

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**“SESBeacon: Nodo sensor electrónico para alertas tempranas”**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero  
en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Francisco García Fallas**

**Cartago, Noviembre de 2016**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

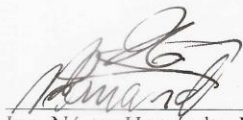
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**ACTA DE APROBACIÓN**

**Defensa de Proyecto de Graduación  
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica  
Grado Académico de Licenciatura  
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

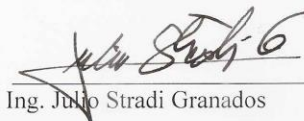
El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado "SESbeacon: Nodo sensor electrónico para alertas tempranas", realizado por el señor Francisco García Fallas y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. Néstor Hernández Hostaller

Profesor lector



Ing. Julio Stradi Granados

Profesor lector



Ing. Miguel Hernández Rivera

Profesor asesor

Cartago, 30 de noviembre, 2016

### **Declaración de autenticidad**

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Francisco García Fallas

Cédula: 113940468

## **Resumen**

Este proyecto fue desarrollado en el Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab) perteneciente a la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Este laboratorio investiga y desarrolla sistemas electrónicos que contribuyan al desarrollo sostenible. En este contexto este proyecto busca resolver la necesidad del SESLab de contar con un nodo sensor para comunicación inalámbrica con características de: bajo costo económico, bajo consumo energético, versatilidad y adaptabilidad para distintas aplicaciones en el área de monitorización.

A partir de los requerimientos específicos se diseñó e implementó el nodo SESbeacon basado en la arquitectura genérica de los nodos sensores para redes inalámbricas, aplicando técnicas y dispositivos de bajo consumo que permitieron una mayor autonomía de funcionamiento del nodo a un bajo costo económico.

Se logró transmitir 3 estados distintos de alerta cada: 0.5, 1 y 2 horas, según la configuración de tiempo seleccionada por el usuario, a una distancia mayor de 50m. Para ello se aplicó una solución basada en un enfoque centralizado y un protocolo de difusión directa con esquemas de ajuste del ciclo de trabajo para la disminución de los requerimientos energéticos y resultó un 44% más económico con respecto al presupuesto inicial del proyecto.

*Palabras claves:* redes de sensores inalámbricos, radiofrecuencia, monitorización, microcontrolador, tecnologías de bajo consumo.

## **Abstract**

This project was developed at Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESlab) which is part of the School of Electronic Engineer from the Costa Rican Institute of Technology (ITCR).

This laboratory investigates and builds electronic systems that contribute to sustainable development.

Given this context, this project aims to resolve that necessity that the SESLab currently faces to have a sensor node for wireless communication with the following characteristics: low cost, low power consumption, versatility, and adaptability to a variety of monitoring applications.

Following the specific requirements, the SESbeacon node has been designed and implemented based on generic architecture of sensor nodes for Wireless networks. This was possible by using low power consumption devices and techniques that allowed a better operational autonomy of the node at a low economic cost.

It was possible to transmit 3 alert statuses: every 0.5 hour, every hour, and every 2 hours according to the time set up chosen by the user, to a distance longer than 50 meter.

To accomplish this, a solution based on a centralized approach was applied with a directed diffusion protocol and a scheme of duty cycle adjustment to diminish the energy requirements which turned out to be 44% more economic than initial budget for the project.

*Key words:* Network of Wireless sensors, radiofrequency, monitoring, microcontroller, low power technology.

