



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA
LOCALIZACIÓN DE UN OBJETO EN MOVIMIENTO MEDIANTE ZIGBEE”**

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del título de

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN

Presentado por:

LENIN EDUARDO GUERRA RESUMEN

El objetivo del proyecto es diseñar e implementar un prototipo para la localización de un objeto en movimiento mediante ZigBee, sobre un área de trabajo de $18m^2$ en interiores, para que el usuario pueda controlar y verificar la posición del prototipo.

Para el diseño del prototipo se investigó el funcionamiento de la tecnología ZigBee y su comunicación con otros dispositivos, cuyo error de cálculo de la posición es de 25cm de radio

para ZigBee. En el desarrollo del prototipo se utilizó el método de triangulación de coordenadas para calcular la posición actual cada 2 segundos, 6 nodos de referencia, un nodo colocado en el prototipo y el coordinador, todos con tecnología ZigBee, conectados al puerto serie de una PC, mediante el programa diseñado, implementado permite visualizar la posición o trayectoria recorrida.

El sistema permite que el usuario al hacer la petición de ubicación al prototipo mediante la interfaz en la PC, el prototipo pide coordenadas y el indicador de potencia (RSSI) a los nodos de referencia, los que responden enviando su posición y el valor RSSI promedio; el prototipo con estos datos calcula mediante el algoritmo WCL, y devuelve a los nodos de referencia su posición actual, el número de nodos de referencia activados, las direcciones lógicas de los nodos de referencia más cercanos y el valor RSSI; esta información es retransmitida por el coordinador hacia el computador y visualizada mediante la interfaz por el usuario. Como valor agregado, se puede controlar al prototipo desde la misma interfaz; pudiendo realizar tareas remotas.

Los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento muestran un error relativo promedio del 20%, mismo que se encuentra dentro de los parámetros de error de ZigBee. De acuerdo a éstos resultados, el sistema funciona de manera correcta; porque localiza al prototipo con un error mínimo dentro del área de trabajo útil para el monitoreo y ubicación del mismo.

Se recomienda el uso del sistema con ZigBee en interiores con dimensiones de hasta 63.75x63.75m, para uso en exteriores y lugares más grandes, se pueden diseñar una malla con estas dimensiones en forma modular o utilizar tecnología GPS.

ALVEAR

JORGE RAMIRO VINUEZA GARCÍA

RIOBAMBA – ECUADOR

2010

DEDICATORIA

Después de toda una vida de estudios, este es el punto culminante, el proyecto representa un gran esfuerzo, que para mí no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de mi familia, lo más grande que tengo en este mundo.

Lenin.

Este proyecto de tesis va dedicado a todas las personas que en algún punto de mi vida supieron brindarme su apoyo, para mis compañeros con quienes compartimos grandes momentos en la politécnica, para los profesores que supieron no sólo compartir sus conocimientos, sino también generar interés en la carrera, para toda mi familia por su aliento constante, pero principalmente para mis padres, de los cuales me siento muy orgulloso, ya que con su sacrificio diario han servido como guía y fuente de inspiración.

Jorge.

| NOMBRE | FIRMA | FECHA |
|--|--------------|--------------|
| DR. ROMEO RODRIGUEZ | _____ | _____ |
| DECANO FACULTAD INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA | | |
| ING. PAUL ROMERO | _____ | _____ |
| DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA ELECTRÓNICA | | |
| ING. HUGO MORENO | _____ | _____ |
| DIRECTOR DE TESIS | | |
| ING. WILSON BALDEÓN | _____ | _____ |
| MIEMBRO DEL TRIBUNAL | | |
| LIC. CARLOS RODRIGUEZ | _____ | _____ |
| DIRECTOR CENTRO DE DOCUMENTACIÓN | | |
| NOTA DE LA TESIS | _____ | |

“Nosotros, Lenin Eduardo Guerra Alvear y Jorge Ramiro Vinueza García, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta tesis; y, el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.”

LENIN EDUARDO GUERRA ALVEAR

JORGE RAMIRO VINUEZA GARCÍA

TERMINOLOGÍA

| | |
|---------------------|---|
| PHY | Capa física. |
| PPDU | Unidad de protocolo de datos de capa PHY. |
| ZDO | ZigBee Device Object. |
| RSSI | Indicador de Nivel de potencia de señal recibida. |
| LQI | Índice de calidad del enlace. |
| ToA | Tiempo de llegada. |
| WCL | Cálculo del centroide. |
| WPAN | Redes inalámbricas de área personal. |
| ZC | Coordinador ZigBee. |
| ZR | Router ZigBee. |
| ZED | Dispositivo final ZigBee. |
| FFD | Dispositivo de funcionalidad completa. |
| PAN | Red de área personal. |
| RFD | Dispositivo de funcionalidad reducida. |
| LLC | Control de enlace lógico. |
| DSSS | Espectro ensanchado por secuencia directa. |
| OQPSK | Modulación por cuadratura en offset. |
| PAYLOAD | Carga de datos. |
| APS | Subnivel de soporte de aplicación. |
| ZigBee Stack | Pila de protocolos ZigBee. |

| | |
|--------------------|--|
| LR-WPAN | Redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transferencia. |
| SOC | Sistema en chip. |
| PSW | Palabra de estado de programa. |
| SFR | Registros de función especial. |
| ACC | Acumulador de instrucciones. |
| Scratch-pad | Registros temporales. |
| API | Application Programming Interface. |
| ZCL | ZigBee Cluster Library. |
| CTR | Counter mode encryption. |
| CSMA-CA | Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance. |
| CCM | Encryption using CTR with CBC-MAC. |
| MCPS MAC | Common Part Sublayer (data interface). |
| CBC-MAC | Cipher Block Chaining Message Authentication Code. |
| CAP | Contention Access Period. |
| AES | Advanced Encryption Standard encryption algorithm. |

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

| | |
|----------------------------------|----|
| 1. GENERALIDADES..... | 12 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 12 |
| 1.2 ANTECEDENTES..... | 14 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN..... | 15 |
| 1.4 OBJETIVOS..... | 16 |
| 1.4.1 OBJETIVO GENERAL | 16 |
| 1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | 16 |

CAPÍTULO II

| | |
|---|----|
| 2. FUNDAMENTO TEÓRICO..... | 17 |
| 2.1 LOCALIZACIÓN DE OBJETOS | 17 |
| 2.1.1 INTRODUCCIÓN | 17 |
| 2.1.2 TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN | 19 |
| 2.1.2.1 DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA POR ÍNDICE DE POTENCIA | 21 |
| 2.1.2.1.1 POTENCIA DE SEÑAL RECIBIDA (RSSI)..... | 21 |
| 2.1.2.1.2 CALIDAD DEL ENLACE (LQI)..... | 23 |
| 2.1.2.1.3 CÁLCULO DEL CENTROIDE (ALGORITMO WCL)..... | 25 |
| 2.1.3 APLICACIONES..... | 29 |
| 2.2 ZIGBEE | 29 |
| 2.2.1 USOS..... | 30 |
| 2.2.2 DISPOSITIVOS | 31 |
| 2.2.3 PROTOCOLO IEEE 802.15.4..... | 32 |
| 2.2.3.1 NIVEL FÍSICO | 33 |
| 2.2.3.2 NIVEL DE ENLACE DE DATOS | 35 |
| 2.2.3.3 ESPECIFICACIÓN ZigBee | 37 |
| 2.2.3.3.1 NIVEL DE RED..... | 37 |
| 2.2.3.3.2 NIVEL DE APLICACIÓN | 38 |
| 2.2.3.3.2.1 COMPONENTES PRINCIPALES..... | 38 |
| 2.2.4 HARDWARE Y SOFTWARE | 40 |
| 2.2.5 CONEXIÓN | 41 |
| 2.2.5.1 TOPOLOGÍAS DE RED | 41 |
| 2.2.5.2 ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS EN UNA RED ZIGBEE | 42 |
| 2.2.5.2.1 CON BALIZAS..... | 42 |
| 2.2.5.2.2 SIN BALIZAS | 43 |
| 2.2.6 FUTURO | 44 |
| 2.2.7 CRONOLOGÍA..... | 44 |

CAPÍTULO III

| | |
|--|----|
| 3. ANÁLISIS DEL PROYECTO | 46 |
| 3.1 ANÁLISIS PRELIMINAR | 46 |
| 3.2 DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO | 47 |
| 3.3 DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE..... | 47 |
| 3.3.1 CIRCUITO INTEGRADO CC2431 | 47 |
| 3.3.1.1 CARACTERÍSTICAS | 47 |
| 3.3.1.2 MÓDULO DE RADIO | 49 |
| 3.3.10 BUSCAR LAS COORDENADAS DE FRONTERA..... | 61 |
| 3.3.11 VALORES RSSI | 62 |
| 3.3.12 ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN | 63 |
| 3.3.2 FORMATO DE TRAMA | 51 |
| 3.3.3 RSSI / DETECCIÓN DE ENERGÍA | 52 |
| 3.3.4. INDICADOR DE CALIDAD DEL ENLACE (LQI) | 53 |

| | |
|--|-----|
| 3.3.5 MOTOR DE LOCALIZACIÓN | 54 |
| 3.3.6 OPERACIÓN DEL MOTOR DE LOCALIZACIÓN | 55 |
| 3.3.7 COORDENADAS DE REFERENCIA | 57 |
| 3.3.8 PARÁMETROS MEDIDOS | 58 |
| 3.3.8.1 PARÁMETRO A | 58 |
| 3.3.8.2 PARÁMETRO n | 59 |
| 3.3.9 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS | 60 |
| 3.4 SISTEMA DE LOCALIZACIÓN | 64 |
| 3.4.1 INTRODUCCIÓN | 64 |
| 3.4.2 TIPOS DE NODOS | 66 |
| 3.4.2.1 NODOS DE REFERENCIA | 66 |
| 3.4.2.2 NODO CIEGO | 67 |
| 3.4.3 HARDWARE DE LOCALIZACIÓN | 67 |
| 3.4.3.1 ENTRADAS | 68 |
| 3.4.3.2 SALIDAS | 69 |
| 3.4.4 INDICADOR DE POTENCIA DE SEÑAL RECIBIDA (RSSI) | 69 |
| 3.4.4.1 OFFSET | 70 |
| 3.4.4.2 LINEALIDAD | 70 |
| 3.4.4.3 PROPAGACIÓN TEÓRICA DE LA SEÑAL | 71 |
| 3.4.4.4 RSSI – CONSIDERACIONES PRÁCTICAS | 72 |
| 3.4.5 PARÁMETROS DE INFLUENCIA | 74 |
| 3.4.5.1 POSICIÓN EXACTA | 78 |
| 3.5 A – VALOR RSSI MEDIDO A UN METRO DEL TRANSMISOR | 79 |
| 3.5.1 n – COEFICIENTE DE PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL | 81 |
| 3.5.2 NÚMERO DE NODOS DE REFERENCIA | 83 |
| 3.5.3 ALGORITMOS DE SOFTWARE | 83 |
| 3.5.4 SELECCIÓN DE LOS MEJORES NODOS DE REFERENCIA | 84 |
| 3.5.4.1 EXTENSIÓN DEL ÁREA DE COBERTURA | 84 |
| 3.5.5 INDICACIÓN DE NIVEL O PISO | 86 |
| 3.5.6 SISTEMA DE CONTROL CENTRAL | 89 |
| 3.6 CÁLCULO DE LA DISTANCIA EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS | 91 |
| CAPÍTULO IV | |
| 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO | 94 |
| 4.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA | 94 |
| 4.2 DISEÑO DEL SOFTWARE | 96 |
| 4.2.1 PROGRAMACIÓN DE LOS MÓDULOS | 96 |
| 4.2.2 PARÁMETROS DE ENTRADA Y SALIDA | 97 |
| 4.2.2.1 PARÁMETROS DE ENTRADA | 98 |
| 4.2.2.2 PARÁMETROS DE SALIDA | 98 |
| 4.2.3 DEFINICIÓN DEL ENTORNO | 98 |
| 4.2.4 CÁLCULO DE LA POSICIÓN | 99 |
| 4.2.5 INTERFAZ DE USUARIO | 100 |
| 4.3. DISEÑO DEL CARRO A CONTROL REMOTO (ACTUADOR) | 106 |
| 4.4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS DE HARDWARE | 110 |
| 4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL ACTUADOR | 107 |
| 4.5 LOCALIZACIÓN DE BALIZAS | 111 |
| 4.5.1 PROBLEMAS EN LA PRÁCTICA CON RSSI | 116 |
| 4.6 INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO | 111 |
| 4.7 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO | 113 |
| CAPÍTULO V | |
| 5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 117 |
| 5.1 RESULTADOS OBTENIDOS | 117 |
| 5.2 PORCENTAJE DE ERROR | 119 |

| | |
|---|------------|
| 5.3 PRUEBAS DE CAMPO CON OTRAS TECNOLOGÍAS | 119 |
| 5.3.1 PRUEBA CON BLUETOOTH | 119 |
| 5.3.2 PRUEBAS CON TARJETAS INALAMBRICAS | 121 |

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BILBIOGRAFÍA

ANEXOS

dBm

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura II.1a. Potencia versus distancia..... | 22 |
| Figura II.1b. Potencia recibida como RSSI..... | 22 |
| Figura II.2. Potencia de señal recibida con un nodo sensor Chipcon CC1010. | 23 |
| Figura II.3. LQI vs. Distancia entre dos nodos sensores zigbee CC2420DB en 20 veces. | 24 |
| Figura II.4. Simulación del error de localización vs. Rango de transmisión..... | 28 |
| Figura II.5. Aplicaciones de ZigBee..... | 29 |
| Figura II.6. Arquitectura WPAN..... | 33 |
| Figura II.7. Pila de protocolos 802.15.4..... | 36 |
| Figura II.8. Coexistencia en dominio de frecuencia de ZigBee. | 37 |
| Figura II.9. Pila de protocolos (ZigBee stack)..... | 40 |
| Figura III.10. Formato de trama IEEE 802.15.4..... | 51 |
| Figura III.11. Gráfico de potencia recibida del módulo CC2431. | 53 |
| Figura III.12. Algoritmo del motor de localización. | 56 |
| Figura III.13. Atenuación vs. Distancia logarítmica..... | 61 |
| Figura III.14. Sistema de detección de la posición. | 65 |
| Figura III.15. Vista simplificada en la capa de software. | 68 |
| Figura III.16. Valores típicos RSSI vs. Potencia de entrada. | 71 |
| Figura III.17. RSSI vs. Distancia para $A = 40$ y $n = 3$ | 72 |
| Figura III.18. Valor RSSI teórico. | 74 |
| Figura III.19. Configuración de medición para determinar los parámetros A y n | 75 |
| Figura III.20. Medida de atenuación con el método de una regresión lineal. | 76 |
| Figura III.21. Nodos de referencia usados en el ejemplo. | 77 |
| Figura III.22. Nodos de referencia posicionados en grilla. | 78 |
| Figura III.23. Medida de la posición exacta..... | 79 |
| Figura III.24. Midiendo A | 79 |
| Figura III.25. RSSI medido a una distancia de un metro. | 80 |
| Figura III.26. A vs. Posición calculada. | 81 |
| Figura III.27. n vs. Distancia..... | 82 |
| Figura III.28. Mapeo de 64x64 metros. | 86 |
| Figura III.29. Posición en una red tridimensional. | 87 |
| Figura III.30. Interfaz entre la red de radios y una PC. | 89 |
| Figura III.31. Valores de RSSI desde varios nodos de referencia. | 91 |
| Figura III.32. Relación entre RSSI y d | 93 |
| Figura IV.33. Algoritmo de funcionamiento del sistema a implementar. | 97 |
| Figura IV.34. Algoritmo del motor de localización. | 97 |
| Figura IV.35. Pantalla principal para localizar el objeto en movimiento. | 100 |
| Figura IV.36. Ingreso de dimensiones del área de trabajo en metros..... | 100 |
| Figura IV.37. Determinar número de nodos de referencia. | 101 |
| Figura IV.38. Direcciones lógicas de los nodos de referencia..... | 101 |
| Figura IV.39. Coordenadas ingresadas por el usuario. | 102 |
| Figura IV.40. Determinar número de nodos ciegos. | 102 |
| Figura IV.41. Dirección lógica del nodo ciego..... | 102 |
| Figura IV.42. Ingreso de parámetros A y n | 103 |
| Figura IV.43. Botón de inicio de la localización. | 103 |
| Figura IV.44. Visualización de nodos en pantalla con ejes coordenados. | 104 |
| Figura IV.45. Coordenadas de ubicación de nodos ciegos. | 104 |
| Figura IV.46. Cálculo de A en el nodo ciego. | 105 |
| Figura IV.47. Botones para guardar ó cargar trayectorias. | 105 |
| Figura IV.48. Consola de mando del actuador con el nodo ciego. | 106 |
| Figura IV.49. Algoritmo de control de actuador..... | 106 |
| Figura IV.50. Circuito para carro a control remoto..... | 107 |
| Figura IV.51. Diseño de la placa del circuito a control remoto. | 108 |

| | |
|--|------------|
| Figura IV.52. Placa en 3D..... | 108 |
| Figura IV.53. Pistas terminadas..... | 109 |
| Figura IV.54. Placa terminada..... | 109 |
| Figura IV.55. Chasis de juguete..... | 110 |
| Figura IV.56. Actuador para pruebas sin carcasa..... | 110 |
| Figura IV.57. Plano teórico del área de trabajo..... | 111 |
| Figura IV.58. Instalación de las balizas en campo..... | 112 |
| Figura IV.59. Medición del parámetro A en campo..... | 112 |
| Figura IV.60. Secuencia de establecimiento de red con los diferentes nodos..... | 113 |
| Figura IV.61. Nodo coordinador de red ID 1757..... | 114 |
| Figura IV.62. Interfaz con nodos: de referencia y ciego..... | 115 |
| Figura IV.63. Trayectoria detectada por el sistema..... | 115 |
| Figura V.64. Posiciones de los 6 nodos de referencia..... | 118 |
| Figura V.65. Interfaz del sistema sin interferencia de bluetooth..... | 120 |
| Figura V.66. Interfaz de programa al momento de prender bluetooth..... | 120 |
| Figura V.67. Interfaz del sistema sin interferencia de tarjetas inalámbricas..... | 121 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|------------|
| <i>Tabla II.I. Banda de frecuencias y rata de bits para ZigBee basado en estándar IEEE 802.15.4</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabla II.II. Características de Zigbee</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabla II.III. Formato de trama PPDU basado en estándar IEEE 802.15.4</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabla III.IV. Parámetro n tabla de consulta.</i> | <i>59</i> |
| <i>Tabla III.V. Entradas necesarias para el HW de localización.</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabla III.VI. Salidas del sistema.</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabla III.VII. Posiciones concernientes a las medidas de RSSI.</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla III.VIII. A y n posibles.</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla III.IX. Parámetros calculados con A, a un metro de distancia.</i> | <i>77</i> |
| <i>Tabla III.X. Nodos de ejemplo.</i> | <i>77</i> |
| <i>Tabla III.XI. Dimensiones.</i> | <i>84</i> |
| <i>Tabla IV.XII. Mensajes de salida.</i> | <i>95</i> |
| <i>Tabla IV.XIII. Mensajes de entrada.</i> | <i>96</i> |
| <i>Tabla IV.XIV. Coordenadas de nodos de referencia.</i> | <i>96</i> |
| <i>Tabla IV.XV. Dirección lógica de nodo ciego.</i> | <i>97</i> |
| <i>Tabla IV.XVI. Valores de parámetros A y n.</i> | <i>98</i> |
| <i>Tabla IV.XVII. Vector de valores, posiciones Xn, Yn.</i> | <i>98</i> |
| <i>Tabla IV.XVIII. Condiciones de funcionamiento del circuito.</i> | <i>106</i> |
| <i>Tabla V.XIX. Coordenadas de nodos de referencia.</i> | <i>117</i> |
| <i>Tabla V.XX. Coordenadas reales vs. Coordenadas calculadas.</i> | <i>118</i> |
| <i>Tabla V.XXI. Porcentaje de errores.</i> | <i>119</i> |

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

La función de este proyecto es la de monitorear la posición y movimientos de un objeto en un entorno preestablecido. Nos basamos en el estándar IEEE 802.15.4, el cual utiliza varios parámetros de medición como, el Indicador de potencia de la señal recibida (*Received Signal Strength Indicator* RSSI) que es utilizado para determinar la calidad de comunicación entre nodos, al instalar un nodo ZigBee al objeto y ubicar un número de nodos en posiciones conocidas en un entorno determinado.

El indicador de potencia de la señal recibida puede ser utilizado para determinar la posición de dicho objeto mediante la técnica de multilateración con la mayor precisión

posible, el sistema funcionará recolectando información de los nodos de referencia, la cual será procesada en el nodo del objeto, los resultados son enviados entonces al nodo coordinador de la red ZigBee que estará conectado a una PC, los resultados finales, así como ciertos parámetros de configuración podrán ser visualizados y manipulados por medio de una interfaz de usuario.

ZigBee ofrece una solución más barata y mucho más eficiente a nivel de energía, eliminando la necesidad de instalar cables de corriente o el recambio de baterías con cierta periodicidad, además puede cubrir una extensión más amplia de terreno a diferencias de otras tecnologías de similares características.

1.2. ANTECEDENTES

La localización de objetos mediante balizas es utilizada en entornos restringidos, ubicando un determinado número de balizas en posiciones conocidas y aplicando la multilateración para determinar la distancia entre cada una de éstas y el objetivo para así determinar su posición. ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. En principio, el ámbito donde se prevé que esta tecnología cobre más fuerza es en domótica debido a diversas características que lo diferencian de otras tecnologías como: bajo consumo, topología de red en malla y su fácil integración (se pueden fabricar nodos con muy poca electrónica).

Se espera que los módulos ZigBee sean los transmisores inalámbricos más baratos de la historia, y además producidos de forma masiva. Tendrán un coste aproximado de alrededor de los 6 euros, y dispondrán de una antena integrada, control de frecuencia y una pequeña batería. Ofrecerán una solución tan económica porque la radio se puede fabricar con muchos menos circuitos analógicos de los que se necesitan habitualmente.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La automatización tanto en las industrias como en los hogares actuales requiere la localización de objetos móviles en un entorno conocido, así como el reconocimiento, manipulación e intercambio de diferentes parámetros de información. En la actualidad un método muy utilizado para la localización de objetos en exteriores es el sistema de posicionamiento global GPS, pero además de ser algo costoso, tiene mayor aplicación en exteriores con un margen de error de algunos metros, por lo que su precisión no es muy útil en espacios interiores como hogares, edificios o plantas industriales. Por estos motivos existe la necesidad de implementar otros métodos basados en sistemas que por un lado no representen un costo elevado de implementación y por otro lado sean más precisos y confiables.

Dispositivos de radiofrecuencia son ideales para implementar proyectos de éste tipo, específicamente una tecnología emergente denominada ZigBee, desarrollada para la comunicación inalámbrica, con un bajo consumo de energía, alcance aceptable y costos relativamente bajos. Con este proyecto se pretende explorar más a fondo la tecnología ZigBee y las ventajas que ésta ofrece en aplicaciones de automatización, principalmente en la localización de objetos en movimiento en entornos interiores, se usará el programa IAR Embedded Workbench para la programación de los circuitos integrados y el programa Matlab para la implementación de la interfaz de usuario.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un prototipo para la localización de un objeto en movimiento mediante ZigBee.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Investigar el funcionamiento de la tecnología de comunicaciones inalámbricas ZigBee.
- Investigar acerca de los métodos de localización de objetos.
- Diseñar un programa que permita visualizar el objeto en movimiento e interactuar con los módulos de transmisión y recepción.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 LOCALIZACIÓN DE OBJETOS

2.1.1 INTRODUCCIÓN

En la localización se distinguen tres problemas fundamentales. El primero de ellos es resolver la localización a partir de una posición inicial conocida. La solución consiste en estimar la posición final del dispositivo compensando los errores odométricos incrementales que acumulan los encoders del dispositivo. El segundo problema, es la localización a partir de una posición inicial desconocida. Aquí es donde el dispositivo debe manejar múltiples hipótesis a través de diferentes técnicas para determinar su posición y por ello los errores de estimación son mayores que en el caso anterior. En último lugar se encuentra la localización de varios dispositivos. Este problema consiste

en resolver la localización de un grupo de dispositivos y que puede ser más interesante si éstos pueden detectarse entre sí ya que existirían dependencias estadísticas en las estimaciones individuales de cada dispositivo.

La miniaturización creciente de componentes electrónicos y los avances en la tecnología de comunicación moderna resultan en el desarrollo dispositivos pequeños, baratos e inteligentes. Estos dispositivos llamados nodos, constan de sensores, actuadores, un procesador de baja potencia, memoria, y un módulo de comunicación. Los nodos miden las condiciones del ambiente, pre-calculan, agregan y transmiten estos datos a una estación base. Miles de estos nodos constituyen una red de sensores inalámbricos, para monitorear terrenos grandes inaccesibles.

El rendimiento de procesador y la energía disponible en cada nodo sensor son altamente limitados por su tamaño físico. Sin embargo la comunicación intensiva y tareas de cálculo son viables. Así, los algoritmos en los sensores de red, están sujetas a: requerimientos estrictos, cobertura, consumo de memoria reducido, comunicación y tiempo de procesamiento.

Como consecuencia de la distribución estocástica de todos los nodos en la fase de despliegue, una determinación de la posición del nodo es requerida. Determinar el lugar de todos los sensores de la red es un desafío verdadero. Identificar las coordenadas exactas de nodos sensores (también llamados nodos desconocidos) requiere medir una distancia, por ejemplo: medir el tiempo de llegada (Toa) o la

diferencia del tiempo llegada (TDoA). Las dificultades en cuanto a la medición del tiempo resultan de la sincronización de los dispositivos involucrados, así como el esfuerzo matemático de calcular la posición.

Medir la *Potencia de la señal recibida* (RSS) ofrece una posibilidad de determinar la distancia con un esfuerzo mínimo. Las soluciones existentes, basadas en este método RSS no produce resultados muy precisos.

Un buen algoritmo de localización debe calcular lo más rápido posible y debe ser resistente a las influencias ambientales tanto como las distancias imprecisas. Un algoritmo que combina las condiciones antes mencionadas es el *Localizador del centroide de peso* (WCL) en combinación con ZigBee.

