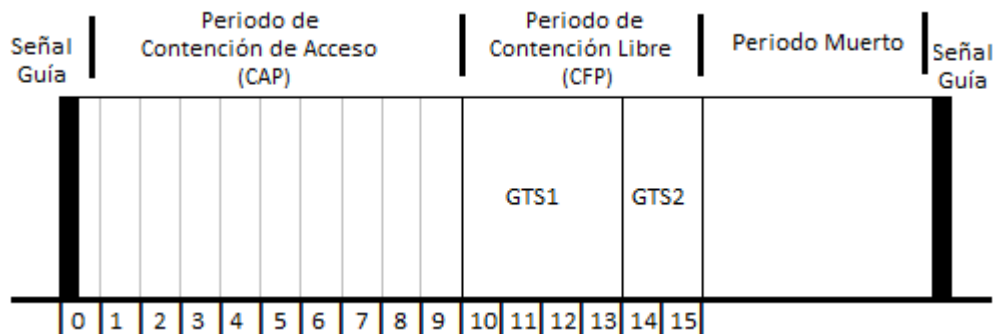


Figura 4: Estructura de la SuperTrama

En modo sin Guía, no se transmiten señales guías. Cuando un nodo desea transmitir deberá hacer uso del algoritmo CSMA/CA sin ranuras. Si un nodo necesita información sobre datos pendientes para este, deberá solicitar esta información al coordinador de forma asíncrona.

La ventaja del utilizar el modo Con Guía es que se puede hacer uso del medio de una forma más eficiente, brindando más tiempo en el medio a nodos con una mayor necesidad de transmisión. Sin embargo, el envío contante de señales guía y su sincronización demanda una mayor energía. Para redes con transmisiones asíncronas es mejor optar por el modo Sin Guía.

### 2.1.8 Administración de dispositivos

En este apartado se hace un breve resumen de cómo se administran los elementos de una red IEEE 802.15.4, desde su creación.

Cuando se da inicio a una red, el primer paso es elegir al coordinador PAN, existen diferentes formas para elegirlo. Un criterio es por descarte, como se mencionó anteriormente un nodo coordinador debe ser un dispositivo de función completa (FFD), si en una red solo existe un nodo FFD necesariamente debe ser el coordinador. Otra forma de elegir al coordinador es por software, en el caso de que existan más de un nodo FFD en la red, se puede programar previamente qué nodo funcionara como coordinador. Por último, si es irrelevante qué nodo FFD es el coordinador, se puede dejar que todos los nodos realicen un escaneo activo para detectar al nodo coordinador, el primero en recibir la respuesta que indique que todavía no hay uno asignado, se convertirá en el nodo coordinador.

El siguiente paso es elegir un Identificador de Red PAN (PAN ID) de 16 bits, se tiene que tener en cuenta que no puede coincidir con otros PAN ID en el mismo Espacio Personal de Operación (POS).

Cuando la red está establecida, para que un nodo pueda asociarse debe conocer el PAN ID. Realiza un escaneo activo, en el cual el nodo envía una solicitud para recibir las señales guía de todas las redes (la señal guía contiene el PAN ID), o un escaneado pasivo, en el cual el nodo espera captar las señales guía transmitidas por el coordinadores PAN.

Si un nodo desea asociarse a la red debe enviar una solicitud de asociación que será recibida por el nodo coordinador, según sus recursos y cómo está configurada la red deberá aceptar o rechazar la solicitud de asociación. Para desasociarse de una red, la solicitud la puede iniciar el nodo a desasociarse o el nodo coordinador.

En cuanto al direccionamiento, existen dos tipos de direcciones. El tipo obligatorio son las direcciones IEEE MAC, las cuales identifican universalmente a cada dispositivo y están compuestos por 64 bits. El tipo opcional son las direcciones cortas de 16 bits, locales para cada red y asignadas por el nodo coordinador, tienen la ventaja de ahorrar bits en el campo de direcciones.

### 2.1.9 Seguridad

La sub-capas MAC, ofrece varios servicios de seguridad. Existen 3 modos en los cuales se puede operar: Modo Inseguro, Modo Lista de Control de Acceso (ACL) y Modo Seguro.

En el modo inseguro ningún tipo de servicio de seguridad es implementado, no se usa seguridad.

En el modo Lista de Control de Acceso, cada dispositivo cuenta con una lista de las direcciones de los dispositivos con los cuales está permitido la comunicación. Cuando se recibe un mensaje, una capa superior se encarga de aceptar o rechazar el mensaje según la comparación de la dirección de origen con la Lista de Acceso que realiza la sub-capas MAC.

En el modo seguro existen siete conjuntos de seguridad, un conjunto puede estar formado por la combinación de los siguientes servicios: Control de Acceso, similar al que se utiliza en el modo Lista de Control de Acceso; Cifrado, los datos son cifrados en el origen y descifrados en el destino utilizando la misma clave, esta debe ser conocida por los nodos implicados en la comunicación; Integridad de Trama, se utiliza el código de integridad de mensaje (MIC) para proteger el mensaje de posibles manipulaciones de dispositivos que no cuenten con la clave de cifrado, esta clave debe ser común a los nodos implicados en la comunicación; Frescura Secuencial, cada mensaje cuenta con un valor de frescura el cual al ser leído por el receptor lo compara con el último valor de frescura recibido y así puede conocer que tan antiguo es el mensaje, de esta manera se evitan la retransmisión de mensajes antiguos.



A continuación se muestra un cuadro con los 7 conjuntos de seguridad.

Conjunto de Seguridad	Control de Acceso	Cifrado	Integridad (Tamaño del MIC)	Frescura Secuencial
AES-CTR	✓	✓	X	Opcional
AES-CCM-128	✓	✓	✓ (128 bits)	Opcional
AES-CCM-64	✓	✓	✓(64 bits)	Opcional
AES-CCM-32	✓	✓	✓(32 bits)	Opcional
AES-CBC-MAC-128	✓	X	✓(128 bits)	X
AES-CBC-MAC-64	✓	X	✓(64 bits)	X
AES-CBC-MAC-32	✓	X	✓(32 bits)	X

Tabla 2: Conjuntos de seguridad del modo seguro

## 2.2 Técnicas de Localización

En este apartado se explica un par de métodos, que permiten desarrollar un sistema de localización utilizando microcontroladores que trabajan con el estándar IEEE 802.15.4.

Los modelos que se explican están basados en las mediciones de distancias entre puntos de referencia y el nodo que se desea localizar. La diferencia entre estos modelos radica en cómo se calculan las distancias a los puntos de referencia, se mencionara dos métodos: por atenuación de la potencia de la señal y por tiempo de propagación de la señal.

### 2.2.1 Sistema de Localización Basado en la Atenuación de la Señal

Con el kit JN5148 se puede implementar diferentes tipos de sistemas de localización, en este apartado se explicara el funcionamiento de uno basado en la estimación de distancias por la atenuación de la señal.

Primero se debe describir el funcionamiento a grandes rasgos del sistema a tratar. Como se mencionó previamente, se tiene dos tipos de nodos: Fijos, que nos servirán como puntos de referencia; y el Móvil, el cual es el nodo que se desea localizar.

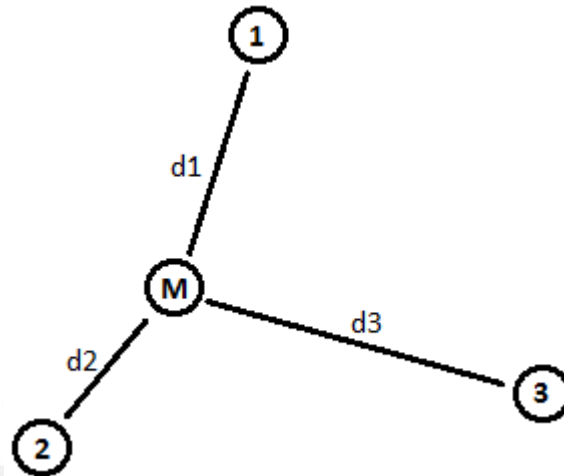


Figura 5: Esquema de un Sistema de Localización

En esta figura hay tres nodos fijos (1, 2 y 3) y un nodo móvil (M). Es posible determinar la ubicación del nodo móvil si se conocen las distancias  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$  mediante la trilateración. Todo el sistema se basa en calcular correctamente las distancias a los nodos fijos.

Las distancias se pueden determinar por la atenuación que sufren las señales entre los nodos. Los nodos permiten obtener el valor de RSSI (Indicador de Potencia de Señal Recibida en dB), el cual indica el nivel de potencia de una señal.

Los nodos fijos se encargan de enviar una señal hacia el nodo móvil, este recibe la señal atenuada por las pérdidas de propagación y almacena su valor RSSI. Una vez que el nodo móvil recibió todas las señales puede responder a los nodos fijos enviándoles el valor RSSI de la señal que ellos enviaron previamente. Cada nodo fijo puede conocer la atenuación que sufrió la señal desde que se envió hasta que fue recibida por el nodo móvil. Con la atenuación es posible calcular el valor la distancia según el modelo de propagación que se esté utilizando.

### 2.2.1.1 Modelos de Propagación para Estimar de Distancias

Un modelo aplicable para algunas redes IEEE 802.15.4 es el modelo de pérdidas en espacio libre, se puede utilizar este modelo gracias a que se trabaja con redes de corto alcance y poca potencia, lo cual permite descartar factores que alteran la propagación como el radio de la Tierra, la Troposfera o la Ionosfera, brindando una condición similar a la propagación en el vacío.

Jennic utiliza un modelo basado en la Ley del Cuadrado Inverso para hacer estimaciones de distancias.

La ley del cuadrado inverso propone que la intensidad de influencia de una fuente en un punto es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del punto a la fuente. En este caso, la potencia recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Se suele aplicar cuando una energía es radiada radialmente (área de una esfera  $4\pi r^2$ ).

En forma general esta ley postula

$$I = \frac{S}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Donde

S = Intensidad de la Energía o Potencia en la Fuente

I = Intensidad de la Energía o Potencia a una distancia r

$4\pi r^2$  = Área de la Esfera

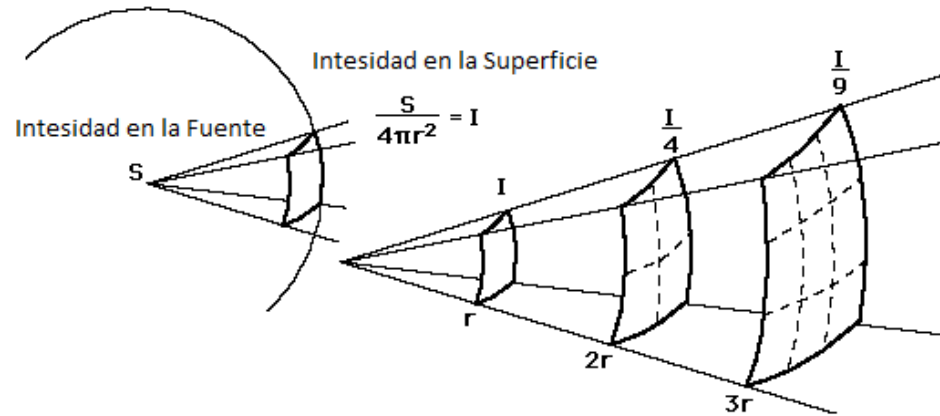


Figura 6: Ley del Cuadrado Inverso

Jennic utiliza se basa en esta ley agregando otros factores que no se mencionan en la documentación para realizar su modelo de propagación. Hace una conversión de potencia recibida a valores RSSI con 1 dB de resolución, teniendo como puntos de referencia: Valor máximo de RSSI es 108 dB correspondiente a 0 dBm, y el valor mínimo 20 dB correspondiente al ruido intrínseco del medio el cual es aproximadamente -105 dBm.

El valor RSSI es proporcional a la potencia recibida, por lo que según esta ley disminuye cuadráticamente con la distancia a la fuente. Sin embargo por las características de una función cuadrática, cuando la distancia aumenta la tasa de cambio del valor RSSI disminuye.

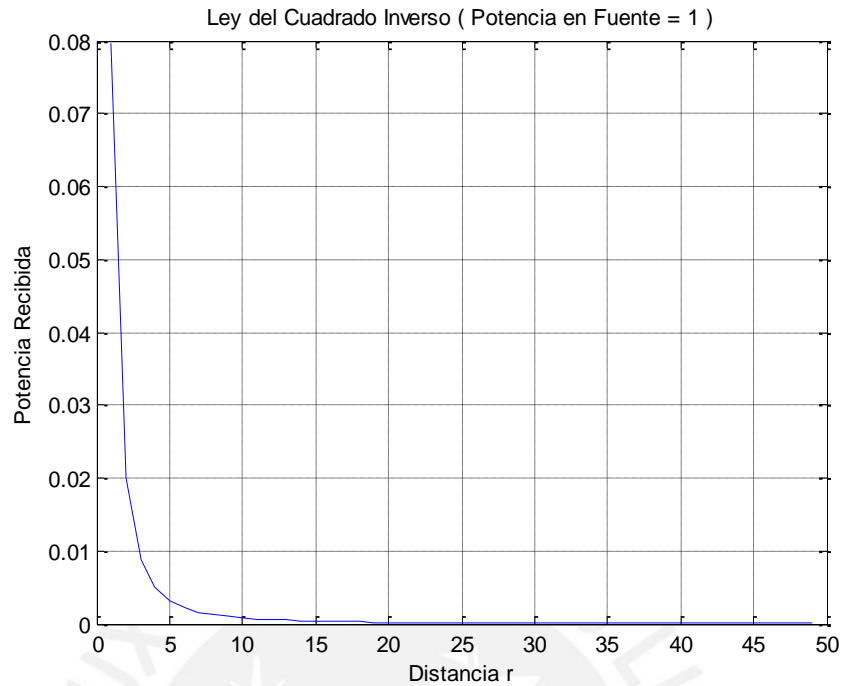


Figura 7: Potencia Recibida según la distancia utilizando solamente la ley del cuadrado inverso

Por lo tanto, la estimación de distancia por medio del valor RSSI se vuelve inexacta a medida que la distancia aumenta. Según la documentación de Jennic [28], la relación que se presenta a continuación (utilizando un modelo basado en la ley del cuadrado inverso) puede considerarse adecuada para distancias menores de 10 metros.

$$d = 0.02 \cdot 10^{\left(\frac{108 - \text{RSSI}}{20}\right)}$$

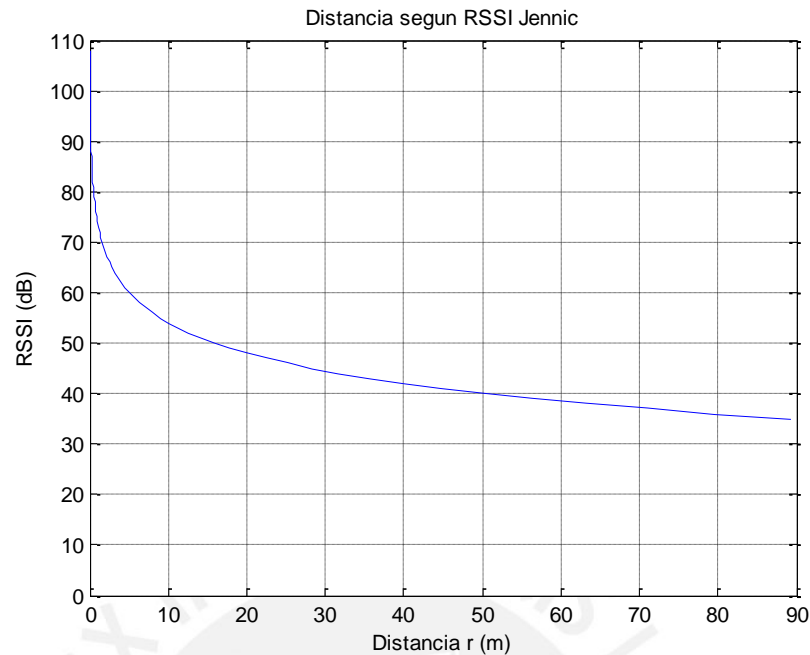


Figura 8: Valor RSSI según la distancia

Las características de un medio inalámbrico no se pueden definir con un solo modelo debido a que es dinámico e incierto, por ejemplo variaciones en la orientación de la antena puede causar cambios notables. Es necesario tener un modelo adecuado para el canal, en un escenario real se presentan los fenómenos de reflexión, difracción y dispersión, los cuales pueden distorsionar la atenuación de la señal. Se debe hacer un modelado del escenario de trabajo, y cualquier alteración en este implica una modificación del modelo, lo cual se convierte en una gran limitación.

### 2.2.2 Sistema de Localización Basado en Tiempo de Propagación

En este sistema de localización también se tiene dos tipos de nodos: los nodos fijos que sirven como puntos de referencia; y el nodo móvil, el cual se desea localizar.

La función que cumplen nodos es la misma, pero ahora las distancias se estiman midiendo el tiempo de vuelo o tiempo de propagación de los mensajes.

Para entender cómo el tiempo de vuelo ayuda a calcular la distancia, se debe tener en cuenta la ecuación de Movimiento Rectilíneo Uniforme:

$$e = v * t$$

Se puede aplicar esta relación para los mensajes enviados por los nodos si se considera lo siguiente:

- La trayectoria de las señales enviadas es recta.
- Las señales tienen dirección y velocidad constante.

Se desea hallar la distancia que ha recorrido un mensaje en cierta cantidad de tiempo, conociendo que la velocidad a la que se desplaza es igual a la velocidad de la luz, aproximadamente  $3 \times 10^8$  metros/segundos.

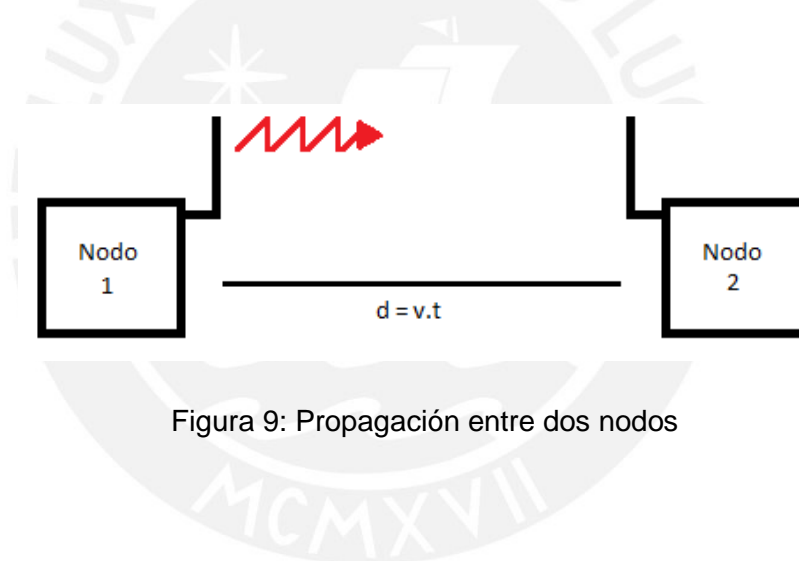


Figura 9: Propagación entre dos nodos

Donde

$d$  = Distancia entre nodos

$v$  = Velocidad de Propagación,  $c = 3 \times 10^8$  metros/segundos

$t$  = Tiempo de Propagación

Para hallar la distancia se tiene que determinar el tiempo de propagación de la forma más precisa posible. Para lograr esto, se debe iniciar un contador en el instante en que la antena del nodo 1 envía la señal, después se debe detener el contador en el instante que la señal llega a la antena del nodo 2. Una vez que se tiene el tiempo, junto a la velocidad ( $c$ ), se deben multiplicar para hallar la distancia.



### 2.2.2.1 Medición del Tiempo de Propagación

Existen varias formas en que se puede medir el tiempo de propagación pero en todos los casos siempre debe haber un interacción entre los nodos involucrados.

#### Medición en un sentido calculado por un solo nodo

El siguiente esquema nos muestra cómo se realiza la medición del tiempo de propagación. En primer lugar, los nodos deben tener sus contadores sincronizados, es necesario que haya un procedimiento previo en el cual los dos contadores empiecen a contar al mismo tiempo.

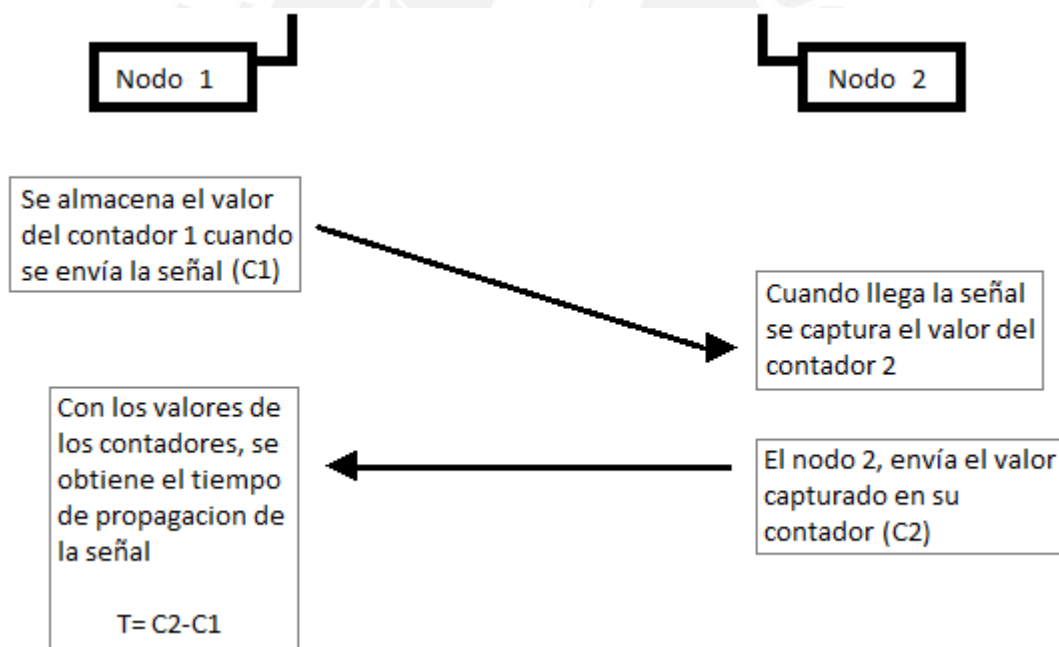


Figura 10: Medición en un sentido calculado por un solo nodo

El problema de este esquema es la sincronización que deben tener los relojes de ambos nodos, es muy fácil que estos pierdan la sincronización por ligeras diferencias en los cristales de cuarzo de los relojes. No existen dos cristales exactamente iguales y

por mínima que sea la diferencia entre sus frecuencias, puede ser suficiente para alterar las mediciones de tiempo, ya que se trabaja con tiempos muy pequeños.

### Medición en ambos sentidos calculado por un solo nodo

En el siguiente esquema, se tiene la ventaja que solo un nodo se encarga de hacer la medición de tiempo de propagación del mensaje, con lo cual se evita el problema de la sincronización. Aunque el nodo 2 debe contar el tiempo que tarda desde que recibió el mensaje hasta que lo reenvía, para luego descartar este tiempo del total.