## ÍNDICE GENERAL

Declaración de autenticidad .....	3
Capítulo 1 .....	12
1.1 Ámbito y perspectiva de desarrollo del proyecto SESbeacon .....	12
1.2 Definición del Problema .....	14
1.3 Requerimientos del nodo sensor .....	15
1.3.1 Objetivo General .....	16
1.3.2 Objetivos Específicos .....	16
1.3.4 Meta .....	17
Capítulo 2 .....	18
Conceptos generales de las redes de sensores inalámbricas .....	18
2.1 Contexto del surgimiento de las redes de sensores inalámbricas .....	18
2.2 Estructura física de los nodos de sensores .....	18
2.3 Aplicaciones de las Redes Inalámbricas de Sensores .....	21
2.3.1 Aplicaciones Militares .....	21
2.3.2 Aplicaciones Medioambientales .....	23
2.3.3 Monitoreo de Volcanes .....	24
2.3.4 Aplicaciones en la Salud .....	25
2.3.5 Aplicaciones Domésticas .....	26
2.4 Retos en el diseño de Redes de Sensores Inalámbricas (WSN) .....	27
2.4.1 Consumo de Energía en Nodos de Redes de Sensores Inalámbricos .....	29
2.5 Arquitectura Centralizada versus Arquitectura distribuida de Nodos .....	29
2.5.1 Topologías de Red .....	31
2.6 Tecnologías de comunicación inalámbricas .....	32
2.6.1 Enrutamiento en las Redes de Sensores Inalámbricas .....	35
2.6.2 Eficiencia Energética .....	37
2.7 Etapa de comunicación en nodos sensores inalámbricos .....	40
2.7.1 Estructura de los transceptores .....	41
2.7.2 <i>Modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana</i> .....	42
2.8 Tecnologías de bajo consumo utilizadas en microcontroladores electrónicos de los fabricantes Microchip, Atmel, y Texas Instruments .....	44
2.8.1 <i>Atmel Pico power Technology</i> .....	45
2.8.2 <i>Energy Trace Technology de TI</i> .....	47
2.8.3 <i>Microchip Xtreme Low Power Technology</i> .....	48
2.9 Descripción y funcionamiento del protocolo de comunicación SPI .....	50
Capítulo 3 .....	54
Diseño del nodo sensor SESbeacon .....	54
3.1 Enfoque de diseño del nodo sensor: A .....	54
3.2 Enfoque de diseño del nodo sensor: B .....	56
3.3 Enfoque para el receptor del enlace de comunicación .....	57
3.4 Desarrollo de la etapa de comunicación del nodo sensor .....	58

3.4.1 Características del transceptor nRF24L01+ .....	62
3.4.2 Protocolo ESB ( <i>Enhanced ShockBurst</i> ) .....	64
3.4.3 Estructura de los paquetes en el protocolo ESB.....	65
3.4.4 Funcionamiento Multiceiver.....	66
3.5 Aspectos de diseño relevantes en la selección del microcontrolador para el nodo SESbeacon. .....	69
3.5.1 Microcontroladores Atmel.....	69
3.5.2 Microcontroladores Microchip. ....	70
3.5.3 Evaluación de las distintas alternativas de microcontrolador para el diseño del nodo sensor SESbeacon.....	71
3.6 Diseño final del nodo sensor. ....	73
3.6.1 Interconexión del MCU PIC24F08KA102 .....	73
3.7 Lógica de Programación diseñada para el nodo SESbeacon .....	78
Capítulo 4 .....	83
Análisis y resultados experimentales de la implementación .....	83
4.1 Comportamiento y verificación del enlace de comunicación. ....	83
4.2 Aplicación de técnicas de bajo consumo. ....	88
4.3 Etapa de Temporización.....	92
4.4 Etapa de comunicación SPI.....	93
4.5 Etapa Receptora .....	93
4.6 Costo final del prototipo.....	94
4.7 Prototipo SESbeacon desarrollado.....	95
Conclusiones.....	96
Recomendaciones.....	98
Bibliografía.....	100
Apéndice A.1 Glosario.....	102
Apéndice A.2 Elementos a considerar en la programación de los periféricos del PIC24F08KA102. ....	104
Anexo B1.....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general del proyecto SESbeacon.....	16
Figura 2. Estructura general de un nodo de comunicación inalámbrico.....	19
Figura 3. Topologías de red para WSN.....	31
Figura 4. Consumo de energía en distintas tecnologías inalámbricas.....	33
Figura 5. Ancho de banda disponible para distintas tecnologías inalámbricas.....	33
Figura 6. Estados de funcionamiento de un nodo sensor.....	38
Figura 7. Bloque general de un transmisor y un receptor RF genérico.....	41
Figura 8. Transceptor de radio frecuencia.....	42
Figura 9. Filtro Gaussiano sobre la banda base.....	43
Figura 10. Estructura general de un microcontrolador.....	44
Figura 11. Características de consumo de microcontroladores PIC con XLP de Microchip.....	49
Figura 12. Software XLP Battery Estimator de Microchip.....	50
Figura 13. Conexión entre módulos SPI.....	51
Figura 14. Conexión módulos SPI en configuración Maestro-Esclavo.....	51
Figura 15. Operación de lectura del transceptor por medio de SPI.....	52
Figura 16. Operación de escritura del transceptor por medio de SPI.....	53
Figura 17. Primer enfoque de solución del proyecto SESbeacon.....	55
Figura 18. Segundo enfoque de solución del proyecto SESbeacon.....	57
Figura 19. Enfoque del receptor del proyecto SESbeacon.....	58
Figura 20. Diagrama de bloques del transceptor Nordic nRF24L01+.....	63
Figura 21. Estructura de paquete para la comunicación con el protocolo ESB.....	65
Figura 22. Funcionamiento Multiceiver nordic nRF24L01+.....	66
Figura 23. Transmisión y Recepción de datos con ACK utilizado por el chip nRF24L01+.....	67
Figura 24. Transmisión y Recepción de datos utilizado por el chip nRF24L01+ en el caso de que no se recibe ACK.....	68
Figura 25. Transmisión y Recepción de 2 datos utilizando el chip nRF24L01+ en el caso de que no se recibe ACK.....	68
Figura 26. Arquitectura del Nodo SESbeacon.....	73
Figura 27. Diagrama de conexión del PIC24F08KA102.....	73
Figura 28. Conexión del chip nRF24L01+.....	76
Figura 29. Diagrama esquemático del circuito del nodo SESbeacon.....	77
Figura 30. Diagrama del circuito programador del nodo SESbeacon.....	77
Figura 31. Diagrama de flujo general de la programación del MCU.....	78
Figura 32. Diagrama de flujo de la configuración del alarma.....	80
Figura 33. Diagrama de flujo general de la atención a la interrupción del RTCC para el envío de la alerta.....	82
Figura 34. Comportamiento del sistema de comunicación a 80 m con pérdida de 2% de los datos.....	86
Figura 35. Comportamiento del sistema de comunicación a 80 m sin pérdida de datos.....	87
Figura 36. Comportamiento del sistema de comunicación a 60 m sin pérdida de datos.....	87
Figura 37. Pérdida de datos en prueba de transmisión-recepción a 80 metros de distancia.....	88
Figura 38. Transmisión-Recepción temporizado cada 10 s.....	92