2.1.2 TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN

Existe una gran cantidad de técnicas de localización que intentan resolver el problema de la localización sin el uso de sensores específicos:

- Localización con balizas: esta técnica permite localizar al objeto en un entorno restringido mediante el emplazamiento específico de un determinado número de balizas con posiciones conocidas. Para estimar la posición se puede utilizar la triangulación basándose en el ángulo con que se ven las balizas y la trilateración basándose en la distancia a las balizas.

- Los filtros de Kalman: son otra técnica que trata de estimar recursiva y periódicamente la posición de mínima varianza fusionando información parcial e indirecta sobre localización. Su principal limitación es que es una técnica unimodal y exclusivamente gaussiana. Esta técnica no soporta bien el ruido de lecturas sensoriales ni entornos dinámicos y no es capaz de manejar múltiples hipótesis.
- El *scan matching*: es otra técnica que utiliza mapas locales para compararlos con lecturas sensoriales alineando estas lecturas con los diferentes mapas en posiciones cercanas a la que creemos que está el dispositivo, necesitando para ello una estimación de la posición inicial del dispositivo representada como una distribución gaussiana que se va actualizando con las lecturas sensoriales,
- Localización probabilística: es adecuada para interiores ya que incorpora incertidumbre de acciones y observaciones que se acoplan a la incertidumbre que muestran los sensores. Este tipo de localización consiste en determinar la probabilidad de que el objeto se encuentre en una determinada posición a través de sus lecturas sensoriales y movimientos a lo largo del tiempo. A cada posible posición se le asocia una probabilidad reflejando la verosimilitud de ser la posición actual del objeto. Esta probabilidad se va actualizando con la incorporación de nuevas lecturas y movimientos del objeto. Estas técnicas nos permiten localizar al objeto aún desconociendo su posición inicial permitiendo representar situaciones ambiguas que se irán desambiguando posteriormente.

La eficiencia de estas técnicas generalmente depende del tamaño del emplazamiento.

2.1.2.1 DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA POR ÍNDICE DE POTENCIA DE SEÑAL RECIBIDA (RSSI) E ÍNDICE DE CALIDAD DEL ENLACE (LQI)

2.1.2.1.1 POTENCIA DE SEÑAL RECIBIDA (RSSI)

Muchos de los algoritmos de localización requieren una distancia para calcular la posición del dispositivo desconocido. Una posibilidad de adquirir una distancia es midiendo la fuerza de señal recibida de la señal de radio entrante. La idea atrás de la RSS es que variando la potencia de transmisión en el dispositivo transmisor (P_{TX}) directamente afecta la potencia recibida en el dispositivo receptor (P_{RX}). De acuerdo con la ecuación de transmisión en el espacio libre de Friis (Ec. I) , la potencia de la señal detectada decrementa cuadráticamente con la distancia para el transmisor:

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (\text{Ec. I})$$

Donde:

P_{TX} = Potencia de transmisión

P_{RX} = Potencia recibida en receptor

G_{TX} = Ganancia de transmisión

G_{RX} =Potencia de recepción

λ = Longitud de onda

d= distancia entre transmisor y receptor

En dispositivos embebidos, la potencia recibida es convertida a un índice de potencia de señal recibida (RSSI) definida como la proporción del potencia recibida con respecto a la potencia de referencia cuyo valor es $P_{ref}=1mW$.

$$RSSI = 10 * \log \frac{P_{RX}}{P_{ref}} [dBm] \quad (Ec. II)$$

Un incremento en la potencia recibida incrementa el índice RSSI. La Figura II.1a y b ilustra la relación entre la potencia recibida y el RSSI, graficando la relación RSSI y la distancia el gráfico es simétrico con relación a la abscisa; la distancia d es inversamente proporcional al RSSI.

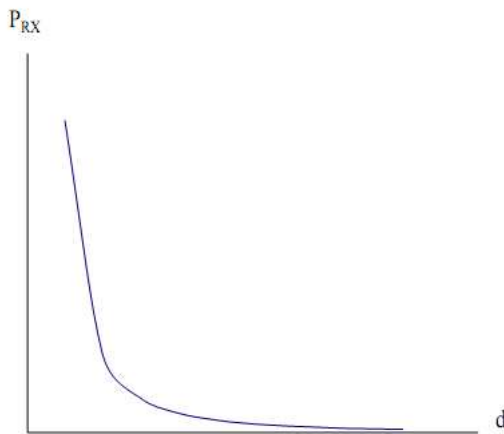
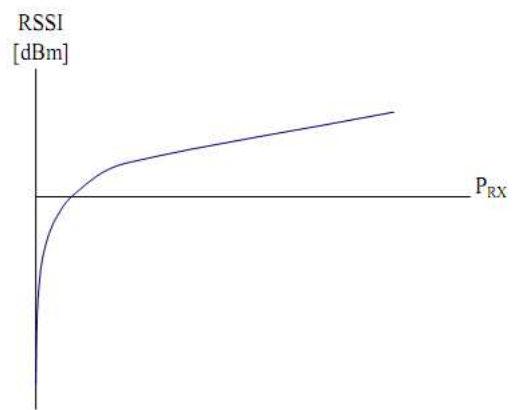


Figura II.1a. Potencia versus distancia



II.1b. Potencia recibida como RSSI

En escenarios prácticos la distribución ideal no es aplicable, porque existen varios tipos de interferencia como por ejemplo:

- Reflexión de objetos metálicos
- Superposición de campos electro-magnéticos
- Límites de difracción
- Refracción por medios con diferente velocidad de propagación
- Polarización de campos electro-magnéticos

Estos efectos degradan significativamente la calidad del índice RSSI, por lo tanto en muchas aplicaciones, el índice RSSI tiene una varianza elevada y una entropía baja.

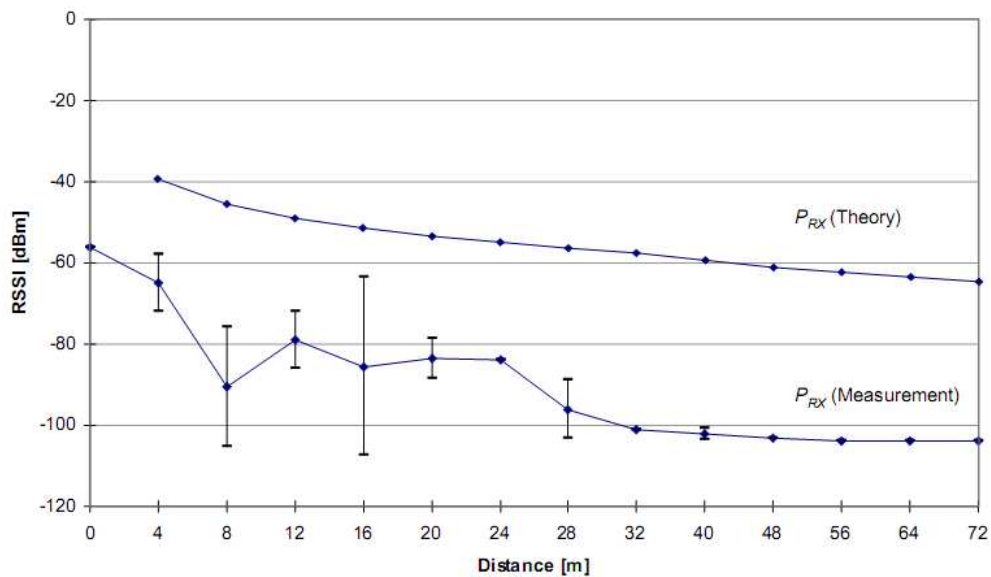


Figura II.2. Potencia de señal recibida con un nodo sensor Chipcon CC1010.

2.1.2.1.2 CALIDAD DEL ENLACE (LQI)

Las interferencias antes mencionadas durante la transmisión de paquetes de radio reducen la calidad de RSSI extremadamente. Por lo tanto, la localización de *nodos*

desconocidos es imprecisa. Otro método para determinar la distancia, está basado en el índice de calidad del enlace (LQI) de la transmisión. Éste representa un número de retransmisiones requeridas para recibir un paquete de radio correctamente en el receptor.

La figura II.3 muestra el indicador de calidad de enlace de los dispositivos ZigBee basados en dispositivos CC2420. La prueba consta de dos nodos sensores. Un nodo sirve de dispositivo de referencia y transmite paquetes constantemente en un bucle. El otro un dispositivo desconocido registra el LQI de los paquebotes de radio entrantes y envía el LQI al computador conectado. Durante el proceso de medición, la posición del dispositivo transmisor varió entre 0 y 40m y fue repetido 20 veces. Cada proceso de medición fue llevado a cabo con cuatro nodos desconocidos diferentes.

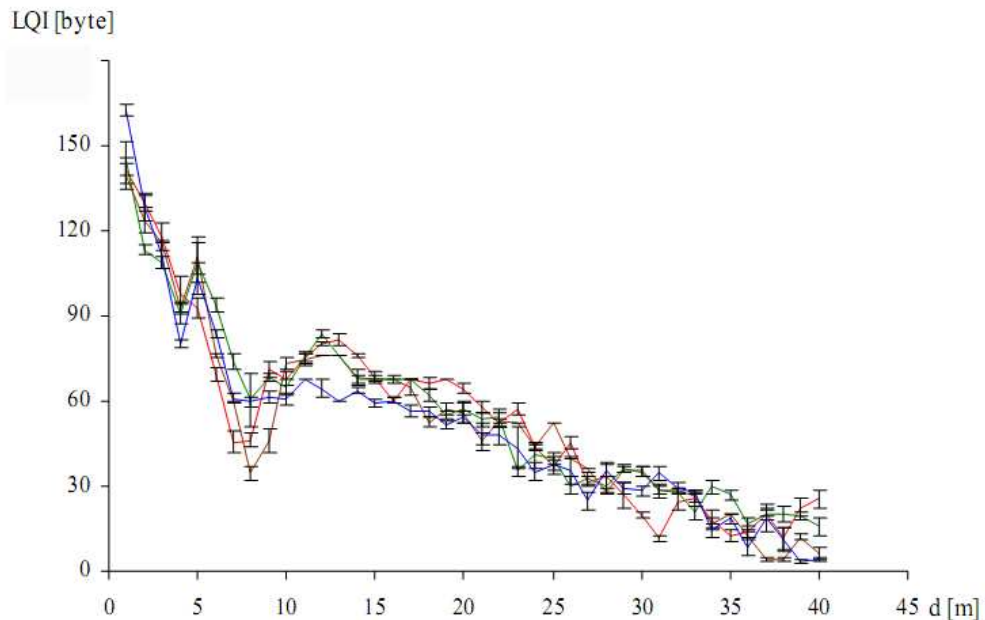


Figura II.3. LQI vs. Distancia entre dos nodos sensores ZigBee CC2420DB en 20 veces.

El LQI determinado es visualizado en la Figura II.3. Nada sorprendente, la calidad del enlace de los paquetes entrantes se reduce cuando se incrementa la distancia. El gráfico muestra satisfactoriamente la periodicidad con la que se determina la distancia. Las mediciones de LQI en todos los cuatro nodos desconocidos muestran curvas características y ofrecen una correlación entre LQI y la distancia.

2.1.2.1.3 CÁLCULO DEL CENTROIDE (ALGORITMO WCL)

Una red de sensores con un número total de k nodos consta con u nodos sensores y b nodos referencia ($b \ll u$). Los nodos de referencia están equipados con el equipo más eficiente y un sistema de localización (por ejemplo: GPS), en cualquier lugar que se encuentren son capaces de determinar su localización exactamente. Los nodos sensores constan de equipo mínimo y desconocen su posición, inicialmente. Durante el desarrollo, los nodos sensores y los desconocidos son distribuidos uniformemente.

Algoritmos como el WCL calculan el centroide para determinar su posición. En la primera fase todos los nodos referencia envían su posición $B_j(x, y)$ a todos los nodos sensores dentro de su rango de transmisión; la segunda fase todos los nodos sensores calculan su propia $P_i'(x, y)$ por determinación del centroide desde todas las n posiciones de los nodos de referencia a su alcance (Ecuación III). El error de localización $f_i(x, y)$ es definido como la distancia entre la posición exacta $B_j(x, y)$ y la posición aproximada $P_i'(x, y)$ de un nodo sensor (Ecuación IV).

$$P_i'(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n B_j(x, y) \quad (\text{Ec. III})$$

$$f_i(x, y) = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2} \quad (\text{Ec. IV})$$

Mientras que el algoritmo CL funciona solamente determinando el promedio de las coordenadas de dispositivos de referencia para localizar dispositivos ciegos; WCL usa pesos que aseguran una localización mejorada. Empezando desde el cálculo del centroide aritmético (Ec. III), la fórmula para calcular con WCL es derivada. Expresando el término n como la sumatoria de unos y la multiplicación de B_j con unos, la ecuación III es ampliada a la fórmula de WCL (Ecuación V):

$$P_i' = \frac{1}{\sum_{j=1}^n 1} * \sum_{j=1}^n 1 * B_j(x, y) \quad (\text{Ec. V})$$

Después de reemplazar los unos por funciones de peso w_{ij} , la ecuación es:

$$P_i'' = \frac{\sum_{j=1}^n (w_{ij} * B_j(x, y))}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (\text{Ec. VI})$$

El peso w_{ij} es una función dependiente de la distancia y de las características del nodo sensor receptor. Cada escenario de aplicación requiere un peso diferente debido a condiciones de ambiente cambiantes. En WCL, las distancias más cortas son más pesadas que las distancias más grandes. Por lo tanto, w_{ij} y d_{ij} son inversamente proporcionales. Como una aproximación, la correlación es equivalente a la función $1/d$.

Pesar distancias más grandes que son marginalmente más livianas, la distancia es incrementada en un ángulo más grande que g . Para una onda de expansión concéntrica con una característica lineal del receptor y una densidad uniforme de los nodos referenciales, constituimos la ecuación VII:

$$w_{ij} = \frac{1}{(d_{ij})^g} \quad (\text{Ec. VII})$$

Donde:

d_{ij} = distancia entre los nodo B_{ij} y el nodo P_i

g = grados

El grado g tiene que asegurar que los nodos lejanos influyan en la determinación de la posición. Además, en un caso muy alto de g , la posición aproximada se desplaza a la posición del nodo de referencia más cercano y la posición de error $f_i(x, y)$ aumenta. Por lo tanto, un mínimo de $f_i(x, y)$ existe, donde g es óptimo.

Para determinar el g óptimo, simulamos una red de sensores equipados completamente de 30mx30m de dimensión, ubicamos los sensores de referencia en las esquinas. Por lo tanto, los nodos se alinean en forma de rejilla y la distancia entre ellos es $f_q = 30\text{m}$. La figura II.4 demuestra los errores de localización dependiendo del alcance de transmisión y 6 funciones de peso diferentes. Las funciones de peso solamente difieren en los grados g . La simulación muestra satisfactoriamente varios errores de localización mínimos dependiendo del alcance de transmisión y los grados.

El error mínimo de localización existe en $tr=10$ y una función de peso $w=1/d$. Por lo tanto, un rango de transmisión muy pequeño y un grado $g=1$ produce mejores resultados de localización.

Pero, en otras configuraciones por ejemplo: $tr=30m$, y un $g=3$ rinden mejores resultados. Por lo tanto antes de empezar el proceso de localización un análisis intensivo de los rangos variables de la potencia de transmisión y las dimensiones de la red son necesarias para conseguir errores mínimos.

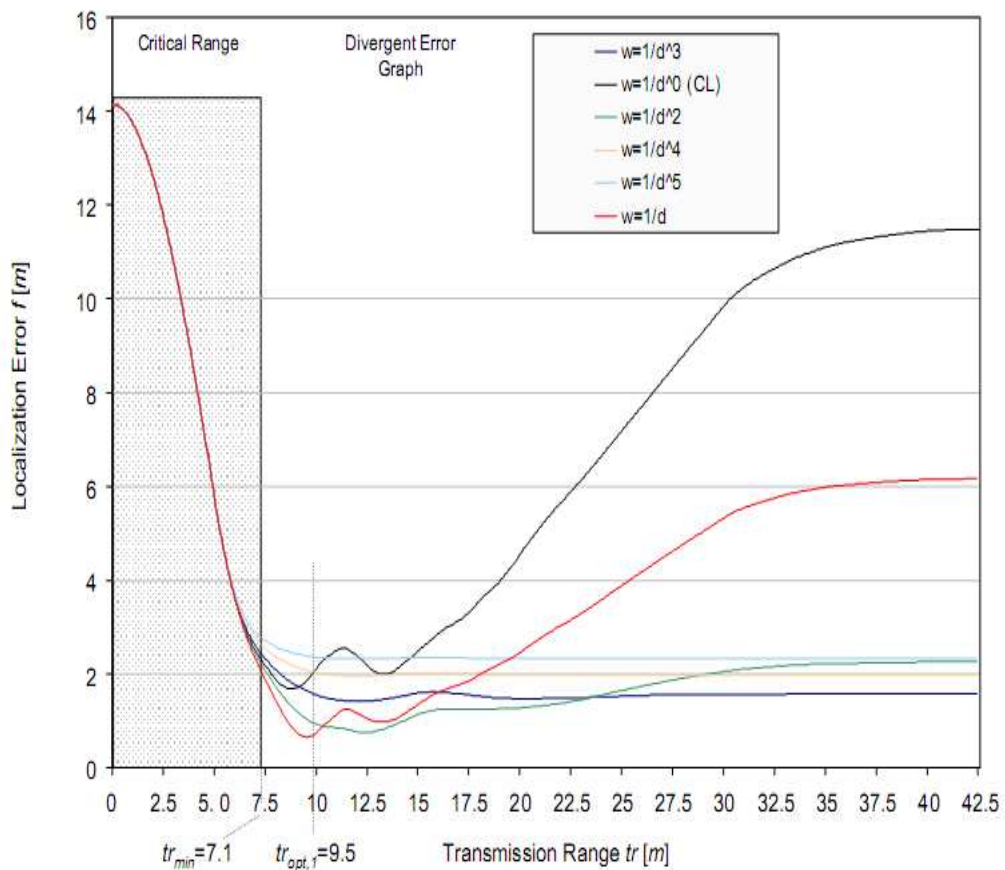


Figura II.4. Simulación del error de localización vs. Rango de transmisión tr con funciones de diferente peso en una red de sensores equipada completamente con 4 sensores de referencia ($d=30*30m$, $f_q=10$)

2.1.3 APLICACIONES

El mercado de ZigBee tiene las siguientes aplicaciones:

- Control y automatización del hogar
- Seguridad de edificios y monitoreo
- Telemetría:
 - Industrial y
 - Médica
- Control industrial



Figura II.5. Aplicaciones de ZigBee

2.2 ZIGBEE

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (*wireless*

personal area network, WPAN). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

En principio, el ámbito donde se prevé que esta tecnología cobre más fuerza es en domótica. La razón de ello son diversas características que lo diferencian de otras tecnologías:

- Su bajo consumo
- Su topología de red en malla
- Su fácil integración (se pueden fabricar nodos con muy poca electrónica).

2.2.1 USOS

Los protocolos ZigBee están definidos para su uso en aplicaciones embebidas con requerimientos muy bajos de transmisión de datos y consumo energético. Se pretende su uso en aplicaciones de propósito general con características auto organizativas y bajo costo (redes en malla, en concreto). Puede utilizarse para realizar control industrial, albergar sensores empotrados, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo o intrusos o domótica. La red en su conjunto utilizará una cantidad muy pequeña de energía de forma que cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación.

2.2.2 DISPOSITIVOS

En una red ZigBee podemos encontrar y detectar tres tipos de dispositivos ZigBee diferentes, según el papel que desarrollen en nuestra red. Estos dispositivos son los siguientes:

- **Coordinador ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC):** Consiste en el dispositivo más completo de los tres, puesto que sus funciones son las de controlar y coordinar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos. Debemos encontrar obligatoriamente un ZC en cada red ZigBee.
- **Router ZigBee (ZigBee Router, ZR):** Su función es la de interconectar los dispositivos separados en la topología de la red, además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario.
- **Dispositivo Final (ZigBee End Device, ZED):** En este dispositivo queda representado las principales características de ZigBee, como son el bajo consumo y el bajo coste. Los ZED poseen la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre, que ya puede ser el Router ZigBee o el Coordinador ZigBee, pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. Es por ello, que este tipo de dispositivo puede estar “dormido” la mayor parte del tiempo aumentando así la vida media de sus

baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por ello significativamente más barato.

2.2.3 PROTOCOLO IEEE 802.15.4

Antes de estudiar la especificación ZigBee, trataremos los niveles definidos por el estándar IEEE 802.15.4 específico para conexiones inalámbricas tales como la nuestra. El estándar no define niveles superiores ni subcapas de interoperabilidad. Existen extensiones, como la especificación ZigBee, que complementan al estándar en la propuesta de soluciones completas.

IEEE 802.15.4 es la base sobre la que se define la especificación de ZigBee, cuyo propósito es ofrecer una solución completa para este tipo de redes construyendo los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar no cubre. El propósito del estándar es definir los niveles de red básicos para dar servicio a un tipo específico de Red Inalámbrica de Área Personal (WPAN) centrada en la habilitación de comunicación entre dispositivos con bajo coste y velocidad. Se enfatiza el bajo coste de comunicación con nodos cercanos y sin infraestructura, o con muy poca, para favorecer aún más el bajo consumo.

En su forma básica se concibe un área de comunicación de 10 metros con una tasa de transferencia de 250kbps. Como se ha indicado, la característica fundamental de 802.15.4 entre las WPAN's es la obtención de costes de fabricación excepcionalmente

bajos por medio de la sencillez tecnológica, sin perjuicio de la generalidad o la adaptabilidad. Entre los aspectos más importantes se encuentra la adecuación de su uso para tiempo real por medio de slots 2 de tiempo garantizados, evitación de colisiones por CSMA/CA y soporte integrado a las comunicaciones seguras. También se incluyen funciones de control de consumo de energía como calidad del enlace y detección de energía.

2.2.3.1 NIVEL FÍSICO

El nivel físico (PHY) proporciona el servicio de transmisión de datos sobre el medio físico propiamente dicho, así como la interfaz con la entidad de gestión del nivel físico, por medio de la cual se puede acceder a todos los servicios de gestión del nivel y que mantiene una base de datos con información de redes de área personal relacionadas. De esta forma, PHY controla el transceptor de radiofrecuencia y realiza la selección de canales junto con el control de consumo y de la señal (Figura II.6).

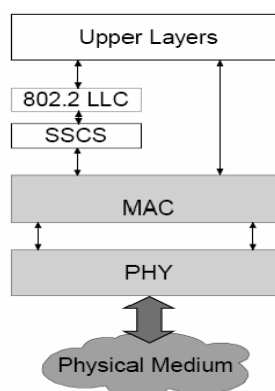


Figura II.6. Arquitectura WPAN

Como ya se ha comentado con anterioridad, se opera en una de las tres posibles bandas de frecuencia siguientes:

Tabla II.1. Banda de frecuencias y rata de bits para ZigBee basado en estándar IEEE 802.15.4

| PHY (Mhz) | Banda de Frecuencias(Mhz) | Modulación | Rata de bits | Número De Canales | Región |
|-----------|---------------------------|------------|--------------|-------------------|---------------|
| 868/915 | 868-868.6 | BPSK | 20 | 1-3 | Europa |
| | 902-928 | BPSK | 40 | 10-30 | USA |
| 2450 | 2400-2483.5 | O-QPSK | 230 | 1-16 | Todo el mundo |

La versión original del estándar (2003) especifica dos niveles físicos basados en Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum). Uno de los dos niveles físicos trabaja en las bandas de 868/915MHz con tasas de transferencia de entre 20 y 40kbps; el otro nivel trabaja en la banda de 2450MHz con hasta 250kbps. Posteriormente se realizó una revisión en el 2006 incrementando las tasas de datos máximas de las bandas de 868/915MHz, pasando a transmitir hasta 100 y 250kbps.

En el nivel físico podemos localizar cuatro niveles físicos distintos en base al método de modulación usado. Tres de estos cuatro niveles conservan el mecanismo DSSS: las bandas de 868-915MHz que usan modulación en fase binaria o por cuadratura en offset (OQPSK, Offset Quadrature Phase Shift Keying). En la banda de 2450MHz se usa la técnica OQPSK.

Adicionalmente, se define una combinación opcional de modulación binaria y en amplitud para las bandas de menores frecuencias, basadas por lo tanto en una difusión de espectro paralela, no secuencial (PSSS). Si se usan éstas bandas de menor

frecuencia, se puede cambiar dinámicamente el nivel físico usado entre los soportados, resumiendo tenemos:

Tabla II.II. Características de ZigBee.

| Item | Características |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Frecuencia | 2400-2483.5MHz |
| Potencia de Transmisión | 0dBm to +20dBm (+4dBm por defecto) |
| Canales RF | 16, espaciados por 5MHz |
| Raw data rate | 250kbps |
| Modulación | DSSS 2Mchip/s (x8 spread, O-QPSK) |
| Sensibilidad de receptor | -85dBm o mejor (-92dBm por defecto) |
| Rango típico interno | 20 – 30m |

La capa física usa paquetes PPDU para comunicar. La Tabla III muestra su estructura. El LSB es siempre transmitido y recibido primero. El SHR, contiene el preámbulo y los campos de SFD, que ayudan a la sincronización del receptor. El preámbulo de 8-bytes contiene solamente ceros y es usado para sincronización.

El SFD contiene una secuencia específica de unos y ceros y especifica el origen de la trama. El PHR contiene la longitud de información. Los paquetes con una longitud de 9 o más bytes son MPDU.

Los paquetes con 5 bytes de longitud son usados para acuse de recibido de MPDU. La información del PPDU encierra el paquete de la capa MAC. Definitivamente, el tamaño de PPDU puede ser hasta de 127 bytes.

Tabla II.III. Formato de trama PPDU basado en estándar IEEE 802.15.4.

| 4 bytes | 1 byte | 1 byte | | Variable |
|-----------|--------|--------------------------|------------------|----------------------|
| Preámbulo | SFD | Longitud Trama 7 bits | Reservado (1) | Información (PSU) |
| SHR | | PHR | | Información PHY |

2.2.3.2 NIVEL DE ENLACE DE DATOS

En este nivel encontramos el Control de Acceso al Medio (MAC). Éste transmite tramas MAC usando para ello el canal físico. Además del servicio de datos, ofrece un interfaz de control y regula el acceso al canal físico y al balizado de la red. También controla la validación de las tramas y las asociaciones entre nodos, y garantiza slots de tiempo.