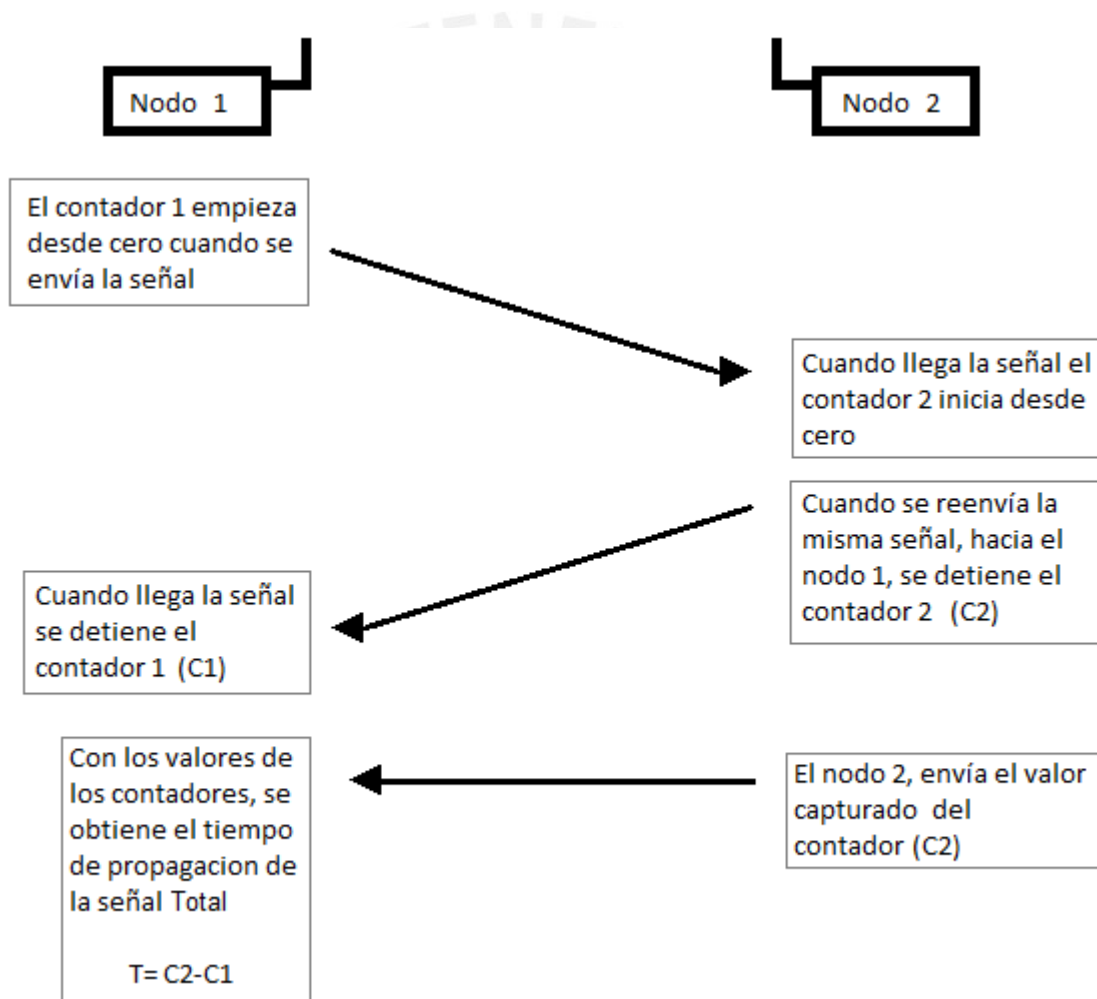


Figura 11: Medición en ambos sentidos calculado por un solo nodo

Para mejorar las mediciones de los tiempos de propagación, se puede realizar este proceso por ambos nodos, con lo cual se disminuyen los errores introducidos por las diferencias en las frecuencias de los cristales de los contadores.

Al igual que un sistema de localización basado en atenuación de la señal, este sistema también presenta desventajas y dificultades. Como se concluyó, todo el sistema se basa en calcular correctamente el tiempo de propagación de la señal, lo cual al trabajar con una red de corto alcance exige una alta resolución de tiempo. Si la red es de corto alcance, significa que las distancias entre nodos son pequeñas, por lo tanto los tiempos de propagación serán muy cortos. Para hacerse una idea, si se desea tener una resolución espacial de 1 metro se debe ser capaz de medir el tiempo en periodos de 3 ns.

$$1 \text{ m} = (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \cdot t$$

$$t = 3,33 \text{ ns}$$

Para medir periodos de 3 ns es necesario tener un contador que tenga una frecuencia de:

$$f = \frac{1}{3,33 \times 10^{-9} \text{ s}}$$

$$f \cong 333 \text{ MHz} \cong 0.3 \text{ GHz}$$

Lograr altas frecuencias en los cristales de los contadores es muy complicado en dispositivos de hardware limitado como los nodos de las redes 802.15.4, los cuales deben ser de baja complejidad. El siguiente grafico muestra las frecuencias de reloj necesarias según la resolución espacial que se desea lograr.

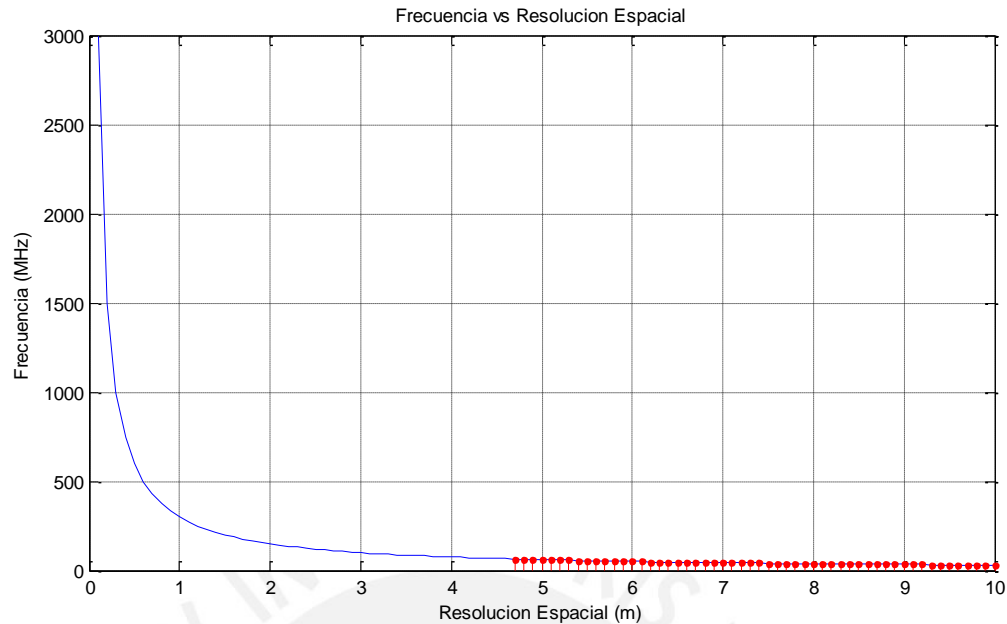


Figura 12: Frecuencia necesaria según la resolución espacial deseada

Este gráfico muestra que para tener resoluciones espaciales menores a un metro debemos tener una frecuencia de reloj mayor a los 300 MHz. En un general se puede aspirar a tener una frecuencia de reloj de hasta 64 MHz, lo cual brinda resoluciones espaciales desde 4.7 metros, se pueden ver como puntos rojos en el gráfico.

Entonces se debe recurrir a la instalación de periféricos que nos ayuden a medir el tiempo de propagación en unidades más pequeñas, esto no implica tener cristales que alcancen grandes frecuencias. Se puede hacer uso del tratamiento de señales, más adelante se explicara en detalle como esta técnica es utilizada por el kit JN5148.

### 2.2.3 Conclusiones

Como vemos cada sistema de localización planteado presenta ventajas y desventajas en la forma de estimar distancias.

Por un lado está la estimación de distancias según la atenuación de la señal, los inconvenientes para utilizar este método son:

No se puede lograr tener un modelo exacto de propagación, aunque existen algunos que se aproximan adecuadamente.

El modelo que utiliza la ley del cuadrado inverso da buenos resultados solo para distancias inferiores a 10 metros.

Si se logra utilizar un modelo de propagación para un determinado contexto, cualquier cambio que se introduzca alterara este modelo. En una red 802.15.4 las atenuaciones por propagación son muy pequeñas, cualquier cambio en el entorno que produzca la mínima atenuación se puede interpretar como un aumento en la distancia.

Por otro lado tenemos la estimación de distancias por el tiempo de vuelo, que cuenta con una mayor precisión para grandes distancias. Este método funciona mientras se pueda detectar la señal correctamente, las ligeras atenuaciones no influyen. Pero también presenta desventajas:

La falta de una línea de vista entre los nodos que realizan las mediciones afecta al tiempo de propagación y por lo tanto a la estimación de distancia.

Al trabajar con señales que viajan a la velocidad de la luz se hace necesario tener contadores de tiempo con una gran resolución para poder medir el tiempo de vuelo.

En este proyecto se eligió hacer un **Sistema de Localización con Estimación de Distancias utilizando Tiempos de Propagación**, por su alta confiabilidad y estabilidad para mayores distancias. La dificultad que presenta, como trabajar con mediciones de tiempo muy pequeñas, se pueden superar con diferentes técnicas.

## CAPÍTULO 3: CONTEXTO DE TRABAJO

En este capítulo se describe todo el entorno de trabajo de este proyecto. Primero se detallan todos los equipos utilizados y después el software necesario.

Para ver los manuales necesarios para trabajar con el kit JN5148 ver [Anexo A.1](#).

### **3.1 Kit de Evaluación JN5148-EK010 de Jennic**

Para este proyecto se utilizó el Kit de Evaluación JN5148-EK010 de Jennic, el cual junto al kit de desarrollo de software JN5148 de Jennic permite crear redes inalámbricas personales que trabajen con los protocolos IEEE 805.15.4, JenNet y ZigBee PRO. El kit contiene los siguientes componentes

- 1 Placa controladora con sensores y una pantalla LCD.
- 4 Placas de sensores.
- 3 Módulos con conector Sub Miniatura versión A (SMA).
- 2 Módulos con antena de circuito impreso (PCB) integrada.
- 2 Módulos con conector SMA, amplificador de potencia y amplificador de ruido bajo, utilizado para largas distancias.
- 3 Antenas con conector SMA.
- 2 Cables USB-Serial (FTDI).
- 10 Baterías AAA.

Un nodo de la red está conformado por un módulo (cualquiera de los 7 disponibles) conectado a una placa (ya sea la placa controladora o una de las 4 placas con sensores). A continuación se detalla las características de los módulos y las placas.

### 3.1.1 Placas de Sensores

#### 3.1.1.1 Placa de Sensores Jennic DR1048

El kit contiene 4 placa de sensores DR1048 prácticamente idénticos y solo difieren en el módulo que tienen conectados, cada placa puede tener cualquiera de los 7 módulos.

Las placas presentan las siguientes características:

- 3 Indicadores LED: D1 y D2 programables, D9 de alimentación.
- 4 Pulsadores: SW1 y SW2 programables, RESET para reseteo y PROGRAM para entrar en modo programación.
- 1 Sensor de temperatura.
- 1 Sensor de humedad.
- 1 Sensor de luminosidad.
- 1 Memoria EEPROM con bus serial.
- 2 Interfaces UART: UART0 y UART1 para comunicación y programación.
- 1 Puerto de expansión adicional, de 40 pines.

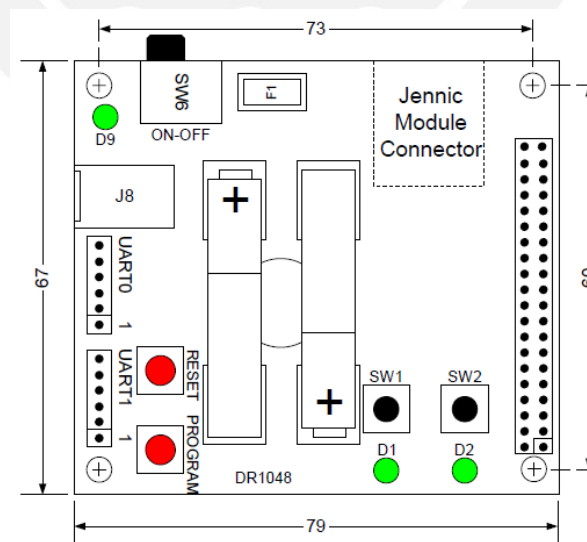


Figura 13: Placa Jennic DR1048



### 3.1.1.2 Placa Controladora Jennic DR1047

Las placas Jennic DR1047, contienen:

- 1 Pantalla LCD (128x64 pixeles).
- 5 Indicadores LED: D1, D2, D3 y D4 programables, POWER de alimentación
- 6 Pulsadores: SW1, SW2, SW3, SW4 programables, RESET para reseteo y PROGRAM para entrar en modo programación
- 1 Sensor de temperatura
- 1 Sensor de humedad
- 1 Sensor de luminosidad
- 1 Memoria EEPROM con bus serial
- 2 Interfaces UART: UART0 y UART1 para comunicación y programación
- 1 Puerto de expansión adicional, de 40 pines

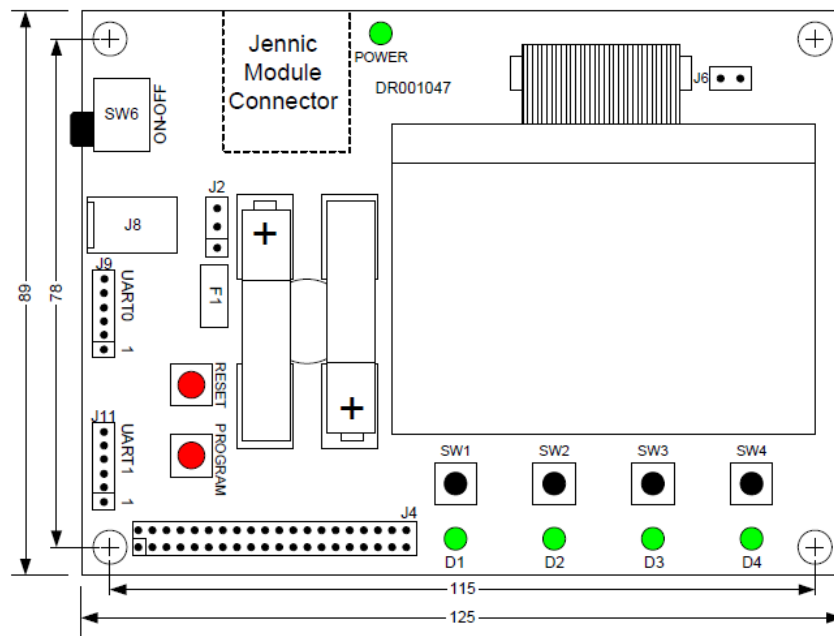


Figura 14: Placa Jennic DR1047

### 3.1.1.3 Consideraciones de Funcionamiento

Las consideraciones que se mencionan en este apartado se aplican para las placas DR1048 y DR1047, es importante tenerlas en cuenta para evitar el dañarlas.

Cualquier módulo puede conectarse fácilmente a las placas, pero antes de conectarlos es necesario asegurarse que no haya una alimentación de energía, ya sea por batería o alimentación externa.

La alimentación puede provenir de baterías o de una alimentación externa. Las placas contienen dos ranuras para baterías de 1.5V AAA y un conector Jack de 2.1 mm (J8 en las figuras de DR1047 y DR1048). El voltaje de la alimentación externa debe ser 5-7V DC y 4.5-6V AC.

En las figuras también se ven los pines denominados J2, utilizando un jumper se debe conectar los pines 1 y 2 si se desea utilizar alimentación por baterías, en caso se use la alimentación externa se deben conectar los pines 2 y 3.

Cuando se usan baterías, las placas cuentan con un fusible que funciona como dispositivo de seguridad en caso de una inserción incorrecta de baterías. Este fusible aparece como F1 en las figuras anteriores.

### 3.1.2 Módulos JN5148-001-Myy

Los módulos presentes en el kit pertenecen a la familia de microcontroladores JN5148-001-Myy, los cuales permiten desarrollar redes inalámbricas personales, de forma rápida, simple y con bajo costo.

Esta familia está compuesta por los módulos:

- JN5148-001-M00 con antena de circuito impreso (PCB) integrada, máxima potencia 2.5 dBm y sensibilidad -95 dBm.
- JN5148-001-M03 con conector Sub Miniatura versión A (SMA), máxima potencia 2.5 dBm y sensibilidad -95 dBm.
- JN5148-001-M04 con conector SMA, amplificador de potencia y LNA, máxima potencia 20 dBm y sensibilidad -98 dBm.

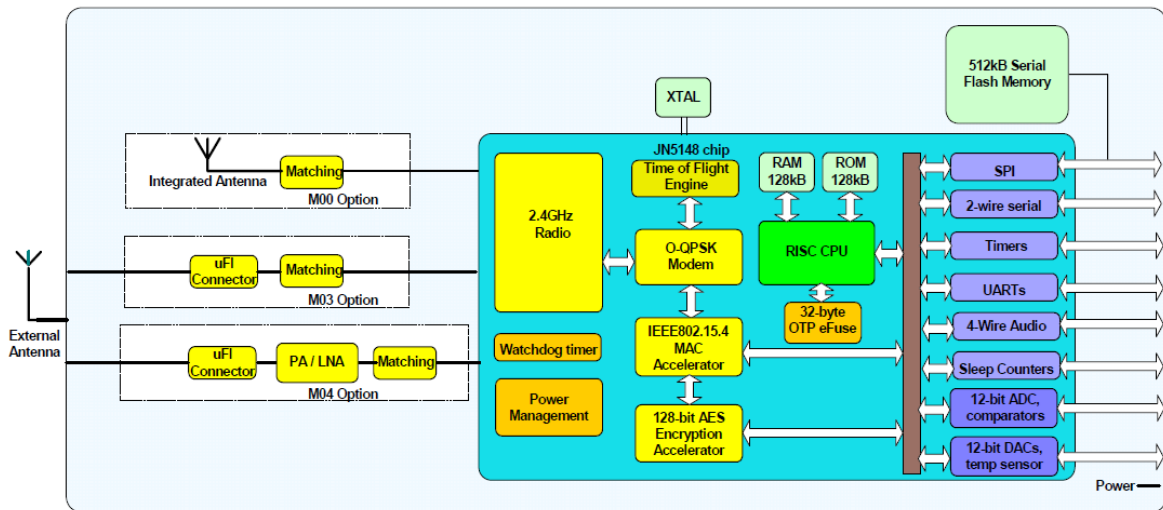


Figura 15: Módulo JN5148-001-Myy

En esta figura vemos un diagrama de bloques de un módulo JN5148-001-Myy

- 1 CPU con arquitectura RISC de 32 bits.
- 128 kB de ROM para almacenar códigos del sistema.
- 128 kB de RAM para almacenar código del programa de arranque y datos del sistema.
- Interfaz de Radio para trabajar en la banda 2.4 GHz IEEE 802.15.4.
- Motor de Tiempo de Vuelo, del cual no se brinda más información en las hojas de datos de los módulos.
- Periféricos
- 1 Puerto de Interfaz de periféricos serial (SPI).
- Interfaz serial síncrona “two-wire” para intercambio de datos entre dispositivos
- 3 Contadores que pueden ser configurados en 5 modos diferentes

- 2 Puertos tipo Receptor-Transmisor Asíncrono Universal (UART) para comunicación y generación de interrupciones
- Interfaz de audio digital “four-wire” para trabajar con CODECs de audio
- 2 Contadores “WakeUp” de 32 bits
- 2 Convertidores Analógico-a-Digital de 12 bits
- 1 Convertidores Digital-a-Analógico de 12 bits
- 2 Comparadores Analógicos
- 1 Sensor de temperatura Interna

Si se desea tener un diagrama de bloques más detallado ver el documento [\[14\]](#).

### 3.2 Kit de Desarrollo de Software

En este apartado se nombra y explica todo el software necesario para desarrollar este proyecto. El Kit de Desarrollo de Software (SDK) está compuesto por un conjunto de herramientas (JN5148 SDK Toolchain) y librerías (JN5148 SDK Libraries), los cuales se instalan por separado. Para más detalles sobre la instalación del SDK, ver documento [\[12\]](#).

El conjunto de herramientas está compuesto por:

- Línea de Comandos Cygwin
- Entorno de Desarrollo Integrado Eclipse (Eclipse IDE)
- Herramientas de Depuración
- Herramientas de compilación JN5148
- Programador de Flash JN5148 (Jennic Flash Programmer)

El conjunto de librerías comprende

- Librerías e Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) para desarrollar aplicaciones en ZigBee PRO (Conjunto de protocolos construidos sobre IEEE 802.15.4, propiedad de ZigBee).
- Librerías y APIs para desarrollar aplicaciones en JenNet (Conjunto de protocolos construidos sobre IEEE 802.15.4, propiedad de Jennic).
- Librerías y APIs para desarrollar aplicaciones en IEEE 802.15.4, el cual permite interactuar con la pila IEEE 802.15.4 (802.15.4 Stack API).
- API que permite controlar, crear y responder a eventos sobre los periféricos integrados de JN5148 (Integrated Peripherals API).
- API para controlar los periféricos de las placas (LPRF Board API) tales como los LEDs, el sensor de temperatura, etc.
- API para administrar las interrupciones según su origen (MLME, MCPS, interrupciones por hardware) y después tratarlas (Application Queue API).

### 3.2.1 Arquitectura de una Aplicación

En la siguiente figura se observa cómo interactúan las librerías con las diferentes capas y hardware.

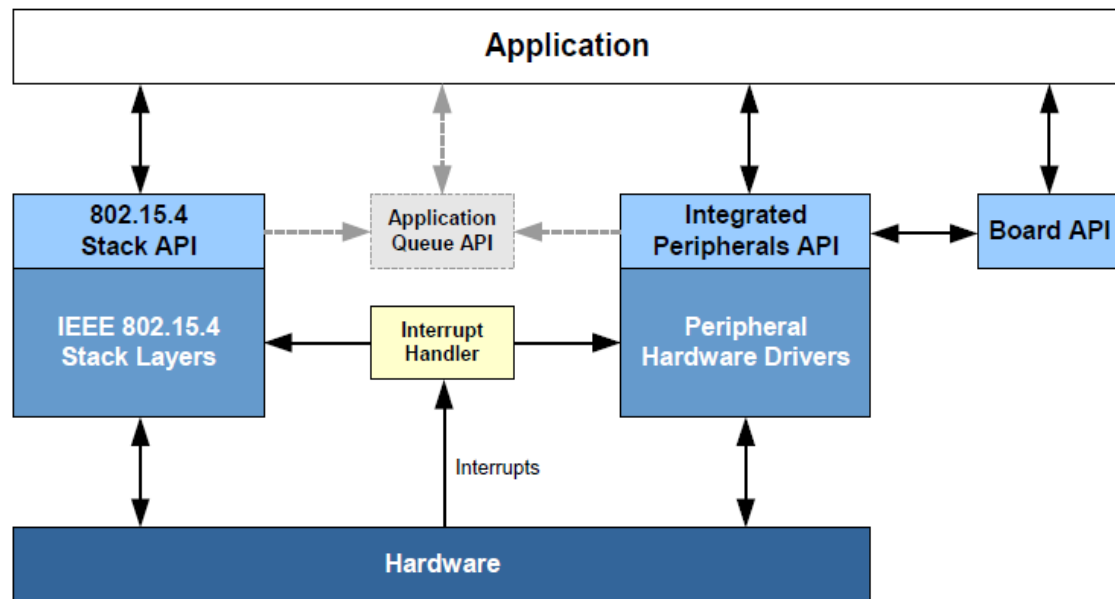


Figura 16: Arquitectura de una Aplicación con el Kit JN5148

En este esquema se observa que la aplicación interactúa con la pila de las capas de la IEEE 802.15.4 mediante la 802.15.4 StackAPI, a su vez la pila de las capas IEEE 802.15.4 se encarga de administrar y controlar el hardware.

La 802.15.4 Stack API presenta el conjunto de funciones y rutinas para interactuar, en forma de transacciones, con las capas MAC y Física de una implementación IEEE 802.15.4 utilizando los módulos JN5148. Es importante conocer el funcionamiento de esta API ya que es básico para la creación y funcionamiento de la red. Para información más detallada del funcionamiento de esta API revisar el [Anexo B.2](#).