Figura 39.Envío de la alerta cada 30 s configurado a partir de la selección del interruptor.	93
Figura 40.Prototipo nodo sensor SESbeacon. ....	95
Figura 41. Nodo sensor SESbeacon utilizado para las pruebas de caracterización. ....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de caracterización para Redes de Sensores Inalámbricos (WSN). .....	20
Tabla 2. Comparación de Tecnologías de comunicación Inalámbricas. ....	32
Tabla 3. Ventajas y desventajas del protocolo Serial Peripheral Interface (SPI). ....	52
Tabla 4. Comparación de Transceptores de radio frecuencia para aplicaciones de Redes de Sensores Inalámbricas. ....	59
Tabla 5. Rúbrica de evaluación de los dispositivos transceptores. ....	60
Tabla 6. Resultados de la evaluación de los dispositivos transceptores para el diseño del nodo SESbeacon. ....	61
Tabla 7. Comparación del costo económico de los distintos transceptores evaluados. ....	61
Tabla 8. Evaluación de consumo de energía en distintos modos de operación de tres MCU de ATmel. ....	70
Tabla 9. Evaluación de consumo de energía en distintos modos de operación de tres MCU de Microchip con tecnología XLP. ....	71
Tabla 10. Comparación del costo económico de los microcontroladores de ultra bajo consumo disponibles por los fabricante: Microchip, TI y Atmel. ....	72
Tabla 11. Evaluación de los microcontroladores de ultra bajo consumo disponibles por los fabricante: Microchip, TI y Atmel. ....	72
Tabla 12. Distribución de pines del PIC24F08KA102 utilizados en el nodo sensor SESbeacon. ....	74
Tabla 13. Funciones desarrolladas para el control del transceptor nRF24L01+. ....	81
Tabla 14. Estructura del procedimiento de pruebas implementado. ....	83
Tabla 15. Comportamiento del enlace comunicación utilizando el nodo sensor SESbeacon a 0 dBm y velocidad de transmisión 250kbps en un entorno cerrado o con obstáculos. ....	85
Tabla 16. Estadística del comportamiento del enlace comunicación utilizando el nodo sensor SESbeacon a 0 dBm y velocidad de transmisión 250kbps en 10 escenarios de transmisión. ....	85
Tabla 17. Objetivos esperados para el enlace comunicación utilizando el nodo sensor SESbeacon. ....	86
Tabla 18. Resultados de la implementación de los distintos modos de bajo consumo del PIC24F08KA102 a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo y tensión de alimentación 3.3 V. ....	89
Tabla 19. Características de consumo del nodo SESbeacon a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo, tensión de alimentación 3.3 V, potencia del transceptor -18 dBm. ....	89
Tabla 20. Características de consumo del nodo SESbeacon a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo, tensión de alimentación 3.3 V, potencia del transceptor -12 dBm. ....	89
Tabla 21. Características de consumo del nodo SESbeacon a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo, tensión de alimentación 3.3 V, potencia del transceptor -6 dBm. ....	90
Tabla 22. Características de consumo del nodo SESbeacon a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo, tensión de alimentación 3.3 V, potencia del transceptor 0 dBm. ....	90
Tabla 23. Estimación del tiempo de funcionamiento del nodo SESbeacon con una batería Li-ion de 3.6V y capacidad de 2250 mAh a 25 °C. ....	91