Por último, ofrece puntos de enganche para servicios seguros. En el nivel de enlace de datos podemos localizar el Control de Enlace Lógico (LLC) que hace la función de interfaz con los niveles superiores de la pila de protocolos. En la Figura II.7 podemos observar los niveles definidos por el estándar 802.15.4 y las capas intermedias que posibilitan la comunicación con los niveles superiores definidos por un tipo de especificación WPAN, como ZigBee.

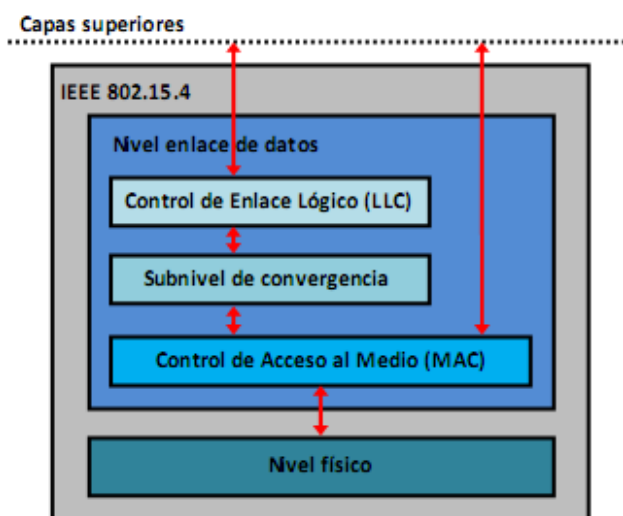


Figura II.7. Pila de protocolos 802.15.4

La capa MAC define tiempo, trama y administración de canales RF; destinada a coexistir en dominio de frecuencia con otros servicios (Figura II.8):

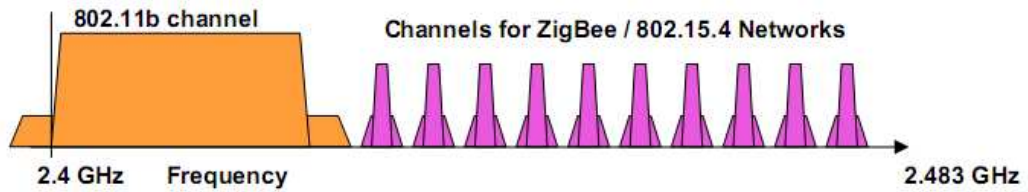


Figura II.8. Coexistencia en dominio de frecuencia de ZigBee.

Coexiste en tiempo usando procedimiento CSMA/CA de WiFi.

2.2.3.3 ESPECIFICACIÓN ZigBee

2.2.3.3.1 NIVEL DE RED

Los cometidos principales del nivel de red son permitir el correcto uso del subnivel MAC, definido por el estándar 802.15.4, y ofrecer un interfaz adecuado para su uso por parte del nivel inmediatamente superior, el nivel de aplicación. Sus capacidades son las típicas de un nivel de red clásico.

Por una parte, la entidad de datos crea y gestiona las unidades de datos del nivel de red a partir del payload del nivel de aplicación y realiza el ruteo en base a la topología de la red en la que el dispositivo se encuentra. Por otra parte, las funciones de control del nivel de red controlan la configuración de nuevos dispositivos y el establecimiento de nuevas redes; puede decidir si un dispositivo colindante

pertenece a la red e identifica nuevos routers y vecinos. El control puede detectar así mismo la presencia de receptores, lo que posibilita la comunicación directa y la sincronización a nivel MAC.

La capa de Red suministra la funcionalidad de direccionamiento:

- Formación de red, y reparación cuando sea necesario.
- Descubrimiento de rutas entre múltiples nodos.
- Almacenamiento y envío de mensajes punto a punto.

2.2.3.3.2 NIVEL DE APLICACIÓN

El nivel de aplicación es el más alto definido por la especificación y, por tanto, la interfaz efectiva entre el nodo ZigBee y sus usuarios. En él se ubican la mayor parte de los componentes definidos por la especificación: tanto ZDO's (ZigBee Device Object), como sus procedimientos de control y los objetos de aplicación.

2.2.3.3.2.1 COMPONENTES PRINCIPALES

El ZDO se encarga de la definición del rol de un dispositivo como Coordinador ZigBee o Dispositivo Final. Además, el ZDO identifica los dispositivos que se encuentran a un salto en la red (dispositivos vecinos) y los servicios que ofrecen. Tras ello, puede

proceder a establecer enlaces seguros con Dispositivos externos y responder peticiones.

El subnivel de soporte a la aplicación (APS, Application Support Sublayer) es el segundo componente básico del nivel. Como tal, ofrece una interfaz bien definida y servicios de control asociados. Trabaja como nexo de unión entre el nivel de red y el resto de componentes del nivel de aplicación. Mantiene actualizadas las tablas de asociaciones en forma de base de datos, que puede utilizarse para encontrar dispositivos adecuados en base a los servicios demandados y ofrecidos. Como puente entre dos niveles, encamina los mensajes a lo largo de la pila de protocolos.

La pila de protocolos ZigBee, también conocida como ZigBee Stack, se basa en el nivel físico (PHY) y el control de acceso al medio (MAC) definidos en el estándar IEEE 802.15.4, que desarrolla estos niveles para redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transferencia (LR-WPAN, Low Rate - Wireless Personal Area Network). La especificación ZigBee completa este estándar añadiendo cuatro componentes principales:

- Nivel de red
- Nivel de aplicación
- Objetos de dispositivo ZigBee (ZDO, ZigBee Device Objects)
- Objetos de aplicación definidos por el fabricante

Además de añadir dos capas de alto nivel (nivel de red y de aplicación) a la pila de protocolos, el principal cambio es la adición de los ZDO ya que son los responsables de llevar a cabo una serie de cometidos, entre los que se encuentran el mantenimiento de los roles de los dispositivos, la gestión de peticiones de unión a una red, el descubrimiento de otros dispositivos y la seguridad.

Dicha ZigBee Stack será un elemento a tener en cuenta más adelante puesto que los dispositivos que se usen para implementar nuestro proyecto deberán ser totalmente compatibles con ZigBee y de este modo poder programar la pila de protocolos. En la Figura II.9 vemos de forma esquematizada los distintos niveles del estándar 802.15.4 y de la especificación ZigBee.

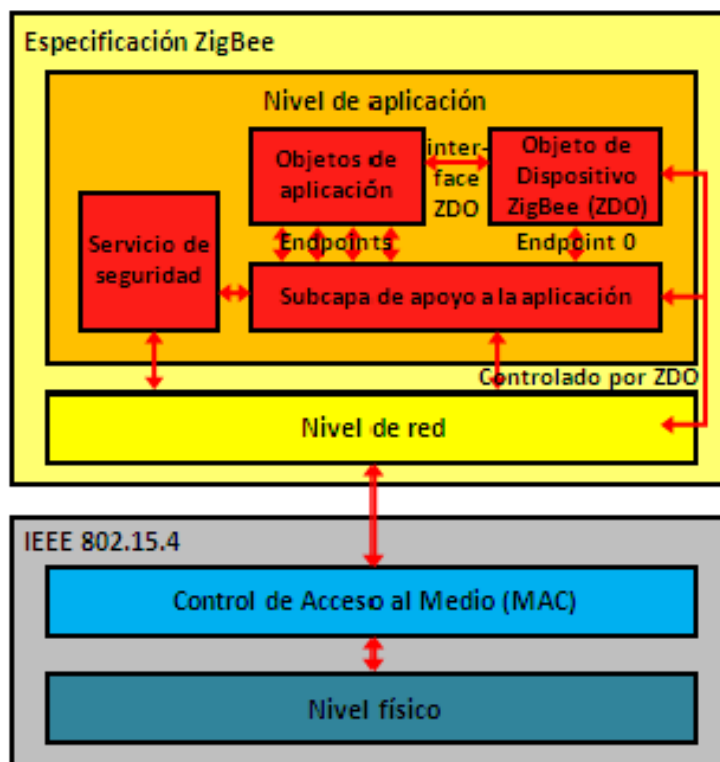


Figura II.9. Pila de protocolos (ZigBee stack)

2.2.4 HARDWARE Y SOFTWARE

El software se ha diseñado para ejecutarse en procesadores y micro-controladores de bajo coste, con un diseño de radio muy optimizado para lograr bajos costes con altos volúmenes de producción. Utiliza circuitos digitales siempre que es posible y evita los componentes analógicos. Si bien el hardware es sencillo, el proceso de certificación de un dispositivo conlleva una validación completa de los requerimientos del nivel físico. Esta revisión intensiva tiene múltiples ventajas, ya que todas las radios fabricadas a partir de una misma máscara de semiconductor gozarán de las mismas características de radiofrecuencia. Por otro lado, un nivel físico mal controlado podría perjudicar no sólo al propio dispositivo, sino al consumo de energía de otros dispositivos en la red. Otros estándares pueden compensar ciertos problemas, mientras que ZigBee trabaja en márgenes muy estrechos de consumo y ancho de banda. Por ello, según el 802.15.4, las radios pasan validaciones ISO 17025. La mayoría de fabricantes planea integrar la radio y el micro-controlador en un único chip.

2.2.5 CONEXIÓN

2.2.5.1 TOPOLOGÍAS DE RED

ZigBee permite tres topologías de red:

- Topología en estrella: el coordinador se sitúa en el centro.
- Topología en árbol: el coordinador será la raíz del árbol.

- Topología de malla: al menos uno de los nodos tendrá más de dos conexiones.

La topología más interesante (y una de las causas por las que parece que puede triunfar ZigBee) es la topología de malla. Ésta permite que si, en un momento dado, un nodo del camino falla y se cae, pueda seguir la comunicación entre todos los demás nodos debido a que se rehacen todos los caminos. La gestión de los caminos es tarea del coordinador.

2.2.5.2 ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS EN UNA RED ZIGBEE

Las redes ZigBee han sido diseñadas para conservar la potencia en los nodos 'esclavos'. De esta forma se consigue el bajo consumo de potencia. La estrategia consiste en que, durante mucho tiempo, un dispositivo "esclavo" está en modo "dormido", de tal forma que solo se "despierta" por una fracción de segundo para confirmar que está "vivo" en la red de dispositivos de la que forma parte. Esta transición del modo "dormido" al modo "despierto" (modo en el que realmente transmite), dura unos 15ms, y la enumeración de "esclavos" dura alrededor de 30ms, como ya se ha comentado anteriormente. En las redes ZigBee, se pueden usar dos tipos de entornos o sistemas:

2.2.5.2.1 CON BALIZAS

Es un mecanismo de control del consumo de potencia en la red. Permite a todos los dispositivos saber cuándo pueden transmitir. En este modelo, los dos caminos de la

red tienen un distribuidor que se encarga de controlar el canal y dirigir las transmisiones. Las balizas que dan nombre a este tipo de entorno, se usan para poder sincronizar todos los dispositivos que conforman la red, identificando la red domótica, y describiendo la estructura de la "supertrama". Los intervalos de las balizas son asignados por el coordinador de red y pueden variar desde los 15ms hasta los 4 minutos. Este modo es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos que conforman la red, escuchan a dicho coordinador durante el "balizamiento" (envío de mensajes a todos los dispositivos -broadcast-, entre 0,015 y 252 segundos). Un dispositivo que quiera intervenir, lo primero que tendrá que hacer es registrarse para el coordinador, y es entonces cuando mira si hay mensajes para él. En el caso de que no haya mensajes, este dispositivo vuelve a "dormir", y se despierta de acuerdo a un horario que ha establecido previamente el coordinador. En cuanto el coordinador termina el "balizamiento", vuelve a "dormirse".

2.2.5.2.2. SIN BALIZAS

Se usa el acceso múltiple al sistema ZigBee en una red punto a punto cercano. En este tipo, cada dispositivo es autónomo, pudiendo iniciar una conversación, en la cual los otros pueden interferir. A veces, puede ocurrir que el dispositivo destino puede no oír la petición, o que el canal esté ocupado.

Este sistema se usa típicamente en los sistemas de seguridad, en los cuales sus dispositivos (sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales), duermen

prácticamente todo el tiempo (el 99,999%). Para que se les tenga en cuenta, estos elementos se "despiertan" de forma regular para anunciar que siguen en la red.

Cuando se produce un evento (en nuestro sistema será cuando se detecta algo), el sensor "despierta" instantáneamente y transmite la alarma correspondiente. Es en ese momento cuando el coordinador de red, recibe el mensaje enviado por el sensor, y activa la alarma correspondiente. En este caso, el coordinador de red se alimenta de la red principal durante todo el tiempo.

2.2.6 FUTURO

Se espera que los módulos ZigBee sean los transmisores inalámbricos más baratos de la historia, y además producidos de forma masiva. Tendrán un coste aproximado de alrededor de los 6 euros, y dispondrán de una antena integrada, control de frecuencia y una pequeña batería. Ofrecerán una solución tan económica porque la radio se puede fabricar con muchos menos circuitos analógicos de los que se necesitan habitualmente.

2.2.7 CRONOLOGÍA

- Las redes de la familia de ZigBee se conciben hacia 1998, al tiempo que se hizo claro que Wi-Fi y Bluetooth no serían soluciones válidas para todos los

contextos. En concreto, se observó una necesidad de redes ad hoc inalámbricas.

- El estándar IEEE 802.15.4 se aprobó en mayo de 2003.
- En el verano de 2003, Philips Semiconductors puso fin a su inversión en redes de mallas. Philips Lighting ha perpetuado la participación de Philips, que sigue siendo un miembro prominente de la ZigBee Alliance.
- ZigBee Alliance anunció en octubre de 2004 una duplicación en su número de miembros en el último año a más de 100 compañías en 22 países. En abril de 2005 había más de 150 miembros corporativos, y más de 200 en diciembre del mismo año.
- La especificación se aprobó el 14 de diciembre de 2004.
- ZigBee 2004 se puso a disposición del público el 13 de junio de 2005.
- En diciembre de 2006 se publicó la actual revisión de la especificación.
- En Noviembre de 2007 se publicó el perfil HOME AUTOMATION de la especificación

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DEL PROYECTO

3.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

La función de este proyecto es la de monitorear la posición y movimientos de un objeto en un entorno conocido. En el estándar IEEE 802.15.4 el Indicador de potencia de la señal recibida (*Received Signal Strength Indicator* RSSI) es utilizado para determinar la calidad de comunicación entre nodos, al instalar un nodo ZigBee al objeto y ubicar un número de nodos en posiciones conocidas en un entorno establecido, el indicador de potencia de la señal recibida puede ser utilizado para determinar la posición de dicho objeto mediante la técnica de multilateración con la mayor precisión posible, el sistema funcionará recolectando información de los nodos de referencia, la cual será procesada en el nodo del objeto, los resultados son enviados entonces al nodo coordinador de la red ZigBee que estará conectado a una PC, los

resultados finales, así como ciertos parámetros de configuración podrán ser visualizados y manipulados por medio de una interfaz de usuario.

3.2. DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO

Según el análisis preliminar realizado este proyecto requerirá de los siguientes componentes de hardware y software:

- Circuito integrado CC2431 (incluye modulo de transceptor ZigBee y microcontrolador 8051).
- IAR Embedded Workbench para la programación y compilación del código fuente de los circuitos integrados.
- Matlab para la programación de la interfaz de usuario.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

3.3.1. CIRCUITO INTEGRADO CC2431

3.3.1.1. CARACTERÍSTICAS

El CC2431 es un Sistema en chip (System-On-Chip SOC) para soluciones de sensores de redes inalámbricas ZigBee/IEEE 802.15.4.

El CC2431 combina las excelentes prestaciones del transceiver de RF CC2420 con un mejorado micro-controlador 8051 usado como estándar industrial. Combinado con la pila de protocolos de ZigBee (z-Stack) de Texas Instruments, el CC2431 provee la solución ZigBee más competitiva del mercado.

Sus principales características son:

- Núcleo de micro-controlador 8051 de alto rendimiento y bajo consumo.
- Transceiver RF IEEE 802.15.4 de 2.4 GHz (núcleo del líder industrial CC2420 radio).
- Pila de protocolos ZigBee (Z-Stack) de Texas Instruments.
- Excelente sensibilidad de recepción y robustez a interferencias.
- Flash programable incluido de 128 KB.
- 8 KB de RAM, 4 KB con retención de datos en todos los modos de operación.
- Funcionalidad poderosa DMA.
- Muy pocos componentes externos.
- Solo un único cristal necesario para sistemas de redes en malla.
- Bajo consumo de corriente (RX: 27 mA, TX: 27 mA, micro-controlador corriendo a 32 MHz).
- Solo 0.5µA de consumo de corriente en modo apagado, donde interrupciones externas o RTC pueden activar el sistema.
- 0.3µA de consumo de corriente en modo apagado, donde interrupciones externas pueden activar el sistema.

- Tiempos muy veloces de transmisión de modo de bajo consumo a modo activo muy bajo promedio de consumo en sistemas de bojos ciclos de uso.
- Soporta hardware CSMA/CA.
- Amplio rango de voltaje (2.0 V – 3.6 V).
- Soporta RSSI/ LQI digital.
- Monitor de batería y sensor de temperatura.
- ADC con más de ocho entradas y resolución configurable.
- Coprocesador de seguridad AES de 128-bit.
- Dos poderosos USARTs con soporte para varios protocolos seriales.
- Soporte de debug de hardware.
- Temporizador Watchdog.
- Un temporizador IEEE 802.15.4 MAC, un temporizador general de 16-bits y dos temporizadores de 8-bits.
- 21 pines de entrada/salida de propósito general.
- Poderosas y flexibles herramientas de desarrollo.

3.3.1.2. MÓDULO DE RADIO

El núcleo del radio está basado en el transceiver CC2420RF líder industrial. El circuito CC2431 se caracteriza por un receptor de bajo IF. La señal RF recibida es amplificada por el amplificador de bajo ruido (LNA) y convertida en cuadratura (I y Q) a la frecuencia inmediata (IF). A la IF (2MHz), la compleja señal I/Q es filtrada y amplificada y entonces digitalizada por los ADCs del receptor RF. Control de ganancia automático,

filtrado de canal final, des-esparcimiento, correlación de símbolo y sincronización de bytes son realizadas digitalmente.

Una interrupción indica que el comienzo de un delimitador de trama ha sido detectado. El CC2431 almacena los datos recibidos en una FIFO de 128 bytes. El usuario puede leer la FIFO a través de los SFR de interface. Es recomendado usar el acceso directo de memoria (DMA) para mover datos entre la memoria y la FIFO. El CRC es verificado en hardware. El RSSI y valores relacionados son agregados a la trama. La evaluación de canal libre (CCA) es disponible a través de una interrupción en el modo de recepción.

El transmisor del CC2431 está basado en una conversión directa. Los datos son almacenados en una FIFO de transmisión de 128 bytes (separada de la FIFO de recepción). El preámbulo y el delimitador de comienzo de trama son generados por hardware. Cada símbolo (4 bits) es extendido usando la secuencia de extendido IEEE 802.15.4 a 32 chips y de salida a los conversores digital a analógico (DACs). Un filtro analógico pasa bajos pasa la señal a los mezcladores de conversión de cuadratura (I y Q). La señal RF es amplificada por el amplificador de poder (PA) y alimentada a la antena.

La circuitería interna del interruptor T/R hace que la interface de la antena armonice fácilmente. La conexión RF es diferencial. Un balun puede ser usado para antenas de

una única terminación. La polarización del PA y LNA se realiza conectando TXRX_SWITCH a RF_P y RF_N a través de un camino DC externo.

El sintetizador de frecuencia incluye un LC VCO completo en el chip y un divisor de fase de 90 grados para generar las señales I y Q LO a los mezcladores de conversión hacia abajo en el modo receptor y los mezcladores de conversión hacia arriba en el modo transmisor. Los VCO operan en el rango de frecuencias de 4800 – 4966 MHz, y la frecuencia es dividida para dos cuando es separada en las señales I y Q. La banda base digital incluye soporte para el manejo de la trama, reconocimiento de direcciones, buffering de datos, procesador estroboscópico CSMA-CA y seguridad MAC. Un regulador de voltaje en el chip entrega el voltaje de alimentación regulado de 1,8 V.

3.3.2 FORMATO DE TRAMA

El Circuito CC2431 tiene soporte de hardware para partes del formato de trama IEEE 802.15.4. La figura III.10 muestra una vista esquemática del formato de trama IEEE 802.15.4.

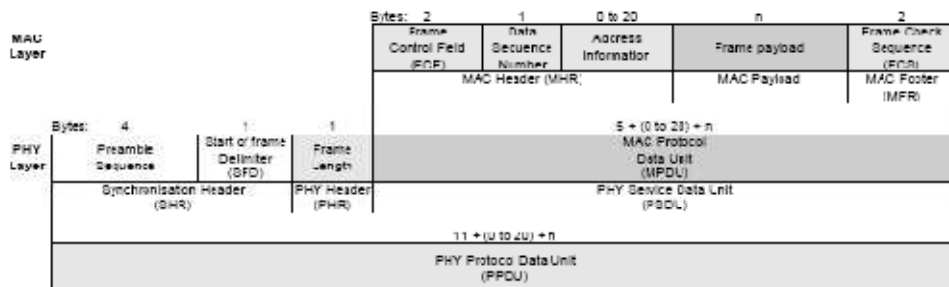


Figura III.10. Formato de trama IEEE 802.15.4

3.3.3 RSSI / DETECCIÓN DE ENERGÍA

El circuito CC2431 tiene incorporado un Indicador de Potencia de Señal Recibida RSSI (Received Signal Strength Indicator) dando un valor digital que puede ser leído de los 8 bits, complemento de 2 con signo del registro RSSIL.RSSI_VAL. El valor de RSSI siempre es promediado en ocho períodos de símbolo (128 μ s).

El valor RSSI del registro RSSIL.RSSI_VAL puede ser referido a la potencia P en los pines RF usando la siguiente ecuación VIII:

$$P = \text{RSSI_VAL} + \text{RSSI_OFFSET} [\text{dBm}] \quad (\text{Ec. VIII})$$

Donde RSSI_OFFSET puede ser encontrado empíricamente durante el desarrollo del sistema de la ganancia frontal.

RSSI_OFFSET es aproximadamente -45. Por ejemplo si es leído un valor de -20 del registro RSSI, la potencia RF de entrada es de aproximadamente -65 dBm. Una grafica típica de una lectura de RSSI_VAL como función de la potencia de entrada es mostrada en la figura XI.

En la figura III.11 se puede notar que la lectura de RSSI del CC2431 es muy lineal y tiene un rango dinámico de alrededor de 100 dB.

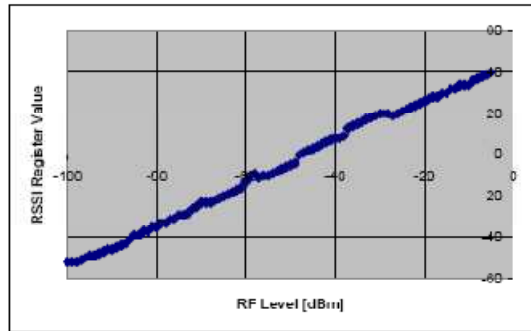


Figura III.11. Gráfico de potencia recibida del módulo CC2431.

3.3.4. INDICADOR DE CALIDAD DEL ENLACE (LQI)

La medida del Indicador de Calidad del Enlace (LQI) es una característica de la fuerza y/o calidad de un paquete recibido. El valor de RSSI descrito en la sección anterior puede ser usado por el software MAC para producir el valor de LQI. La trama requiere que el valor de LQI sea limitado al rango de 0 a 255, con al menos ocho valores únicos. El software es responsable de generar la escala apropiada del valor de LQI para la aplicación dada.

Usar directamente el valor de RSSI para calcular el valor de LQI tiene la desventaja de por ejemplo una banda estrecha interfiera dentro del canal de banda ancha incrementando el valor de LQI aunque éste realmente reduce la verdadera calidad del enlace. Por tanto el CC2431 también provee de un valor de correlación promedio para cada paquete entrante, basado en los ocho primeros símbolos a continuación del SFD. Este valor de 7 bits sin signo, que debe ser lo más alto posible puede ser visto como un indicador de el “promedio de error del chip”, aunque el CC2431 no realiza decisión de chip.

3.3.5 MOTOR DE LOCALIZACIÓN

El motor de localización es usado para estimar la posición de los nodos de una red inalámbrica ad-hoc. Los nodos de referencia existentes tienen coordenadas conocidas, típicamente porque éstos son parte de una infraestructura instalada. Otros son nodos ciegos, cuyas coordenadas necesitan ser estimadas. Estos nodos generalmente son móviles y unidos a dispositivos que necesitan ser rastreados.

El motor de localización implementa un algoritmo de cómputo distribuido que usa los valores del Indicador de Potencia de la Señal Recibida (RSSI) de los nodos de referencia conocidos. Realizar los cálculos de localización a nivel de nodo reduce el tráfico de la red y retrasos de comunicación que de otra forma estarían presentes en un enfoque de computación centralizado.

El motor de localización tiene las siguientes características:

- De 3 a 16 nodos pueden ser usados para el algoritmo de estimación de localización.
- Resolución de 0,25 m de la lectura de la posición estimada (la precisión de la posición estimada dependerá de varios factores).
- El tiempo para estimar la posición de un nodo es de 50 μ s a 13 ms.

- Rango de localización de 64 x 64 metros.
- Mínimo uso del CPU para correr la estimación de la posición.

Para lograr la mejor precisión posible se deben usar antenas que tengan características de radiación cercanas a las isotrópicas. El error de localización depende del ambiente de la señal, forma de despliegue de los nodos de referencia y la densidad de éstos en un área dada. En general, tener más nodos de referencia disponibles mejora la precisión al estimar la posición.

3.3.6 OPERACIÓN DEL MOTOR DE LOCALIZACIÓN

El motor de localización requiere un conjunto de 3 a 16 coordenadas de referencia que deben ser ingresadas con un conjunto de otros parámetros medidos. La salida del motor de localización consiste en un par de coordenadas de la posición estimada.

Antes de que cualquier dato sea ingresado, el motor de localización debe ser habilitado escribiendo un 1 en el bit de habilitación LOCENG.EN. Cuando el motor de localización no está en uso, escribir un cero en LOCENG.EN reducirá el consumo de energía del CC2431 desconectando la señal de reloj del motor.