Así mismo, la Integrated Peripherals API es utilizada para acceder al hardware a través de los controladores de hardware periférico (Peripheral Hardware Drivers). Para administrar el hardware presente en la placa, se utiliza la Board API, la cual lo hace a través del Integrated Peripherals API.

Finalmente, el hardware puede generar interrupciones relacionadas a la pila de la capa IEEE 802.15.4 o a los periféricos. La Queue API se encarga administrar estas interrupciones para que puedan ser atendidas por la aplicación.

### 3.2.2 Creación de Aplicaciones

Una aplicación 802.15.4 es aquel código compilado que ha sido grabado en un dispositivo para que este se comporte según la configuración del programador. Toda nueva aplicación debe seguir ciertos pasos entrar en funcionamiento. A continuación se mencionan las etapas para la creación y funcionamiento de una red PAN.



Figura 17: Pasos para poner en funcionamiento una red 802.15.4



Para crear el código de las aplicaciones es necesario tener un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) en el cual se pueda desarrollar todo el proyecto. El SDK de Jennic JN5148 brinda dentro del conjunto de Herramientas el Eclipse IDE versión 3.4.2.

Primero se debe crear un proyecto en lenguaje de programación C, en el editor de Eclipse se puede escribir el código de la aplicación. Después construir el fichero binario y grabarlo en los módulos mediante la aplicación Jennic Flash Programmer, disponible en el SDK de Jennic y que se puede integrar a Eclipse como una herramienta externa o se puede iniciar independientemente. Para más detalles ver documento [\[29\]](#).

Jennic brinda Plantillas de Proyectos que son utilizadas como punto de partida. La plantilla que se ha utilizado en este proyecto ha sido diseñada para trabajar con el protocolo IEEE 802.15.4. Se puede descargar del sitio web de Jennic ([www.jennic.com](http://www.jennic.com)).

Esta plantilla brinda el código necesario para poder configurar y modificar los pasos, anteriormente listados, para creación de una aplicación IEEE 802.15.4 de dos nodos, un coordinador y un terminal. Es imprescindible entender todo el código existente en los ficheros C de cada nodo así como los archivos de cabecera .h para poder adaptarlos a las necesidades del proyecto. Además esta plantilla brinda los ficheros tipo “makefile” necesarios para la construcción de los ficheros binarios que serán grabados en los módulos más adelante.

Para cargar un fichero binario en los módulos ver el [Anexo B.1](#).

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA ESTIMACIÓN DE DISTANCIAS ENTRE NODOS

En este capítulo se analiza y propone diferentes aplicaciones para la estimación de distancias utilizando el kit JN5148 de Jennic en una red IEEE802.15.4.

Como se especificó en el capítulo 2, el sistema de localización que se estudia en este proyecto se basa en la medición de distancias utilizando el Tiempo de Propagación o Tiempo de Vuelo de las señales, siendo esta medición la parte más importante para el sistema de localización. Por esta razón, en este apartado se analizan diferentes maneras para obtener los tiempos de propagación. Primero se analiza una aplicación que mida el tiempo de propagación con las librerías disponibles en el SDK, después se analiza el motor de tiempo de vuelo de Jennic, el cual se puede utilizar bajo pedido específico.

### **4.1 Medición de Tiempo de Propagación sin el Motor de Tiempo de Vuelo**

Para medir el tiempo de propagación se diseñó una aplicación que sea capaz de contar el tiempo de vuelo de diferentes formas, utilizando lo disponible en el conjunto de herramientas (JN5148 SDK Toolchain) y librerías (JN5148 SDK Libraries).

El contador que se utiliza es el “TickTimer”, el cual es derivado de un reloj de sistema de 16 MHz y puede ser controlado con funciones pertenecientes al Integrated Peripherals API. Puede programarse para generar una interrupción de software una vez alcanzado un valor de referencia (establecido por el usuario). Es un contador de 32 bits.

Para esta aplicación se establece un valor de referencia equivalente a 0.1 segundos. Cuando se llega a la cantidad de ciclos equivalente a 0.1 segundos, el contador se detendrá y generará una interrupción. En caso contrario el contador se detendrá cuando llegue la trama de respuesta.

$$0.1 s = 1600000 \text{ ciclos} = 0x186A00 \text{ ciclos}$$

Para ver código necesario para la configuración del TickTimer ver el [Anexo C1](#).

#### 4.1.1 Resolución Temporal y Espacial

La frecuencia del reloj que se utiliza es importante para conocer la resolución espacial de la aplicación, se entiende por resolución espacial a la mínima unidad en la que se puede expresar una distancia. En este proyecto está directamente vinculado a la resolución temporal del contador de tiempo.

Se halla la resolución espacial que nos permite el TickTimer de 16 MHz (periodo 62.5 ns)

$$e = (62.5 \text{ ns}) \cdot \left(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 18.75 \text{ m}$$

Si se considera este tiempo como el tiempo de ida y vuelta de una trama entonces la resolución espacial será de 9.375 m.

Cuando se hace una medición de distancia con el TickTimer contando el tiempo vuelo, la cantidad de ciclos de 62.5 ns aumentara en 1 si el nodo que se desea ubicar se mueve más de 9.375 m. La siguiente figura muestra la cantidad de ciclos según la distancia

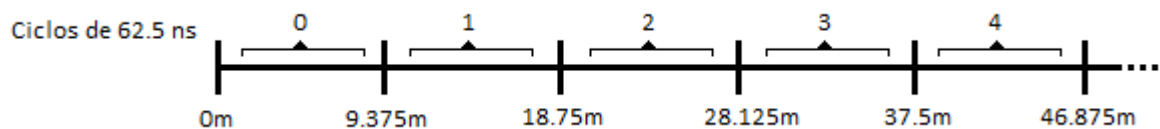


Figura 18: Ciclos de reloj (62.5 ns) según la distancia

Esta resolución espacial no es la más adecuada para una red de localización IEEE 802.15.4 debido a que es muy pobre, aunque en redes más grandes que utilicen los módulos de alta potencia (por lo tanto redes de más alcance) esta puede ser suficiente. Todos estos apuntes se basan en que se cuenta con un kit de sensores ideales, es decir que nunca sufren desincronización en sus relojes, y siempre miden la misma cantidad de ciclos para la misma distancia, en un escenario real se verá que no es así.

Si se realizan varias mediciones para una distancia desconocida y la desviación estándar de todas es grande entonces no se puede determinar con seguridad con que distancia se trabaja. Por ejemplo, una variación de 3 ciclos de reloj en las mediciones

implica una diferencia de 28.125 metros. Es importante determinar un método para hacer estas variaciones lo más pequeña posible.

En las siguientes mediciones, se activa el TickTimer(empieza a contar) en una instrucción antes de ejecutar la instrucción de envío del mensaje, todo esto desde la capa de aplicación. Una medición más exacta se lograría empezando el contador exactamente cuando el transceptor empieza a transmitir el mensaje, pero la 802.15.4 Stack API y la Integrated Peripherals API no permiten establecer esa comunicación entre el transceptor y el contador de tiempo.

#### 4.1.2 Tiempo de Transmisión y Recepción de un mensaje

Primero se desarrolla una aplicación que cuenta el tiempo que se tarda en enviar y recibir un mensaje. Es necesario tener claro todos los tiempos incluidos en este proceso.

Esta aplicación transmite una cantidad de mensajes hacia otro nodo. El nodo origen (nodo 1) cada vez que envía un mensaje, antes de ejecutar la instrucción de transmisión inicia un contador de tiempo. El otro nodo (nodo 2) cuando recibe el mensaje, identifica el mensaje y responde enviando otro mensaje. El nodo 1 recibe e identifica el mensaje del nodo 2 y detiene el contador, en caso se pierdan los mensajes el contador de tiempo tiene un valor límite (valor de referencia), que al ser alcanzado detendrá el contador evitando que se quede contando indefinidamente.

En el siguiente esquema podemos ver todos los tiempos involucrados cuando se hace una medición de tiempo del envío y recepción de una trama.

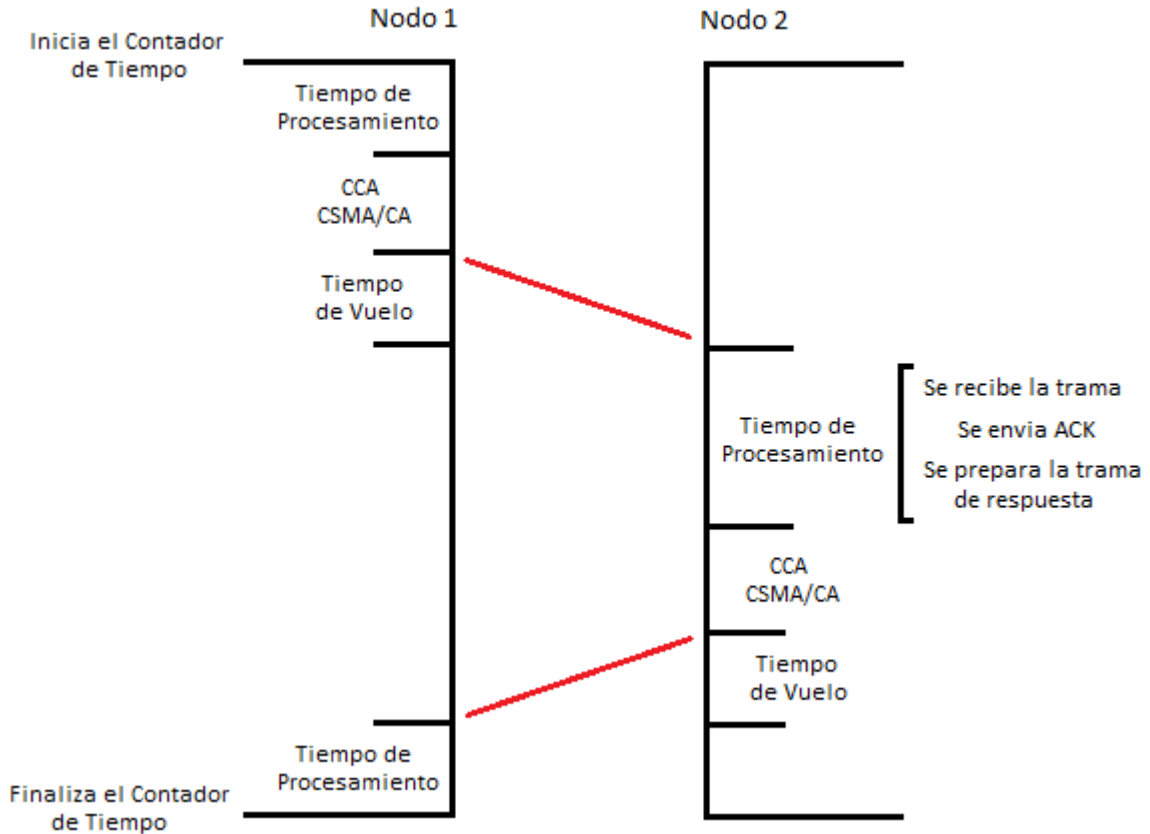


Figura 19: Tiempos en el envío y recepción de una trama

Como el sistema de localización se basa en mediciones de tiempo muy pequeñas, surge la necesidad de identificar aquellos tiempos que son variables, ya que alteran las mediciones.

Todos los tiempos de procesamiento dependen de los módulos, y se asume que este tiempo es similar para todas las tramas.

El tiempo que tarda el CCA y CSMA/CA es el tiempo para acceder al canal y depende del medio. Si hay mucho tráfico en el canal entonces no se podrá enviar la trama en el primer intento y se intentara otra vez hasta que se pueda enviar o se llegue al límite de intentos. Este tiempo depende del tráfico del canal, por lo tanto se considera como variable.

Para tener una lectura de tiempo adecuada se debe excluir los tiempos variables, es decir el tiempo que se tarda en acceder al canal (CSMA/CA). No se puede evitar que se haga la escucha del canal CCA antes de enviar una trama pero si se puede enviar

la trama independientemente del resultado del CCA, aunque se corre el riesgo de perder tramas.

Para calcular el tiempo de procesamiento en las mediciones, se debe realizar mediciones a distancia cero, donde el valor del tiempo de vuelo será nulo.

También se desactiva el mecanismo del mensaje de confirmación (ACK) para evitar introducir tiempo de procesamiento innecesario.

Se crea una aplicación para realizar medidas de este tiempo de vuelo. Para la construcción del código se utilizara la plantilla de proyecto de Jennic que trabaja con el protocolo IEEE 802.14.5. Para ver detalles del código ver [Anexo C2](#).

#### 4.1.3 Tiempo de arribo del mensaje ACK

Es necesario hacer las mediciones de diferentes maneras para obtener una mayor cantidad de datos y elegir el mejor método para obtener los tiempos de vuelo. Por esta razón, se crea el proyecto para obtener el tiempo de vuelo de un mensaje y su mensaje de acuse de recibo ACK.

La aplicación transmite una cantidad de mensajes hacia otro nodo. El nodo origen (nodo 1) cada vez que envía un mensaje, antes de ejecutar la instrucción de transmisión inicia un contador de tiempo. El otro nodo (nodo 2) cuando recibe el mensaje se encarga enviar el mensaje de confirmación (ACK) inmediatamente. El nodo 1 recibe el mensaje ACK y detiene el contador. Si se pierden mensajes el contador de tiempo tiene un valor límite (valor de referencia), que al ser alcanzado detendrá el contador evitando que se quede contando indefinidamente.

En el siguiente esquema se ven todos los tiempos que se deben considerar cuando se hace una medición del tiempo de arribo del mensaje ACK.

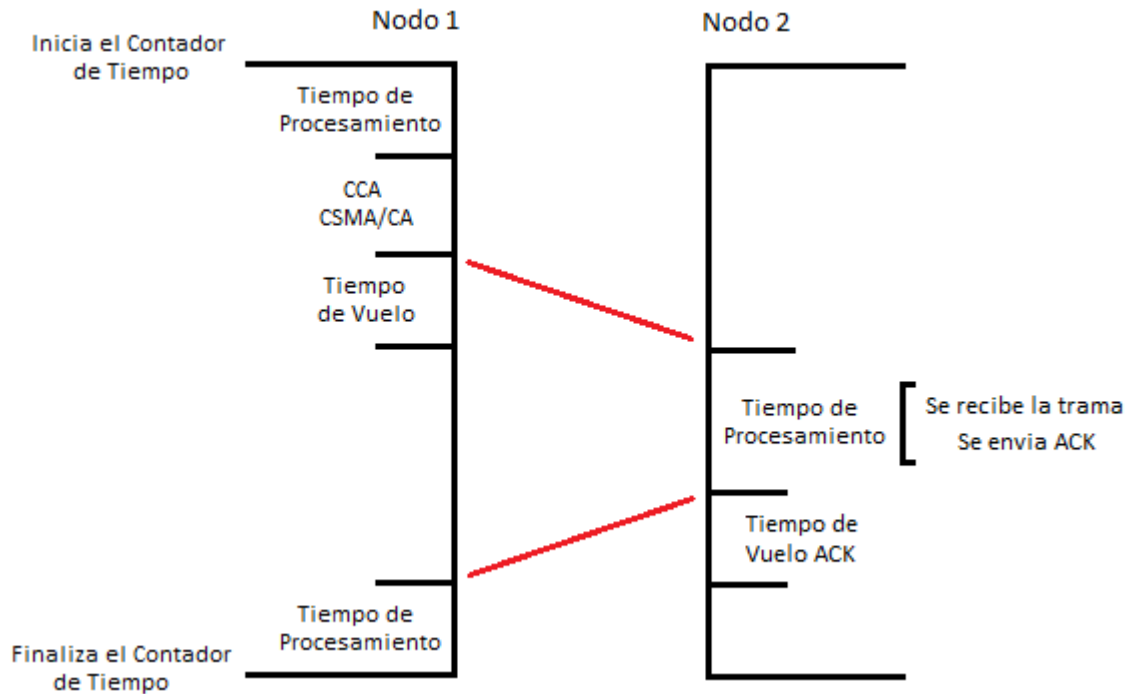


Figura 20: Tiempos en el arribo de un mensaje ACK

Es necesario entender los tiempos implicados, los cuales son casi los mismos que los antes explicados salvo unas pequeñas diferencias.

Los tiempos de procesamiento se consideran similares en todas las mediciones.

El tiempo que tarda el CCA y CSMA/CA es el tiempo para acceder al canal, y depende del medio, lo cual no se puede controlar. En esta aplicación también se deshabilita su uso.

Se considera que el tiempo de vuelo del mensaje y de su ACK es el mismo, ya que la distancia no varía entre la transmisión del mensaje y la recepción del ACK.

En estas mediciones se utiliza el mensaje de acuse de recibo (ACK), a pesar de que un mensaje ACK no pueda llegar por diferentes razones y obligue a la retransmisión del mensaje original. Si existen retransmisiones, el tiempo de la medición aumentará y se descarta esa medición porque sería mayor a los valores que se suelen obtener.

Además se desarrolló esta aplicación para intentar emular el mecanismo de tiempo de vuelo de Jennic, el cual hace mediciones de tiempo del mensaje ACK, pero cuenta con



la ventaja de interactuar directamente con el transceptor de radio entre otras cosas. Más adelante se explicara con más detalle el mecanismo de Jennic.

Para desarrollar estas mediciones se utiliza el proyecto anterior con algunas funciones adicionales, para más detalles ver [Anexo C.3](#).

## 4.2 Motor de Tiempo de Vuelo

Jenic ha implementado un mecanismo de medición de tiempo de vuelo en los módulos del kit JN5148, le ha denominado Motor de Tiempo de Vuelo (Time-of-Flight Engine) y se utiliza para la estimación de distancias.

### 4.2.1 Esquema de medición

La medición del Tiempo de Retardo de Propagación o Tiempo de Vuelo se realiza enviando un mensaje entre nodos y midiendo el tiempo que tarda en llegar el mensaje de confirmación.

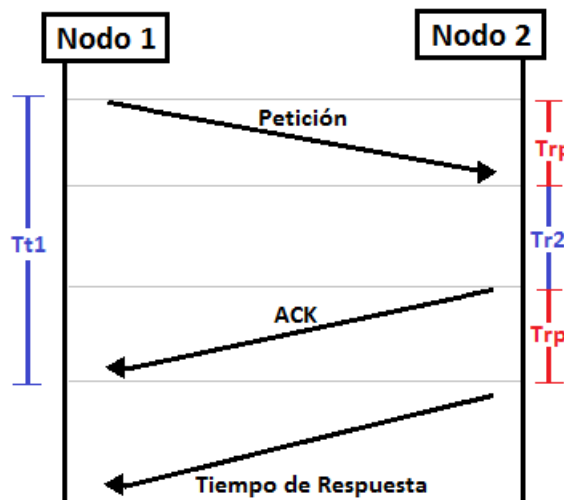


Figura 21: Esquema de medición utilizando el motor de tiempo de vuelo de Jennic

El nodo 1 inicia el proceso enviando el mensaje de petición de TOF (Time of Flight). La capa física debe iniciar un contador en el instante que empieza a enviar el mensaje, este tiempo es el Tiempo Total 1 ( $Tt1$ ).

Después del Tiempo de Retardo de Propagación ( $Trp$ ), el nodo 2 recibe la petición e inmediatamente inicia otro contador para medir el Tiempo de Respuesta 2 ( $Tr2$ ), y prepara el mensaje de confirmación (ACK). En el instante que envía el mensaje ACK detiene el contador del  $Tr2$  y lo almacena.

Después del Tiempo de Retardo de Propagación, el nodo 1 recibe el mensaje ACK y detiene el contador de  $Tt1$ .

Finalmente el nodo 2, envía al nodo 1 el tiempo  $Tr2$  en un mensaje. Con este dato el nodo 1 es capaz de calcular el Tiempo de Retardo de Propagación a partir del Tiempo Total 1 y el Tiempo de Respuesta 2.

$$Tt1 = Trp + Tr2 + Trp$$
$$Trp = \frac{(Tt1 - Tr2)}{2} = \text{Tiempo de Vuelo}$$

Cuando se realizan varias mediciones con una misma instrucción, primero se envían y reciben todos los mensajes de petición y los mensajes ACK. Al final el mensaje que contiene los tiempos de respuesta de cada medición es enviado al nodo origen para que este se encargue de hacer el cálculo de los tiempos de vuelo con el tiempo total de cada medición. Un mensaje solo puede contener hasta 11 tiempos de respuesta, si se realizan más mediciones, se necesitaran mensajes extras.

Las medidas pueden verse afectada por el “offset” que existe entre los relojes de los contadores en cada nodo. Para minimizar su impacto es posible realizar la medición de tiempo de vuelo en ambos sentidos, el mejor resultado se obtiene promediando los resultados obtenidos en los dos sentidos.

A diferencia de la aplicación que se realizó anteriormente, el motor de tiempo de vuelo si utiliza el mecanismo CSMA/CA, esto no representa un problema para las mediciones dado que el contador de tiempo se inicia después de los periodos back-off y por lo tanto este tiempo aleatorio no es incluido. Las retransmisiones son descartadas en este proceso.

#### 4.2.2 Licencia

Las funciones que permiten el uso del motor de tiempo de vuelo se encuentran en el Time of Flight API, el cual no está disponible en el SDK JN5148 que se descarga del sitio web de Jennic. Para acceder a estas funciones se debe seguir los siguientes pasos

- **Pre-Venta:** Se puede solicitar una introducción a este mecanismo mediante el sitio web de Jennic.
- **Evaluación:** Se accede a este paquete mediante la aprobación de una hoja de requerimientos. Se incluye la documentación del TOF API y unos archivos binarios de demostración.
- **Desarrollo:** Se accede a esta fase mediante un acuerdo de uso de licencia del motor de tiempo de vuelo. En este paquete se incluye las librerías del TOF API para desarrollar aplicaciones.

Una vez que se cuenta con las librerías del ToF API, la implementación de una aplicación que sea capaz de medir las distancias es más sencilla. No se utiliza el mismo proyecto anterior ya que el proyecto anterior no hace uso del mecanismo CSMA/CA, y el motor de tiempo de vuelo si lo utiliza, para no entrar en conflictos en la iniciación de la red se utiliza otro proyecto.

#### 4.2.3 Time of Flight API

Una medición con esta API brinda más datos aparte del tiempo de vuelo. Se brinda la siguiente información:

- Tiempo de Vuelo
- Valor RSSI en el nodo local
- Valor SQI en el nodo local
- Valor RSSI en el nodo remoto

- Valor SQI en el nodo remoto
- Estampa de Tiempo en que se realizó la medición (con un reloj de 16 MHz)
- Estatus de la medición
- El valor SQI (SignalQualityIndication) se utiliza para valorar la calidad de correlación de la señal.

#### 4.2.4 Patente de Jennic: Método y Aparatos para Determinar el Retardo de Propagación

Número de Solicitud de Patente: US 2010/0081389, Documento [\[7\]](#).

Jenic ha trabajado en una patente para medir el retardo de propagación y así obtener el tiempo de vuelo de una señal entre nodos. Su invento se centra principalmente en el dispositivo físico capaz de medir el error que existe entre la llegada de la señal y su detección por parte del sensor. A continuación se explica el mecanismo presentado en su patente.

Primero se recuerda el esquema de medición (Ver Figura 23)

Tt1: Tiempo total medido en el nodo 1

Trp: Tiempo de retardo de propagación

Tr2: Tiempo de respuesta para el mensaje ACK del nodo 2

$$Trp = \frac{(Tt1 - Tr2)}{2} = \text{Tiempo de Vuelo}$$

##### 4.2.4.1 Error en la Frecuencia de los Relojes

Los cristales que se utilizan en los relojes no son ideales, es decir contienen un cierto error en relación a su frecuencia ideal, este error es distinto en todos los relojes. Se

denomina  $Ef1$  al error en la frecuencia del cristal reloj del nodo 1 y  $Ef2$  al error en el cristal del nodo 2, ambos son fracciones de la frecuencia de reloj ideal.