Tabla 24. Costo económico de la implementación del nodo sensor. .... 94

## Capítulo 1

### 1.1 Ámbito y perspectiva de desarrollo del proyecto SESbeacon

Este proyecto se desarrolló en el Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESlab); laboratorio perteneciente a la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El SESlab tiene como objetivos investigar y desarrollar sistemas electrónicos que contribuyan al desarrollo sostenible, por tanto sus campos de acción se centran en las siguientes áreas: energías renovables, eficiencia energética y monitorización.

En general un nodo sensor activo es un dispositivo que emite una señal que permite indicar: cierto estado, ubicación o situación de alerta. Existen diversos tipos de nodos sensores en dependencia de las señales que generan por ejemplo: las que generan señales de radio, luminosas y ultrasónicas. Los dispositivos electrónicos modernos logran mayor precisión, facilidad de manejo, disponibilidad y menor susceptibilidad a efectos o perturbaciones en las radiobalizas o nodos sensores (Hernández, Mario. 2014). Específicamente este proyecto se ubica en el área de monitorización, ya que se busca el desarrollo de un nodo de comunicación de bajo consumo de energía y costo económico.

Según S. Gerasenko (2001), las señales de los nodos sensores son parte integral de nuevas y variadas aplicaciones en los sistemas inalámbricos. Se aplican en las redes celulares, donde las estaciones base envían señales periódicas e inundan la red para identificar suscriptores móviles en determinada área. Otros ejemplos de la utilización de *beacons* o señales de información que se transmiten periódicamente son: las redes inalámbricas de área local, los sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de búsqueda y rescate que son activados tras un evento de emergencia por ejemplo en la aviación o percances marítimos.

Algunos investigadores proponen el uso de *beacons* en robots autónomos de tal manera que se facilite la distribución, coordinación y navegación en áreas como la exploración espacial, tareas de riesgo o en el ámbito militar.

Sin lugar a dudas el uso de nodos de sensores electrónicos encuentra amplia aplicación en nuestro país. En el sector ambiental la obtención de información directamente desde el campo de estudio es fundamental. El empleo de esta tecnología es de vital importancia para la protección, estudio de la fauna y la flora, así como para la validación y compromiso de las metas asociadas con en el objetivo de lograr la carbono neutralidad ( Granados, Alejandra. 2013).

En sistemas de generación fotovoltaica se pueden generar alertas en dependencia del nivel de generación eléctrica en determinado momento.

Son variadas las aplicaciones de estos nodos sensores, sin embargo en la mayoría de estas la construcción de nodos sensores requiere del diseño de circuitos electrónicos sumamente eficientes, ya que cuentan con fuentes de energía limitadas y en dependencia de la localización su mantenimiento puede ser altamente costoso y difícil. Por esta razón los nodos sensores deben alargar al máximo el tiempo de funcionamiento con baterías.

Otros factores importantes considerados en el diseño son los costos de fabricación, las dimensiones del dispositivo y el empleo de una frecuencia del espectro disponible para la comunicación.

## 1.2 Definición del Problema

La relevancia de las redes de sensores inalámbricas ha tomado auge en el contexto del “internet de las cosas”, este término novedoso involucra la capacidad de los dispositivos de transmitir información inalámbricamente a otro dispositivo o estación base, brindando un enorme abanico de aplicaciones.