La figura III.12 muestra la operación básica del motor de localización:

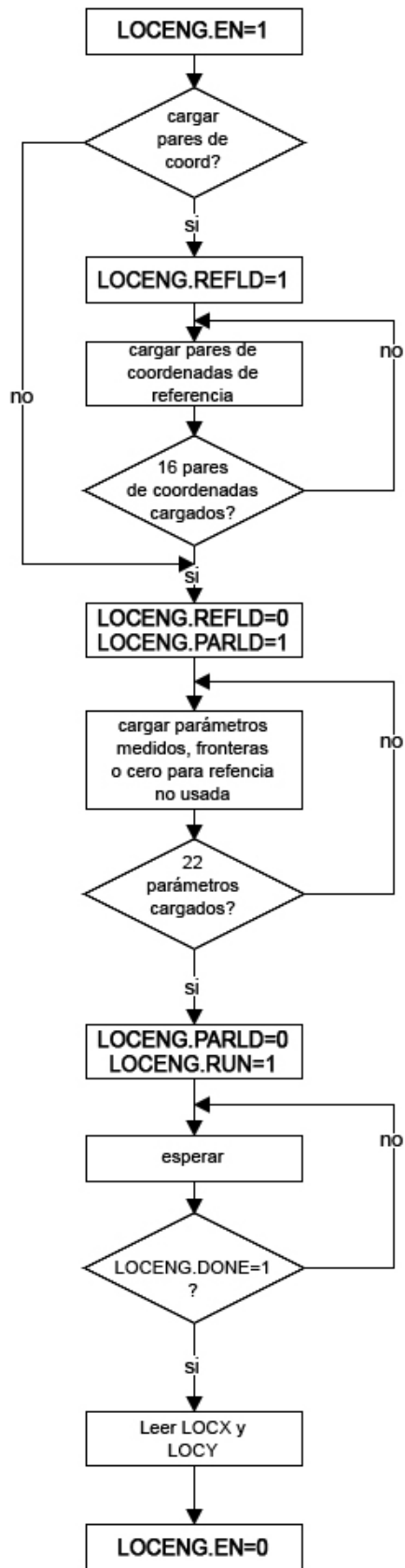


Figura III.12. Algoritmo del motor de localización.

3-3-7 COORDENADAS DE REFERENCIA

El motor de localización requiere un conjunto de entre 3 y 16 coordenadas de referencia [x0, y0, x1, y1, ... , x15, y15] sean ingresadas. Las coordenadas de referencia expresan cada una de las posiciones de los nodos de referencia en metros como valores sin signo en el intervalo entre [0, 63.75] metros. La mejor resolución posible de lectura es de 0.25 metros. El formato usado es de datos de punto fijo con los 2 bits menos significativos (LSB) representando la parte fraccional y los restantes 6 bits representando la parte entera, así por ejemplo 63.75 es representado como 0xFF.

Las coordenadas de referencia son cargadas en el registro RF REFCOORD. Antes de escribir en el registro REFCOORD, un 1 debe ser escrito en el bit de registro LOCENG.REFLD para indicar que un conjunto de coordenadas de referencia están siendo escritas. Una vez que comienza el proceso de carga de las coordenadas (LOCENG.REFLD=1), 16 pares de coordenadas siempre deben ser escritas. Sin embargo es posible para el motor de localización usar menos de 16 coordenadas de referencia, marcando ciertas coordenadas como no usadas. Ceros deben ser usados para llenar los espacios de las coordenadas de referencia no usadas, éstos serán interpretados como no usados cuando 0,0 es cargado en el valor RSSI para aquellas coordenadas de referencia. Las coordenadas de referencia son escritas en el orden [x0, y0, x1, y1, ..., x15, y15] en el registro REFCOORD. Luego que todas las coordenadas son escritas, un 0 es escrito en el bit de registro LOCENG.REFLD.

3.3.8 PARÁMETROS MEDIDOS

Después que han sido escritos los datos de las coordenadas de referencia, un conjunto de parámetros medidos debe ser ingresado al motor de localización. Estos consisten de dos parámetros de radio: cuatro coordenadas de límite de búsqueda y 16 valores RSSI, los parámetros de radio son los valores A y n , que son usados en el algoritmo del motor para calcular la posición estimada.

Los parámetros A y n pueden ser ajustados para describir el entorno de propagación en la cual una red de dispositivos operará.

3.3.8.1 PARÁMETRO A

El parámetro de radio A es definido como el valor absoluto de la potencia promedio en dBm recibida desde la distancia de referencia más corta de 1m del transmisor, asumiendo un patrón de radiación omnidireccional. Por ejemplo si la potencia recibida a 1m es -40dBm, el parámetro A es especificado como 40.

El motor espera que el parámetro A se encuentre en el rango de [30.0, 50.0] con una precisión de 0.5. El parámetro A está dado como un valor de punto fijo sin signo donde el bit menos significativo (LSB) es la parte fraccional y los bits restantes son la parte entera. Un valor típico de A es 40.0.

3.3.8.2 PARÁMETRO n

El parámetro de radio n es definido como el exponente de pérdida que describe la tasa a la cual el poder de la señal decae cuando se incrementa la distancia desde el transmisor. Esta atenuación es proporcional a d^n , donde d es la distancia entre transmisor y receptor.

El valor actual del parámetro n escrito en el motor de localización es un valor índice entero seleccionado de una tabla de consulta mostrada a continuación (Tabla III.IV). Por ejemplo, en el caso de que $n=2.98$ encontrado por mediciones, el valor disponible más cercano de n en la tabla es 3.00, correspondiente al índice 13. Por lo tanto, el valor entero 13 es usado para el parámetro n escrito en el motor de localización.

Tabla III.IV. Parámetro n tabla de consulta.

| n index | n | n index | n |
|-----------|-------|-----------|-------|
| 0 | 1.000 | 16 | 3.375 |
| 1 | 1.250 | 17 | 3.500 |
| 2 | 1.500 | 18 | 3.625 |
| 3 | 1.750 | 19 | 3.750 |
| 4 | 1.875 | 20 | 3.875 |
| 5 | 2.000 | 21 | 4.000 |
| 6 | 2.125 | 22 | 4.125 |
| 7 | 2.250 | 23 | 4.250 |
| 8 | 2.375 | 24 | 4.375 |
| 9 | 2.500 | 25 | 4.500 |
| 10 | 2.625 | 26 | 4.625 |
| 11 | 2.750 | 27 | 5.000 |
| 12 | 2.875 | 28 | 5.500 |
| 13 | 3.000 | 29 | 6.000 |
| 14 | 3.125 | 30 | 7.000 |
| 15 | 3.250 | 31 | 8.000 |

Éste parámetro n es escrito en el motor como un índice entero en el rango $[0, 31]$, como el índice es dado como un valor entero sin bits fraccionarios, por ejemplo, el valor $n=7$ es escrito como 00000111. El valor típico de n depende el entorno.

3.3.9 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Los parámetros A y n pueden ser estimados empíricamente por una recolección de datos RSSI (por lo tanto datos con pérdida) para los cuales las distancias entre el transmisor y receptor son conocidas. La Figura XV muestra un gráfico disperso de datos $\text{abs}(\text{RSSI})$ versus la distancia logarítmica \log en metros. Una línea semirrecta es usada para graficar los valores específicos de A y n para el entorno en el cual los datos fueron medidos.

- A es la intersección en el eje y
- n es la pendiente de la recta.

Los datos en la Figura XIII son $A=42.4$ y $n=2.98$ para ese entorno, Nótese que en el gráfico de éste ejemplo no se muestra la intersección con el eje y , es decir, el punto de la línea donde $x=0$.

El valor de A cargado al motor en este caso sería 42.5 y el valor de n sería 13 consultado en la Tabla III.IV.

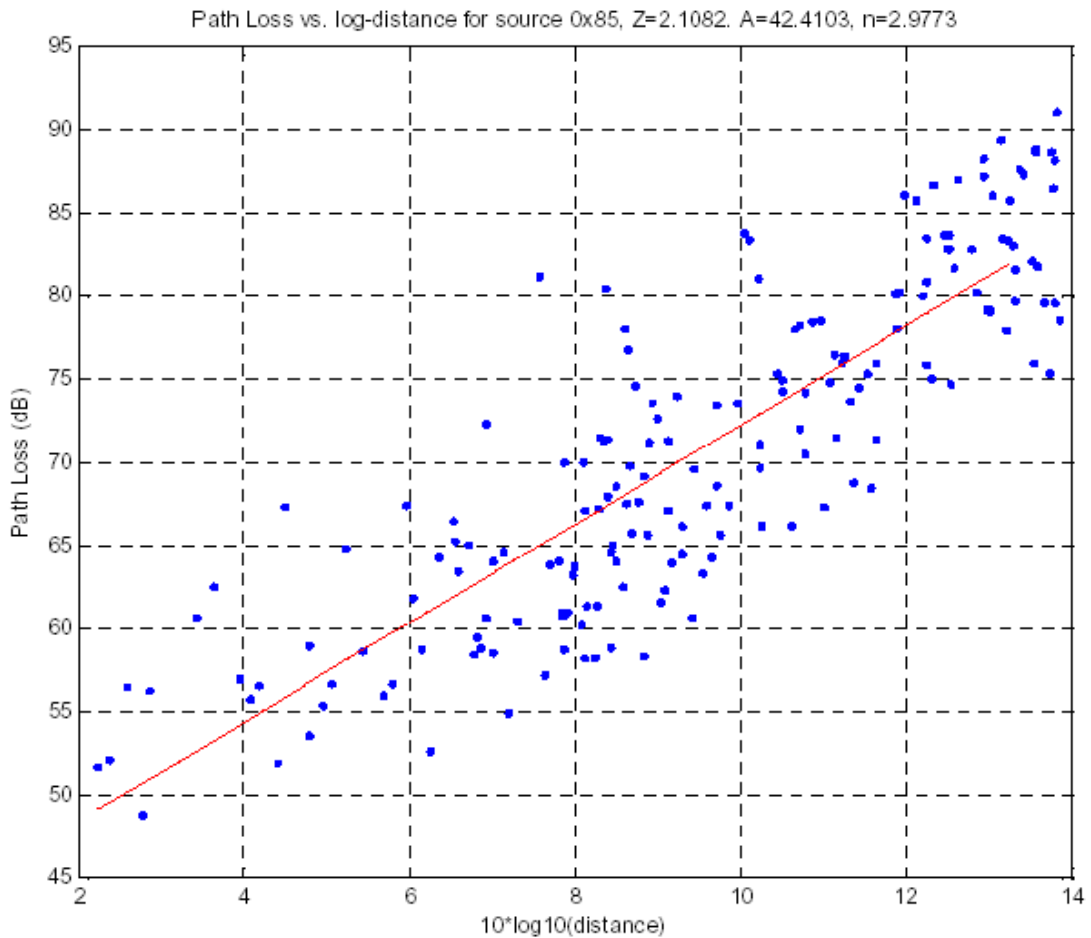


Figura III.13. Atenuación vs. Distancia logarítmica

3.3.10 BUSCAR LAS COORDENADAS DE FRONTERA

Es posible reducir el error y tiempo de estimación configurando la búsqueda de fronteras para las coordenadas X y Y de la posición estimada. La máxima área que puede ser considerada es con X y Y en el intervalo [0.0, 63.75] metros.

Asumamos que la búsqueda del motor de localización está limitada para incluir sólo el área rectangular limitada por las coordenadas [Xmin, Ymin] y [Xmax, Ymax].

Cuatro parámetros de límite de búsqueda son ingresados en el siguiente orden:

Xmin, Xdelta, Ymin, Ydelta

Donde:

$$Xdelta = Xmax - Xmin \quad (Ec.8)$$

$$Ydelta = Ymax - Ymin \quad (Ec.9)$$

Nótese que incluso cuando se escoge buscar en todo el espacio de búsqueda disponible, estos parámetros deben ser ingresados como las coordenadas del espacio entero, es decir los siguientes valores: 0.0, 63.75, 0.0, 63.75.

Si algunos parámetros de entrada son omitidos, el motor de localización no estimará correctamente.

3.3.11- VALORES *RSSI*

Los valores *RSSI* son los medidos al correspondiente conjunto de coordenadas de referencia. Estos valores están en el intervalo [-40 dBm, -95 dBm] con una precisión de 0.5 dBm. El signo negativo es removido en los valores ingresados. Como un ejemplo, en el caso del valor *RSSI* = -50.35 dB, éste debería ser escrito en el motor de localización como 50.5.

Nótese que un valor de 0.0 debe ser escrito como valor de RSSI para coordenadas de referencia no usadas, si menos de 16 coordenadas de referencia son usadas. El motor de localización no funcionará correctamente si solo algunos de los parámetros son cargados.

3.3.12 ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN

Las coordenadas de localización estimadas son dadas en metros en el intervalo [0.0, 63.75] metros con una resolución de 0.25 m. El formato de datos usa los bits menos significativos (LSB) como parte fraccional.

Cuando las coordenadas de referencia y los parámetros de medición son cargados, la posición estimada es calculada escribiendo un 1 en el bit del registro LOCENG.RUN. Las coordenadas estimadas pueden ser leídas de los registros LOCX y LOCY cuando el bit del registro LOCENG.DONE es 1.

El tiempo para que las coordenadas estimadas puedan ser leídas varía con los parámetros de límite de búsqueda, desde 50 μ s hasta 13 ms (con un reloj del sistema de 32 MHz) después de que LOCENG.RUN es puesto a 1. El motor de localización no produce ningún pedido de interrupción.

El valor estimado de la coordenada *X* dado por *LOCX* incluye un valor de offset que debe ser removido para obtener el valor actual de la coordenada *X*. La remoción del

offset debe ser efectuada después de la lectura del registro *LOCX*, para obtener el valor real de *X* como se muestra a continuación:

$$X = (X_{Locx} - X_{min} + 1) \% (X_{delta} + 1) + X_{min} \quad (\text{Ec. IX})$$

Donde *X_{Locx}* es el valor leído del registro *LOCX*, y *X_{min}* y *X_{delta}* son los parámetros de frontera usadas como entradas para limitar la búsqueda como se describió anteriormente. Nótese que la coordenada *Y* leída del registro *LOCY* puede ser usada directamente. Las coordenadas estimadas permanecen válidas en los registros *LOCX* y *LOCY* hasta que nuevos resultados sean calculados o hasta que se realice un reinicio. Nótese que *LOCENG.EN* debe ser 1 durante la operación del motor de localización.

3.4 SISTEMA DE LOCALIZACIÓN

3.4.1 INTRODUCCIÓN

El algoritmo de localización usado en el motor de localización de CC2431 está basado en los valores del Indicador de Potencia de la Señal Recibida RSSI. El valor del RSSI disminuirá cuando aumenta la distancia.

La figura III.14 muestra un sistema simplificado para la detección de la posición. El nodo de referencia es un nodo estático ubicado en una posición conocida. Por

simplicidad éste nodo conoce su propia posición y puede decir a los otros nodos donde se encuentra cuando exista una petición.

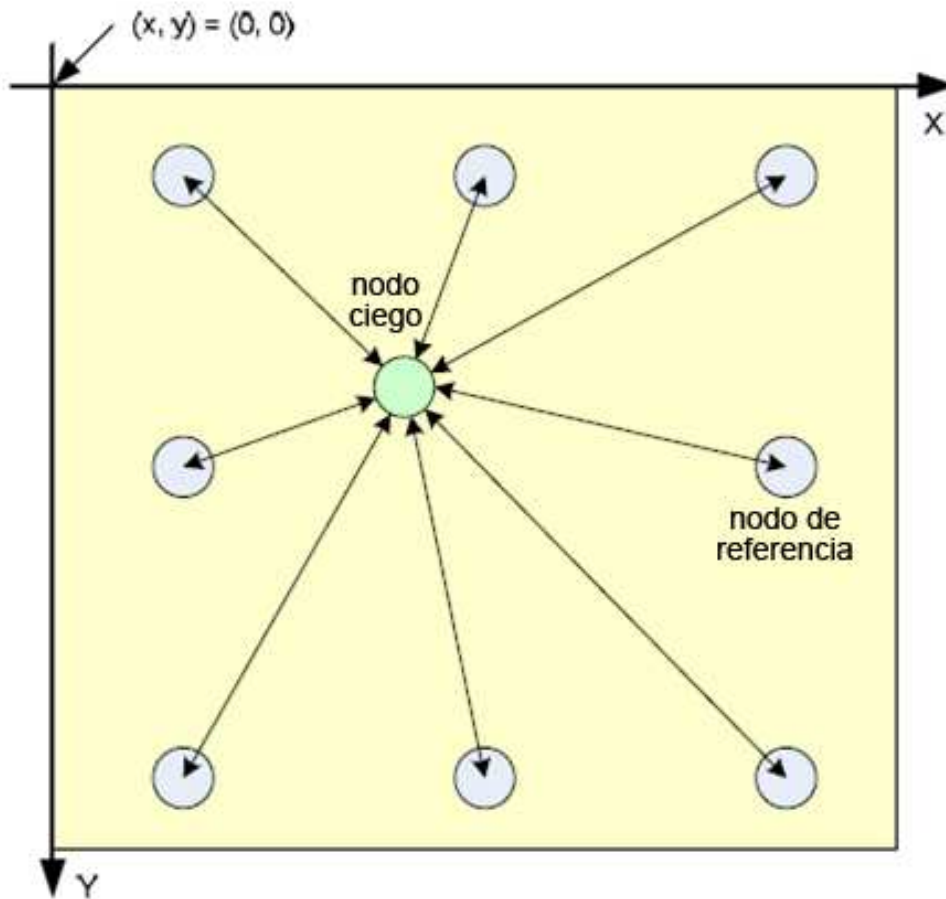


Figura III.14. Sistema de detección de la posición.

Un nodo de referencia no necesita implementar el hardware para la detección de la posición, éste no realizará ningún cálculo. El nodo ciego es un nodo implementado con el CC2431. Este nodo recolectará las señales de todos los nodos de referencia que respondan a una petición, leerá los correspondientes valores de RSSI, ingresará dichos valores en el motor de localización, y después de esto leerá la posición calculada y enviará ésta información a una aplicación de control.

La cantidad de datos mínimos contenidos en un paquete enviado desde un nodo de referencia a un nodo ciego deberán ser las coordenadas X y Y . El valor RSSI es calculado por el receptor, es decir el nodo ciego.

La principal característica del motor de localización es que el cálculo de la posición puede ser efectuado en cada nodo ciego, por lo tanto el algoritmo de cálculo es descentralizado. Esta propiedad reduce la cantidad de transferencias de datos en la red, ya que solo la posición calculada es transferida y no los datos necesarios para realizar dicho cálculo.

Para mapear cada posición en un lugar distinto en un ambiente natural, se usa un sistema de referencia bidimensional, las direcciones serán denotadas como X y Y , siendo X el eje horizontal y Y el eje vertical. El circuito CC231 solo puede manejar dos dimensiones.

3.4.2 TIPOS DE NODOS

3.4.2.1 NODOS DE REFERENCIA

Un nodo que tiene una posición estática es conocido como nodo de referencia. Este nodo debe estar configurado con los valores X y Y que corresponden a su posición física.

La principal tarea para un nodo de referencia es la de proporcionar un paquete de referencia al nodo ciego que contiene las coordenadas X y Y .

Ya que éste nodo no utiliza el hardware de localización, no es necesario usar el circuito CC2431 para éste propósito. Esto significa que un nodo de referencia puede usar tanto un circuito CC2430 como un CC2431. Ya que los circuitos CC2430 y CC2431 están basados en el mismo transceiver que el CC2420, incluso un CC2420 junto con un micro-controlador apropiado puede ser usado para un nodo de referencia.

3.4.2.2 NODO CIEGO

Un nodo ciego se comunicará con los nodos de referencia más cercanos, recolectando X , Y y $RSSI$ para cada uno de éstos nodos, y calculará su posición basado en los parámetros de entrada usando el hardware del motor de localización. Después la posición calculada debería ser enviada a una estación de control, la cual puede estar conectada a una PC o a otro nodo en el sistema.

3.4.3 HARDWARE DE LOCALIZACIÓN

El motor de localización utiliza una interface extremadamente simple, vista desde la capa de software (Figura III.15); escribir los parámetros de entrada, esperar que los cálculos sean realizados y leer la posición calculada de salida.

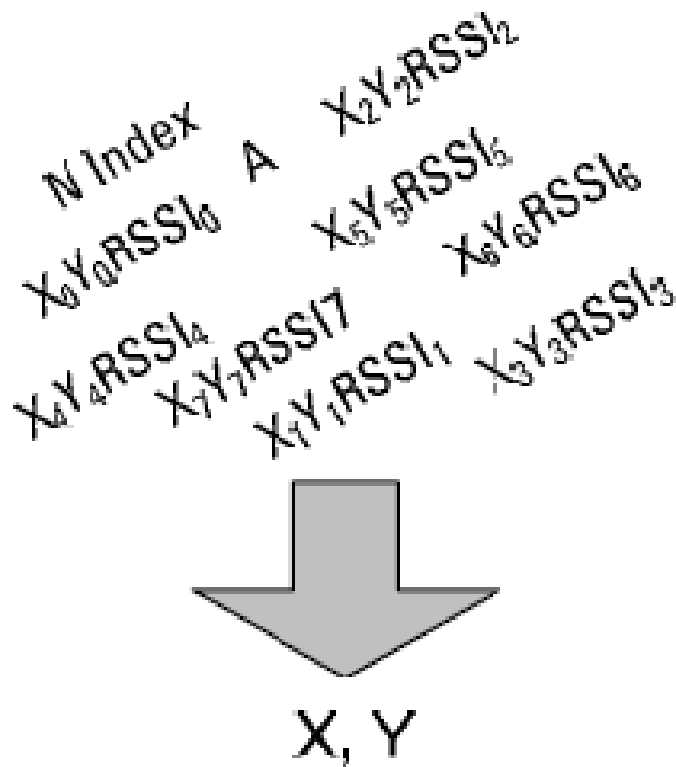


Figura III.15. Vista simplificada en la capa de software.

3.4.3.1 ENTRADAS

La tabla III.V muestra todas las entradas necesarias para el hardware de localización.

Tabla III.V. Entradas necesarias para el HW de localización.

| Nombre | Valor min. | Valor max. | Descripción |
|---------|------------|------------|---|
| A | 30 | 50 | El valor absoluto de RSSI en dBm a un metro de distancia del transmisor |
| n_index | 0 | 31 | Este valor representa el exponente de propagación de la señal, éste valor depende del ambiente |
| RSSI | 40 | 95 | El valor del Indicador de Potencia de la Señal Recibida es medido en dBm. El motor de localización usa el valor absoluto como entrada |
| X, Y | 0 | 63.75 | Estos valores representan las coordenadas X y Y relativas a un punto fijo. Los valores están en metros y la precisión es de 0.25 metros |

3.4.3.2 SALIDAS

Las salidas del sistema son las siguientes (Tabla III.VI):

Tabla III.VI. Salidas del sistema.

| Nombre | Valor min. | Valor max. | Descripción |
|--------|------------|------------|---|
| X, Y | 0 | 63.75 | Estos valores representan las coordenadas X y Y calculadas relativas a un punto fijo. Los valores están en metros |

3.4.4 INDICADOR DE POTENCIA DE SEÑAL RECIBIDA (RSSI)

Cuando el circuito CC2430/31 recibe un paquete, automáticamente añade un valor RSSI al paquete recibido. El valor RSSI siempre es promediado durante los 8 primeros períodos de símbolo (128 μ s). Este valor de RSSI es representado como un valor de un byte, como el complemento de 2 con signo. Cuando un paquete es leído de la FIFO del CC2431 el penúltimo byte contendrá el valor RSSI que fue medido después de haber recibido 8 símbolos del paquete actual.

Incluso si el valor de RSSI es capturado al mismo tiempo que el paquete de datos es recibido, éste reflejará la intensidad de la potencia de la señal recibida en ese tiempo, no necesariamente el poder de la señal perteneciente de los datos recibidos. Esto da la oportunidad de que los valores de RSSI sean erróneos cuando un gran número de nodos están hablando en el mismo canal al mismo tiempo que el valor RSSI está siendo capturado.

| | | | | | | | |
|---|------|------|------|-------|--------|------|--------------|
| n | D(0) | D(1) | D(2) | | D(n-2) | RSSI | CRC/ corr |
|---|------|------|------|-------|--------|------|--------------|

Formato de trama de un paquete de datos recibido.

Los circuitos CC2430/31 contienen un registro denominado RSSI. Este registro contiene los mismos valores descritos anteriormente, pero no está bloqueado cuando un paquete es recibido, por lo tanto el valor del registro no debería ser usado para cálculos posteriores.

Únicamente el valor de RSSI bloqueado adjuntado a los datos recibidos puede ser interpretado como el valor RSSI medido exactamente cuando los datos son recibidos.

3.4.4.1 OFFSET

El valor RSSI descrito anteriormente está representado como el complemento de 2 con signo. El valor no puede ser leído e interpretado como la potencia de la señal recibida en sí. Para convertir el valor actual leído a la potencia de la señal recibida se debe añadir un offset, que es aproximadamente -45, además éste offset depende de la configuración de la antena.

3.4.4.2 LINEALIDAD

Mediciones realizadas en los laboratorios muestran que los valores RSSI medidos por los chips encajan muy bien con la señal de poder entrante. La linealidad de la curva puede ser encontrada en la hoja de datos del circuito CC2430 graficada como potencia de entrada versus valor RSSI (Figura III.16).

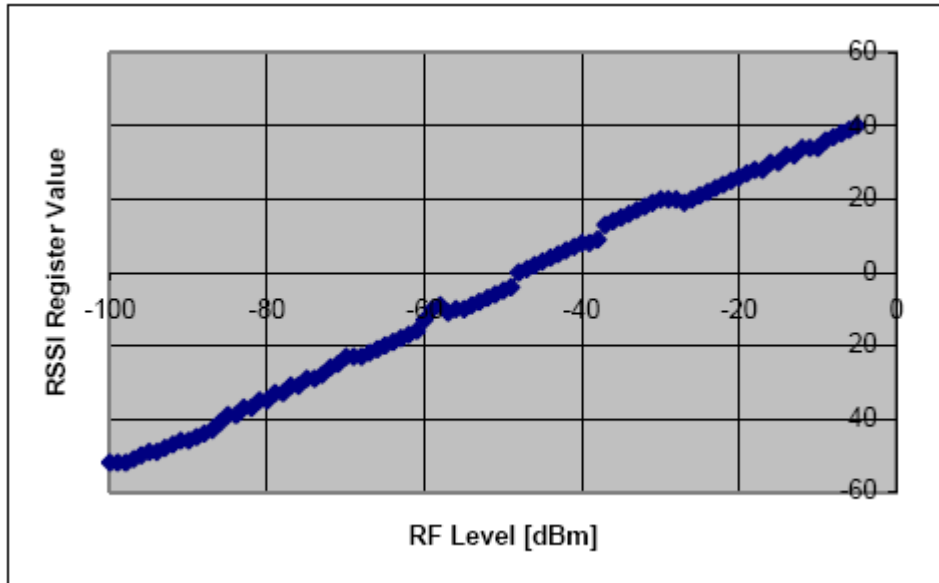


Figura III.16. Valores típicos RSSI vs. Potencia de entrada.