El tiempo de retardo de propagación medido en el nodo 1 se ve alterado de la siguiente manera

$$Trp1 = \frac{(Tt1 + (Tt1.Ef1) - Tr2 - (Tr2.Ef2))}{2}$$

$$Trp1 = \frac{Tt1 - Tr2}{2} + \frac{(Tt1.Ef1) - (Tr2.Ef2)}{2}$$

Se define el Error en el Tiempo de Propagación medido en el nodo 1 como

$$Erp1 = \frac{(Tt1.Ef1) - (Tr2.Ef2)}{2}$$

Considerando  $Tt1 = 2Trp + Tr2$ , se vuelve a escribir el error en el nodo 1

$$Erp1 = Trp.Ef1 + \frac{Tr2(Ef1 - Ef2)}{2}$$

De la misma forma se define el Error en el Tiempo de Propagación medido por el nodo 2

$$Erp2 = Trp.Ef2 + \frac{Tr1(Ef2 - Ef1)}{2}$$

Una forma de minimizar los errores producidos por los cristales es realizando una medición del retardo de propagación en ambos sentidos, es decir primero del nodo 1 al nodo 2 y viceversa, finalmente juntar la información en un nodo y obtener la media de los retardos de propagación medidos.

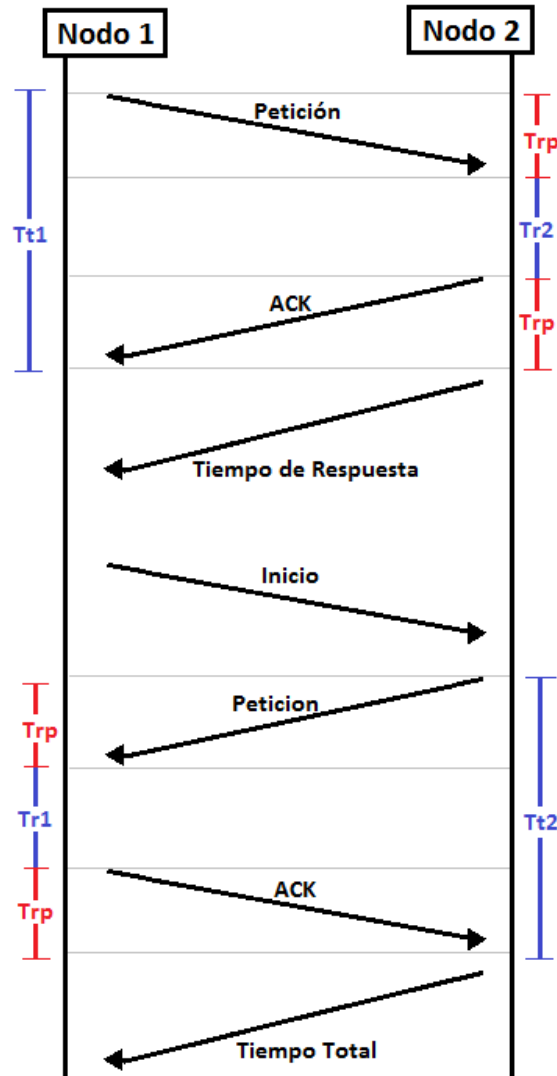


Figura 22: Esquema de medición en ambos sentidos

Este esquema representa como se realiza una medición en ambos sentidos. Primero se realiza la medición del retardo de propagación por parte del nodo 1, cuando este termina y recibe el Tiempo de Respuesta del nodo 2 ( $Tr2$ ) se da inicio a la medición en sentido opuesto. El nodo 1 envía un mensaje de Inicio al nodo 2 para indicarle que debe empezar el proceso de medición del retardo de propagación. Finalmente el Nodo 2 envía el Tiempo Total2 en un mensaje al nodo 1, este puede promediar el retardo de propagación medido en los dos sentidos.

Si se promedia los retardos de propagación entonces los errores también

$$Erp = \frac{Trp \cdot Ef1 + \frac{Tr2(Ef1-Ef2)}{2} + Trp \cdot Ef2 + \frac{Tr1(Ef2-Ef1)}{2}}{2}$$

$$Erp = \frac{Trp(Ef1 + Ef2)}{2} + \frac{(Ef1 - Ef2)(Tr2 - Tr1)}{4}$$

En el error existente en el nodo 1, la mayor contribución la realiza el segundo término de la suma, ya que el valor más grande viene a ser Tr2

$$Erp1 = Trp \cdot Ef1 + \frac{Tr2(Ef1 - Ef2)}{2}$$

Pero en el error promediado de los dos nodos, la contribución al error que suman los valores Tr2 y Tr1 se anulan ya que se estos valores se consideran muy similares.

$$Erp = \frac{Trp(Ef1 + Ef2)}{2} + \frac{(Ef1 - Ef2)(Tr2 - Tr1)}{4}$$

#### 4.2.3.2 Error de Detección

Existe un lapso de tiempo entre la llegada de la señal a la antena y su detección por parte del nodo, se llamara a este lapso Delta. Este error de tiempo se debe a que un nodo solo puede detectar la llegada de la señal en un flanco de subida y/o de bajada.

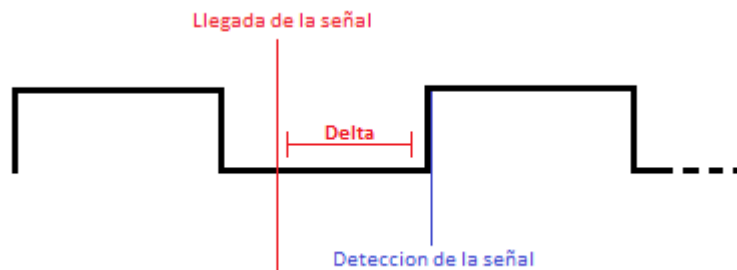


Figura 23: Error de detección (Delta)

Dejar de lado este error de tiempo (delta) puede impactar negativamente en la resolución espacial del sistema. Por ejemplo, con un reloj de 16MHz solo se puede



detectar la señal cada 62,5 ns, lo cual permite una resolución espacial de 9,375m, pero se si se conoce el valor Delta se puede saber el momento exacto en que llego la señal y así mejorar la resolución espacial.

Se hace necesario tener un mecanismo para determinar el valor delta. La patente de Jennic consiste en el invento para calcular este error de tiempo.

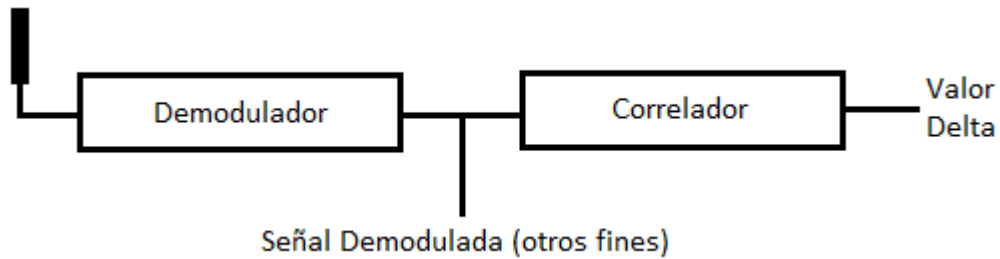


Figura 24: Aparato Receptor de un módulo

Cada módulo cuenta con los bloques de la imagen, tienen una antena receptora y un bloque receptor que se encarga de de-modular la señal, además cuenta con un correlador calcula el valor Delta a partir de la señal demodulada. Cuando se transmite una señal, se pasa la información de bits a símbolos (4 bits por símbolo), después de símbolo a chip (16 secuencias únicas de 32 chips) y finalmente se modula usando O-QPSK.

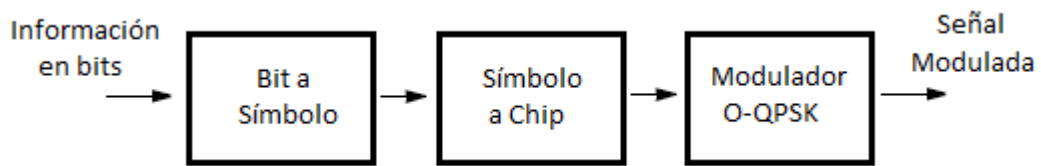


Figura 25: Proceso para la transmisión de datos

A continuación se explicara con más detalle cómo funciona el correlador

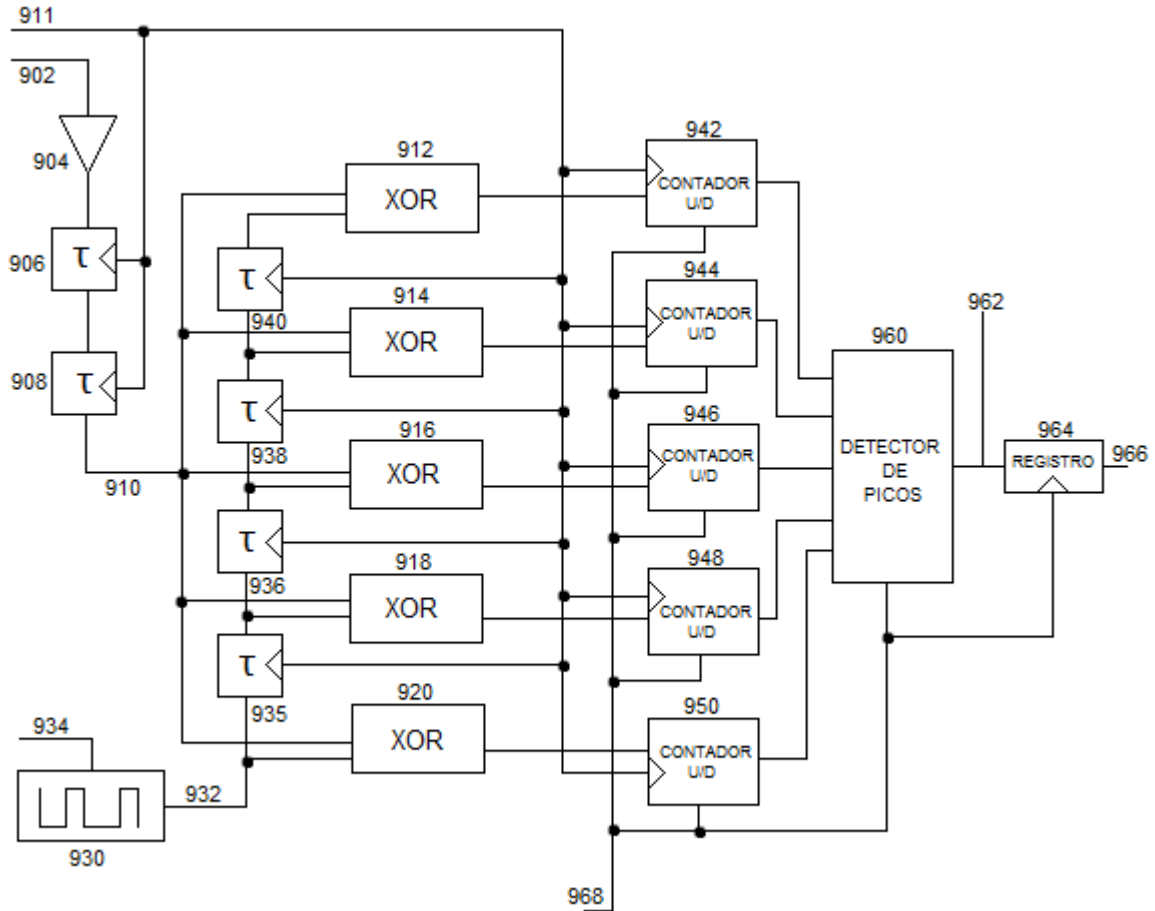


Figura 26: Correlador presentado en el documento de patente de Jennic

La entrada 902 es la señal demodulada previamente, contiene los bits de información representados por símbolos, cada 4 bits son representados por una secuencia pseudo-aleatoria de 32 chips.

La señal 902 pasa por el buffer 904 y después por dos bloques de retardo  $\tau$  (este retardo es una fracción de una señal del reloj 911). La salida de los bloques de retraso es la señal 910, entrada para el conjunto de dispositivos XOR 912, 914, 916, 918 y 920.

En la parte inferior se puede observar el generador de secuencias de chip 930, su función es generar la misma secuencia de chips de la señal 910, utilizando la información que brinda la entrada 934. En el aparato receptor se puede incluir otro correlador que se encargue de detectar el inicio de campo SFD (start of frame

delimiter) de la señal recibida, y a partir de ahí detectar la secuencia utilizada y su fase aproximada, esta información se transmite al correlador mediante la entrada 934.

La señal 910 y 932 son las entradas para el bloque XOR 920, la señal 910 y 932 retrasada  $\tau$  son entradas para el XOR 918, la señal 910 y 932 retrasada  $2\tau$  son entradas para el XOR 916, la señal 910 y 932 retrasada  $3\tau$  son entradas para el XOR 914, la señal 910 y 932 retrasada  $4\tau$  son entradas para el XOR 912. Los bloques de retraso son controlados por la señal de reloj 911.

Las unidades XOR tienen como salida 1 si sus entradas no coinciden y 0 cuando las entradas coinciden. Cada salida de las unidades XOR se dirige a un Contador Up/Down (942, 944, 946, 948 y 950), estos incrementan su salida cuando la entrada es 1, o la decrece si es 0. Son reseteados por la señal 968 y controlados por la señal de reloj 911.

Con la salida de los contadores Up/Down se puede saber cuántas coincidencias han habido para cada bloque de retraso (la salida más baja de los contadores es donde hubo una mayor cantidad de coincidencias en los XOR). El Detector de Picos 960 se encarga de ajustar la curva de coincidencias y calcular el valor donde ocurre el mínimo. La diferencia de fases entre la señal 932 y la señal 902 puede no ser un valor entero múltiplo de  $\tau$ , el máximo número de coincidencias ocurre en un retardo  $X\tau$ , el cual es igual al valor Delta que desea encontrar.

#### 4.2.5 ToF API Demo

Para utilizar la ToF API, se tiene que solicitar la licencia de Jennic. En este proyecto las primeras mediciones se realizaron con la aplicación demostración que se obtiene en el paquete de evaluación.

La aplicación de demostración está compuesta por dos ficheros binarios, uno para el nodo local y otro para el nodo remoto.

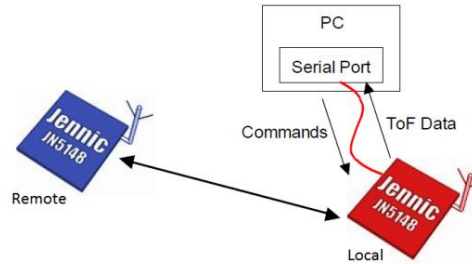


Figura 27: Esquema de conexión del ToF API Demo

Tiempo de vuelo:  $ToF = (T_t - T_r) / 2$

Una medición de la aplicación contiene el tiempo de vuelo de 10 tramas (sub-mediciones) y para cada una brinda los siguientes datos

<b>Dirección</b>	De local a remoto(F) o de remoto a local(R)
<b>ToF (ps)</b>	$ToF = (T_t - T_r) / 2$
<b>Lcl RSSI(dB)</b>	Nivel de Potencia Recibida en el nodo local. Valor mínimo aprox. 20 dB (valor de ruido), valor máximo 108 dB. Estos valores solo son válidos en los módulos estándar, en los módulos de alta potencia se debe tener otra conversión a los valores RSSI.
<b>Lcl LQI</b>	Indicador de calidad de enlace en el nodo local $LQI = (RSSI - 20) \times 3$ ; $0 < LQI < 255$
<b>Rmt RSSI(dB)</b>	Nivel de Potencia Recibida en el nodo remoto
<b>Rmt LQI</b>	Indicador de calidad de enlace en el nodo remoto
<b>Timestamp</b>	Estampa de tiempo en el nodo que inicia la medición
<b>Status</b>	Es el número resultante de un mapa de 5 bits. Bit 0: Lectura exitosa Bit 1: Tiempo invalido en el nodo remoto

	Bit 2: Tiempo invalido en el nodo local Bit 3: No se recibió ACK Bit 4: No se recibió el Ttat
--	---

Tabla 3 : Datos de un submedición

Al final de cada medición se presenta un resultado promediado de las 10 sub-mediciones

<b>Media ToF (ps)</b>	Media de los ToF de la sub-mediciones validas
<b>Desviación Estándar (ps)</b>	Desviación estándar de las sub-mediciones validas
<b>Errores</b>	Cantidad de sub-mediciones erróneas
<b>Distancia ToF (cm)</b>	Distancia según el tiempo de vuelo $Distancia = c * ToF$ $c = 0.0003$ (velocidad de la luz)
<b>Distancia RSSI (cm)</b>	Distancia según atenuación $Distancia = 0.02 \times 10^{\left(\frac{108 - RSSI}{20}\right)}$ Este modelo solo es válido para los módulos estándar.

Tabla 4 : Datos de una medición

Si se utilizan módulos de alta potencia (con amplificadores), su uso se habilitará automáticamente pero los valores de RSSI y LQI serán erróneos. La estimación de RSSI debe variar, para tener un nuevo modelo de cálculo de RSSI se debe poder acceder al valor de potencia recibida.

Los resultados de las mediciones se pueden mostrar mediante una comunicación serial con el nodo local y almacenar en un fichero de texto (txt). Se ha creado una aplicación en Delphi para poder procesar los resultados y presentarlos en Ms Excel.

Esta aplicación permite:

- Modificar el archivo de texto para que se pueda exportar a Ms Excel.
- Hacer un filtrado, en el cual se elige una cantidad de mediciones(R o F) con un límite de errores máximo y eliminando valores extremos en las sub-mediciones de cada medición para mostrar los resultados en MS Excel.
- Para detalles sobre el funcionamiento de esta aplicación ver [Anexo D.1.](#)



## CAPÍTULO 5: MEDICIONES PARA LA ESTIMACIÓN DE DISTANCIA

En este capítulo se presentan las mediciones hechas en diferentes condiciones y métodos, con y sin el motor de tiempo de vuelo de Jennic.

Se han hecho medidas del tiempo de vuelo en interiores, exteriores y con diferentes tipos de módulos para obtener las mejores condiciones. Se ha realizado un análisis y procesado para obtener los mejores resultados en cada tipo de medición y para obtener valores de referencia con cada método. Adicionalmente se hace una comparación entre estimar la distancia utilizando el tiempo de vuelo y atenuación de la señal.

El resultado de las mediciones se tomara en cuenta para implementar el sistema de localización en el siguiente capítulo.

En este capítulo se utilizó la aplicación Comunicación 1.0 (en Delphi) para realizar las mediciones con la aplicación que no utiliza el motor de tiempo de vuelo de Jennic. Para las mediciones con el motor de tiempo de vuelo se utilizó el Hyperterminal de Microsoft Windows con el ToF API Demo y para procesar sus resultados se usó la aplicación explicada en el capítulo anterior. En el momento de realizar estas mediciones sólo se contaba con la aplicación de demostración del tiempo de vuelo, dependiendo de los resultados se solicitara el paquete de desarrollo.

### **5.1 Comunicación 1.0**

Se ha creado una aplicación en Delphi que puede comunicarse con las placas. Esta interacción es necesaria para ordenar qué tipo de medición se desee hacer y para leer los resultados desde una PC.

La aplicación emula el Hyperterminal de Windows y envía caracteres por el puerto de comunicación asignado (para indicar el tipo de medición). Se presentan los resultados medidos en una lista, para luego ser copiados al portapapeles.

Las mediciones con el motor de tiempo de vuelo solamente se pueden realizar si se cuenta con las librerías parte del paquete de desarrollo. En este capítulo no se utiliza



esta función, sino que se trabaja con el ToF Demo y el Hyperterminal de Windows para leer los resultados.

Para ver más detalles del funcionamiento de Comunicación 1.0 ver [Anexo D.2](#).

## 5.2 Mediciones sin el Motor de Tiempo de Vuelo

### 5.2.1 Mediciones 1

Las primeras mediciones se realizaron en el interior del laboratorio, se desea encontrar el método de medición que dé mejores resultados. Se realizaron en las siguientes condiciones:

Los nodos se encuentran a una altura aproximadamente de 80 cm.

Para simplificar, se denomina “TXRX” a las mediciones del tiempo de transmisión y recepción de mensajes y “ACK” a las mediciones del tiempo de arribo del mensaje ACK.

#### 5.2.1.1 Tipo de Modulo

Primero se hicieron las mediciones para determinar que con qué tipo de módulos se obtiene mejores resultados. Se compararon los módulos con antena de circuito impreso integrada (PCB) y los módulos con conector SMA para la antena.

En interiores a 0 metros se obtuvieron las siguientes tasas de error

Antena PCB	Conector SMA
5.6 %	5.4 %

Tabla 5 : Error según Antena

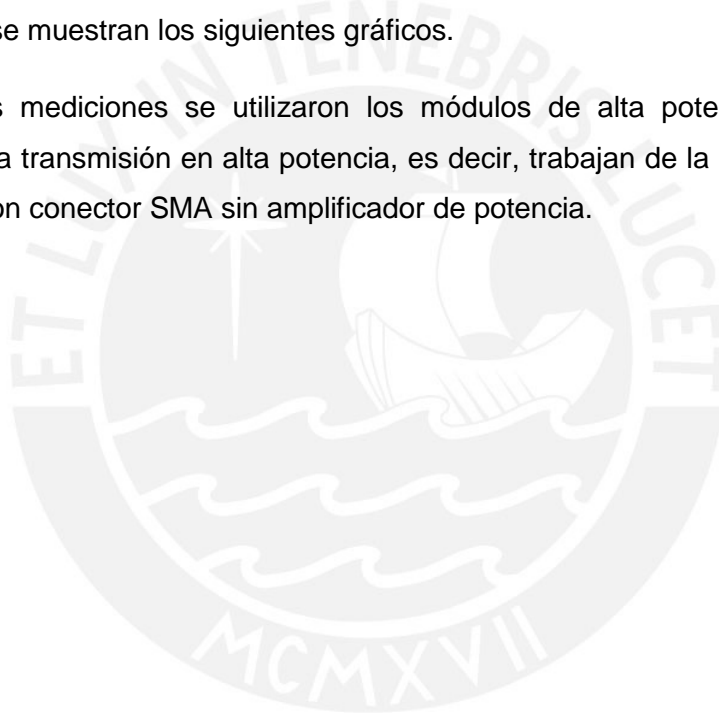
La diferencia no es muy grande, resulta casi igual utilizar cualquier modulo. Al aumentar las distancias y hacer las mediciones en exteriores con interferencias de un escenario real es mejor utilizar los módulos con conector SMA porque brindan una menor tasa de error.