En el mercado se ofrece una serie de nodos sensores inalámbricos comerciales, sin embargo su costo económico por nodo en su mayoría supera los 100 USD, por lo que son una alternativa poco atractiva para algunas aplicaciones.

Actualmente el Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESlab) no cuenta con un nodo sensor electrónico para la generación de alertas que cumpla con características de bajo costo (alrededor de 25 USD), bajo consumo energético y dimensiones volumétricas máximas de  $125 \text{ cm}^3$ .

Este nodo sensor es necesario para el laboratorio ya que podrá integrarse a otros proyectos. Por ejemplo: en el proyecto de cargadores eléctricos para bicicletas a partir de paneles solares, donde permitirá conocer el estado del sistema en distintos momentos del día, ser parte de una solución específica para un cliente o incluso formar parte de una red conformada por varios nodos sensores para investigaciones científicas.

### 1.3 Requerimientos del nodo sensor

El SESlab requirió que el diseño del nodo sensor permitiera enviar señales cada: 0.5 horas, 1 hora o cada 2 horas; según seleccione el usuario.

Las señales a transmitir correspondieron a las siguientes 3 alertas: estado normal o verde, estado alerta media o naranja y finalmente alerta alta o roja. Para la validación de las señales transmitidas fue necesario desarrollar un receptor que permitiera la obtención de las alertas anteriormente descritas.

Como se recalcó previamente las aplicaciones de estos dispositivos son muy amplios, razón por la cual el laboratorio necesitaba un diseño genérico que permitiera la fácil adaptación para distintas aplicaciones funcionales. Esto implicó considerar posibilidades de brindar características de hardware que facilitaran la puesta en marcha de aplicaciones con requerimientos en procesamiento y transmisión de datos mayores, pero manteniendo un bajo costo económico (alrededor de 25 USD) del dispositivo final.

El diseño final debió maximizar la distancia de comunicación manteniendo el compromiso de bajo consumo de energía, como valor meta se tomó una distancia de referencia de 50 m entre transmisor y receptor en línea vista.

Como parte de esta primera etapa del proyecto se implementó una comunicación *ad-hoc* esto quiere decir que solamente se requiere de 2 elementos para formar el enlace de comunicación, sin embargo el hardware del diseño final permite la conexión de más nodos sensores a la red.

En la figura 1 se muestra gráficamente la idea general de la implementación del proyecto.

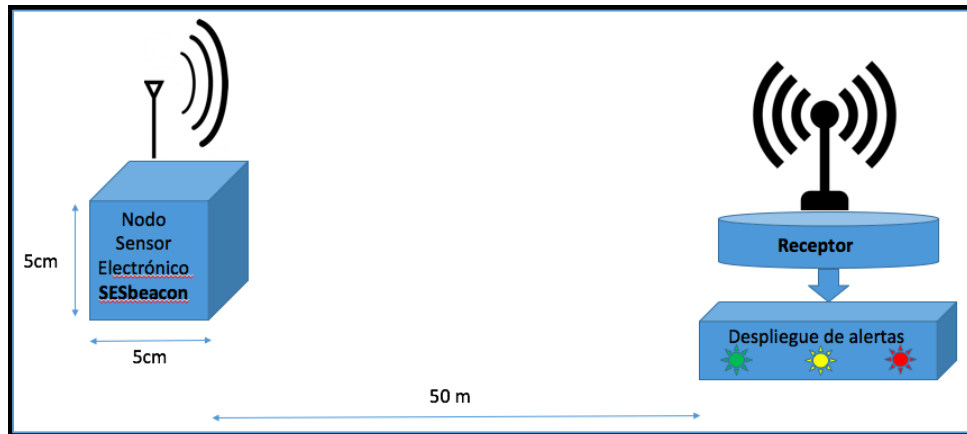


Figura 1. Diagrama general del proyecto SESbeacon.

Para la consecución de este proyecto, se planteó el siguiente objetivo general y varios objetivos específicos mostrados a continuación.

### 1.3.1 Objetivo General

Diseñar y construir un sistema de comunicación inalámbrico por radiofrecuencia basado en la arquitectura de un nodo transmisor para redes de sensores, que permita el envío de una alerta generada a partir de la medición de una señal cada 0.5, 1 o 2 horas. El costo de los componentes por nodo será menor al costo de dispositivos comerciales similares, un consumo energético reducido que maximice su tiempo de funcionamiento con batería, ocupando el dispositivo final un volumen no mayor a  $125 \text{ cm}^3$ .