3.4.4.3 PROPAGACIÓN TEÓRICA DE LA SEÑAL

La potencia de la señal recibida es una función de la potencia transmitida y la distancia entre transmisor y receptor (Figura III.17).

La potencia de la señal recibida se reducirá cuando aumente la distancia como muestra la siguiente ecuación:

$$RSSI = -(10n \log_{10} d + A) \quad (\text{Ec. X})$$

- n: constante de propagación de la señal, también llamado exponente de propagación.
- d: distancia desde el emisor.

- A: potencia de la señal recibida a una distancia de un metro.

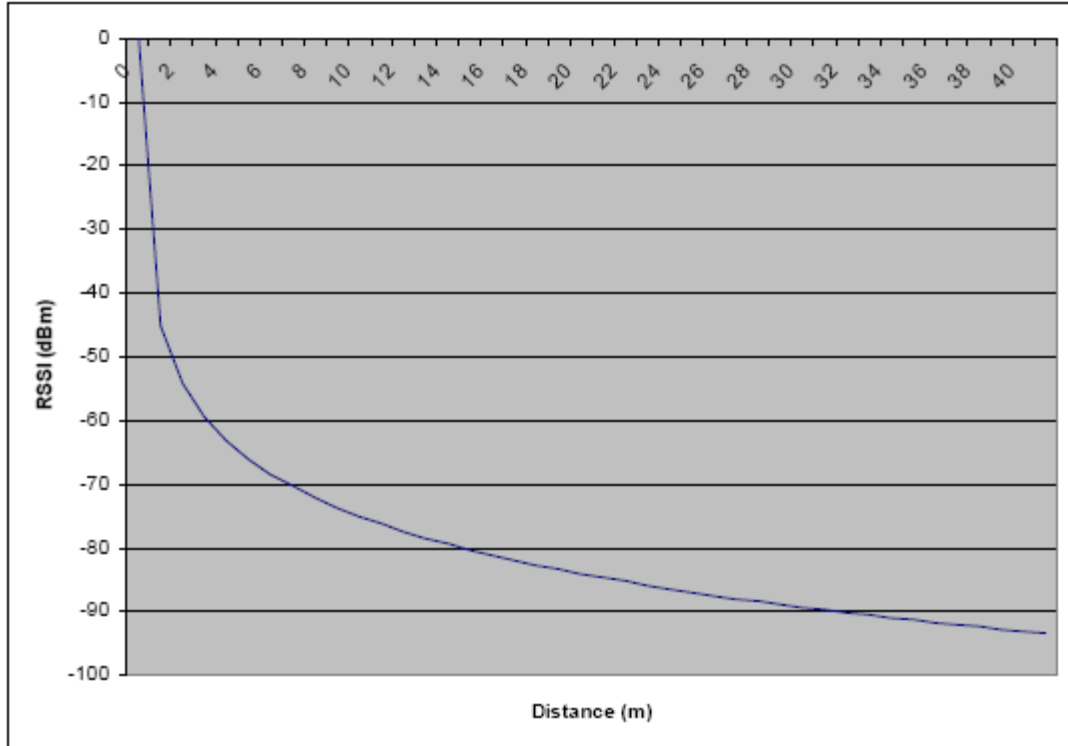


Figura III.17. RSSI vs. Distancia para $A = 40$ y $n = 3$

3.4.4.4 RSSI – CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

En la sección anterior se describió el valor RSSI teórico como una función de la distancia. Esta sección discutirá como se espera que el valor RSSI sea medido en el mundo real. Cuando se usa la ecuación X, el cálculo de potencia de la señal recibida es directa, pero cuando se usan valores reales, cosas inciertas deben ser tomadas en cuenta. La mayoría de estas incertidumbres son manejadas por el hardware, pero algún manejo por software debería ser añadido para aumentar la precisión. Los

métodos presentados en ésta sección tienen un objetivo principal: obtener un valor RSSI que se relacione con la distancia en la mejor forma posible.

- **FORMAS SIMPLES DE FILTRAR EL VALOR RSSI**

Varios filtros pueden ser usados para suavizar el valor RSSI. Dos filtros comunes son simplemente promediar y realimentar. Promediar es el tipo más simple de filtro, pero éste requiere que más paquetes sean enviados. Los filtros de realimentación usan sólo una pequeña parte de los valores de RSSI más recientes para cada cálculo. Esto requiere menos datos pero aumenta la latencia cuando se calcula una nueva posición. El valor RSSI promedio es calculado simplemente requiriendo pocos paquetes de cada nodo de referencia cada vez que el valor RSSI es medido y calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\overline{RSSI} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{i=n} RSSI_i \quad (\text{Ec. XI})$$

Si se usará un filtro de aproximación, éste puede ser hecho como se muestra a continuación. En ésta ecuación la variable a tiene un valor típico de 0.75 o debajo de éste. Este enfoque asegura que una gran diferencia en los valores RSSI sea suavizada. Por lo tanto no es aconsejable si los objetos a ser localizados pueden moverse grandes distancias entre cada cálculo.

$$RSSI_n = a \cdot RSSI_n + (1 - a) \cdot RSSI_{n-1} \quad (\text{Ec. XII})$$

- **RSSI CALCULADO vs. RSSI MEDIDO**



Figura III.18. Valor RSSI teórico.

La figura III.18 muestra, de izquierda a derecha, el valor RSSI teórico, luego cuando algunos componentes varían suavemente y finalmente cuando se añaden componentes rápida variación, por ejemplo bajo la influencia de componentes de múltiples trayectorias.

La figura más apegada a la derecha muestra la señal que es más cercana a la realidad. Nótese que las figuras no muestran una medición real, son únicamente gráficos que indican algunos de los problemas que se presentan al calcular una posición usando valores RSSI.

3.4.5 PARÁMETROS DE INFLUENCIA

Para determinar los parámetros A y n , una medición de la atenuación es necesaria. La siguiente medición mostrada en la figura III.19 (campo de futbol de 30m*15m), fue hecha para encontrar los coeficientes. Todas las balizas fueron orientadas en el mismo sentido para evitar errores en las antenas, al igual que el nodo coordinador.

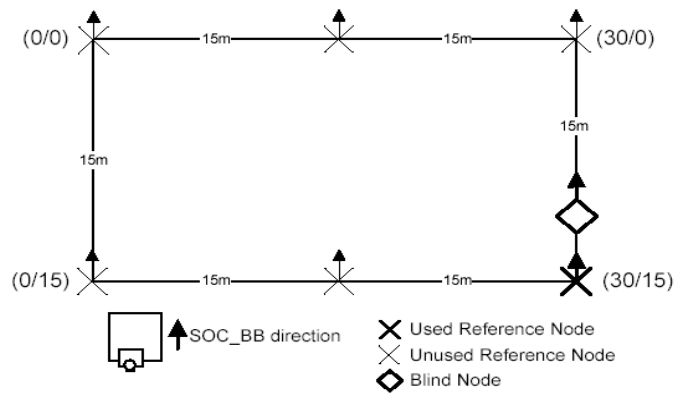


Figura III.19. Configuración de medición para determinar los parámetros A y n.

Para medir el RSSI, el nodo ciego fue puesto en lugares específicos listados en la tabla II.VII y los valores de RSSI fueron determinados en promedio con el tiempo. Para esta medición solamente el nodo de referencia en el puesto (30/15) estaba encendido.

Tabla III.VII. Posiciones concernientes a las medidas de RSSI.

| Nr. | x Position [m] | y Position [m] | Distance [m] | RSSI [dBm] |
|-----|----------------|----------------|--------------|------------|
| 1 | 30 | 14 | 1 | -41.0000 |
| 2 | 30 | 13 | 2 | -41.0751 |
| 3 | 30 | 12 | 3 | -45.0556 |
| 4 | 30 | 11 | 4 | -48.5833 |
| 5 | 30 | 10 | 5 | -47.5881 |
| 6 | 30 | 9 | 6 | -50.3335 |
| 7 | 30 | 8 | 7 | -47.9487 |
| 8 | 30 | 7 | 8 | -56.2631 |
| 9 | 30 | 6 | 9 | -56.3280 |
| 10 | 30 | 5 | 10 | -53.3401 |
| 11 | 30 | 4 | 11 | -52.9744 |
| 12 | 30 | 3 | 12 | -52.6688 |
| 13 | 30 | 2 | 13 | -54.3304 |
| 14 | 30 | 1 | 14 | -55.1023 |

El nodo de referencia envía la señal con una potencia constante de 0dBm, por lo tanto, la atenuación L puede ser calculado de la siguiente manera con la ecuación XIII donde P_T significa la potencia transmitida.

$$L[dB] = P_T[dBm] - RSSI[dBm] \quad (\text{Ec. XIII})$$

$$L[dB] = 0[dBm] - RSSI[dBm] \quad (\text{Ec. XIV})$$

$$L[dB] = -RSSI[dB] \quad (\text{Ec. XV})$$

La atenuación medida es mostrada en la figura III.20 con una regresión lineal. Los parámetros A y n pueden ser calculados ahora. A es el punto de intersección entre el eje de atenuación y la regresión lineal donde n es su pendiente. Los parámetros en la tabla VIII resultan de la medición.

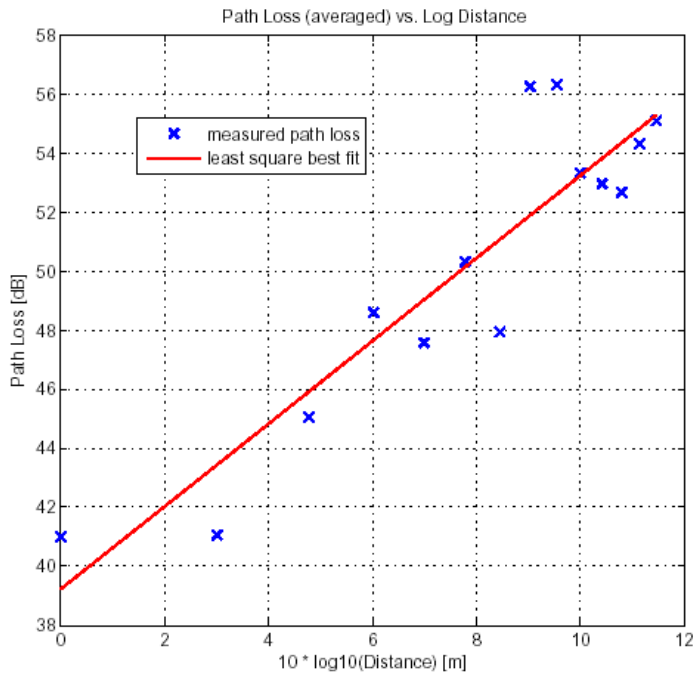


Figura III.20. Medida de atenuación con el método de una regresión lineal.

Resultados:

Tabla III.VIII. A y n posibles.

| A | n |
|----|-----|
| 39 | 1.4 |

Otra manera de determinar el A de parámetro es medir la atenuación a un metro de distancia. Con la medición mostrada en figura III.20, los parámetros en la tabla III.IX pueden ser definidos y usados para las mediciones exactas con puestos adicionales.

Tabla III.IX. Parámetros calculados con A, a un metro de distancia.

| A | N |
|----|-----|
| 41 | 1.4 |

En otro ejemplo en ésta sección, se usan valores de un experimento real. En el experimento se usó ocho nodos, localizados como se muestra a continuación, el nodo ciego fue puesto en el centro de la grilla de nodos de referencia y los valores RSSI fueron típicamente medidos en las posiciones mostradas en la tabla III.X y en la figura III.21.

Tabla III.X. Nodos de ejemplo.

| | X | Y | RSSI |
|--------|-------|-------|------|
| Node 0 | 20.00 | 20.00 | -71 |
| Node 1 | 20.00 | 24.00 | -59 |
| Node 2 | 20.00 | 28.00 | -55 |
| Node 3 | 20.00 | 32.00 | -69 |
| Node 4 | 24.00 | 20.00 | -72 |
| Node 5 | 24.00 | 24.00 | -81 |
| Node 6 | 24.00 | 28.00 | -50 |
| Node 7 | 24.00 | 32.00 | -60 |

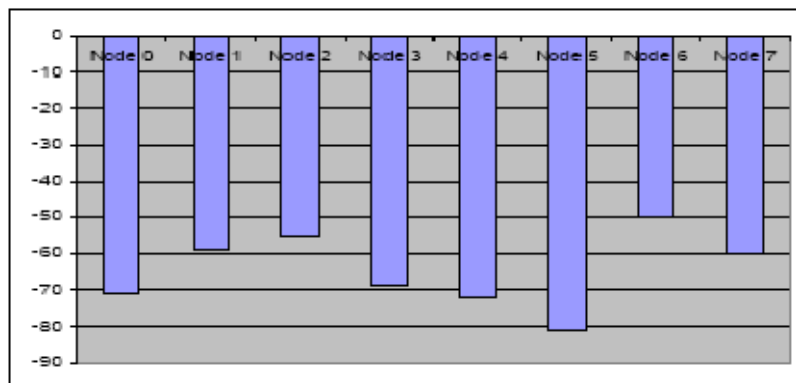


Figura III.21. Nodos de referencia usados en el ejemplo.

En el ejemplo los nodos 0, 3, 4 y 7 fueron puestos a una distancia igual del nodo ciego, los nodos 1, 2, 5 y 6 también fueron puestos a una distancia igual del nodo ciego, pero algunos metros más cerca. Como muestran los valores, esto no es directamente representado en los valores medidos, en la figura III.22 se muestran en una grilla.

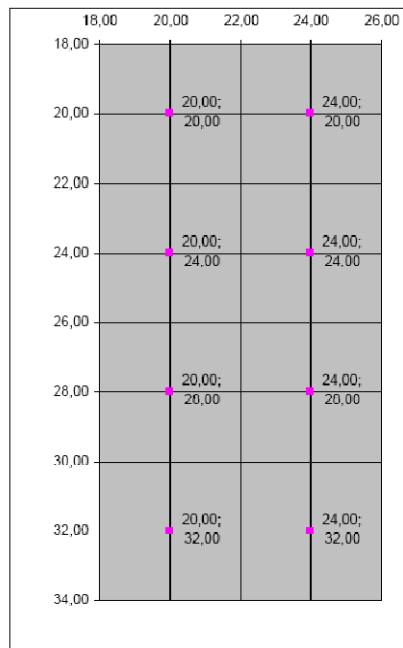


Figura III.22. Nodos de referencia posicionados en grilla.

3.4.5.1 POSICIÓN EXACTA

Con los parámetros $A = 41$ y $n = 1.4$, una medición exacta fue determinada. Para ver cómo trabaja el motor de localización. Por lo tanto los seis nodos de referencia fueron encendidos y un nodo ciego es ubicado en el campo como se muestra en la figura III.23.

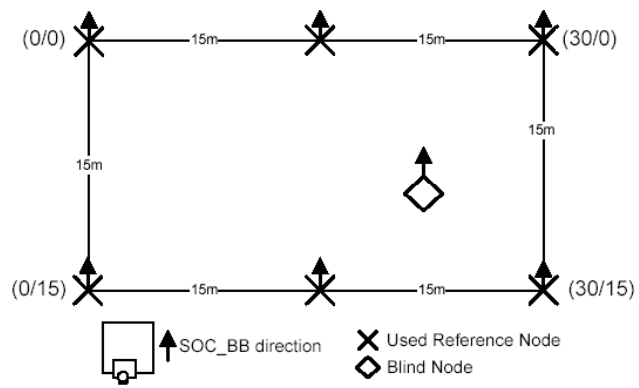


Figura III.23. Medida de la posición exacta.

3.5 A – VALOR RSSI MEDIDO A UN METRO DEL TRANSMISOR

A, que es un parámetro empírico puede ser determinado midiendo el valor RSSI a un metro de la unidad de transmisión.

- **MIDIENDO A**

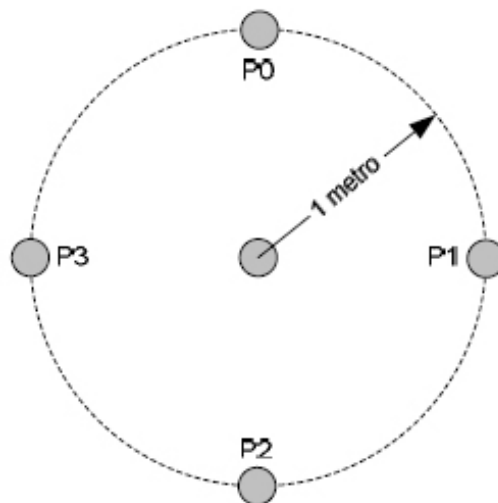


Figura III.24. Midiendo A.

Teóricamente el valor de A debería ser igual en todas las direcciones. Es muy poco probable que las antenas tanto en el transmisor y receptor sean completamente isotrópicas, por lo tanto se debería usar un valor promedio (figura III.24).

La figura III.25 muestra valores típicos de RSSI medidos a un metro del transmisor. La figura III.24 muestra valores medidos en las posiciones P0, P1, P2 y P3. La conclusión de ésta figura es que la antena no es isotrópica, así que un valor promedio de A debe ser usado. Para los dispositivos usados en ésta prueba, el valor promedio es de aproximadamente -46. Estas mediciones fueron hechas con un RSSI_OFFSET igual a -45.

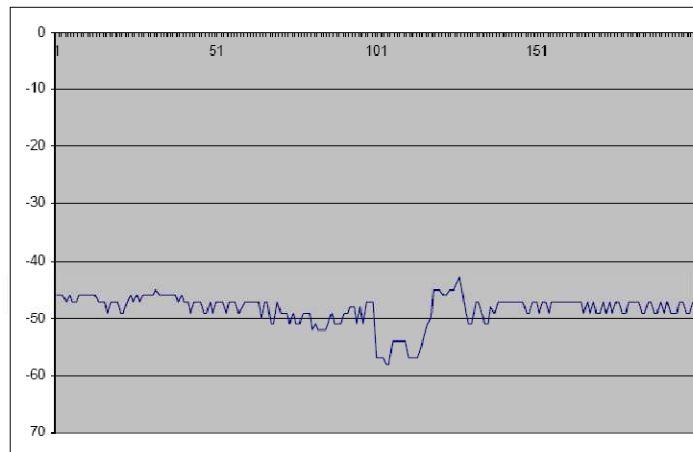


Figura III.25. RSSI medido a una distancia de un metro.

- **A vs. POSICIÓN CALCULADA**

La figura III.26 de abajo muestra como un valor erróneo para el parámetro A afectará el cálculo de la posición de un nodo ciego. La figura III.26 no está mostrado que valor de A es el más correcto de usar. El punto azul muestra que el nodo ciego calcula su

posición diferente usando valores de A diferentes, relativamente grandes diferencias en X y Y pueden ser obtenidas. Generalmente un valor de A entre 45 y 49 da respuestas más precisas para ambientes interiores de oficina. En éste ejemplo la posición calculada con A entre 45 y 49 fue aproximadamente (22, 28), mientras que la posición real fue (22, 26).

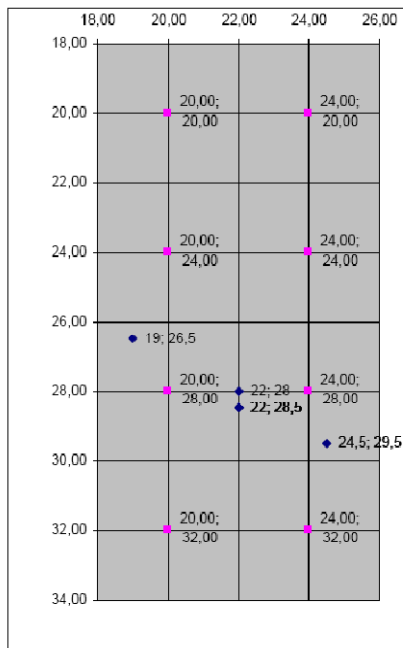


Figura III.26. A vs. Posición calculada.

3.5.1 n – COEFICIENTE DE PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL

El parámetro n es el que describe como la potencia de la señal decrece cuando la distancia desde el transmisor aumenta; n depende altamente del ambiente, por ejemplo el grosor de las paredes influirá mucho. Este valor sólo puede ser determinado empíricamente.

El motor de localización implementado en el circuito CC2431 no usa n directamente, en su lugar se usa un valor denominado n_index . La relación entre n y n_index puede ser vista en la tabla. Esta tabla de conversión es usada para reducir la complejidad de la implementación de hardware.

De la tabla III.IV n puede ser escogida entre 1.0 y 8.0

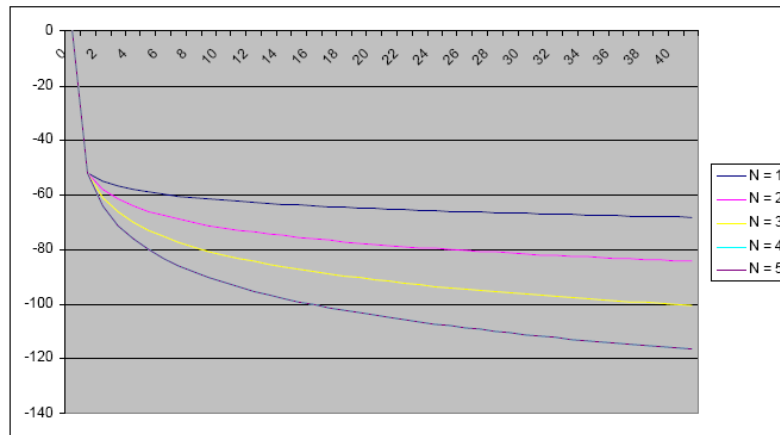


Figura III.27. n vs. Distancia

La figura III.27 muestra como la selección de n afecta el valor teórico RSSI a una distancia dada, donde la distancia está dada en metros, n debería ajustarse al ambiente actual lo más preciso posible.

- **MIDIENDO n**

Es difícil, si no imposible, encontrar un valor por defecto óptimo de n_index para todos los ambientes. La forma más fácil probablemente será instalar todos los nodos de referencia en el ambiente donde el sistema será usado y después de esto probar con

diferentes valores de n *index* para encontrar el valor que mejor se adapte con el ambiente actual. Experimentos han demostrado que un valor de n *index* entre 15 y 25 da buenos resultados.

3.5.2 NÚMERO DE NODOS DE REFERENCIA

Como regla general, se debe usar la mayor cantidad de nodos de referencia posibles. Por lo menos tres son necesarios para dar un resultado fiable. Si se usan muy pocos nodos, entonces la influencia de cada nodo es mayor y un valor RSSI erróneo puede cambiar la posición calculada significativamente.

En éste contexto valores RSSI erróneos significan valores RSSI que no se ajustan bien con el valor teórico, por ejemplo si la señal es bloqueada por muros u objetos similares.

Si el nodo ciego está localizado fuera de la grilla de los nodos de referencia, es muy probable que el resultado difiera mucho de la posición real. No es aconsejable localizar objetos que se encuentran fuera de la grilla.

3.5.3 ALGORITMOS DE SOFTWARE

Algunos algoritmos generales pueden ser implementados en software. Tres de éstos son descritos a continuación.

3.5.4 SELECCIÓN DE LOS MEJORES NODOS DE REFERENCIA

Los nodos más cercanos deberían ser usados para el cálculo. Esto significa que los ocho nodos de referencia con los valores RSSI más altos deberían ser usados, todos los otros nodos deberían ser descartados, si no se tiene más de ocho nodos, se debería usar el mayor número de nodos posibles.

3.5.4.1 EXTENSIÓN DEL ÁREA DE COBERTURA

El hardware del motor de localización puede manejar valores de X y Y de hasta 64 metros o más precisamente 63.75 metros en ambas direcciones.

Esta es un área muy pequeña para muchas aplicaciones prácticas. Por lo tanto puede ser necesario expandir ésta área. Esto puede ser logrado fácilmente con un algoritmo pre proceso de software.

Cada nodo representa X y Y con dos bytes. Con una precisión de 0.25 metros, esto da un rango máximo de 16 384 metros (Tabla III.XI.).

Tabla III.XI. Dimensiones.

| | Máximo | Precisión |
|----------|----------------------------|------------------|
| X | $2^{14} = 16384 \text{ m}$ | 0.25 metros |
| Y | $2^{14} = 16384 \text{ m}$ | 0.25 metros |

La figura III.28 muestra un ejemplo de cómo funciona el algoritmo y muestra nodos de referencia ubicados a cada 30 metros en ambas direcciones X y Y.

En la figura III.28 el nodo verde es el nodo ciego, todos los otros nodos son de referencia.

- El primer paso es localizar el nodo de referencia con el valor RSSI más alto y calcular un offset que “mueva” éste nodo al centro de un cuadrado de 64x64 metros.
- Debido al valor RSSI conocido de la señal desde éste nodo, la distancia al nodo puede ser fácilmente estimada. En la figura LII.28 la posición debe estar en el círculo blanco.
- El siguiente paso es localizar los otros nodos de referencia que serán usados junto con el nodo de señal más alta.
- En la figura III.28 los nodos usados son los de color azul. Todas las posiciones de los nodos tienen el offset calculado en el paso 1.
- Todos los valores medidos son alimentados al motor de localización y la posición resultante es medida a la salida.
- El último paso es aumentar el mismo offset a la posición calculada, luego de esto se conoce la posición del nodo ciego en la grilla global.