### 5.2.1.2 Distancia 0 metros

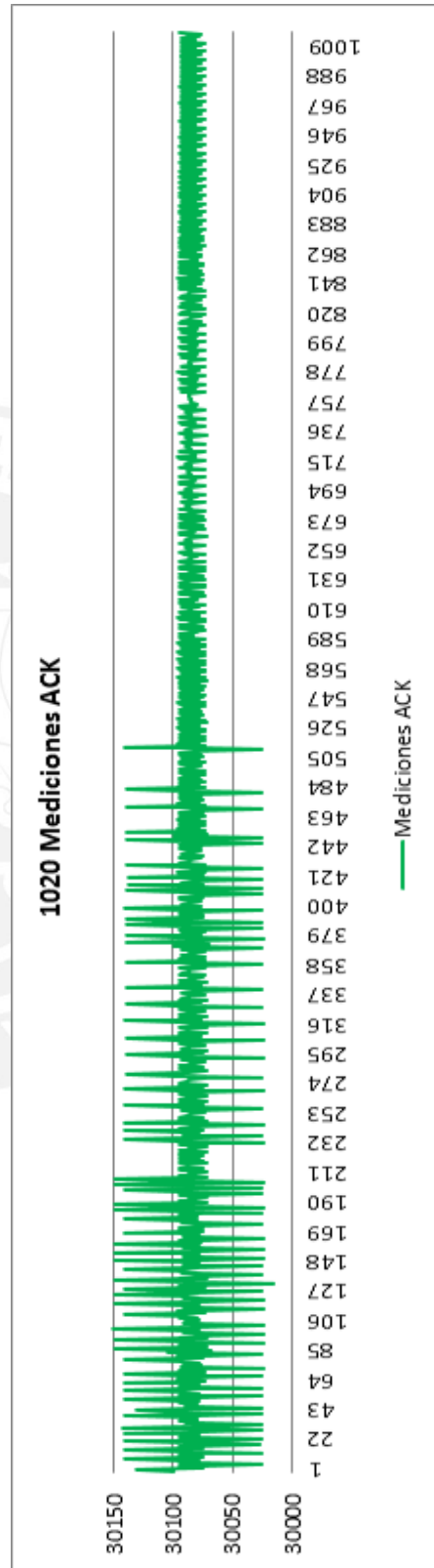
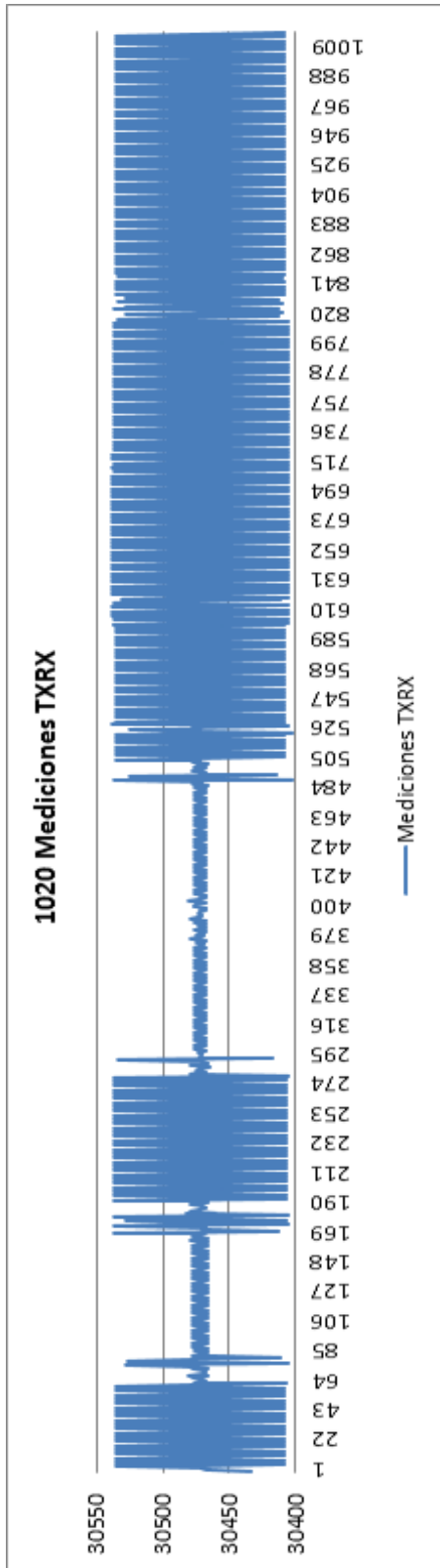
La distancia entre nodos es cero metros, con el fin de eliminar cualquier tiempo de vuelo y solo medir el tiempo de procesamiento. Después, en mediciones a mayores distancias (tiempo de vuelo diferente de cero), se restara el tiempo de procesamiento para obtener sólo el tiempo de vuelo.

Se han realizado 1020 mediciones de cada tipo (TXRX y ACK). El objetivo de estas mediciones obtener un número de ciclos de reloj que represente el tiempo de procesamiento. Antes de analizar las medidas es necesario tener una perspectiva de todos los valores medidos, para ver cuántas variaciones de ciclos (62.5 ns) existen. Para esto se muestran los siguientes gráficos.

Para estas mediciones se utilizaron los módulos de alta potencia pero no se ha habilitado la transmisión en alta potencia, es decir, trabajan de la misma forma que los módulos con conector SMA sin amplificador de potencia.



1020 mediciones



Para ver los valores de estas mediciones ver el Fichero Excel Adjunto, Hoja “1020 TXRX ACK”.

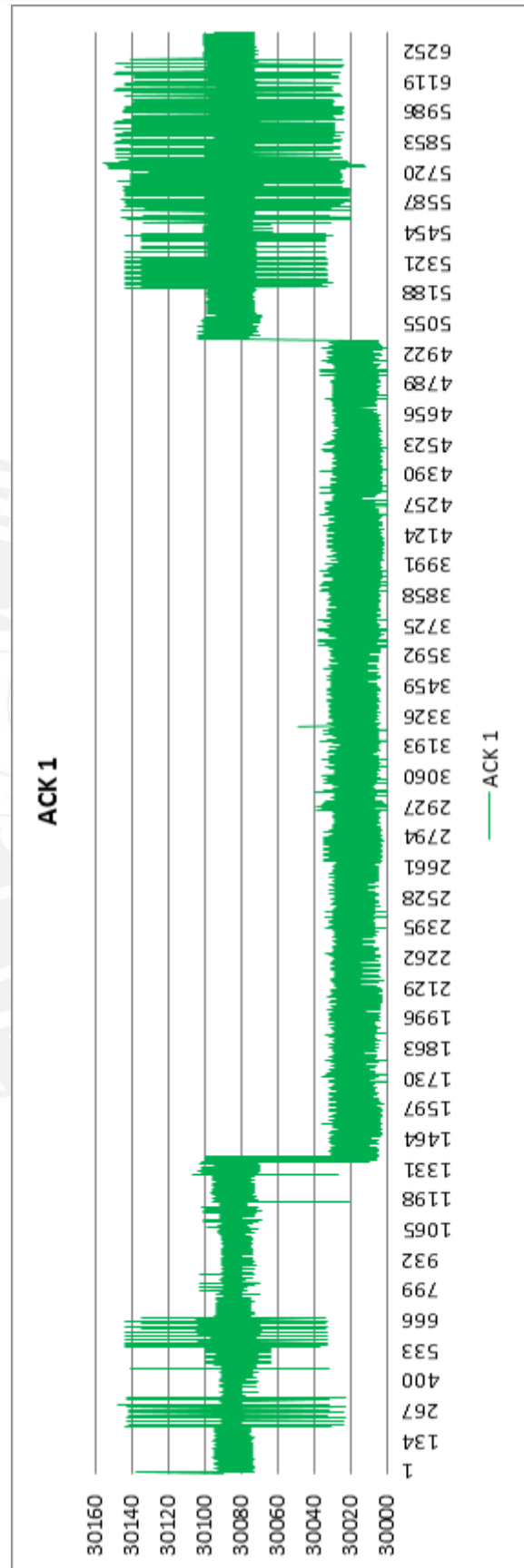
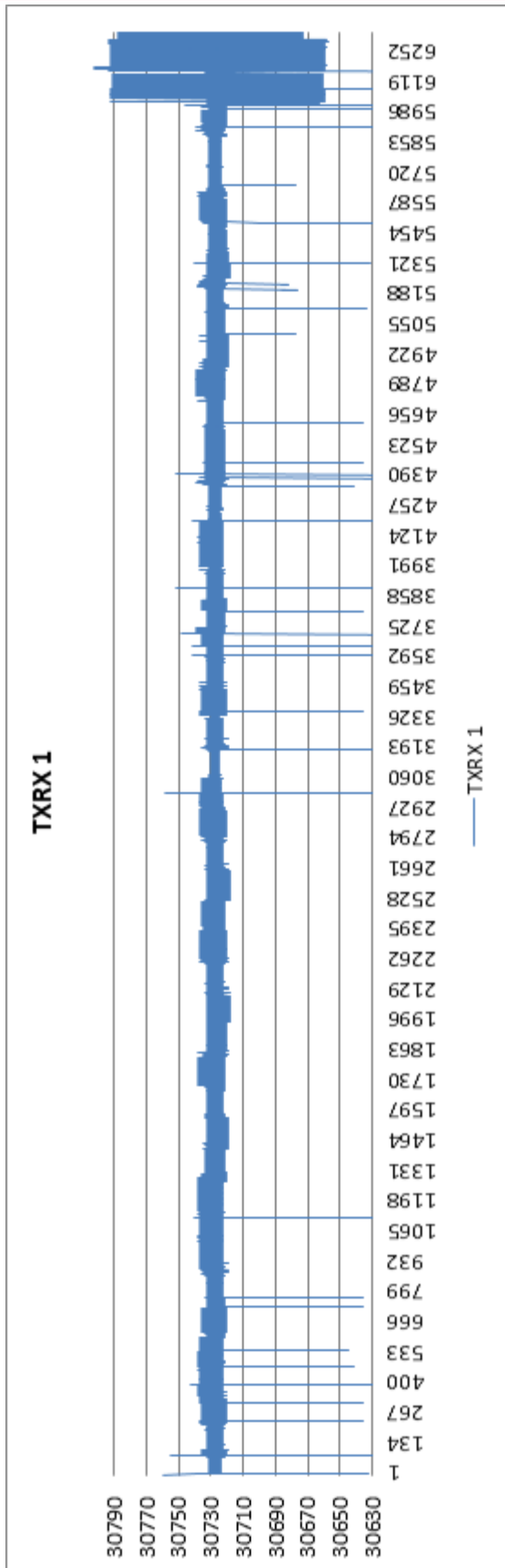
Es importante tener un valor constante. Considerando que un ciclo de reloj equivale a un error de distancia de 9.375 m, si las variaciones para una misma distancia son varios ciclos entonces el error en distancia será muy grande, no se lograra la exactitud necesaria para un sistema de localización.

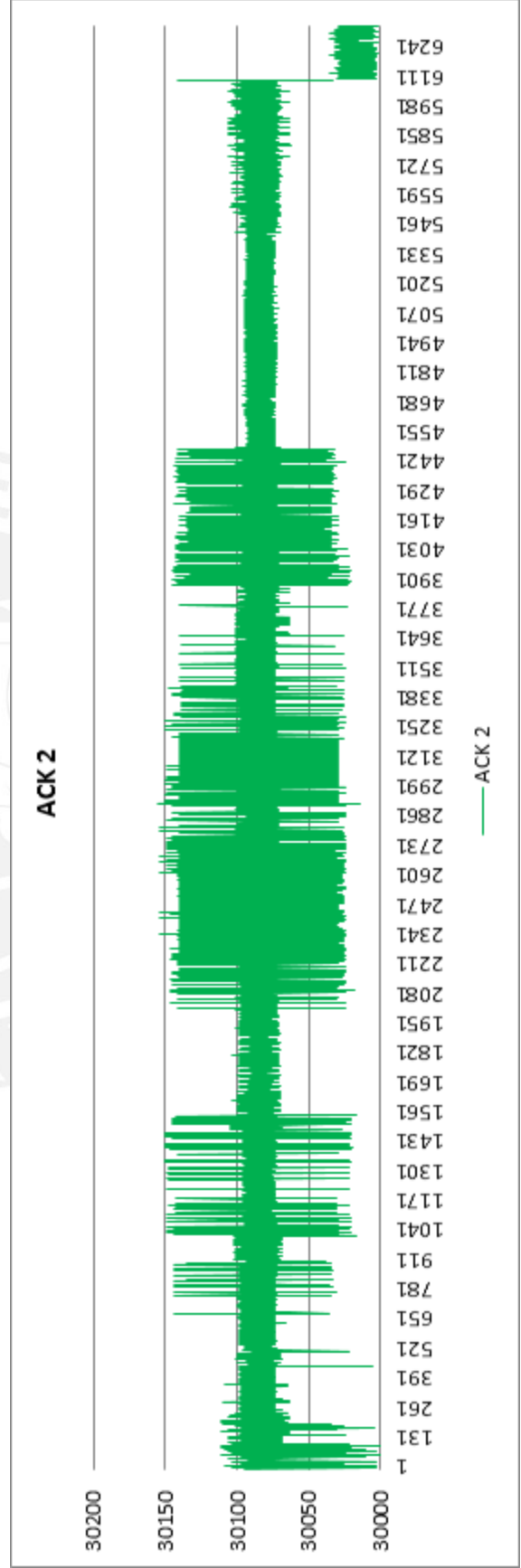
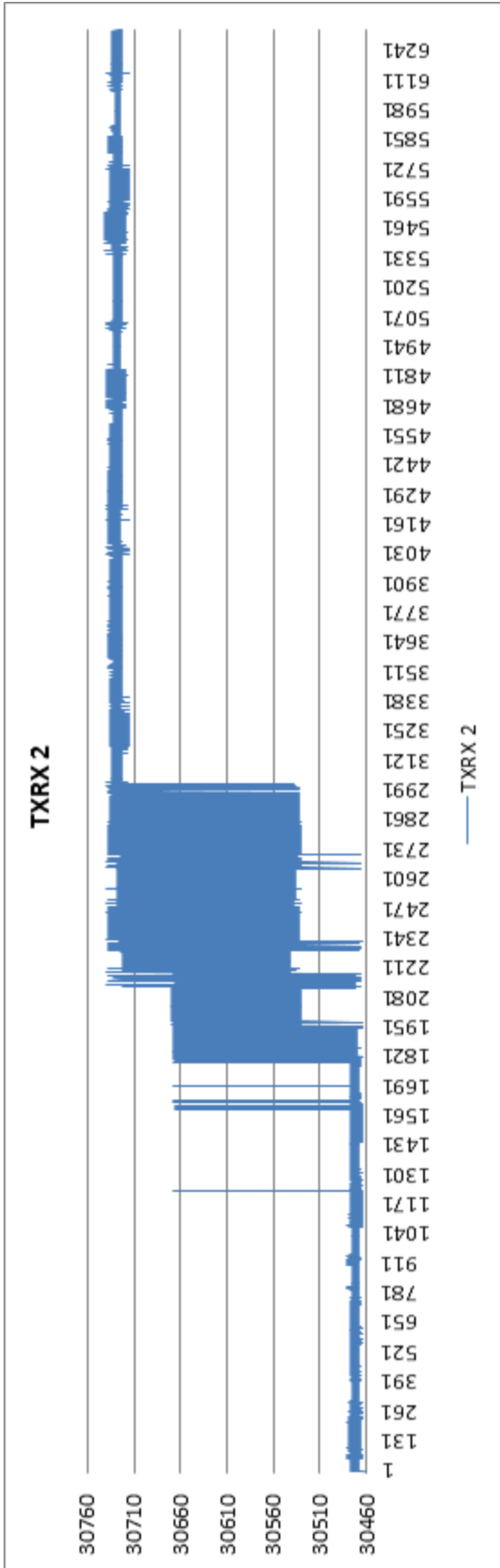
En los dos primeros gráficos de mediciones TXRX y ACK se ven que las variaciones entre los valores mínimo y máximo son aproximadamente de 150 ciclos.

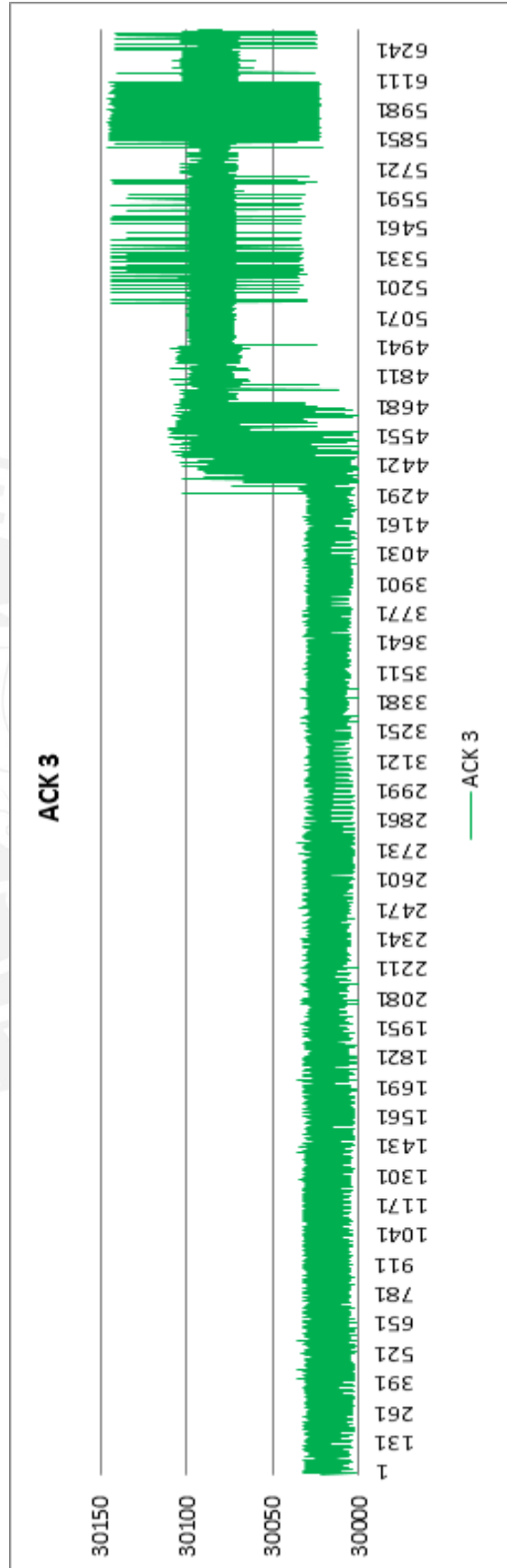
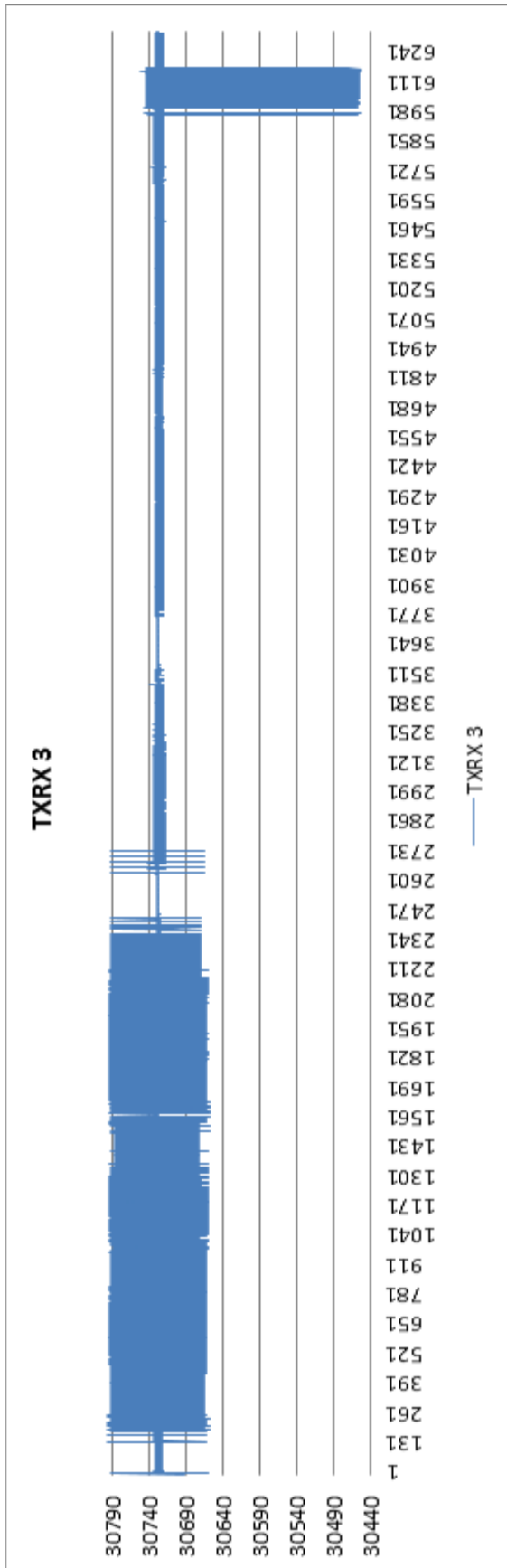
Las mediciones en ambos casos presentan ciertos patrones aunque con esta cantidad de mediciones no se puede saber exactamente si se repetirán y si lo harán con los mismos valores. De estos posibles patrones se puede obtener el valor estable que se necesita para representar el tiempo de procesamiento.

Se debe obtener una mayor cantidad de muestras, ahora serán grupos de 6340 mediciones. Si el patrón toma más de 6300 mediciones en aparecer se descartara estos métodos ya que consumiría muchos recursos.

Se han realizado 3 grupos de 6340 mediciones tanto para TXRX como para ACK, las gráficas se muestran a continuación:









Para ver los valores de estas mediciones ver el Fichero Excel Adjunto, Hoja “6340 TXRX ACK”.

Los 3 graficas no muestran un patrón que se repita en ninguno de los dos tipos de mediciones aunque existen muchos valores que se repiten. A continuación se presentan algunas observaciones que pueden ayudar en el análisis de las medidas.

Entre los dos métodos de medición de tiempo de vuelo existe un diferencia aproximada de 680 ciclos (42.5  $\mu$ s). Esta diferencia es porque en las transmisiones TXRX se toma más tiempo en procesar la trama recibida en el nodo 2 y preparar la trama de respuesta para enviar al nodo 1.

En los dos métodos existen variaciones no despreciables entre sus valores.

Se han eliminado los valores de ciclos que eran muy grandes, es decir que excedían a la media en más de 1000 ciclos, se asume que son resultados erróneos. También se han eliminado los valores cero, que se daban cuando el TickTimer alcanzaba el valor de referencia y descartaba esa medición asignándole el valor cero.

Se calculan algunos indicadores estadísticos para encontrar un valor estable para esta distancia.

	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
	TXRX	ACK	TXRX	ACK	TXRX	ACK
<b>Valor Mínimo</b>	30340	29960	30444	29995	30454	29957
<b>Media</b>	30727	30049	30635	30082	30724	30040
<b>Mediana</b>	30728	30029	30723	30083	30728	30026
<b>Moda</b>	30723	30021	30723	30094	30728	30021
<b>Cantidad Valor Moda</b>	998 (15.74%)	362 (5.7%)	831 (13.11%)	495 (7.81%)	1985 (31.31%)	672 (10.6%)
<b>Desviación Estándar</b>	18	36	117	26	44	33

Tabla 6: Indicadores estadísticos para mediciones TXRX y ACK

**Valor Mínimo:** Se analiza el valor mínimo porque es la mínima cantidad de ciclos que toma hacer la medición, es probable que se repita varias veces. Los resultados indican que no existe un mismo valor mínimo en los 3 grupos, e incluso puede haber una gran diferencia entre estos. Se descarta usar este valor como referencia.

**Media:** La media en las mediciones TXRX del grupo 1 y el grupo 3 son muy parecidas, pero el grupo 2 se distancia totalmente. En las mediciones ACK se observa el mismo comportamiento que en TXRX aunque la diferencia con el grupo 2 es menor, igual sigue siendo muy grande. Para este tipo de mediciones la media no es un buen indicador porque no siempre es igual.

**Mediana:** Este indicador no se ve tan afectado por valores extremos como en la media. La mediana en las mediciones TXRX es similar y existe una diferencia de 5 ciclos (46.875 m). En cambio en las mediciones ACK, el grupo 2 se separa de la mediana de los grupos 1 y 3 por varios ciclos de reloj. Para las mediciones TXRX la mediana puede ser un buen valor aunque con un error considerable aproximado de 45 metros.