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Investigar y aplicar técnicas de diseño de nodos de comunicación inalámbrica que permitan disminuir el consumo de energía del nodo transmisor.
- Diseñar e implementar una Etapa Transmisora de radio frecuencia que permita enviar datos a una distancia de 50m con una tolerancia del 10%.
- Implementar un Etapa Receptora que permita la identificación de la alerta recibida por parte del usuario.
- Integrar una etapa temporizadora que permita al usuario configurar el envío de las alertas cada: 0.5, 1, 2 horas.



- Optimizar el costo y dimensionamiento físico del dispositivo final.
- Desarrollar un protocolo de pruebas que permita la simulación de distintas condiciones de operación del nodo transmisor de tal forma que se caracteriza su funcionamiento.

#### **1.3.4 Meta**

La meta de este proyecto es contribuir en la consecución de diversas investigaciones y tareas del Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESlab) en el área de monitorización; se brinda una herramienta de bajo costo (se aproxime a 25 USD ), bajo consumo energético maximizando el funcionamiento con batería, dimensiones reducidas y a la vez versátil para diversos procesos o aplicaciones.

## **Capítulo 2**

### **Conceptos generales de las redes de sensores inalámbricas**

#### **2.1 Contexto del surgimiento de las redes de sensores inalámbricas.**

En los últimos años el desarrollo de la electrónica y la mejora en los procesos de fabricación de circuitos integrados, permitió el desarrollo de sistemas electrónicos con una mayor escala de integración y con costos cada vez menores.

La diversidad en dispositivos microelectrónicos, así como el diseño de sistemas de comunicación por radio frecuencia, impulsó la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones en el campo de la telemetría. Estos sistemas en general permiten identificar los estados en que se encuentran otros equipos, procesos u otros sistemas de diversa complejidad y aplicación. Con la información obtenida a partir de los sistemas de telemetría se facilita el control remoto, la identificación de fallas y el análisis de datos con la finalidad de generar conclusiones válidas entorno a un estudio en cuestión.

#### **2.2 Estructura física de los nodos de sensores**

Las redes de sensores inalámbricas están conformadas por dispositivos electrónicos de bajo costo económico, bajo consumo energético, capaces de obtener información del entorno, procesarla y posteriormente transmitirla a otros nodos.

Dependiendo de la función que cumplen los nodos dentro de la estructura de la red estos se clasifican como: nodos sensores, nodos enrutadores, nodo *gateway*.

La estructura básica de los nodos se muestra en la figura 2 y está conformada principalmente por: Unidad de Procesamiento Central (CPU), una interfaz de sensores, bloque de comunicación (transceptor de RF), bloque de alimentación.

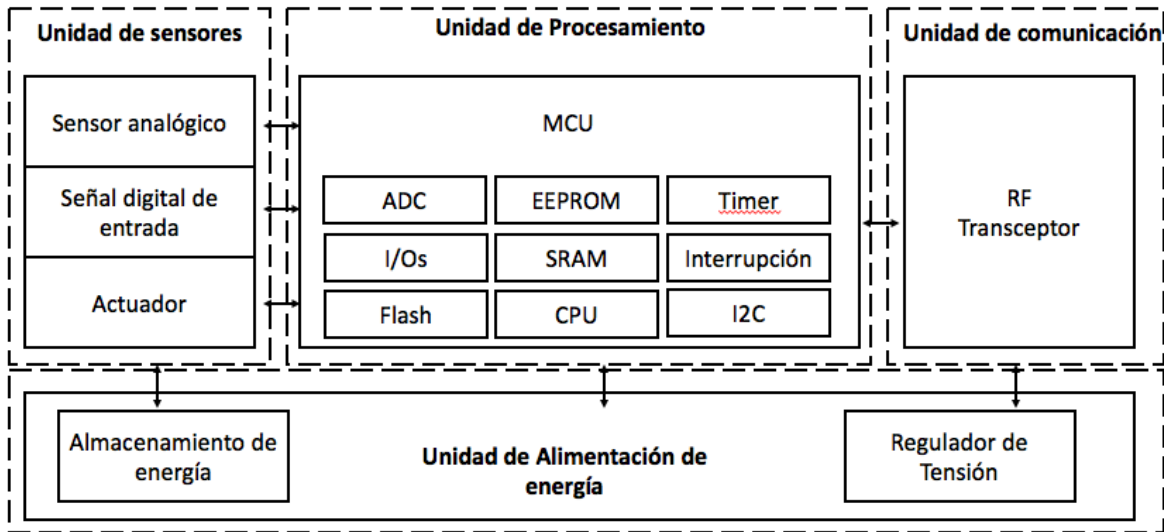


Figura 2. Estructura general de un nodo de comunicación inalámbrico.