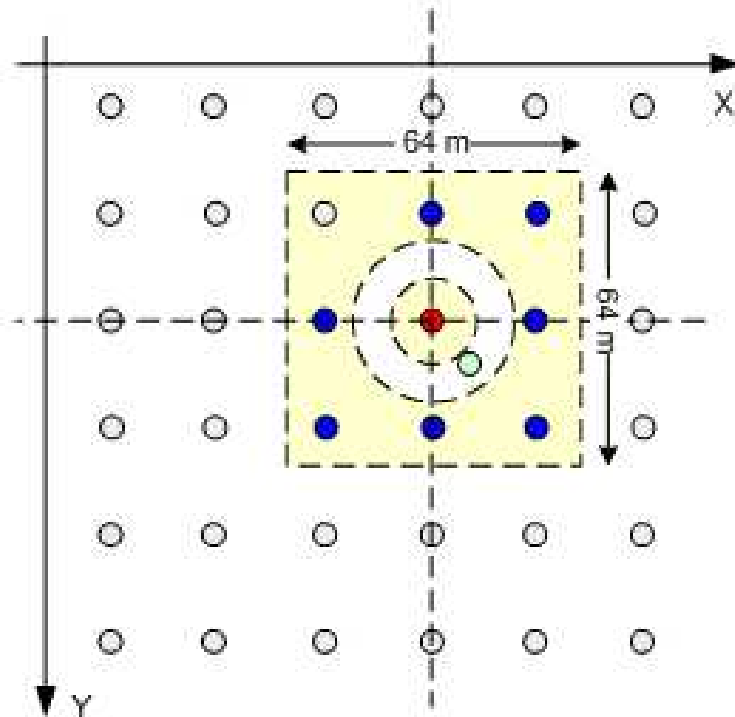


Figura III.28. Mapeo de 64x64 metros.

3.5.5 INDICACIÓN DE NIVEL O PISO

El hardware del motor de localización está diseñado para el cálculo de posiciones en dos dimensiones. A continuación se explican claves e ideas de cómo se puede extender mediante software el manejo de una tercera dirección, por ejemplo los pisos de un edificio.

Para indicar niveles, una tercera coordenada debe ser añadida a X y Y. Esta coordenada será denominada Z. Para la mayoría de propósitos será suficiente representar a Z con un valor de un byte, esto da 256 diferentes niveles.

Se asume que la potencia de la señal recibida desde un nodo ubicado en otro piso que el del nodo ciego es menor que la potencia de la señal desde un nodo ubicado en el mismo piso, esto implica que la densidad de nodos de referencia será muy alta. No se asume que todos los nodos de referencia en el mismo piso que el nodo ciego tienen una señal más fuerte que todos los nodos de referencia en los otros pisos.

La figura III.29 muestra una red simplificada usada para localizar la posición de un objeto entre niveles. Todos los tres nodos marcados con una A tienen los mismos valores en X y Y, pero diferente en Z. Todos los nodos del mismo color tienen el mismo valor de Z, pero diferentes coordenadas X y Y.

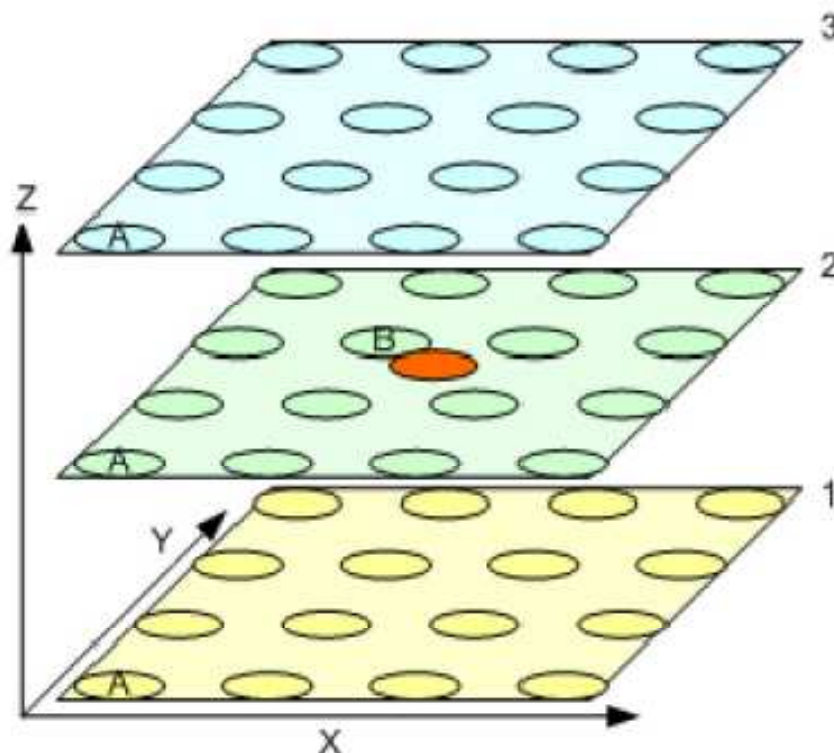


Figura III.29. Posición en una red tridimensional.

Un algoritmo que puede ser usado es el de primero localizar el nodo de referencia más cercano y leer el valor del nivel de ese nodo, se asume que éste nivel es el mismo nivel en el que se encuentra localizado el nodo ciego. Entonces es necesario asegurarse que únicamente los valores de los nodos en el mismo nivel sean ingresados en el motor de localización.

De cualquier manera, el algoritmo es usado mayormente para saber cuáles nodos de referencia serán usados, la clave principal de éste algoritmo es decidir en qué nivel se encuentra el nodo ciego, esto puede ser realizado de diferentes maneras. Si lo asumido anteriormente no es válido, otro algoritmo debe ser implementado.

En éste ejemplo se asume que el nodo de referencia más cercano proveerá al nodo ciego con la señal más fuerte. La figura III.29 muestra una red distribuida en tres pisos. Se asume que el círculo rojo en segundo piso es el nodo ciego. El algoritmo descrito a continuación hará lo siguiente para éste caso:

- Encontrar el nodo más cercano, en éste caso el nodo es denominado B.
- El nodo B le dirá al nodo ciego que se encuentra localizado en el segundo piso.
- El nodo ciego asumirá (sabrà) entonces que él también está localizado en el segundo piso.
- Todos los otros nodos de referencia que se usarán para calcular la posición también deben estar localizados en el segundo piso (de color verde en la figura).

- El nodo ciego calcula su posición de manera normal, solamente usando las direcciones X y Y .
- Las coordenadas X y Y calculadas, junto con la coordenada Z decidida son reportadas como la posición tridimensional.

3.5.6 SISTEMA DE CONTROL CENTRAL

Para recolectar los datos calculados e interactuar con la red de los radios de los nodos, es necesario algún tipo de sistema de control. Una típica unidad de control es una computadora. Ya que normalmente una computadora no tiene un transceiver incorporado, éste necesita ser conectado externamente (figura III.30.).

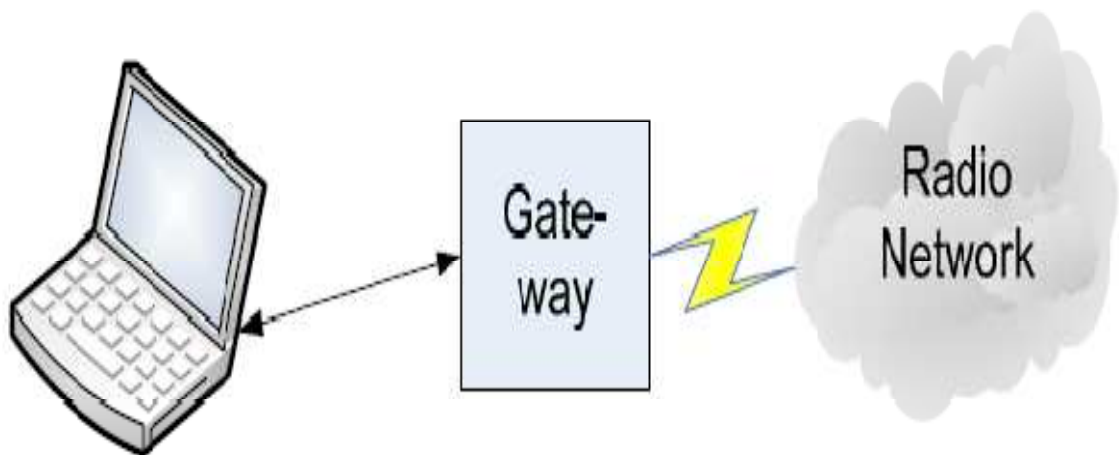


Figura III.30. Interfaz entre la red de radios y una PC.

Existen dos enfoques para construir un gateway: (1) el gateway puede ser un dispositivo pasivo que solamente escucha el tráfico de la red, o (2) éste puede ser

parte activa de la red. En el enfoque pasivo el dispositivo es un sniffer de paquetes, el gateway únicamente capturará los paquetes RF y proveerá de ésta información al usuario. El enfoque activo da al usuario mayor flexibilidad, pero es más difícil de implementar.

Qué funciones que residen en éste transceiver, llamado gateway, corresponden a la aplicación. Algunas de las funciones mínimas típicamente podrían ser:

- Configuración de los nodos.
- Verificar el estado de la red., por ejemplo cuantos nodos están conectados.
- Pedir a los nodos ciegos que realicen algún cálculo, si éstos no están configurados para hacerlo por sí mismos en intervalos regulares de tiempo.

El dispositivo que actúa como gateway puede ser parte de la red de cálculo y actuar como nodo de referencia o nodo ciego al mismo tiempo.

Ya que el cálculo de la posición se realiza en los nodos ciegos, el dispositivo de control no realizará ningún cálculo de posición. Su único propósito es el de brindar al usuario la habilidad de interactuar con la red.

3-6 CÁLCULO DE LA DISTANCIA EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS Y LA ATENUACIÓN DEL MEDIO

Para determinar la distancia con los valores RSSI (figura III.31); como ejemplo práctico manejamos las mediciones sobre un campo de futbol (30m*15m); el módulo de CC2431 de Chipcon utiliza un modelo de atenuación simple (sistema de pérdidas en el espacio libre), como se muestra en la figura III.31 y en la ecuación . El motor de localización requiere una suma al valor RSSI los parámetros A y n analizados en esta sección.

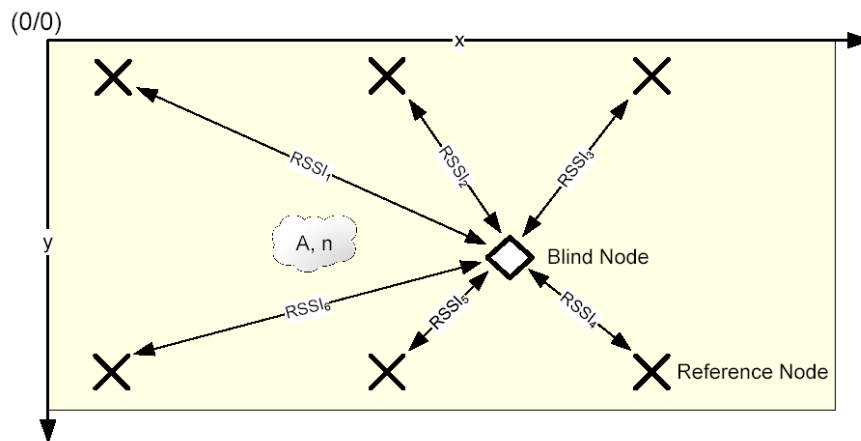
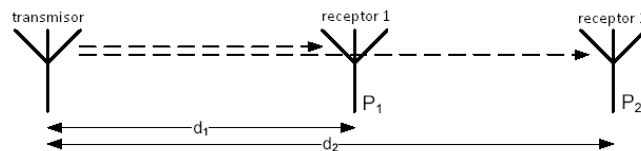


Figura III.31. Valores de RSSI desde varios nodos de referencia.



$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^n \quad (\text{Ec. XVI})$$

Donde:

d_1 =distancia al transmisor [m]

d_2 =distancia al transmisor [m]

P_1 =distancia al transmisor [W]

P_2 =distancia al transmisor [W]

n = coeficiente de atenuación

Podemos reescribir la ecuación en notación logarítmica, así:

$$P_2[dBm] = P_1[dBm] + 10n(\log_{10}(d_1) - \log_{10}(d_2)) \quad (\text{Ec. XVII})$$

El parámetro A es definido como el valor absoluto de la potencia en dBm, recibido a la distancia de 1 metro desde el transmisor; aplicando este hecho a la ecuación esta se reduce a la ecuación 19 y 20, donde P_2 es el valor RSSI medido a la distancia d desde el sensor.

$$\underbrace{P_2[dBm]}_{RSSI} = \underbrace{P_1[dBm]}_{-A} + 10n \underbrace{(\log_{10}(d_1) - \log_{10}(d_2))}_0 \quad (\text{Ec. XVIII})$$

$$RSSI = -(A + 10n * \log_{10}(d)) \quad (\text{Ec. XIX})$$

Donde:

d = distancia al transmisor [m]

A = valor absoluto de la potencia a 1 metro del transmisor [dBm]

n = coeficiente de atenuación

La ecuación XIX resulta de la relación entre $RSSI$ y d como es mostrado en la figura

III.32:

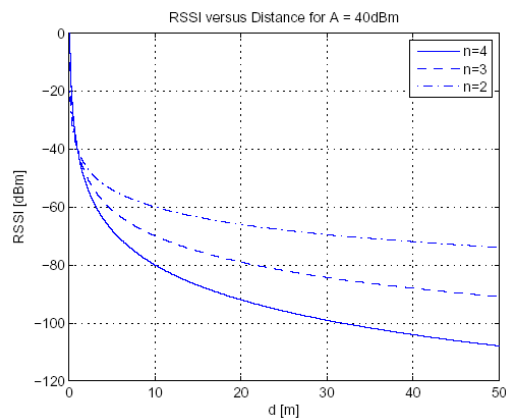


Figura III.32. Relación entre $RSSI$ y d para un valor de $A=40dBm$, variando los coeficientes de atenuación.

El valor de $RSSI$ disminuye logarítmicamente con respecto a la distancia y es influenciado fuertemente por el coeficiente de atenuación n , donde $n = 2$ para el típico modelo en espacio libre. Despejando la distancia de la ecuación III.XIX, la ecuación que utilizaremos para calcular la posición queda:

$$d = 10^{-\left(\frac{A+RSSI}{10n}\right)} [m] \quad (\text{Ec. XX})$$

$$d = 10^{-\left(\frac{P_1+P_2}{10n}\right)} [m] \quad (\text{Ec. XXI})$$

Este cálculo se aplica desde el nodo ciego a cada nodo de referencia para después aplicar la trilateración o triangulación.

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

4.1. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

La comunicación entre el programa (interfaz de usuario) y el nodo coordinador de la red zigbee se realiza mediante el puerto serie, ésta interfaz serial permite enviar comandos y recibir respuestas desde el objetivo (coordinador) mediante un protocolo de enlace de capas. Para la comunicación entre los nodos vía inalámbrica también se utiliza el mismo formato de mensajes.

Los parámetros de la transmisión serial son los siguientes:

- Sin paridad
- 8 bits de datos

- 1 bit de parada
- 38.4 kbps

En los campos de múltiples bytes se transmite primero el byte más significativo. Los paquetes tienen el siguiente formato:

| | | | | |
|-----|-----|-----|------|-----|
| SOP | CMD | LEN | DATA | FCS |
|-----|-----|-----|------|-----|

Paquete de información serial.

- SOP (start of packet) este es un campo de un byte con el valor 0x02 que define el comienzo de cada paquete.
- CMD (ID de comando) este es un campo de dos bytes con el valor de la identificación de comando del mensaje.
- LEN (length) este es un campo de un byte que indica el número de bytes en el campo DATA.
- DATA este campo contiene la información a ser transmitida.

Mensajes de salida (Tabla IV.XII.):

Tabla IV.XII. Mensajes de salida.

| Byte | Descripción | Valor |
|-------|------------------------------------|---------------------|
| 0 y 1 | Dirección de destino del mensaje | 0x0000 – 0xFFFF |
| 2 | Dispositivo de destino del mensaje | 0x00 – 0xFF |
| 3 y 4 | Id del mensaje | 0x0000 – 0xFFFF |
| 5 | Longitud del mensaje | 0x00 – 0xFF |
| 6 - n | Mensaje de salida | Depende del mensaje |

Mensajes de entrada (tabla IV.XIII.):

Tabla IV.XIII. Mensajes de entrada.

| Byte | Descripción | Valor |
|-------|-----------------------------------|---------------------|
| 0 | Id de aplicación | 0x00 – 0xFF (0XCB) |
| 1 y 2 | Dirección de origen del mensaje | 0x0000 – 0xFFFF |
| 3 | Dispositivo de origen del mensaje | 0x00 – 0xFF |
| 4 y 5 | Id del mensaje | 0x0000 – 0xFFFF |
| 6 | Longitud del mensaje | 0x00 – 0xFF |
| 7 - n | Mensaje de entrada | Depende del mensaje |

- FCS (frame check sequence) este es un campo de un byte que se usa para asegurar la integridad del paquete, se calcula con un XOR de todos los bytes en el mensaje desde CMD hasta el último byte de DATA.

4.2. DISEÑO DEL SOFTWARE

4.2.1. PROGRAMACIÓN DE LOS MÓDULOS

Los módulos (circuito integrado CC2431) fueron programados con el software IAR Embedded Workbench 8051.

Los módulos de referencia fueron programados con los siguientes datos (tabla XIV.):

Tabla IV.XIV. Coordenadas de nodos de referencia.

| Balizas | Dirección Lógica | Coordenadas (X, Y) m |
|---------|------------------|----------------------|
| 1 | 50F6 | (0, 0) |
| 2 | 287B | (0, 3) |
| 3 | 6532 | (3, 0) |
| 4 | 143E | (3, 3) |
| 5 | 50F5 | (0, 6) |
| 6 | 0001 | (3,6) |

El algoritmo de funcionamiento de la red es descrito a continuación (figura IV.33.):

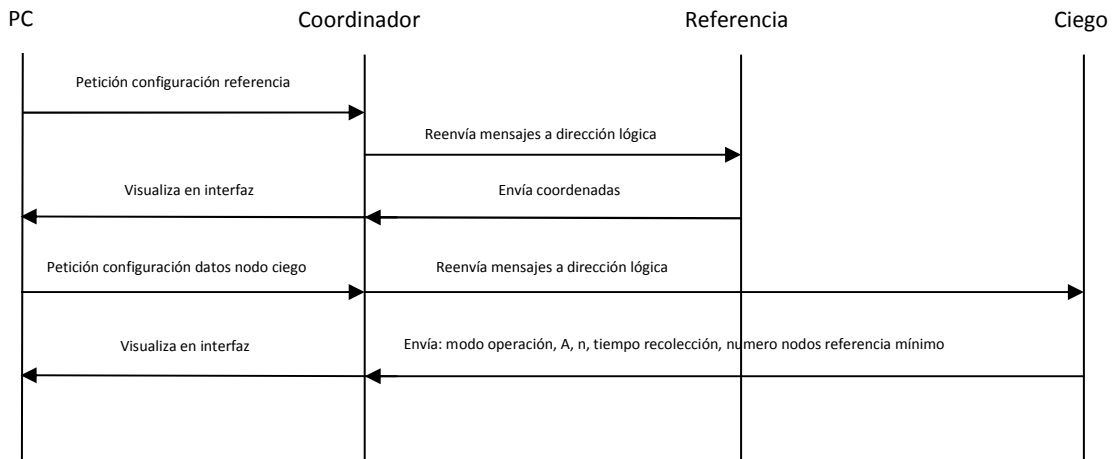


Figura IV.33. Algoritmo de funcionamiento del sistema a implementar.

Para modificar las coordenadas de cualquier tipo de nodo, el algoritmo varía únicamente en la primera orden, en lugar de hacer una petición, se envían los datos de las nuevas coordenadas.

El nodo ciego fue programado con los siguientes datos (tabla IV.XV.):

Tabla IV.XV. Dirección lógica de nodo ciego.

| |
|-------------------------|
| Dirección Lógica |
| 3CB8 |

El algoritmo para el motor de localización es el siguiente (Figura IV.34):

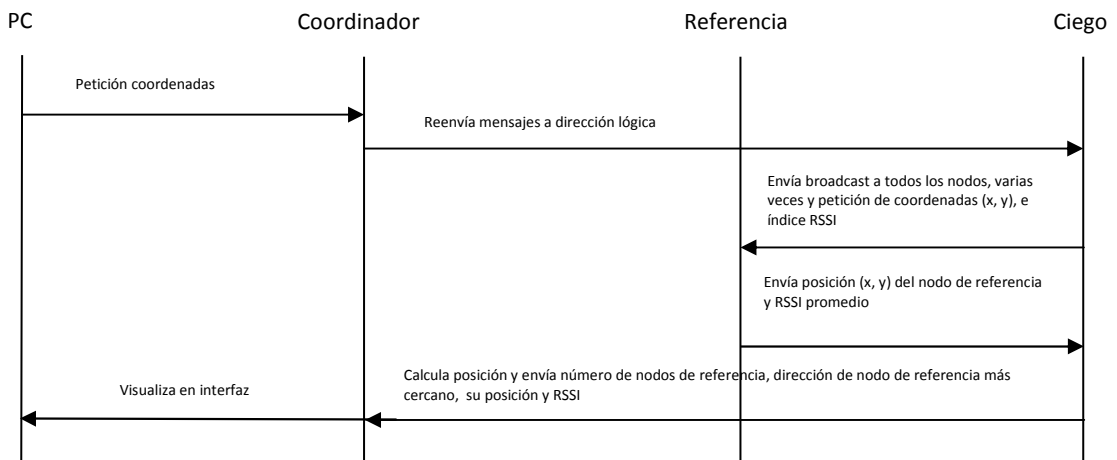


Figura IV.34. Algoritmo del motor de localización.

4.2.2. PARÁMETROS DE ENTRADA Y SALIDA

4.2.2.1 PARÁMETROS DE ENTRADA

De acuerdo a nuestra grilla de referencia las posiciones o datos de entrada son los siguientes (tabla IV.XVI.):

Tabla IV.XVI. Valores de parámetros A y n.

| Nombre | Valor | Rango |
|---------|-------|---------|
| A | 39 | [30-50] |
| n_index | 30 | [0-31] |

4.2.2.2 PARÁMETROS DE SALIDA

La respuesta para cada petición es recibida; y es almacenada en un vector de datos como se muestra en la tabla IV.XVII:

Tabla IV.XVII. Vector de valores, posiciones X_n , Y_n .

| Valor X | Valor Y |
|---------|-----------|
| 0_n | 63.75_n |

4.2.3. DEFINICIÓN DEL ENTORNO

En entornos como naves industriales, edificios de oficinas o cualquier tipo de área donde se necesite implementar un sistema de localización de dispositivos móviles, que pueden ser instalados en robots para desplazarse de forma autónoma y realizar tareas programadas o ser llevados por personas como pequeños aparatos de localización, es fundamental determinar primero las características del área y la cobertura deseada donde se implementará el sistema, con el fin de establecer los parámetros iniciales que definen el funcionamiento del algoritmo. Por lo tanto, en nuestro caso primero definimos el área por donde se desplazará el móvil y el área donde se podrán ubicar las

balizas o nodos. Luego conociendo la altura del móvil y determinando la altura a la que se ubicarán las balizas, es posible conocer el radio de cobertura de cada baliza con base en las características del lóbulo de emisión. Entonces el problema consiste en encontrar la ubicación del menor número de balizas posibles, para tener cobertura en toda el área de trabajo con buenas condiciones geométricas para hacer los cálculos de multilateración, garantizando un sistema utilizable en toda el área de trabajo. Por propósitos prácticos utilizamos un módulo estándar de 3m*3m para formar nuestra grilla, ésta dimensión puede variar dependiendo de las necesidades del usuario. Estamos en el interior de una construcción; el nodo coordinador de la red está directamente conectado al computador para interpretar la información recibida por los nodos de referencia y del nodo ciego.

4.2.4. CÁLCULO DE LA POSICIÓN

Utilizando la ecuación XXII, calculamos una distancia del nodo ciego a un nodo de referencia con la ecuación XXI.

$$d = 10^{-\left(\frac{A+RSSI}{10n}\right)}$$

Los datos son los siguientes:

A=39

RSSI=-25

n=30

Obtenemos:

$$d = 10^{-\left(\frac{39-25}{10*30}\right)}$$

$$d = 10^{-0.0467}$$

$$d = 0.898m$$

4.2.5. INTERFAZ DE USUARIO

El programa para localizar el objeto en movimiento fue programado en MATLAB, la pantalla principal es la siguiente (figura IV.35):

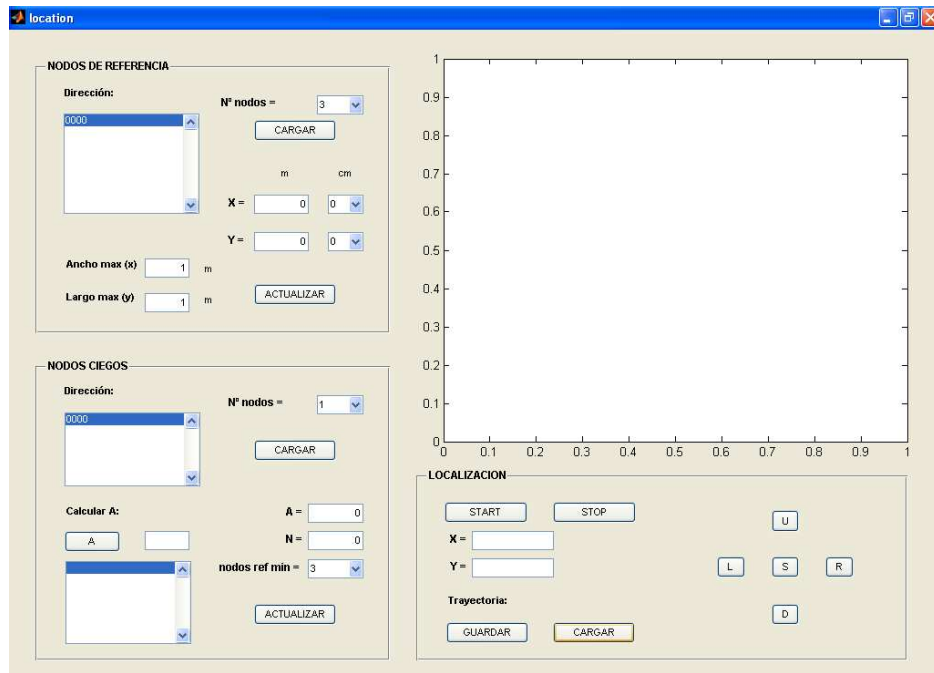


Figura IV.35. Pantalla principal para localizar el objeto en movimiento.

Primero cargamos las dimensiones del área de trabajo (figura IV.36):

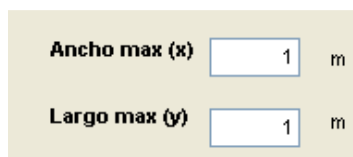


Figura IV.36. Ingreso de dimensiones del área de trabajo en metros.