**Moda:** Existen varios valores que se repiten. Las mediciones TXRX presentan más valores iguales en comparación a las mediciones ACK

**Cantidad del valor Moda:** El porcentaje de los valores que se repiten en las mediciones TXRX es mayor que en las mediciones ACK, lo cual indica una mayor estabilidad en ese tipo de mediciones.

**Desviación Estándar:** Las desviación estándar de los valores es variable, no hay un método que presente una menor desviación siempre. Por lo cual este valor no ayuda a poder escoger un método sobre otro.

Los indicadores que se acercan a un valor estable son la mediana y la moda en las mediciones TXRX, aunque el error es grande todavía. A continuación se realizan medidas a mayores distancias para ver el rendimiento que se obtiene con la mediana y la moda cuando existen ciclos introducidos por tiempo de vuelo.

## 5.2.2 Mediciones 2

### 5.2.2.1 Varias Distancias

Ahora se han realizado mediciones a distancias mayores para comparar la mediana y la moda. Se busca obtener diferencias clara en la cantidad de ciclos para cada distancia. Se realizaron las medidas en las siguientes condiciones:

Se cambió el escenario a un espacio abierto, la Plaza Telecomunicaciones, para alcanzar mayores distancias.

Primero se utilizaron los módulos JN5148-001-M03 (con conector SMA sin amplificador), pero las pérdidas de mensajes era mayor al 25%, por lo cual se decide cambiar a los módulos JN5148-001-M04 (con conector SMA con amplificador).

Se realizaron dos grupos de mediciones, cada grupo contiene 6340 medidas a 0, 12, 22 y 32 metros tanto para TXRX como para ACK. Estas distancias en teoría tienen como diferencia un ciclo de reloj. Si no se logran diferencias claras hasta los 32 metros, se descarta este tipo de mediciones ya que el error en distancia sería muy grande.

A continuación se muestran los resultados para los dos grupos de mediciones

#### Grupo 1

	TXRX				ACK			
	0 m	12 m	22 m	32 m	0 m	12 m	22 m	32 m
<b>Valor Mínimo</b>	30450	30361	30403	30343	29953	29952	29953	29952
<b>Media</b>	30648	30555	30568	30585	30053	30049	30055	30055
<b>Mediana</b>	30730	30474	30474	30478	30070	30033	30069	30069
<b>Moda</b>	30730 (44.9%)	30474 (47.7%)	30474 (40.1%)	30474 (35.1%)	30072 (8.6%)	30072 (7.2%)	30026 (6%)	30070 (4.7%)

Tabla 7: Indicadores estadísticos para varias distancias grupo 1

Grupo 2

	TXRX				ACK			
	0 m	12 m	22 m	32 m	0 m	12 m	22 m	32 m
<b>Valor Mínimo</b>	30668	30411	30411	30462	29953	29952	29952	29952
<b>Media</b>	30730	30474	30580	30618	30068	30046	30050	30057
<b>Mediana</b>	30730	30474	30475	30724	30072	30031	30034	30071
<b>Moda</b>	30730 (55.3%)	30474 (53.7%)	30474 (36%)	30730 (36.7%)	30072 (12%)	30026 (6.9%)	30026 (6.5%)	30072 (8%)

Tabla 8: Indicadores estadísticos para varias distancias grupo 2

Parar grandes distancias no se aprecia una diferencia notable, en teoría en ambos grupos de mediciones debería haber un aumento de ciclos cuando la distancia es mayor, pero los valores de mediana y moda no muestran esta tendencia.

**Mediana:** La única tendencia de aumento es entre 22 y 32 metros pero se busca una grafica creciente en todas las distancias. No existe una diferencia clara entre los ciclos para cada distancia, por eso se descarta la mediana como posibilidad de un valor estable para una distancia especifica.

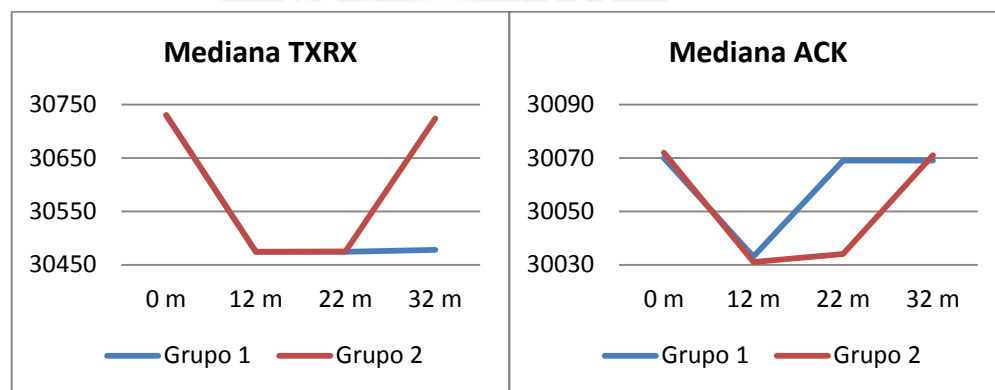


Figura 28: Mediana TXRX y ACK para varias distancias

**Moda:** Se observa la misma tendencia que la mediana, no existen un crecimiento constante entre distancia, a pesar que la presencia del valor moda es muy alto para las mediciones TXRX (entre 35% y 55%). No se observa los resultados esperados, también se descarta la moda como un indicador

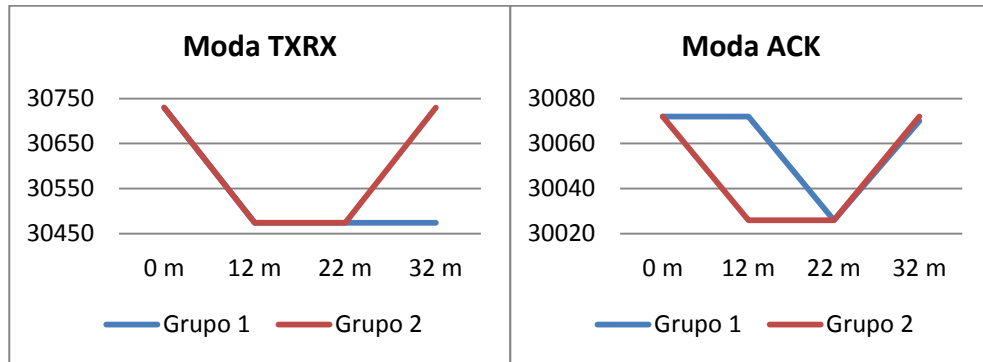


Figura 29: Moda TXRX y ACK para varias distancias

Para ver los valores de estas mediciones ver el Fichero Excel Adjunto, Hoja “Varias Distancias 1” y Hoja “Varias Distancias 2”.

### 5.2.3 Conclusiones

No se ha alcanzado los resultados esperados. La principal limitación es la imposibilidad de enlazar el contador de tiempo con el transceptor de los módulos. Se debe empezar la medición de tiempo desde una instrucción anterior a la instrucción de envío de los mensajes, en lugar de empezarla en el instante que se inicia la transmisión del mensaje en la antena del nodo, igualmente para la recepción de mensajes. Esto significa la introducción de un tiempo de procesamiento que no es constante. Las variaciones del tiempo de procesamiento implican muchos ciclos de reloj en comparación a los ciclos introducidos por el tiempo de vuelo.

El Tick Timer que se utilizó para las mediciones de tiempo tiene una frecuencia de 16 MHz, el cual brinda una resolución espacial de 9.375 metros. Se debe considerar que este contador de tiempo introduce un cierto valor de error debido a una posible inestabilidad del cristal de cuarzo

Se analizaron algunos indicadores como media, mediana, moda, etc., pero al no haber un patrón fijo en las mediciones, no se pudo encontrar un valor que represente constantemente a cada distancia. Se consideró como límite de error 30 metros aproximadamente pero no se logró los resultados adecuados por lo cual este tipo de medición se descarta.

### 5.3 Mediciones con el Motor de Tiempo de Vuelo

#### 5.3.1 Mediciones 1

Se realizaron mediciones con los módulos de alta potencia para conocer el margen de error que tiene el ToF API y el máximo alcance con un error aceptable. Las mediciones se realizaron en exteriores, en una calle de un polígono industrial.

Primero se hicieron entre 10 y 200 metros, en pasos de 10 metros. Después se aumentó la distancia y se fue probando hasta obtener aproximadamente 50% de paquetes perdidos.

Para estas mediciones se utilizó la aplicación de demostración del ToF API, se debe señalar que una medición está compuesta de 10 sub-mediciones del tiempo de vuelo de una trama. Además se presenta un valor promediado de 25 mediciones (repartido en ambos sentidos, hacia adelante F o al revés R)

Los resultados son los siguientes

Distancia (m)	Sin Procesar			Procesadas			Tramas Perdidos
	Cm	Metros	Error (m)	Cm	Metros	Error (m)	
10	2074,4	21	11	1773,6	18	8	9%
20	2868,2	29	9	3322,4	33	13	5%
30	2691,4	27	-3	2632,9	26	-4	3%
40	4157,2	42	2	4370,8	44	4	4%
50	4897,8	49	-1	5166,4	52	2	2%
60	5684,0	57	-3	5742,5	57	-3	7%
70	7144,9	71	1	7021,6	70	0	1%

80	8902,0	89	9	8926,1	89	9	3%
90	10619,8	106	16	10384,1	104	14	4%
100	10652,8	107	7	10987,3	110	10	3%
110	11482,6	115	5	11628,1	116	6	4%
120	12909,4	129	9	12693,2	127	7	3%
130	13299,1	133	3	13284,1	133	3	2%
140	13854,5	139	-1	14258,9	143	3	4%
150	15546,0	155	5	15445,5	154	4	2%
160	15582,0	156	-4	16174,6	162	2	3%
170	17702,0	177	7	17954,1	180	10	7%
180	18547,5	185	5	18694,7	187	7	4%
190	19687,7	197	7	19708,1	197	7	8%
200	20416,8	204	4	20706,4	207	7	12%

Tabla 9: Valores ToF para varias distancias

El primer campo es la distancia real entre nodos. El segundo, tercer y cuarto campo (en color rojo claro) son valores promediados de 25 mediciones sin hacer ninguna filtración previa, el segundo campo es el valor medido en centímetros, el tercer campo es el valor en metros y redondeado, y el cuarto es el error en metros que existe con la distancia real. El quinto, sexto y séptimo campo (en color azul claro) son valores filtrados (procesados) antes de ser promediados. Se han eliminado las mediciones que tienen submediciones erróneas, se eliminaron los valores extremos de las submediciones en cada medición y se tomaron las últimas 10 mediciones. El último campo es porcentaje de submediciones erróneas.

Se hicieron las mediciones con los sensores a una altura de 1 metro y medio. No podemos considerar interferencia en la misma banda ya que era una calle junto a un parking de autobuses y una fábrica, entonces las interferencias eran mínimas.



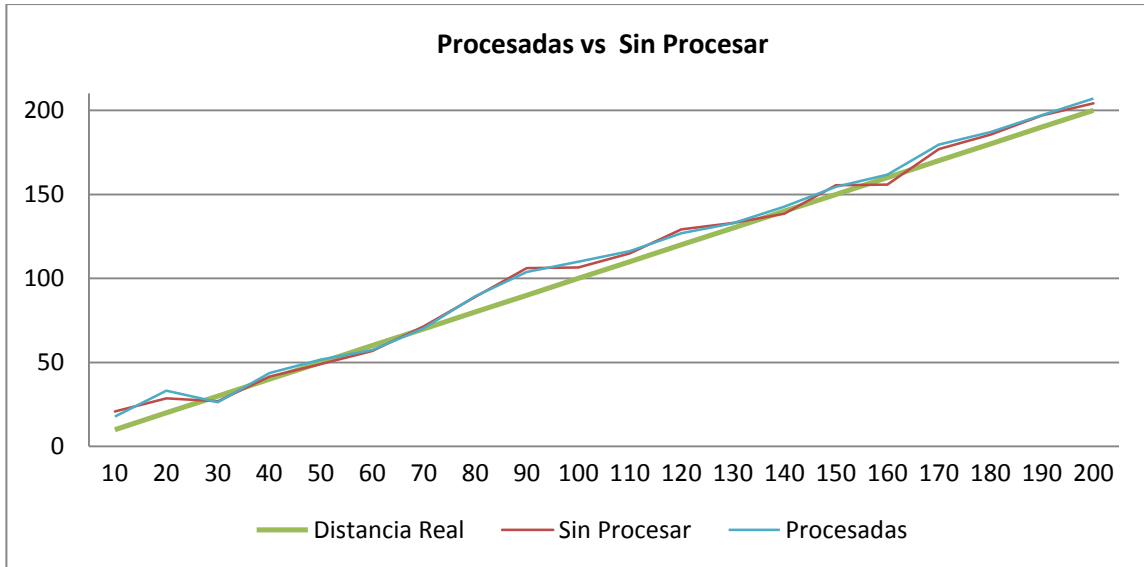


Figura 30: Valores Procesados vs Sin Procesar

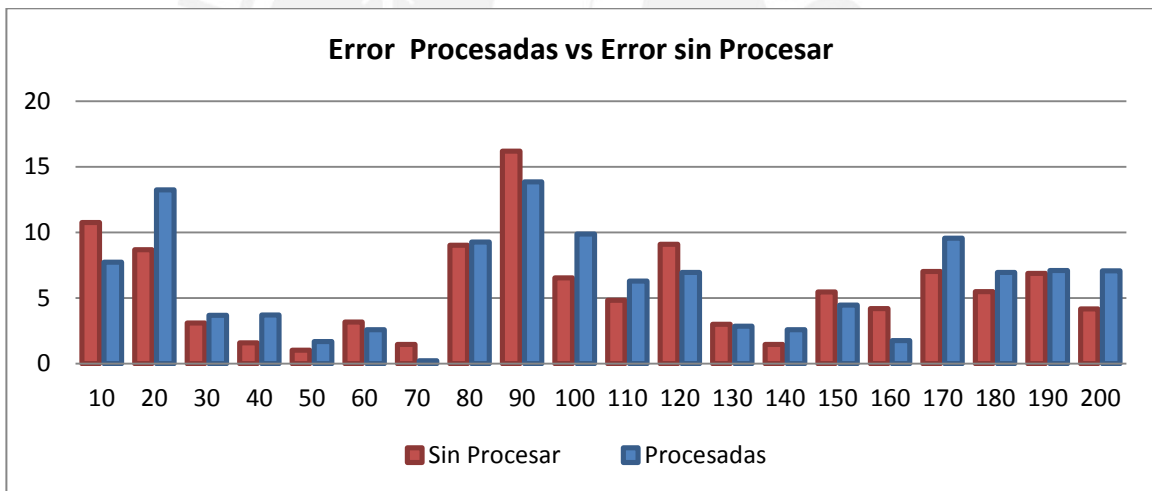


Figura 31: Error de valores procesados y sin procesar 1

En los dos casos existen errores muy grandes, algunos pueden ser corregidos mediante el procesado pero no siempre se obtienen buenos resultados. Por ejemplo para 70 metros se reduce el error, pero a 170 metros el error aumenta.

Sumando todos los metros de error resulta en 113 para los resultados sin procesar y para los resultados procesados en 121. Se concluye que este tipo de filtrado (tomar las últimas 5 mediciones F y las ultimas 5 mediciones R, sin tomar en cuenta las que

tengan por lo menos 1 submedición errónea y eliminar los valores extremos en cada medición) no ayuda a reducir el error de los resultados.

Ahora en lugar de tomar las últimas 5 mediciones F y 5 R se tomó las últimas 10 de cada tipo. Los resultados superaron los del filtrado anterior pero no llegaron a mejorar las mediciones sin procesar, a continuación se muestra un gráfico de los errores.

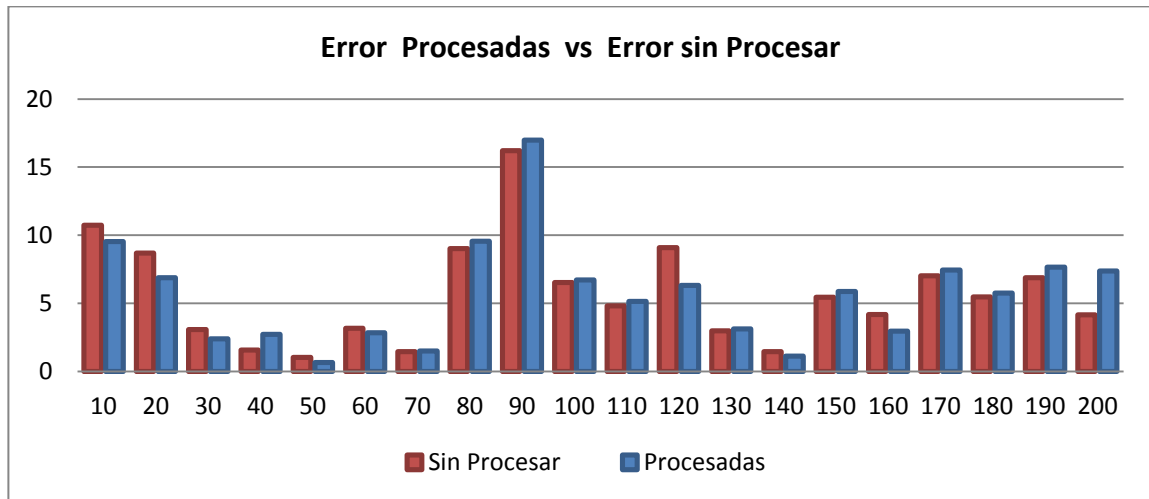


Figura 32: Error de valores procesados y sin procesar 2

Comparando errores en ambos casos se obtienen errores totales de 113 metros. En vista de los resultados es mejor utilizar el ultimo tipo de filtrado pero igual no existe una gran diferencia con los valores sin procesar como para justificar el procesamiento adicional que el filtrado requiere.

La media de error para los valores sin procesar es 4.4 metros, lo cual es aceptable si se considera que se puede trabajar con cientos de metros.

Después se realizaron otras mediciones para determinar el alcance aceptable de los sensores. A una distancia aproximada de 500 metros se notó que el envío y recepción de paquetes de la ToF API DEMO tenía un 50% de éxito. En total se hicieron 31 mediciones, de las cuales 15 fallaron, y en las restantes hubo un error del 22,5% en todas las submediciones. Se concluye que utilizar los sensores de alta potencia brinda un alcance de medio kilómetro.

### 5.3.2 Mediciones 2

Se realizaron mediciones en interiores utilizando la ToF API Demo con los módulos de potencia estándar. Se intenta comparar el método de cálculo de distancia mediante RSSI y el de Tiempo de Vuelo en un escenario con línea de vista entre los nodos

La aplicación de demostración de Jennic es capaz de calcular distancias utilizando el valor RSSI, utilizando una estimación por atenuación de la señal. La aplicación utiliza un modelo basado en la ley del cuadrado inverso.

$$d = 0.02 \cdot 10^{\left(\frac{108 - \text{RSSI}}{20}\right)}$$

Los resultados fueron los siguientes

Módulos Estándar		Distancias Reales (cm)
ToF (cm)	RSSI (cm)	
-187	2	0
244	110	210
550	335	590
807	435	860

Tabla 10: Valores ToF y RSSI

Se aprecia que para interiores y distancias cortas, la estimación de distancias utilizando el tiempo de vuelo es más precisa que utilizando la atenuación de la señal excepto a distancia 0 m. Además el error disminuye a comparación de medidas hechas en exteriores.

### 5.3.3 Mediciones 3

Se realizaron mediciones en interiores utilizando la ToF API Demo entre dos nodos, el local fijo y el remoto móvil. Se hicieron con obstáculos para poder hacer una comparación entre el método de cálculo de distancia mediante RSSI y el de Tiempo de Vuelo, cuando no hay línea de vista entre nodos.

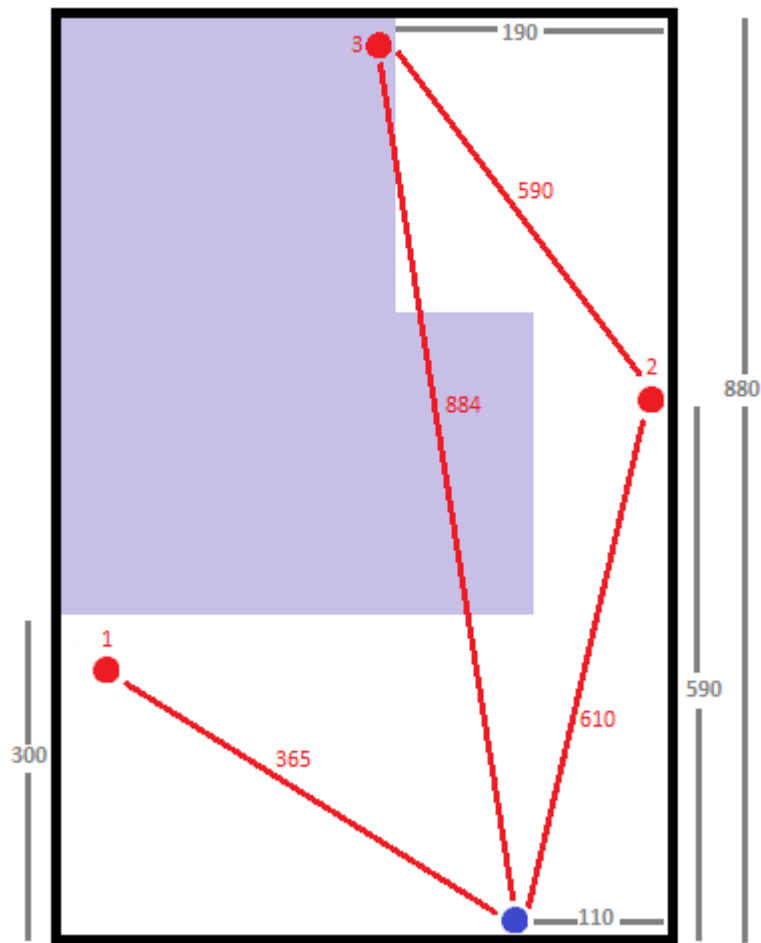


Figura 33: Plano del escenario de medición con obstáculos (distancias en cm)

- El nodo local (conectado al ordenador) es el punto azul.
- El nodo remoto se colocó en tres posiciones distintas 1, 2 y 3.
- En la posición 1, los nodos tienen línea de vista.
- En la posición 2, se aseguró que exista línea de vista, este punto es parte del camino para que las señales lleguen al punto 3.
- En la posición 3, no existe línea de vista, las señales pueden llegar a través del punto 2 o atravesando los obstáculos.

Se realizaron las medidas con los módulos de alta potencia y los módulos estándar, las medidas de alta potencia son mejores para estimar distancias con el motor de tiempo de vuelo, y los módulos estándar sirven para brindar información sobre el valor RSSI.

Se realizaron 5 mediciones (F) y 5 mediciones (R). Y se presenta una media de los valores resultantes.

	Módulos Alta Potencia		Módulos Estándar		Distancias Reales cm
	ToF (cm)	RSSI (cm)	ToF (cm)	RSSI (cm)	
Posición 1	631,2	-	149,7	680,4	365
Posición 2	716,8	-	263,7	1311,6	610
Posición 3	1130,3	-	1773,7	10286,9	884 (1200)

Tabla 11: Valores ToF y RSSI con obstáculos

El punto 3 es el único que no tiene línea de vista y el propósito de estas mediciones es saber si en ese caso las distancias RSSI son más precisas que las de ToF. Los resultados indican que tanto en posiciones con línea vista como en las que no hay, los resultados de ToF son mejores.

En realidad, para la posición con obstáculos no se consigue un cálculo de distancia adecuado, pero si proporciona una aproximación del tamaño de los segmentos que forman parte del camino entre los sensores, lo cual da una idea de la distancia del camino más directo entre sensores evitando los obstáculos.