Determinamos el número de nodos de referencia, por defecto el programa utiliza 3 nodos mínimo; en nuestro caso utilizamos 6 nodos (Figura IV.37):

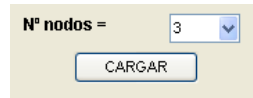
A small rectangular window with a light beige background. At the top left, it says "Nº nodos =". To the right of this text is a small white box containing the number "3" and a small blue downward-pointing arrow. Below this box is a button with the word "CARGAR" in capital letters.

Figura IV.37. Determinar número de nodos de referencia.

Se pueden visualizar las direcciones lógicas de cada nodo de referencia en la caja de texto (figura IV.38.):

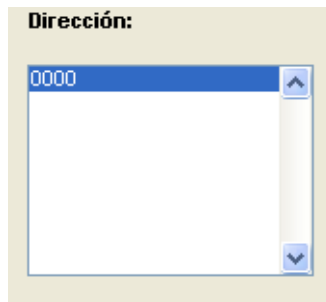
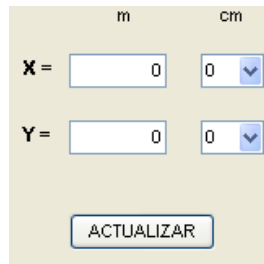
A rectangular window with a light beige background. At the top left, it says "Dirección:". Below this is a text box with a blue border and a blue background. The text "0000" is written in white on the blue background. To the right of the text box is a vertical scrollbar with a blue arrow pointing up and a blue arrow pointing down.

Figura IV.38. Direcciones lógicas de los nodos de referencia.

Se pueden cargar las coordenadas (en metros y centímetros) por el usuario en cada nodo de referencia, opcionalmente; para verificación de coordenadas y localización (figura IV.39.), se debe pulsar el botón ACTUALIZAR para que se carguen las mismas.

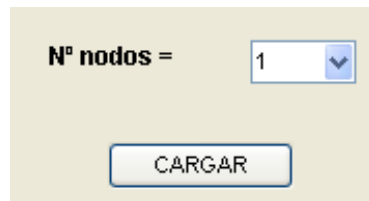
La precisión de las coordenadas puede variar en 25 cm con sus respectivos múltiplos; después debemos pulsar el botón CARGAR las nuevas coordenadas.



The form contains two rows of input fields. The first row is for 'X' and the second for 'Y'. Each row has a text input field with '0' inside, followed by a dropdown menu with '0' selected. Above the first dropdown is the label 'm' and above the second is 'cm'. Below the input fields is a button labeled 'ACTUALIZAR'.

Figura IV.39. Coordenadas ingresadas por el usuario.

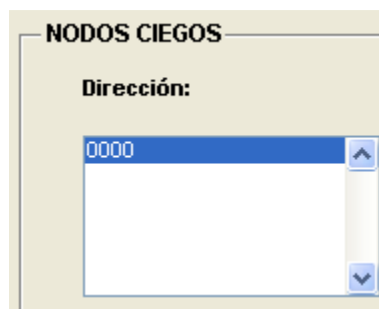
Procedemos a cargar los nodos ciegos, pueden ser varios (figura IV.40.), en nuestro caso por el limitado número de hardware utilizamos solamente un nodo con su respectivo actuador.



The form has a label 'Nº nodos =' followed by a dropdown menu showing the number '1'. Below this is a button labeled 'CARGAR'.

Figura IV.40. Determinar número de nodos ciegos.

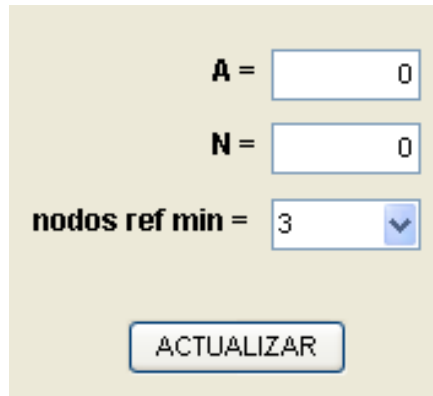
Visualizamos la dirección lógica del nodo en la caja de texto (figura IV.41.):



The form has a title bar 'NODOS CIEGOS'. Below it is a label 'Dirección:' followed by a text input field containing '0000'. To the right of the text field is a vertical scrollbar with up and down arrows.

Figura IV.41. Dirección lógica del nodo ciego.

Podemos cargar los parámetros A y n definidos por el usuario para mejorar la precisión en el cálculo de la posición (figura IV.42.), y pulsamos el botón ACTUALIZAR:



A =

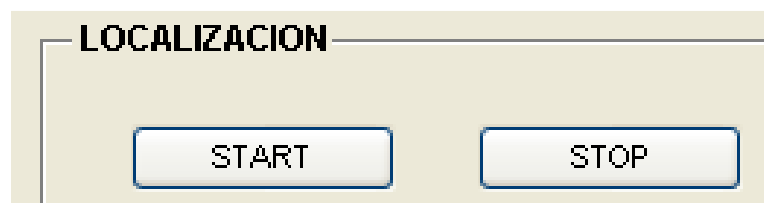
N =

nodos ref min =

Figura IV.42. Ingreso de parámetros A y n.

Existe un control para el cálculo de A y n, basado en el número de nodos de referencia ingresados por el usuario, el nodo ciego puede calcular su posición con al menos 3 nodos ó con un número menor o igual al número de nodos de referencia (figura IV.43.).

Una vez establecidos los parámetros e ingresados los datos para el cálculo del nodo ciego, procedemos a iniciar con la localización del objeto en movimiento, pulsamos el botón START (figura IV.43.):



LOCALIZACION

Figura IV.43. Botón de inicio de la localización.

El resultado se visualiza en el espacio de ejes coordenados (figura IV.44.), punto por punto:

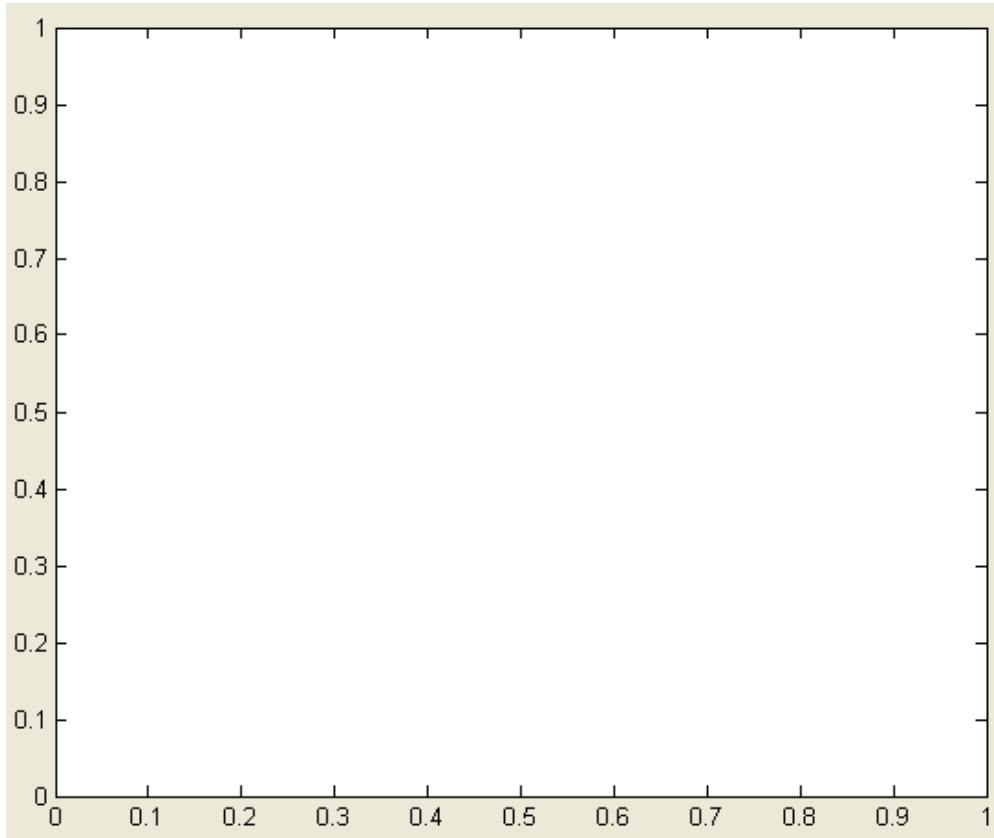


Figura IV.44. Visualización de nodos en pantalla con ejes coordenados.

Para detener el proceso de localización pulsamos el botón STOP de la figura IV.43. En los casilleros X y Y se obtienen las coordenadas de los diferentes puntos de localización del nodo ciego en su toda su trayectoria, uno a la vez (figura IV.45.).

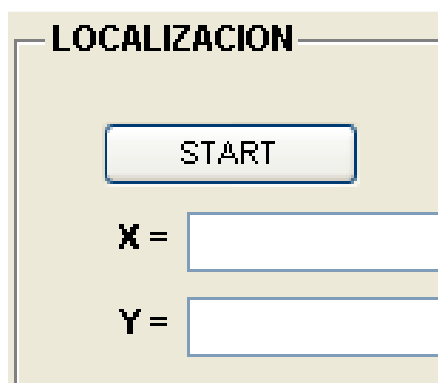
A software interface window titled "LOCALIZACION" in bold black text. Below the title bar, there is a button labeled "START". Underneath the button, there are two input fields. The first is labeled "X =" and the second is labeled "Y =", both in bold black text. The input fields are empty rectangular boxes with blue borders.

Figura IV.45. Coordenadas de ubicación de nodos ciegos.

El valor de A puede ser obtenido presionando el botón A, el mismo que es calculado por medio de la fórmula de media geométrica para los diferentes valores de los nodos de referencia (figura IV.46.).

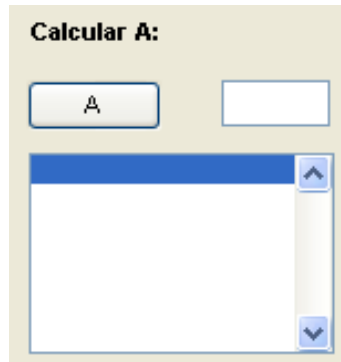


Figura IV.46. Cálculo de A en el nodo ciego.

Podemos guardar la trayectoria actual del objeto en movimiento, que acabamos de localizar grabándolo en un archivo de texto, pulsando el botón GUARDAR, ó podemos cargar una trayectoria anterior y visualizarla en la pantalla pulsando el botón CARGAR de la figura IV.47.

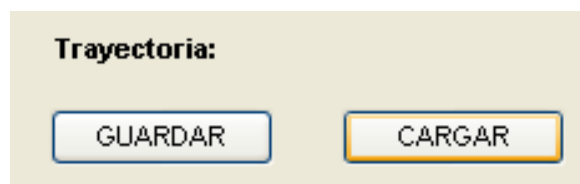


Figura IV.47. Botones para guardar ó cargar trayectorias.

Desde la interfaz del programa podemos controlar el movimiento del actuador mediante la consola de dirección que se muestra en la figura IV.48.

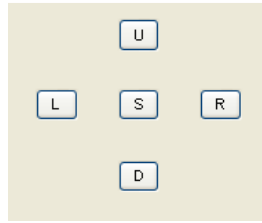


Figura IV.48. Consola de mando del actuador con el nodo ciego.

Puede moverse para arriba (UP), abajo (DOWN), izquierda (LEFT), y derecha (RIGHT), el paro general es STOP.

4.3. DISEÑO DEL CARRO A CONTROL REMOTO (ACTUADOR)

Para propósitos demostrativos, se construye un carro a control remoto controlado desde la interfaz del programa. Las condiciones del programa son detallados en la tabla de verdad mostrada a continuación (tabla IV.XVIII.):

Tabla IV.XVIII. Condiciones de funcionamiento del circuito.

| Entradas | | | Motor 1 | | Motor 2 | |
|----------|---|---|---------|-----|---------|-----|
| X | Y | Z | M1A | M1B | M2A | M2B |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |

El algoritmo de funcionamiento es el siguiente (figura IV.49.):

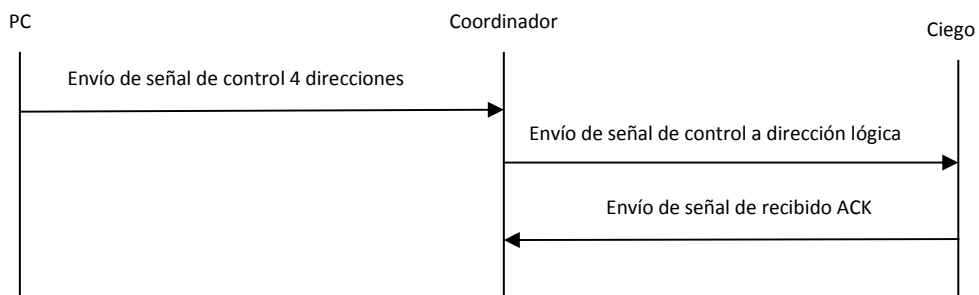


Figura IV.49. Algoritmo de control de actuador.

4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL ACTUADOR

El circuito construido a continuación es diseñado en Proteus (Figura IV.50.) e implementado sobre un chasis de juguete, impulsado con dos motores de 6v cada uno; utilizamos una batería recargable de 9.6v con 650mAh, para mover el vehículo.

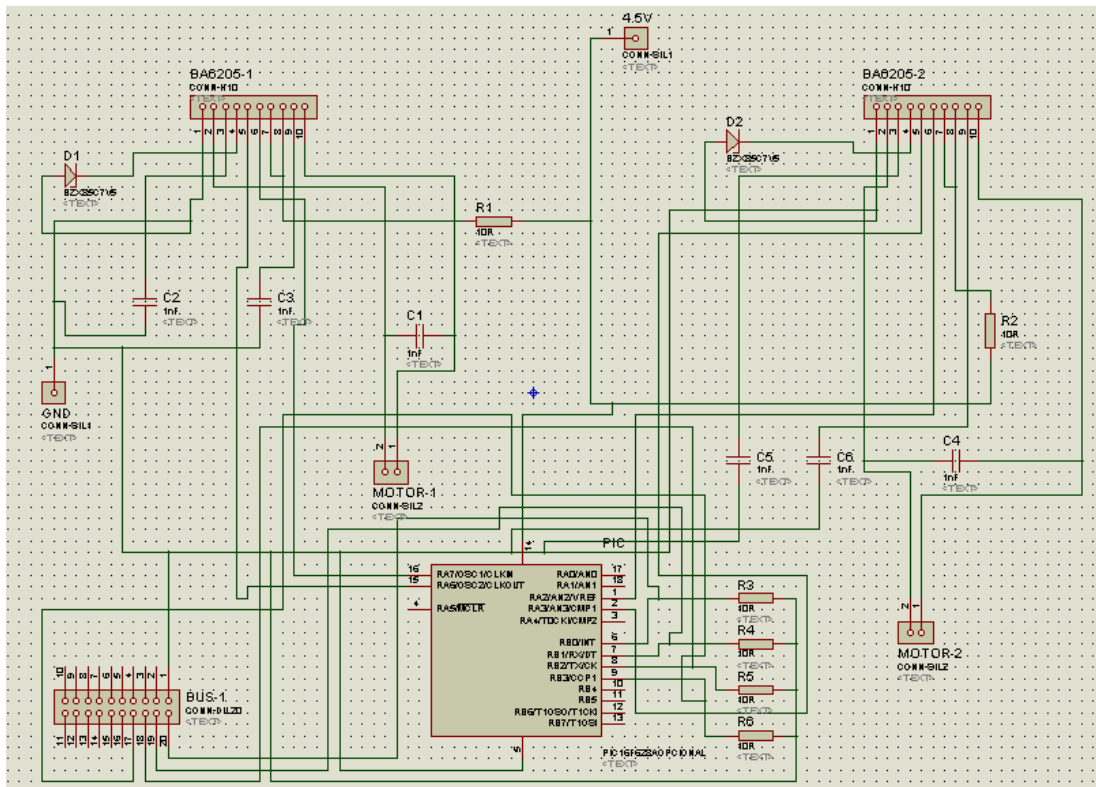


Figura IV.50. Circuito para carro a control remoto.

Con todas las piezas disponibles para grabar, el circuito es transportado al programa ARES para el diseño de la placa, (Figura IV.51):

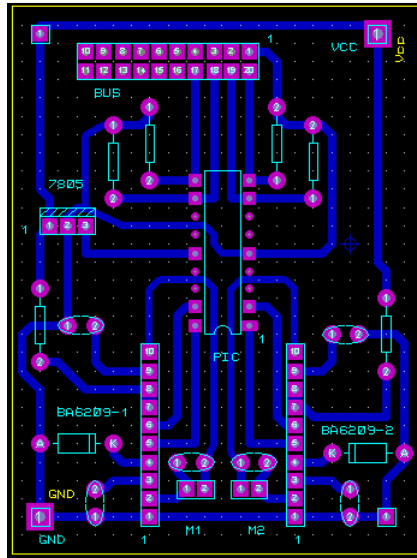


Figura IV.51. Diseño de la placa del circuito a control remoto.

La figura IV.52 muestra el circuito en 3D:

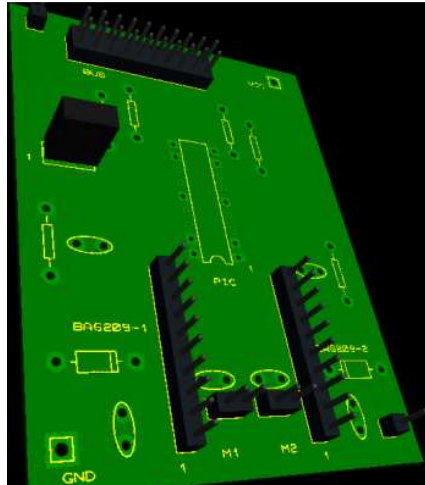


Figura IV.52. Placa en 3D.

Imprimimos el circuito sobre papel transfer, pasamos con calor a la placa y diluimos el ácido, sumergimos y obtenemos nuestra placa terminada (figura IV.53.):

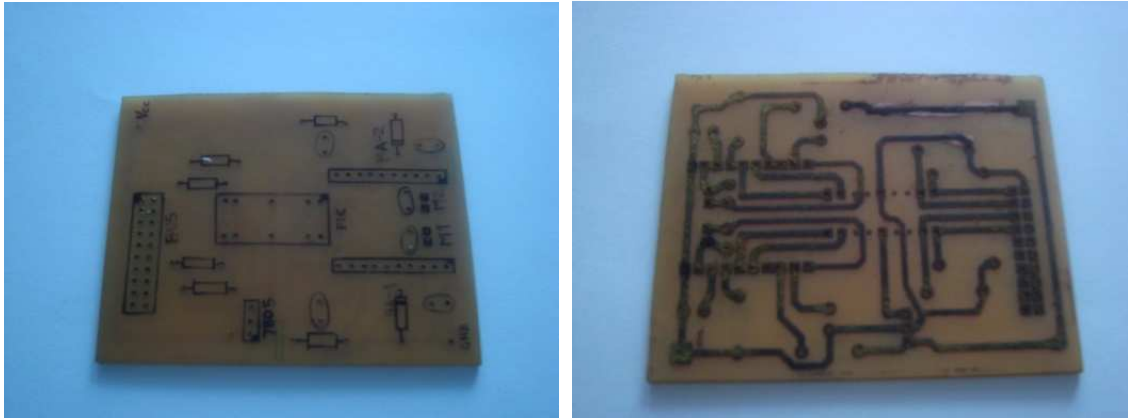


Figura IV.53. Pistas terminadas.

Procedemos a soldar los elementos (figura IV.54.):

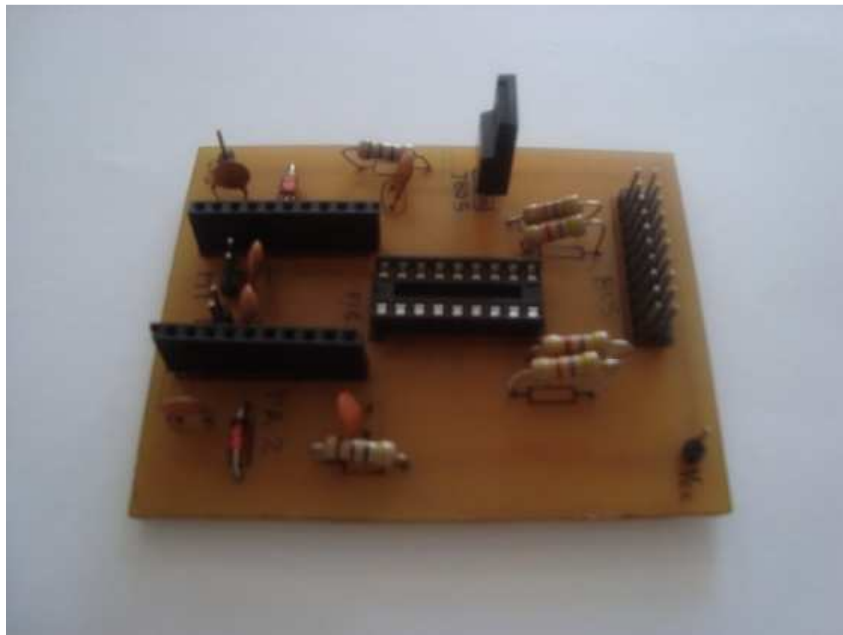


Figura IV.54. Placa terminada.

Montamos sobre un chasis de juguete con dos motores de 4.5v (figura IV.55.):



Figura IV.55. Chasis de juguete.

El actuador terminado sin carcasa queda (figura IV.56.):



Figura IV.56. Actuador para pruebas sin carcasa.

4.4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS DE HARDWARE

El proyecto está compuesto a nivel de hardware por cinco componentes:

- Interfaz de usuario (PC)
- Nodo coordinador de la red

- Nodos de referencia
- Nodo ciego
- Actuador

4.5. LOCALIZACIÓN DE BALIZAS

Utilizamos 6 balizas como nodos de referencia, cada 4 balizas definen un módulo estándar (3m*3m) el plano teórico es mostrado en la figura IV.57:

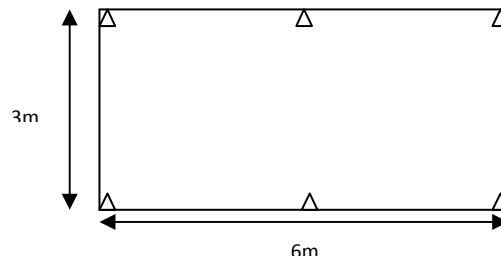


Figura IV.57. Plano teórico del área de trabajo.

La altura de las balizas en nuestro caso son 2cm, es decir los nodos están colocados a nivel de piso, los 2 cm son la altura efectiva de la antena de cada transceiver.

4.6. INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO

Para la instalación hemos escogido un lugar abierto (figura IV.58.):



Figura IV.58. Instalación de las balizas en campo.

Para determinar el valor de A utilizamos 4 nodos de referencia ubicados a 1m del nodo de referencia, en posición ortogonal (figura IV.59.).



Figura IV.59. Medición del parámetro A en campo.

El valor del parámetro A es 39.

El sistema funciona de acuerdo a la siguiente secuencia (figura IV.60):

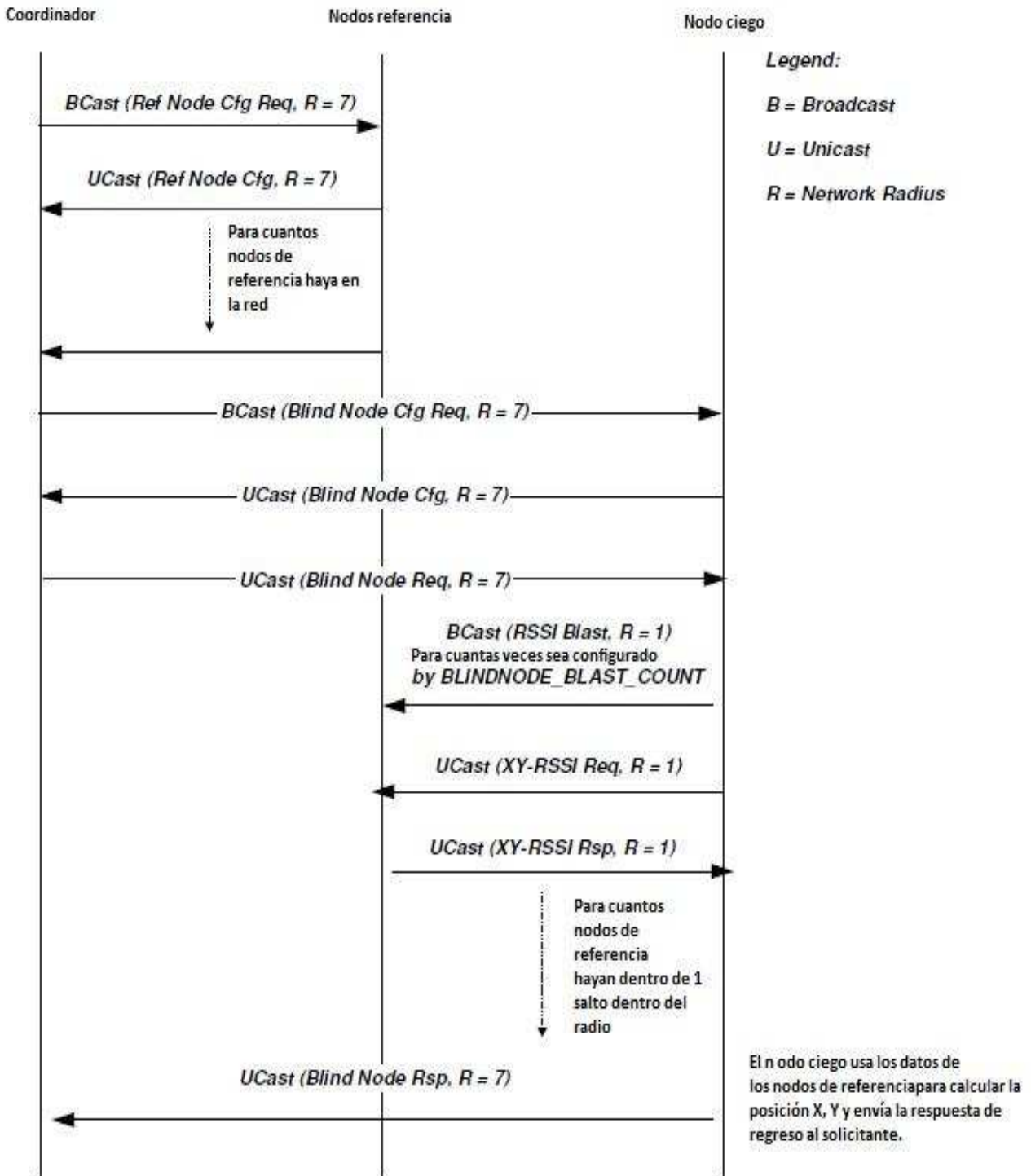


Figura IV.60. Secuencia de establecimiento de red con los diferentes nodos.