### 5.3.4 Conclusiones

Los resultados de las mediciones utilizando el motor de tiempo de vuelo han sido satisfactorios. Con los módulos de alta potencia se ha logrado un alcance de medio kilómetro con un error promedio de 4.4 metros.

Los módulos de alta potencia dan mejores resultados trabajando en exteriores e interiores para distancias cortas y largas. Utilizar una estimación de distancias basada en el tiempo de vuelo resulta mejor que utilizar una basada en la atenuación de la potencia.

En conclusión, utilizar el motor de tiempo de vuelo de Jennic ofrece mejores resultados que implementar una aplicación que intente medir el tiempo de vuelo sin tener un acceso directo al transceptor. El problema se encuentra en las variaciones del tiempo de procesamiento, lo cual imposibilita tener un error aceptable como para una aplicación de localización.



## CAPÍTULO 6: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE LOCALIZACIÓN

En este capítulo se desarrolla e implementa un sistema de localización utilizando el motor de tiempo de vuelo de Jennic. Una vez conocidas las prestaciones de la patente de Jennic en la medición de distancias se pone en práctica un sistema de localización completo.

Se explica el esquema de medición entre sensores y los algoritmos utilizados para obtener la posición de un sensor conociendo la distancia con otros nodos de referencia, también la aplicación desarrollada como interfaz para el usuario final.

### 6.1 Método de Localización: Trilateración

La Trilateración es un método de localización que utiliza la geometría de triángulos y las distancias conocidas a puntos de referencia para determinar la ubicación de un objeto. Se utiliza la trilateración para calcular la posición del nodo móvil a partir de las distancias a los nodos fijos.

A continuación se muestra un esquema de cómo se aplica la trilateración

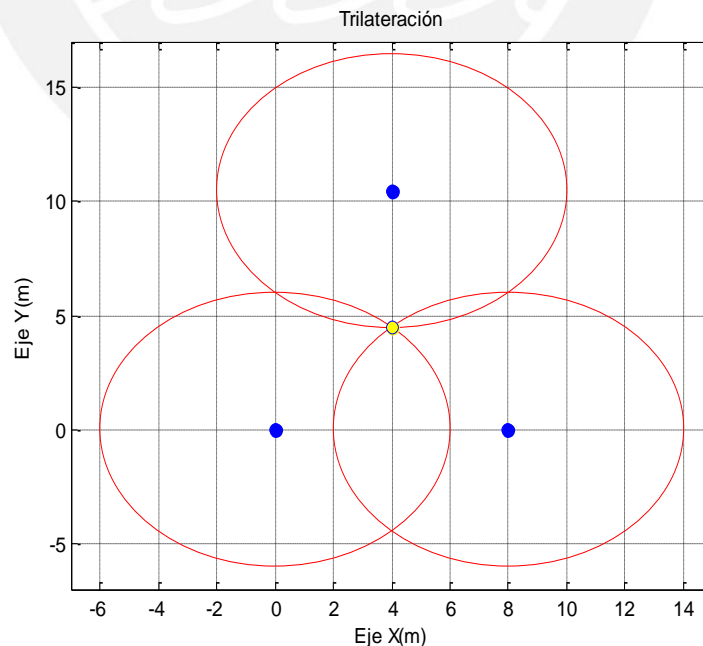


Figura 34: Trilateración ideal



En la figura los puntos azules son las referencias (nodos fijos), el punto amarillo es el nodo que se desea ubicar (nodo móvil). Primero se tiene que medir las distancias entre los nodos fijos y el móvil. Las circunferencias rojas son la representación del lugar geométrico del nodo móvil considerando solo la distancia medida con ese punto de referencia. Finalmente la posición del nodo móvil es el punto donde se interceptan las circunferencias.

En circunstancias ideales la localización se reduce a encontrar la intersección de las 3 circunferencias, pero en un escenario real siempre existe un error en la medición de distancias. Con este error lo más probable es que no exista el punto de intersección entre las 3 circunferencias, incluso puede que las circunferencias no se intercepten. A continuación se presentan algunos casos dependiendo de los errores de medición en la distancias

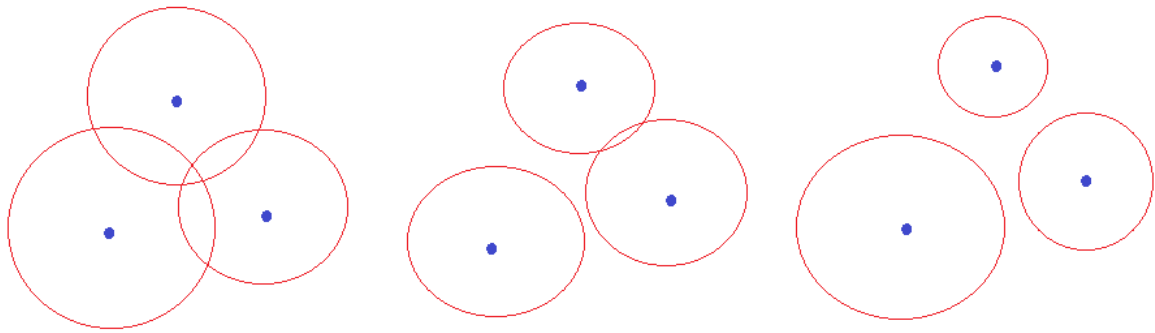


Figura 35: Diferentes resultados de mediciones en la trilateración

Para resolver este problema se analizarán dos métodos, ajuste por Mínimos Cuadrados No Lineales e Intersección de Círculos.

### 6.1.1 Ajuste por Mínimos Cuadrados No Lineales

Conociendo las coordenadas de los puntos fijos y el radio que es igual a la distancia con el nodo móvil se plantea una ecuación por cada nodo fijo.

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2$$

Donde los nodos fijos están en  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  y  $(x_3, y_3)$ ;  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$  son las distancias entre cada nodo fijo y móvil; y  $(x, y)$  es el punto que se desea localizar y debe cumplir para las 3 ecuaciones. Resolver estas ecuaciones se resume a encontrar el punto de intersección entre 3 círculos pero si existen errores (en la medición de las distancias) no hay un punto  $(x, y)$  que cumpla, por lo cual se debe modificar estas ecuaciones de la siguiente forma.

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 - r_1^2 = \Delta_1^2$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 - r_2^2 = \Delta_2^2$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 - r_3^2 = \Delta_3^2$$

Donde  $\Delta_1^2$ ,  $\Delta_2^2$  y  $\Delta_3^2$  son las diferencias entre la distancia medida y nueva la posición estimada del nodo móvil. Se tiene un sistema de ecuaciones sobre-determinado, ya que tenemos más ecuaciones (3) que incógnitas  $(x, y)$ , lo cual quiere decir que existen varias soluciones y es no lineal ya que tiene términos elevados al cuadrado. La solución de los mínimos cuadrados es obtener el par de coordenadas que minimice la suma de los errores  $\Delta_1^2$ ,  $\Delta_2^2$  y  $\Delta_3^2$ .

Este método consiste en una estimación de valores iniciales y a partir de ahí hacer iteraciones en donde la solución siguiente tenga una suma de errores al cuadrado menor que la anterior, y así hasta alcanzar el criterio de detención del algoritmo. Para obtener la solución por ajuste de los mínimos cuadrados se utilizara la función LSQNONLIN de MATLAB.

Por ejemplo en el siguiente escenario, los puntos azules son las posiciones de los nodos fijos. Para simplificar el esquema el nodo 1 y 3 se posiciona sobre el eje X y el punto rojo es la ubicación real del nodo móvil (8.7, 6.3), con el cual se realizaron las mediciones de distancias.

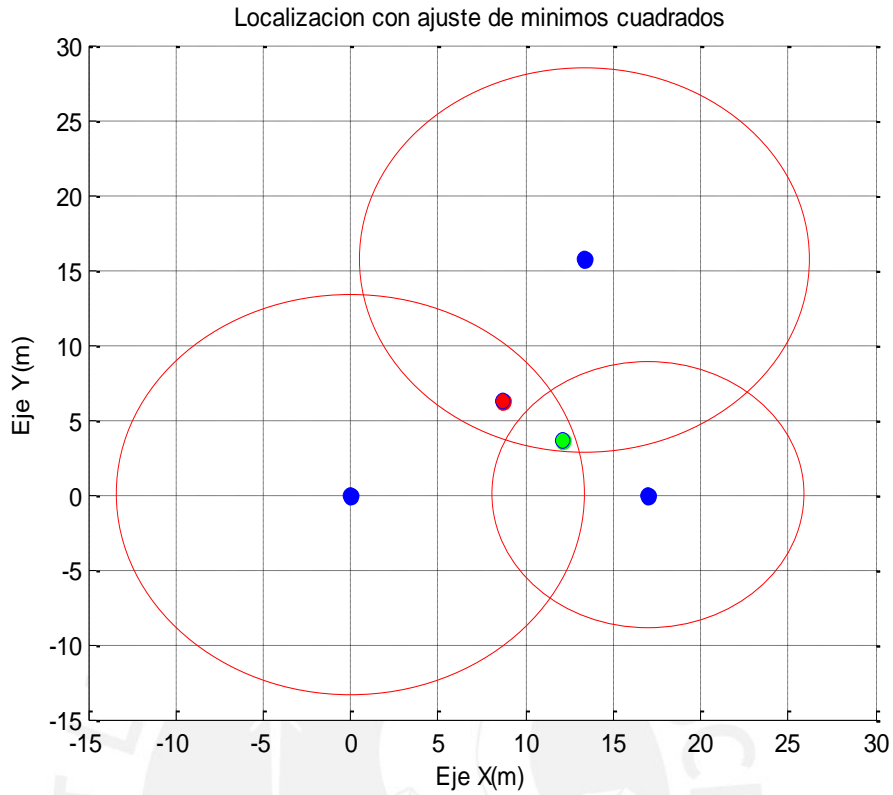


Figura 36: Localización con ajuste por mínimos cuadrados

Los valores medidos en este ejemplo fueron

	Valor Medido (m)
<b>Nodo 1 (0,0)</b>	1338
<b>Nodo 2 (13.35, 15.68)</b>	1283
<b>Nodo 3 (17,0)</b>	894

Tabla 12 : Medición de distancias en 3 nodos

Planteamos las ecuaciones, que después se deben resolver en MATLAB

$$(x - 0)^2 + (y - 0)^2 - (13.38)^2 = \Delta_1^2$$

$$(x - 13.35)^2 + (y - 15.68)^2 - (12.83)^2 = \Delta_2^2$$

$$(x - 17)^2 + (y - 0)^2 - (8.94)^2 = \Delta_3^2$$

La función LSQNONLIN de MATLAB da la solución  $(x,y) = (12.0988, 3.6747)$ , el cual se muestra como un punto verde en la figura anterior. El error entre la ubicación real y la estimada por los mínimos cuadrados:

$$Error = \sqrt{(12.0988 - 8.7)^2 + (3.6747 - 6.3)^2}$$

$$Error = 4.29 \text{ m}$$

Este error es similar al error promedio obtenido en las mediciones de distancias con el motor de tiempo de vuelo en el capítulo 5, entonces lo podemos considerar con un valor común de error.

### 6.1.2 Intersección de Círculos

Otro método consiste en hallar el centroide del triángulo formado por la intersección de círculos. Primero se debe hallar todos los puntos de intersección entre las circunferencias formadas por las mediciones de los nodos fijos, en esta figura se muestran como puntos amarillos.

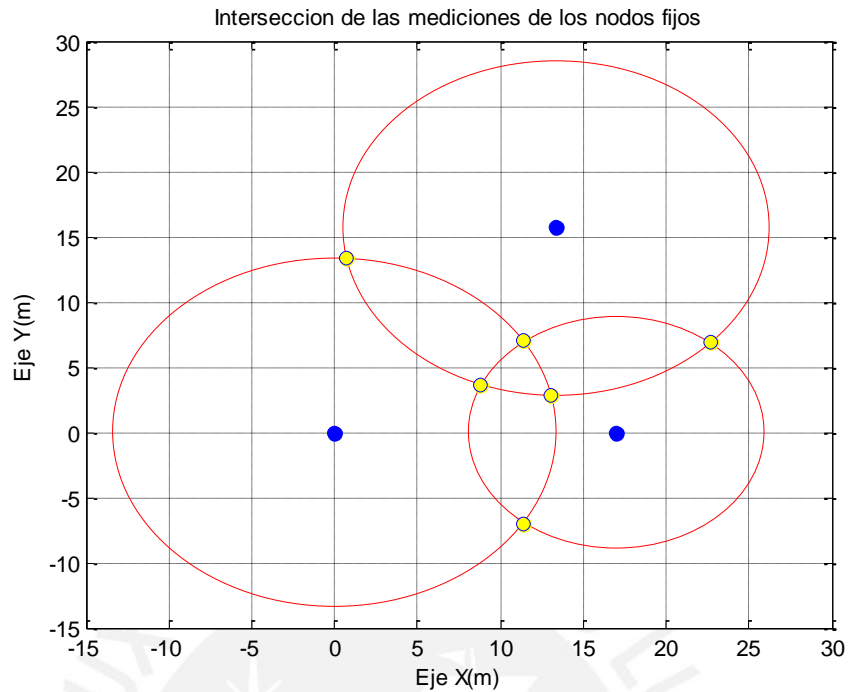


Figura 37: Intersección de círculos

Después elegir los 3 puntos que van a formar el triángulo del cual vamos hallar el centroide. Dos circunferencias (de dos nodos fijos) tienen dos puntos de intersección y se debe escoger el más cercano al otro nodo fijo.

Una vez que se tiene los 3 puntos que van a formar el triángulo (puntos amarillos), se puede hallar el centroide que es el punto donde se interceptan las rectas formadas desde un vértice hacia el puntos medio del lado opuesto. En la siguiente imagen se muestra el triángulo formado, los puntos medios de cada segmento como 'X' de color azul, el centroide de color cian y la ubicación real del nodo móvil de color rojo.

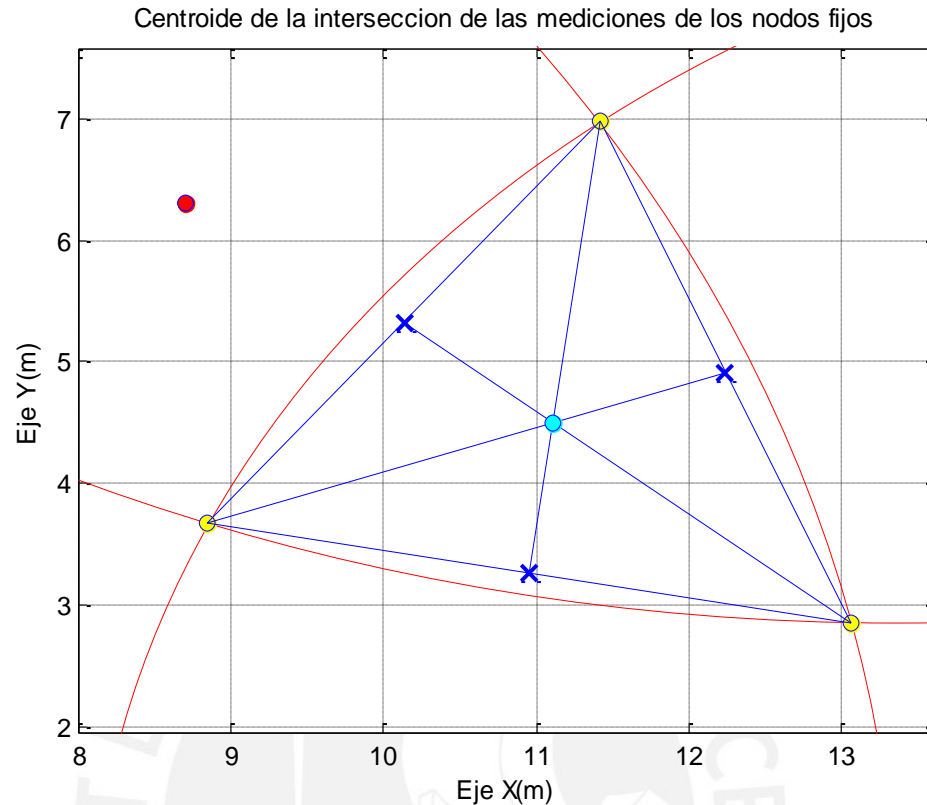


Figura 38: Centroide obtenido con la intersección de círculos

Con los mismo datos del ejemplo anterior, se halla el centroide utilizando MATLAB, las coordenadas del centroide son  $(x, y) = (11.11207, 4.505)$ . Se calcula el error

$$Error = \sqrt{(11.11207 - 8.7)^2 + (4.505 - 6.3)^2}$$

$$Error = 3.00 \text{ m}$$

### 6.1.3 Conclusiones

Hemos comparado dos métodos de Trilateración, ajuste con mínimos cuadrados y centroide de la intersección de círculos. Se han obtenidos mejores resultados trabajando con el método del centroide ya que el error es menor, pero esto no significa que siempre se pueda utilizar este método.

Una desventaja para el método del centroide es cuando las circunferencias no se interceptan, ya que no habría triángulo que formar y tampoco un centroide que hallar. La utilización de este método depende de error existente en las mediciones, en cambio el ajuste por mínimos cuadrados siempre dará un resultado.

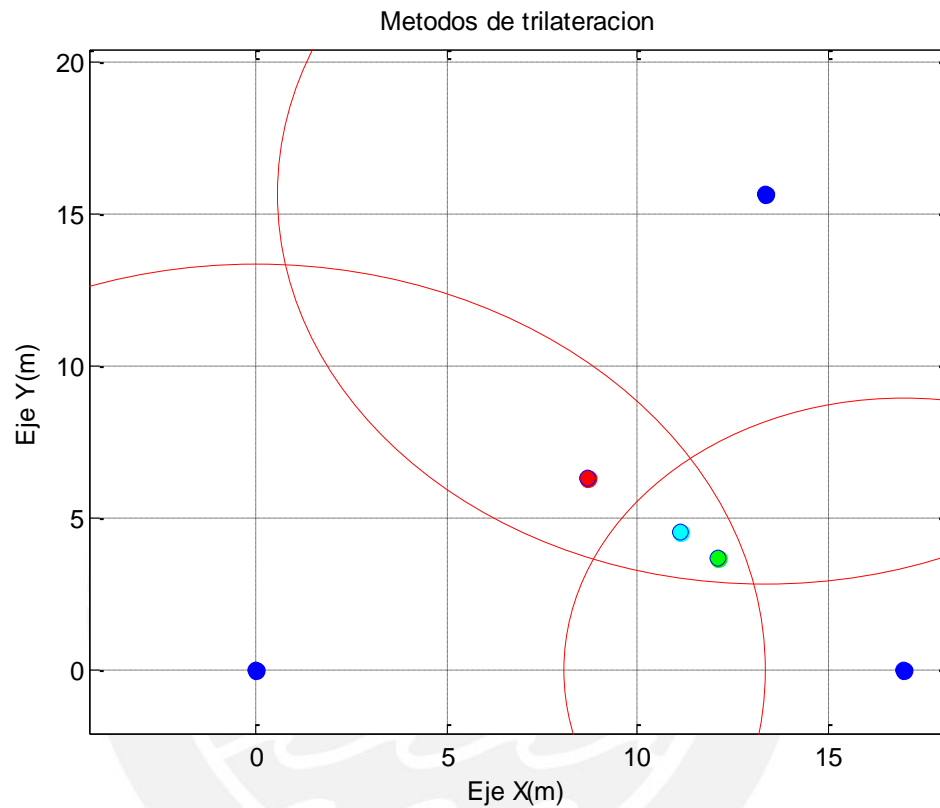


Figura 39: Mínimos Cuadrados vs Intersección de Círculos

Siguiendo con el ejemplo anterior, se muestra una comparación gráfica de las soluciones halladas con ambos métodos. El punto rojo es la ubicación real, el punto color verde la solución hallada con el ajuste por mínimos cuadrados y el punto de color cian la solución hallada con el centroide.



## 6.2 Implementación de un Sistema de Localización

Se ha realizado una aplicación de un sistema de localización para ser probado en un escenario real y analizar sus prestaciones. Primero se solicitó el paquete de desarrollo que contiene la ToF API. Una vez que se cuenta con la librería de tiempo de vuelo se ha desarrollado la aplicación con el SDK JN5148 para programar los microcontroladores y después una interfaz gráfica de usuario (GUI) con MATLAB para procesar y presentar los datos.

A continuación se muestra un esquema del sistema, cuenta con 3 nodos fijos y uno móvil. Para procesar la información uno de los nodos fijos se conecta a un ordenador. El nodo fijo 1 siempre se ubicara en la posición  $(0,0)$  y el nodo fijo 3 en el eje X.

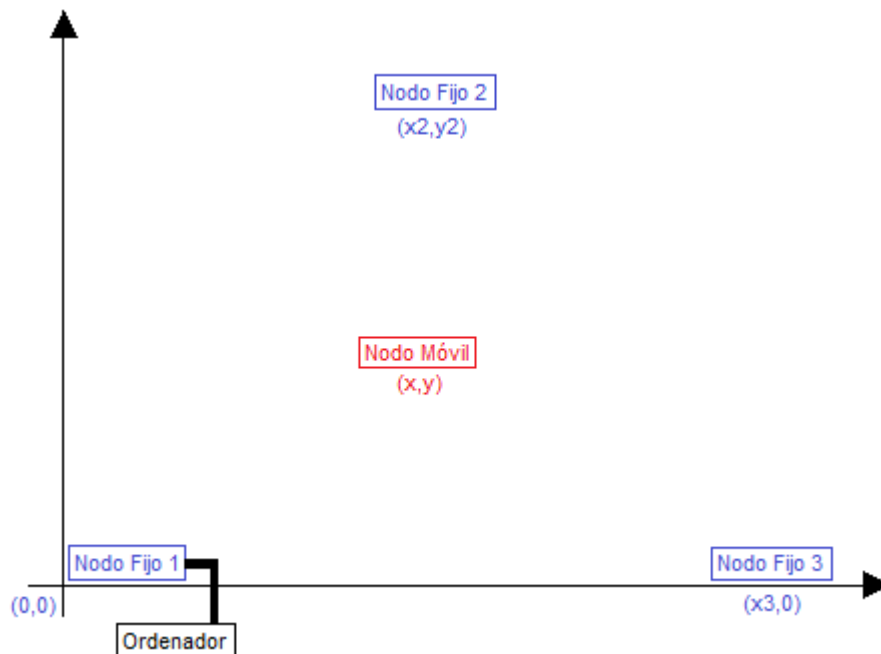


Figura 40: Topología del Sistema de Localización

### 6.2.1 Programación de los Microcontroladores

Para este sistema se desarrolló un proyecto con el código para cuatro microcontroladores en el Eclipse IDE, las funciones que se deben realizar son:

- Informar del Estado del Nodo Coordinador (Nodo Fijo 1).

- Informar de los dispositivos conectados a la red.
- Informar del canal de trabajo.
- Realizar una medición de distancias entre los nodos fijos para armar la topología de red.
- Realizar las mediciones de distancia entre el nodo móvil y los nodos fijos para localizar el nodo móvil.

Para este proyecto se utilizó la plantilla de Jennic, pero ahora se agregó el código necesario para 4 nodos que trabajen con los módulos de alta potencia.

Para cada medición de tiempo de vuelo, se realizaron 255 mediciones en ambos sentidos. Se presenta un promedio de todos los valores no erróneos y la cantidad de errores en cada sentido. Cuando un nodo ha iniciado una medición de tiempo de vuelo encenderá su LED 1 hasta que termine.

### **Nodo Fijo 1**

Cumple la función de coordinador e interactúa con el ordenador para recibir indicaciones del usuario a través del puerto UART 0.

Se habilita el funcionamiento en alta potencia y el uso del motor de tiempo de vuelo durante la inicialización de la red. Una vez que se ha establecido la red se inicia la asociación de los otros nodos. Cuando un nodo se asocia se le asigna un dirección corta, si el nodo se desasocia y desea re asociarse se verifica con su dirección MAC qué dirección corta tenía asignada y se le vuelve a admitir con esa dirección.

Desde el ordenador se puede dar indicaciones al nodo fijo 1 a través de su puerto UART 0. Estas indicaciones llegan como interrupciones de hardware y son representadas con un carácter. La respuesta se envía por el mismo puerto.

Con el carácter “e” o “E” se solicita información del estado del nodo coordinador. Puede responder con 3 estados posibles: “Ocupado” cuando se está inicializando la pila IEEE 802.15.4, “Escaneo de Energía” cuando se está escaneando los canales para encontrar uno adecuado o “Iniciado” cuando el nodo terminó de iniciar la red y se encuentra listo para realizar otras tareas.

Con el carácter “d” o “D” se solicita información de los nodos asociados a la red, se responde con una lista de los nodos asociados.

Con el carácter “c” o “C” se solicita información del canal de trabajo, se responde indicando el canal de trabajo.

Con el carácter “t” o “T” se inicia una medición de distancias entre los nodos fijos. Primero se realiza una medición de tiempo de vuelo entre el nodo 1 y 2, después entre el nodo 1 y 3, finalmente se envía un mensaje al nodo 2 para que realice una medición de tiempo de vuelo con el nodo 3, y envíe los resultados al nodo 1. Cuando el nodo 1 tiene la información de todas las distancias, presenta a través del puerto serial de la siguiente forma:

ToF 1 y 2 | Media 123 | Err\_F4 | Err\_R 6

Donde se indica la media del tiempo de vuelo medido en picosegundos, y la cantidad de errores en ambos sentidos. Si la medición no se realizó o no se completó por diferentes motivos entonces se muestra el siguiente mensaje:

Fallo Medir\_ToF nodos 1 y 2

Con el carácter “m” o “M” se indica al nodo fijo 1 que envíe un mensaje al nodo móvil para que inicie la medición de tiempo de vuelo con todos los nodos fijos. El nodo móvil hace la medición con el nodo 1, 2 y 3 en ambos sentidos y envía los resultados al nodo fijo 1, el cual presenta la información de la misma forma.

ToF 4 y 1 | Media 456 | Err\_F4 | Err\_R 6

### **Nodo Fijo 2 y 3**

En estos nodos se habilita el uso de módulos de alta potencia y el motor de tiempo de vuelo. Una vez que se asocian a la red, están a la espera de realizar medidas de tiempo de vuelo con los nodos que lo soliciten. Además el nodo 2 puede recibir un mensaje del nodo 1 indicándole que debe realizar una medición con el nodo 3 y enviarle los resultados.

## Nodo Móvil

En el nodo móvil se habilita el uso del módulo de alta potencia y el motor de tiempo de vuelo. Una vez que se asocia a la red, está a la espera de un mensaje del nodo 1 que le indique realizar mediciones con todos los nodos fijos. Cuando ha realizado dichas mediciones, le envía a través de mensajes al nodo 1 los resultados.

Para obtener el código del proyecto ver el fichero adjunto “Sistema de LocalizaciónC.rar”.

### 6.2.2 Interfaz Gráfica de Usuario con MATLAB

Una vez que se han programado los sensores para que realicen las mediciones de tiempo de vuelo entre diferentes nodos y se presente los resultados por el puerto serial del nodo fijo 1, se debe procesar esos datos para interpretarlos para el Sistema de Localización.

Se utilizó MATLAB GUI para presentar el sistema de localización ya que además de permitir la creación de una interfaz gráfica para el usuario brinda una potente herramienta matemática utilizando su propio lenguaje de programación, el lenguaje M.

La creación de la aplicación se puede dividir en tareas

- Crear una conexión con el puerto asignado a la comunicación con el nodo fijo 1 e interactuar con este.
- Procesar los datos de las mediciones y presentar la ubicación de los nodos en un plano cartesiano.

A continuación se muestra la interfaz creada y se explican sus funcionalidades

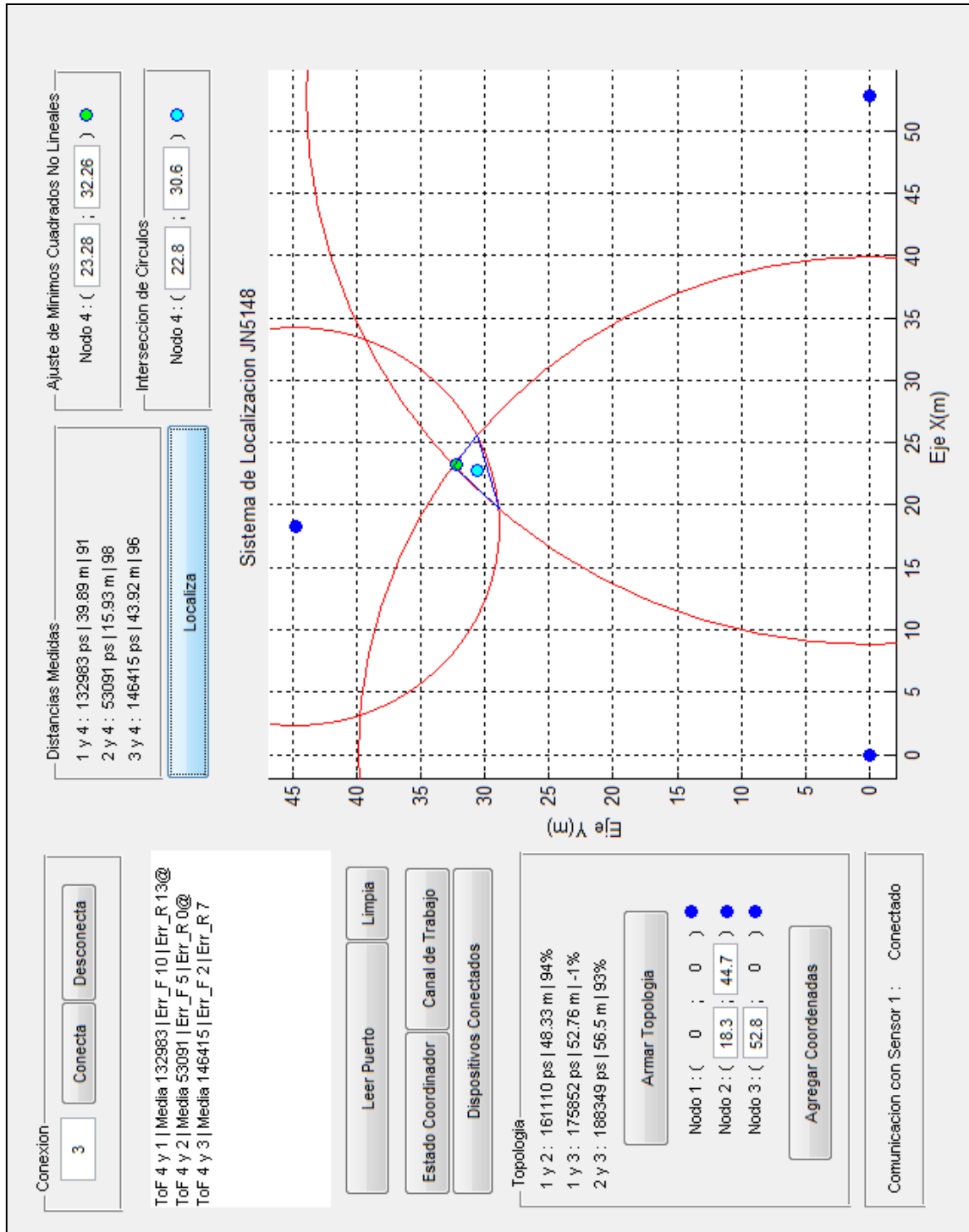


Figura 41 : Aplicación de Localización Geográfica en MATLAB

En la esquina superior izquierda se encuentra el Panel Conexión. Hay un cuadro de edición de texto donde se debe escribir el número del puerto COM de la computadora que se utiliza para comunicación con el nodo fijo 1 (el número del puerto se puede revisar en el Administrador de Dispositivos de Windows). Después de escribir el puerto se pulsa el botón “Conectar” para establecer la comunicación con el puerto; de igual manera cuando se termina de trabajar, antes de cerrar la aplicación se debe pulsar el botón “Desconectar” para cerrar la comunicación existente. En la parte inferior izquierda se ve el estado de la comunicación con el nodo fijo 1, puede ser “Conectado” o “No Conectado”.

Inmediatamente abajo del panel de conexión está el cuadro de texto que muestra los datos que se leen del nodo 1. El botón “Leer Puerto” se utiliza para la lectura del nodo 1. Se usa en dos eventos asíncronos: la inicialización de la red y la asociación de un nuevo nodo. El botón “Limpiar” sirve para borrar el contenido del cuadro de texto.

Más abajo hay 3 botones, al pulsar “Estado del Coordinador” se mostrara en el cuadro de texto uno de los 3 estados que puede tener el nodo coordinador; al pulsar “Canal de Trabajo” se mostrará el número del canal de radiofrecuencia utilizado; y al pulsar “Dispositivos Conectados” se mostrará una lista con todos los dispositivos conectados.

Después se encuentra el Panel de Topología, el botón “Armar Topología” realiza una medición de tiempo de vuelo entre los nodos fijos y lo presenta en el cuadro de texto. En este panel también se muestra la distancia según cada tiempo de vuelo y el porcentaje de mediciones exitosas en cada tramo.

Con los datos de las distancias entre los nodos fijos, la coordenadas del nodo 1 (0,0) y la coordenada X del nodo 3 (0) se puede hallar las coordenadas de los nodo fijos 2 y 3 utilizando la Ley de Cosenos. Las coordenadas de cada nodo fijo se muestran más abajo y se ubican en el gráfico de la derecha.

También se puede ingresar manualmente las coordenadas del nodo fijo 2 y la coordenada X del nodo fijo 3, escribiendo los valores en los cuadros de edición de texto y pulsando el botón “Agregar Coordenadas”. Si las coordenadas son agregadas manualmente en la parte superior de este panel se mostrara la distancia entre cada nodo fijo y se ubicaran los nodos en el gráfico de la derecha.

En la parte superior derecha se encuentran los paneles relacionados a la localización del nodo móvil. El botón “Localiza” envía hacia el nodo fijo 1 el carácter ‘m’ y se recibe las mediciones de tiempo de vuelo entre el nodo móvil y los nodos fijos, las cuales se muestran en el cuadro de texto de la izquierda. Además en el panel Distancias medidas, se muestra la distancia según cada tiempo de vuelo y el porcentaje de éxito en cada tramo. En este panel se asigna el número 4 al nodo móvil, así en los campos “1 y 4”, “2 y 4” y “3 y 4” se muestran las distancias medidas. Internamente se realiza la trilateración con los métodos de ajuste por Mínimos Cuadrados No Lineales y por Intersección de Círculos. Para cada método se obtiene un par de coordenadas y se muestran en el gráfico junto con los nodos fijos y las distancias medidas. Cuando se hace la intersección de círculos también se muestra el triángulo del cual se halla el centroide.

Se debe tener en cuenta algunas consideraciones para el funcionamiento del sistema de localización:

En ambos casos (“Armar Topología” y “Localiza”) se realizan mediciones de tiempo de vuelo de 3 tramos, cada cual cuenta con 255 mediciones en ambos sentidos y según la documentación de Jennic[28] tarda poco menos de 7 segundos. Considerando el tiempo de procesamiento entre otros se toma 7.5 segundos desde que se envió la indicación hasta leer el puerto en busca de los datos.

Cuando se pulsa “Armar Topología” si la medición de tiempo de vuelo de algún tramo falla, el proceso de ubicar los nodos fijos se cancelará y no se mostrarán.

Si no existe una topología de red, ya sea con el botón “Armar Topología” o ingresando las coordenadas manualmente no se podrá intentar localizar el nodo Móvil.

Cuando se intenta localizar el nodo móvil, si existe algún error en la medición de algún tramo se cancelará la localización.

En el caso de localización, si las circunferencias de las distancias entre los nodos fijos y el nodo móvil no se interceptan, no se mostrarán las coordenadas por el método de intersección de círculos. En cambio las coordenadas por ajuste de mínimos cuadrados se mostrarán siempre.



Para obtener el código del proyecto ver el fichero adjunto “Sistema de LocalizaciónM.rar”.

### 6.3 Análisis de Resultados

En este apartado se analizan los resultados de poner en práctica el sistema de localización en un escenario real.

- Las pruebas se realizaron en las siguientes condiciones:
- Los nodos se encuentran a una altura aproximadamente de 70 cm.
- Se realizaron en la plaza al frente de la BRGF, con línea de vista entre sensores.
- Se utilizaron los módulos de alta potencia.
- Todas las coordenadas están en metros.

Se realizaron mediciones en las 3 posiciones diferentes para el nodo móvil, primero con una topología de red estimada con la función de “Armar Topología” y después con la ubicación real de los nodos fijos.

	Nodo Fijo 1		Nodo Fijo 2		Nodo Fijo 3	
	X	Y	X	Y	X	Y
<b>Ubicación Real</b>	0	0	27.7	34	50	0
<b>Ubicación Estimada</b>	0	0	31.9	38.5	60.5	0

Tabla 13 : Coordenadas reales y estimadas



Con ubicación estimada de los nodos fijos (Valores en Metros)

Posición 1		
	<b>Coordenadas Reales</b>	
	( 16.5 , 5.8 )	
	<b>Mínimos Cuadrados</b>	<b>Intersección Círculos</b>
	( 28.62 , -4.54 )	( 28.9 , 3.7 )
	<b>Error</b>	
15.93	12.58	
Posición 2		
	<b>Coordenadas Reales</b>	
	( 29 , 11.7 )	
	<b>Mínimos Cuadrados</b>	<b>Intersección Círculos</b>
	( 42.55 , 22.8 )	( - , - )
	<b>Error</b>	
17.52	-	
Posición 3		
	<b>Coordenadas Reales</b>	
	( 37.5 , 25.4 )	
	<b>Mínimos Cuadrados</b>	<b>Intersección Círculos</b>
	( 47.68 , 29.45 )	( - , - )
	<b>Error</b>	
10.96	-	

Tabla 14: Localización Con Ubicación Estimada

Con las ubicaciones reales de los nodos fijos (Valores en Metros)

<b>Posición 1</b>		
	<b>Coordenadas Reales</b>	
	( 16.5 , 5.8 )	
	<b>Mínimos Cuadrados</b>	<b>Intersección Círculos</b>
	( 13.91 , -2.02 )	( 16.1 , 3 )
	<b>Error</b>	
8.24	2.83	
<b>Posición 2</b>		
	<b>Coordenadas Reales</b>	
	( 29 , 11.7 )	
	<b>Mínimos Cuadrados</b>	<b>Intersección Círculos</b>
	( 35.63 , 17.42 )	( - , - )
	<b>Error</b>	
8.76	-	
<b>Posición 3</b>		
	<b>Coordenadas Reales</b>	
	( 37.5 , 25.4 )	
	<b>Mínimos Cuadrados</b>	<b>Intersección Círculos</b>
	( 33.63 , 36.72 )	( 30.4 , 27 )
	<b>Error</b>	
11.96	7.28	

Tabla 15: Localización Con Ubicación Real

Promediando los errores

	<b>Error con Mínimos Cuadrados (m)</b>	<b>Error con Intersección de Círculos (m)</b>
<b>Ubicación Estimada</b>	14.8	12.58
<b>Ubicación Real</b>	9.65	5.06

Tabla 16: Error para los métodos de solución de la trilateración

Como en el ejemplo del apartado de Trilateración, cuando existen una intersección entre las 3 circunferencia, el método de intersección da mejores resultados que el de los mínimos cuadrados.

Es mejor ingresar las coordenadas reales de los nodos fijos. La función “Armar Topología” se puede aplicar en escenarios donde existan dificultades para conocer las coordenadas de los nodos fijos. En estos ejemplos, el error fue menor cuando se agregó las coordenadas de los nodos 2 y 3 manualmente.

Existen errores en las mediciones, depende de la interferencia existente. Una fuente de interferencia es la red WIFI de la Biblioteca pero su impacto no es tan fuerte, ya que se comprobó que los canales más utilizados por las redes WIFI estaban lo suficientemente separadas de los canales utilizados por el sistema de localización, por eso se implementó la posibilidad de consultar el canal actual de trabajo.

Los metros de error existente son aceptables si se considera que los nodos pueden tener un alcance de 500 metros con una tasa de error del 50%.

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES GENERALES

En este capítulo se presentan las conclusiones generales obtenidas durante el desarrollo de este proyecto, incluyendo dificultades y ventajas de trabajar con el kit de Jennic JN5148.

Además se mencionan las posibilidades de este tipo de redes en sistemas de localización geográfica en un futuro.

### **7.1 Conclusiones y Apuntes**

En este proyecto se analizan las posibilidades de implementar un sistema de localización con microcontroladores que usan el estándar IEEE 802.15.4 basado en el tiempo de vuelo de mensajes. Sin tener un hardware adicional y las librerías para manipular el transceptor de radio es muy difícil hacer una medición de tiempo de vuelo precisa. La ventaja de los microcontroladores del kit JN5148 es que pueden hacer estas mediciones con un margen de error aceptable, aunque está atado al uso de licencia de Jennic.

Se utilizó el tiempo de vuelo como método para medir distancias sobre la atenuación de la señal ya que presenta una mayor confiabilidad en un mayor alcance y permite tener un sistema escalable.

Al utilizar los módulos de alta potencia, el tiempo de vida de las baterías se ve reducido pero las placas tienen la posibilidad de alimentarse con corriente externa. Los nodos fijos pueden alimentarse con corriente externa ya que son inmóviles en el sistema.

Es mejor tener los nodos a una misma altura y con línea de vista. Si existen obstáculos entre sensores ya no se obtendrá el tiempo de vuelo correcto.

Los métodos utilizados para corregir los errores en la trilateración brindan buenos resultados. Si se busca una mayor precisión se puede utilizar la intersección de círculos, pero este método está supeditado a que las 3 circunferencias se intercepten, en cambio el ajuste por mínimos cuadrados siempre brindara un resultado aunque no sea tan preciso.

## 7.2 Líneas Futuras

Las líneas Futuras de este proyecto consisten en implementar mejoras en el sistema de localización:

La introducción de una mayor cantidad de nodos fijos ayudara a disminuir el error en la localización del nodo móvil. Se puede realizar una serie de mediciones que indiquen con qué cantidad de nodos fijos se puede obtener el error deseado.

Se puede plantear un sistema de localización en 3 dimensiones. En el ajuste de mínimos cuadrados se tendrían más ecuaciones, y en la intersección de círculos se tendrían esferas en vez de circunferencias.

Con el alcance de los nodos utilizando los módulos de alta potencia, el sistema de localización se puede combinar con los sensores de luminosidad, temperatura y humedad que brinda este Kit, ampliando así su campo de aplicación. Por ejemplo, un sistema de monitoreo de humedad en un campo de cultivo, que permita conocer los puntos en donde hay mayor humedad; un sistema localización de pacientes en un hospital; etc.

Los microcontroladores trabajan estrictamente con el estándar IEEE 802.15.4-2003, pero en el 2006 se aprobó un documento con el fin de aclarar ambigüedades del documento del 2003. En el 2007 el grupo de trabajo 4a introdujo una capa física adicional UWB (Ultra-wide band) a frecuencias de 3 a 5 GHz y de 6 a 10 GHz, y CSS (Chirp spread spectrum) para la frecuencia 2.45 GHz, con el fin de proveer una alternativa para la medición de distancias.

En la actualidad no existen placas de radio que trabajen con el estándar IEEE 802.15.4a, para un presente inmediato es más factible trabajar con microcontroladores que implementen un motor de tiempo de vuelo como los del kit JN5148, además se asegura su compatibilidad con otros microcontroladores que utilizan el estándar IEEE 802.15.4-2003.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, “802.15.4: *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)*”, Mayo 2003.
- [2]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, “802.15.4: *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)*”, Junio 2006.
- [3]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, “*Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANS), Amendment 1: Add Alternate PHYs*”, Marzo 2007.
- [4]. Blanch, Sebastian; Romeu, Jordi, “*Antenas*”, Edicions UPC, Septiembre 2002.
- [5]. E. E. Mantilla, C. R. Reyes, B. G. Ramo, “*IEEE 802.11 B and g WLAN Propagation Model using Power Density Measurements at ESPOL*”, 2010.
- [6]. Inverse Law Square, General. [En Línea] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/forces/isq.html>
- [7]. Lawrow, Ivan; Bate Stephen, “*Method and Apparatus for determining propagation delay*”, United States Patent Application Publication, Abril 2010.
- [8]. Patwari, Neal; Ash, Joshua; Kyperountas, Spyros; O. Hero III, Alfred; Moses, Randolph; Correal, Neiyer, “*Locating the Nodes*”, IEEE Signal Processing Magazine, Julio 2005.
- [9]. Sahinoglu, Zafer; Gezici, Sinan, “*Ranging in the IEEE 802.15.4a Standard*”, Mitsubishi Electric Research Laboratories, Diciembre 2006.
- [10]. Kaminsk, Alan, “*Trilateration*”, Marzo 2007.
- [11]. William S. Murphy Jr, “*Determination of a position using approximate distances and trilateration*”, Colorado School of Mines, Julio 2007.
- [12]. NXP Jennic, “*JN5148 Software Developer’s Kit Installation and User Guide (JN-UG-3064)*”, Noviembre 2010.
- [13]. NXP Jennic, Data Sheet: JN5148-001.
- [14]. NXP Jennic, Data Sheet: JN5148-001-Myy.



- [15]. NXP Jennic, *"DR1048 Sensor Board Reference Manual (JN-RM-2030)"*, Junio 2010.
- [16]. NXP Jennic, *"DR1047 Controller Board Reference Manual (JN-RM-2029)"*, Febrero 2009.
- [17]. NXP Jennic, *"Integrated Peripherals API User Guide (JN-UG-3066)"*, Julio 2010.
- [18]. NXP Jennic, *"Using JN5121 Timers (JN-AN-1032)"*, Noviembre 2006.
- [19]. NXP Jennic, *"Calculating 802.15.4 Data Rates (JN-AN-1035)"*, Agosto 2006.
- [20]. NXP Jennic, *"Co-existence of IEEE 802.15.4 at 2.4 GHz (JN-AN-1079)"*, Febrero 2008.
- [21]. NXP Jennic, *"Eclipse IDE User Guide (JN-UG-3063)"*, Mayo 2010.
- [22]. NXP Jennic, *"IEEE 802.15.4 Wireless Networks User Guide (JN-UG-3024)"*, Octubre 2006.
- [23]. NXP Jennic, *"Application Queue API Reference Manual (JN-RM-2025)"*, Septiembre 2006.
- [24]. NXP Jennic, *"Integrated Peripherals API Reference Manual (JN-RM-2001)"*, Diciembre 2009.
- [25]. NXP Jennic, *"802.15.4 Stack API Reference Manual (JN-RM-2002)"*, Septiembre 2008.
- [26]. NXP Jennic, *"IEEE 802.15.4 Application Development Reference Manual (JN-RM-2024)"*, Octubre 2008.
- [27]. NXP Jennic, *"JN5148-EK010 ZigBee PRO Evaluation Kit User Guide (JN-US-3062)"*, Marzo 2010.
- [28]. NXP Jennic, *"Time-of-Flight API User Guide (JN-US-3068)"*, Octubre 2009.
- [29]. NXP Jennic, *"JN51xx Flash Programmer User Guide (JN-UG-3007)"*, Octubre 2010.