4.7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

El nodo coordinador organiza la red al dar in ID de red, en nuestro caso es el ID 1757, es alimentado mediante USB y conectado al computador por el puerto serie (figura IV.61.):



Figura IV.61. Nodo coordinador de red ID 1757.

La interfaz detecta las balizas y la posición inicial del nodo ciego, como se muestra a continuación en la figura IV.62:

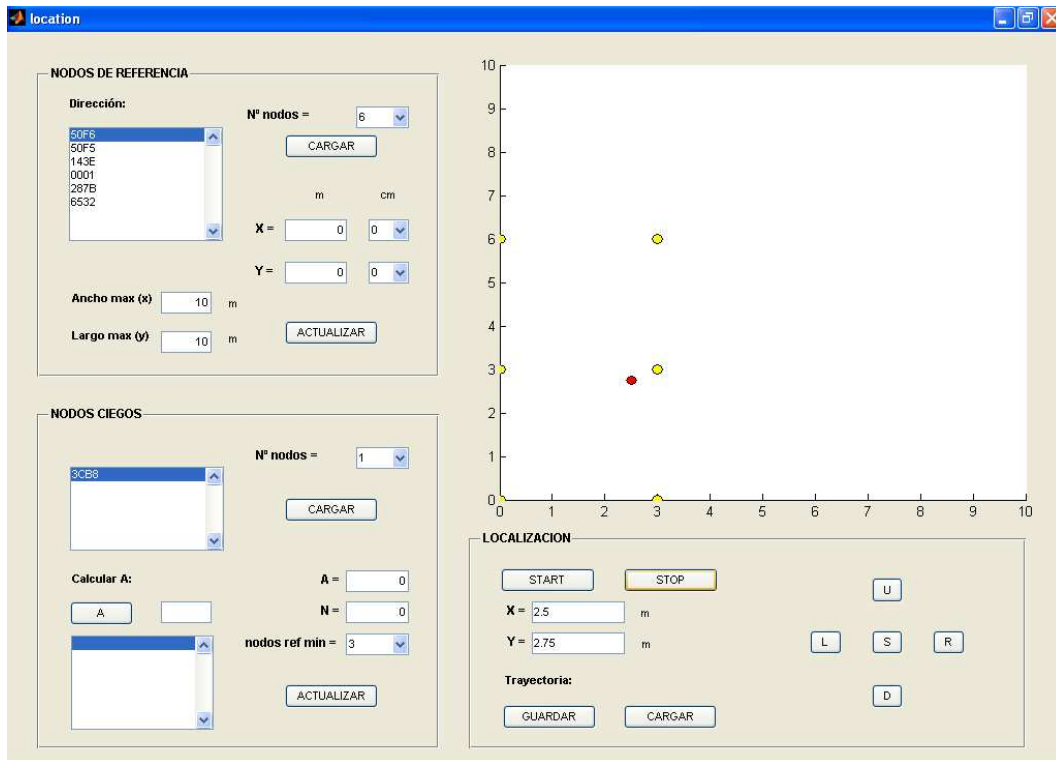


Figura IV.62. Interfaz con nodos: de referencia y ciego.

El objeto en movimiento siguió una trayectoria determinada real, y el sistema detectó la siguiente (figura IV.63.):

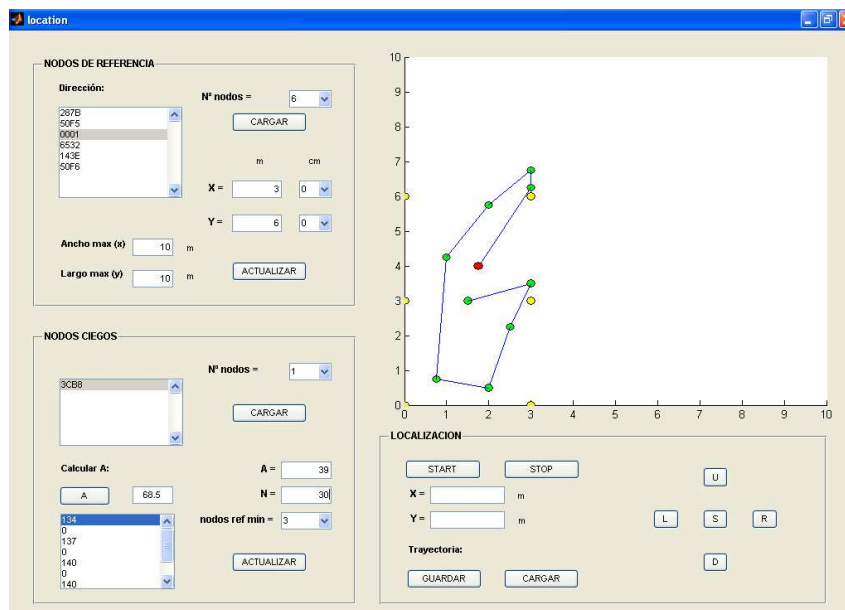


Figura IV.63. Trayectoria detectada por el sistema.

Los resultados obtenidos serán abalizados en lo posterior.

4.5.1 PROBLEMAS EN LA PRÁCTICA CON RSSI

Hay que tener en cuenta varios aspectos con el índice de potencia de la señal:

- Varía cuando traspase objetos, para nuestro caso en la frecuencia de 2.4GHz la atenuación a través de ladrillos (20cm*10cm*40cm) es de 3dB, hay que evitar las paredes de vidrio tinturado pues la pérdida es de 19dB.
- Las características de propagación de la señal cambian frecuentemente.
- El RSSI depende del nivel de batería del nodo.
- Evitar el bloqueo, la difracción, la deflexión, la reflexión de la señal.
- La sensibilidad del transceptor.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS OBTENIDOS

El programa obtiene valores cada 2 segundos de su ubicación. El valor de $A=39$ y $n=30$;

las posiciones de los nodos de referencia son (tabla V.XIX.):

Tabla V.XIX. Coordenadas de nodos de referencia.

| Nodos | Dirección Lógica | Coordenadas (X, Y) |
|--------------|-------------------------|---------------------------|
| 1 | 143E | (0, 0) |
| 2 | 287B | (3, 0) |
| 3 | 6532 | (0, 3) |
| 4 | 50F6 | (3, 3) |
| 5 | 50F5 | (0, 6) |
| 6 | 0001 | (3, 6) |

Las posiciones del nodo de referencia son (Figura V.64.):

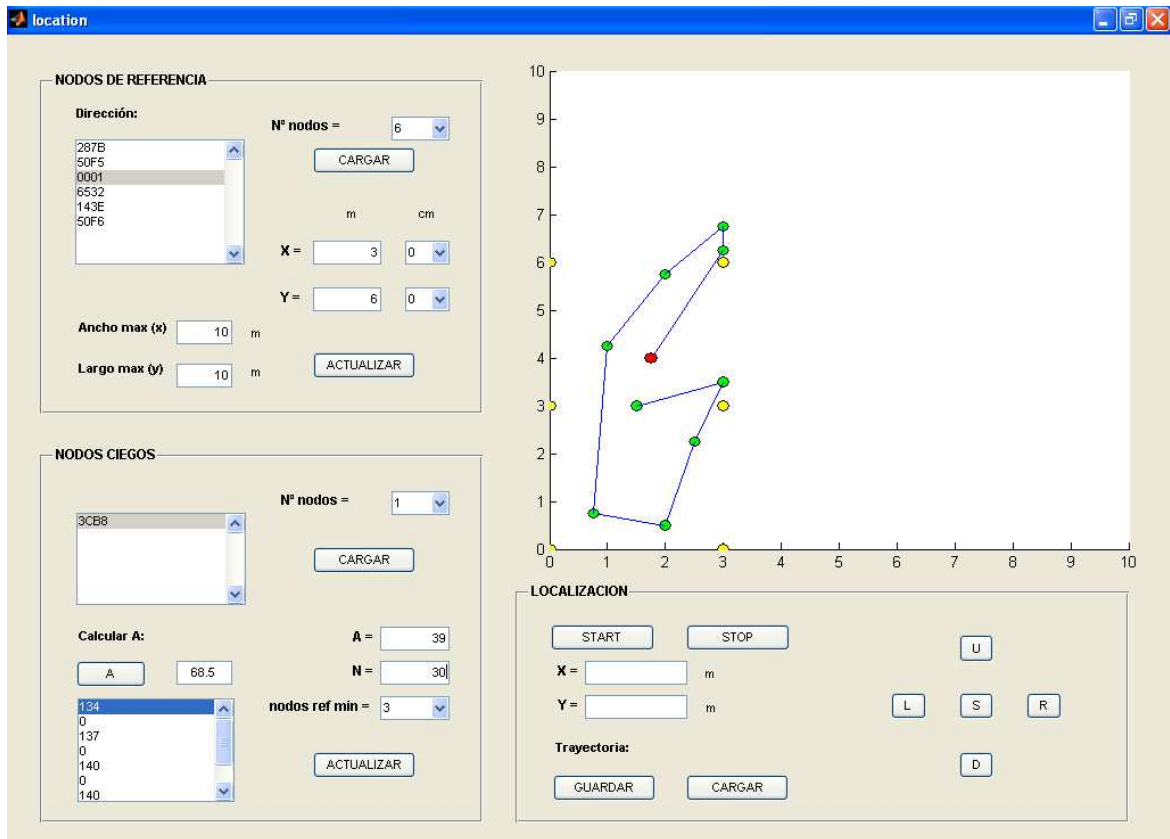


Figura V.64. Posiciones de los 6 nodos de referencia.

Las coordenadas del gráfico son las siguientes (tabla V.XX.):

Tabla V.XX. Coordenadas reales vs. Coordenadas calculadas.

| Num. Veces | X [m] | | Y [m] | |
|---------------|-------|-----------|-------|-----------|
| | Real | Calculada | Real | Calculada |
| 1 | 1.50 | 1.50 | 3.00 | 3.00 |
| 2 | 2.75 | 3.00 | 3.50 | 3.50 |
| 3 | 2.50 | 2.50 | 2.00 | 2.25 |
| 4 | 2.25 | 2.00 | 0.00 | 0.50 |
| 5 | 1.00 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| 6 | 0.75 | 1.00 | 4.00 | 4.25 |
| 7 | 2.00 | 2.25 | 5.25 | 5.75 |
| 8 | 3.00 | 3.00 | 7.00 | 6.75 |
| 9 | 2.75 | 3.00 | 6.00 | 6.25 |
| 10 | 2.00 | 1.75 | 3.75 | 4.00 |

Aunque existen diferencias entre los valores reales y los calculados, la trayectoria del objeto en movimiento es aproximada tomando en cuenta las dimensiones reducidas

del área de trabajo. La precisión de la localización se puede mejorar aumentando el número de nodos de referencia y el área de trabajo.

5.2 PORCENTAJE DE ERROR

Los porcentajes de error en la medición de los diferentes puntos son (tabla V.XXI):

Tabla V.XXI. Porcentaje de errores.

| Num. Veces | X [m] | | Error | Y [m] | | Error |
|----------------|-------|-----------|--------------|-------|-----------|--------------|
| | Real | Calculada | | Real | Calculada | |
| 1 | 1.50 | 1.50 | 0.00 | 3.00 | 3.00 | 0.00 |
| 2 | 2.75 | 3.00 | 0.25 | 3.50 | 3.50 | 0.00 |
| 3 | 2.50 | 2.50 | 0.00 | 2.00 | 2.25 | 0.25 |
| 4 | 2.25 | 2.00 | 0.25 | 0.00 | 0.50 | 0.50 |
| 5 | 1.00 | 0.75 | 0.25 | 0.75 | 0.75 | 0.00 |
| 6 | 0.75 | 1.00 | 0.25 | 4.00 | 4.25 | 0.25 |
| 7 | 2.00 | 2.25 | 0.25 | 5.25 | 5.75 | 0.50 |
| 8 | 3.00 | 3.00 | 0.00 | 7.00 | 6.75 | 0.25 |
| 9 | 2.75 | 3.00 | 0.25 | 6.00 | 6.25 | 0.25 |
| 10 | 2.00 | 1.75 | 0.25 | 3.75 | 4.00 | 0.25 |
| TOTAL | | | 1.75 | | | 2.25 |
| Error relativo | | | 0.175 | | | 0.225 |

5.3 PRUEBAS DE CAMPO CON OTRAS TECNOLOGÍAS

5.3.1 PRUEBA CON BLUETOOTH

Para pruebas prácticas utilizamos dos teléfonos celulares con bluetooth; un Sony Ericsson Z310A y un NOKIA , el sistema activado muestra la siguiente pantalla (figura V.65):

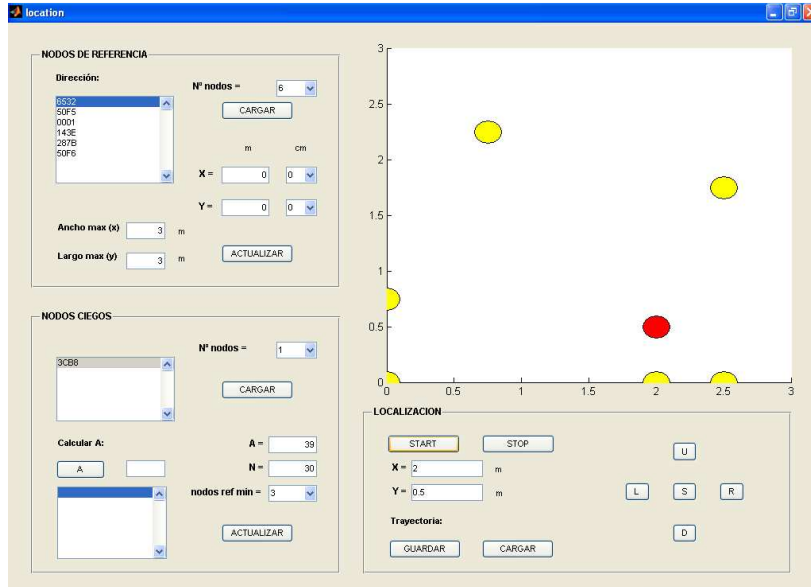


Figura V.65. Interfaz del sistema sin interferencia de bluetooth.

Una vez prendidos los celulares el sistema varió el momento de activar bluetooth la primera vez, como muestra la figura V.66, las veces posteriores no experimentó cambio alguno:

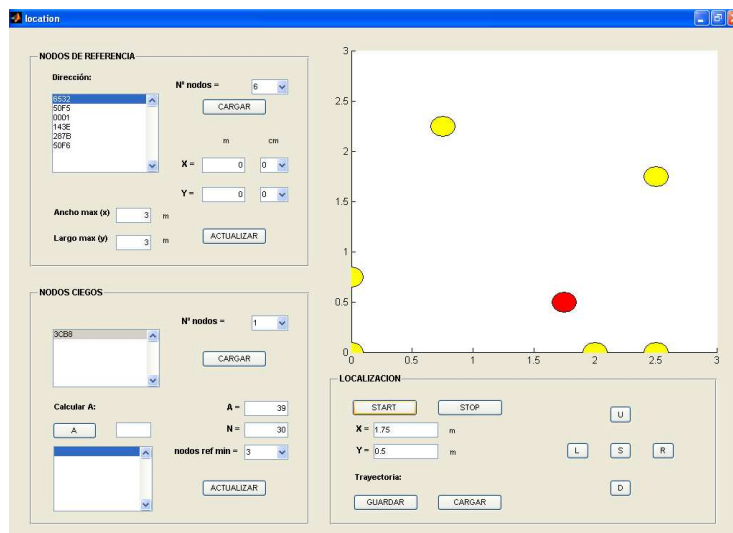


Figura V.66. Interfaz de programa al momento de prender bluetooth.

5.3.2 PRUEBAS CON TARJETAS INALAMBRICAS

Se utilizaron dos computadoras con tarjetas inalámbricas: un HP Pavilion dv4-1225 y un HP 530, conectados en red AD-HOC. La red no sufrió cambio alguno en su posición, como se muestra en la figura V.67:

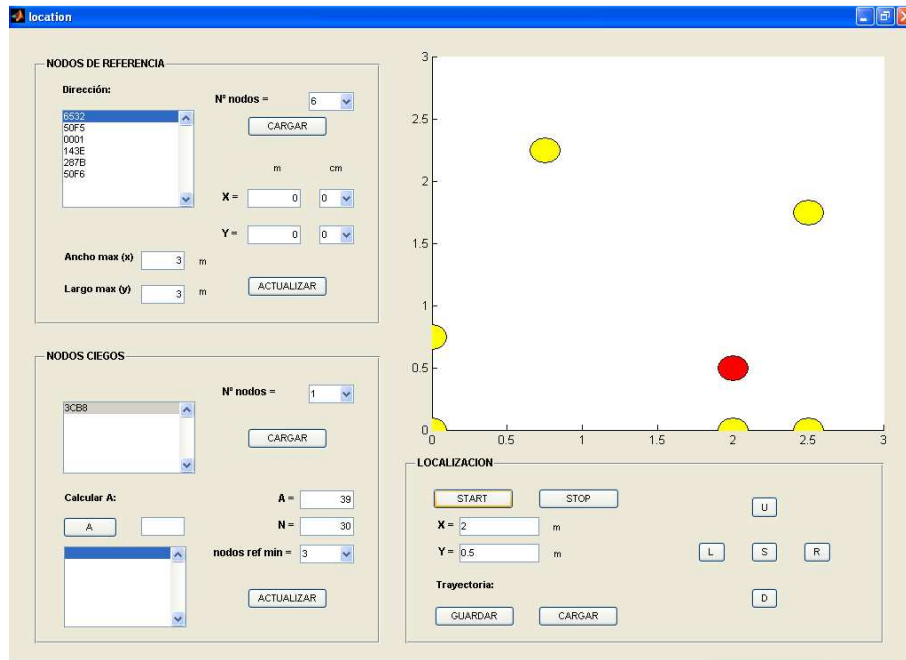


Figura V.67. Interfaz del sistema sin interferencia de tarjetas inalámbricas.

ZigBee posee 16 canales para su funcionamiento, si un canal está ocupado, escanea la red hasta encontrar un canal vacío y establecer la red sin interferencias.

CONCLUSIONES

- El protocolo ZigBee es más robusto Investigar el funcionamiento de la tecnología de comunicaciones inalámbricas ZigBee.
- Encontramos cuatro métodos de localización, tres de los cuales: filtros de Kalman, scan matching y localización probabilística, se basan en probabilidades y en distribuciones gaussianas, cuyas desventajas son los lentos cálculos, los errores de medición que varían los resultados por las influencias del ambiente, lo que ocasiona distancias imprecisas.
- El método WCL es óptimo por el tiempo óptimo de procesamiento y por su resistencia a influencias ambientales, este método es utilizado por la tecnología ZigBee, por el cual las coordenadas calculadas tiene un error mínimo.
- La interfaz del programa fue diseñada en MATLAB, el cual puede obtener las coordenadas del objeto en movimiento, configurar de acuerdo a los diferentes entornos los nodos, establecer las dimensiones del área de trabajo óptimo, controlar el actuador, y visualizar trayectorias previamente grabadas.

RECOMENDACIONES

- Si se coloca el sistema en sitios exteriores se debe considerar otros dispositivos que funcionan en la misma frecuencia para evitar interferencias entre nodos y los consecuentes errores en mediciones de parámetros.
- Las paredes no deben exceder de un grosor de 20cm, o tener un recubrimiento de metal, para evitar interferencias.
- Mientras más nodos de referencia se coloquen, más precisión en las coordenadas se obtendrá, se recomienda que se distribuyan en forma de mallas o cuadrantes para optimizar la recepción en el área de trabajo.
- La altura de las balizas debe ser la misma que la del nodo ciego para optimizar la precisión, al variar las alturas pueden haber inconsistencias en los datos obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ralf Grossmann. "Localization in ZigBee-based wireless sensor networks". 4.ed, University of Rostock (Germany)-Technical Report: 2007, 190p.
- Interface del puerto serie del micro 8051:
http://www.semiconductors.philips.com/AN10319_1.pdf
(22-03-2009)
- Partes y características del módulo CC2430:
<http://www.ti.com/lpw/cc2430.pdf>
(09-08-2008)
- Programación de micro 8051:
<http://focus.ti.com/lit/an/swra095/swra124.pdf>
(05-05-2009)
- Fundamentos del motor de localización y marco teórico:
http://www.osun.org/ebook/da2006-113_SensorNetworkSoccer-pdf.html
(23-06-2009)
- Medición de Parámetros A y n:
<http://www.osun.org/ebook/sensornetzwerke-pdf.html>
(28-07-2009)
- Cálculo con el algoritmo WCL:
http://www.miun.se/upload/Institutioner/STC/PDF/MScThesis/Indoor_Local_Positioning_System_for_ZigBee_based_on_RSSI.pdf

(15-07-2009)

- Marco teórico:

<http://seattle.intelresearch.net/people/jhightower/pubs/hightower2001techniques/hightower2001techniques.pdf>

(20-05-2009)

- Características del protocolo IEEE802.15.4 y marco teórico:

http://focus.ti.com/lit/an/802.15.4 MAC API_F8W-2005-1503

(01-06-2009)

ANEXOS

dBm

El dBm es una unidad de medida utilizada, principalmente, en telecomunicación para expresar la potencia absoluta mediante una relación logarítmica.

El dBm se define como el nivel de potencia en decibelios en relación a un nivel de referencia de 1 mW.

El valor en dBm en un punto, donde tenemos una potencia P , viene dado por la fórmula siguiente:

$$dBm = 10 * \log \frac{P}{1mW}$$

Al utilizarse un nivel de referencia determinado (1 mW) la medida en dBm constituye una verdadera medición de la potencia y no una simple relación de potencias como en el caso de la medida en decibelios. Así, una lectura de 20 dBm significa que la potencia medida es 100 veces mayor que 1mW y por tanto igual a 100 mW.

La ventaja de todas estas unidades logarítmicas es que reducen a simples sumas y restas los cálculos de potencias cuando hay ganancias o atenuaciones.

Por ejemplo, si aplicamos una señal de 15 dBm a un amplificador con una ganancia de 10 dB, a la salida tendremos una señal de 25 dBm.

Si en lugar de un amplificador, la señal de 15 dBm la aplicamos a un atenuador con una pérdida 25 dB, la señal a la salida será de -10 dBm.

No obstante lo indicado anteriormente, hay un hecho muy importante a tener en cuenta en todas estas mediciones y es el que la impedancia de calibrado del aparato debe coincidir en todos los casos con la impedancia del punto donde se realiza la medida.

RESUMEN

El objetivo del proyecto es diseñar e implementar un prototipo para la localización de un objeto en movimiento mediante ZigBee, sobre un área de trabajo de $18m^2$ en interiores, para que el usuario pueda controlar y verificar la posición del prototipo.

Para el diseño del prototipo se investigó el funcionamiento de la tecnología ZigBee y su comunicación con otros dispositivos, cuyo error de cálculo de la posición es de 25cm de radio para ZigBee. En el desarrollo del prototipo se utilizó el método de triangulación de coordenadas para calcular la posición actual cada 2 segundos, 6 nodos de referencia, un nodo colocado en el prototipo y el coordinador, todos con tecnología ZigBee, conectados al puerto serie de una PC, mediante el programa diseñado, implementado permite visualizar la posición o trayectoria recorrida.

El sistema permite que el usuario al hacer la petición de ubicación al prototipo mediante la interfaz en la PC, el prototipo pide coordenadas y el indicador de potencia (RSSI) a los nodos de referencia, los que responden enviando su posición y el valor RSSI promedio; el prototipo con estos datos calcula mediante el algoritmo WCL, y devuelve a los nodos de referencia su posición actual, el número de nodos de referencia activados, las direcciones lógicas de los nodos de referencia más cercanos y el valor RSSI; esta información es retransmitida por el coordinador hacia el computador y visualizada mediante la interfaz por el usuario. Como valor agregado, se puede controlar al prototipo desde la misma interfaz; pudiendo realizar tareas remotas.

Los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento muestran un error relativo promedio del 20%, mismo que se encuentra dentro de los parámetros de error de ZigBee. De acuerdo a éstos resultados, el sistema funciona de manera correcta; porque localiza al prototipo con un error mínimo dentro del área de trabajo útil para el monitoreo y ubicación del mismo.

Se recomienda el uso del sistema con ZigBee en interiores con dimensiones de hasta $63.75 \times 63.75m$, para uso en exteriores y lugares más grandes, se pueden diseñar una malla con estas dimensiones en forma modular o utilizar tecnología GPS.

SUMMARY

The Project objective is to design and implement a prototype for moving object localization by means of Zigbee, on an area of 18m² indoors interior so that user can control and verify the position of the prototype.

The ZigBee technology operation and its communication with other devices were researched for the prototype design and miscalculation of the position is 25 cm radius. The coordinates triangulation method was used in the prototype development in order to calculate the current position every 2 seconds, 6 references nodes, a node placed on the prototype and coordinator, all these ones with the technology mentioned above connected to the serial port of a PC; through the program designed and implemented, the position or trajectory will be visualized.

This system allows the user to make a location request to the prototype through the PC interface, the prototype asks for coordinates and the power indicator (RSSI) to reference nodes, which respond by sending their position and the average RSSI value; the prototype with these data calculates with the algorithm WCL and gives back the reference nodes its current position, the reference number of nodes activated, the logical addresses of the closest reference node and the RSSI value; this information is relayed by the coordinator to the computer and displayed through the user interface. In addition to this, the prototype can be controlled from the same interface and perform remote tasks. The results gotten in the running tests show an average relative error of 20% which is within the Zigbee error parameters. According to these results, the system works properly because the prototype is located with a minimum error within the workspace that is useful for monitoring and location of it.

It is recommended to use the system Zigbee indoors with dimensions up to 63.75 x 63.75m, whereas in outdoor and larger places a system with these dimensions in a modular way can be designed or GPS technology can be used.