Las redes de sensores inalámbricas se caracterizan por estar desatendidas, debido a que generalmente se ubican en áreas donde el acceso es limitado. Por otra parte son redes con probabilidad de fallo por el mal funcionamiento de los nodos, cuando el sistema de alimentación queda sin energía; esto a su vez genera alteraciones frecuentes en la topología de la red.

De manera general, la siguiente tabla muestra los principales parámetros que caracterizan una red de sensores inalámbrica.

*Tabla 1. Parámetros de caracterización para Redes de Sensores Inalámbricos (WSN).*

<b>Caracterización de Redes de Sensores Inalámbricas</b>
• Tiempo de vida de la batería (Gasto de energía).
• Cobertura de la red (distancia del enlace).
• Coste de fabricación y facilidad de instalación.
• Tiempo de respuesta.
• Precisión y frecuencia de las mediciones.
• Seguridad.
• Flexibilidad.
• Robustez.
• Capacidad de comunicación y procesamiento.
• Facilidad de sincronización.
• Dimensionamiento físico del nodo.

Como se observa la caracterización de las redes de sensores inalámbricas involucra diversidad de criterios que son fundamentales para tomar en cuenta en la etapa de diseño de los nodos.

Por ejemplo, el parámetro energético es de suma relevancia ya que permite conocer la capacidad del dispositivo para operar de manera independiente sobre todo en ambientes donde el mantenimiento de los mismos es una tarea difícil y no existe disponible una red de alimentación de energía externa.

Otro parámetro importante se refiere a la cobertura de la red en cuanto a distancia máxima para transmitir información sin que haya pérdida significativa de los datos. Las transmisiones por radiofrecuencia son altamente susceptibles a fenómenos como: atenuación, pérdidas del espacio libre, distorsión, ruido, pérdidas por multirayecto, ruido térmico, desvanecimiento, entre otros. Dichos fenómenos limitan el rango de distancia del enlace en la que hay una comunicación efectiva y plantean serios retos en el diseño de circuitos electrónicos de RF.

## **2.3 Aplicaciones de la Redes Inalámbricas de Sensores**

Según Akyildiz (2010) dentro de la estructura típica de diseño de un nodo para una red inalámbrica de sensores (WSN), el bloque de sensores podría incluir una variedad de elementos que permiten obtener mediciones de parámetros como: vibración, esfuerzo, aceleración, campo magnético, temperatura, humedad, ruido, intensidad de luz, velocidad, energía, entre otros. De esta diversidad resulta una gran cantidad de campos de aplicación posibles para las WSN.

A continuación veremos algunas de las aplicaciones en campos específicos, esto con la finalidad de evidenciar la importancia de este proyecto y la diversidad de aplicaciones que se pueden desarrollar empleando la estructura general de un nodo sensor inalámbrico

### **2.3.1 Aplicaciones Militares**

En el campo militar las redes de sensores se han empleado para tareas de reconocimiento, control, comunicaciones, servicios de inteligencia así como en sistemas de alcance de objetivos.

Las características de bajo costo de nodos, fácil instalación y despliegue de las redes, así como los mecanismos de redundancia ante fallas que permiten el correcto funcionamiento del sistema a pesar de la destrucción de nodos, facilita su aplicación en esta área.

En este campo se han desarrollado proyectos como: “Smart Dust”, “Sniper detection” y “VigilNet”.

#### *Smart Dust*

Este fue uno de los primeros proyectos de aplicación de las redes de sensores inalámbricas, su objetivo se centró en el despliegue de la red para operaciones militares en ambientes realmente hostiles y peligrosos para los soldados. Su función se centró en la recolección de

datos de posición del enemigo, datos sobre riesgo biológico y químico, así como información de estructuras.

Un aspecto muy interesante en torno al proyecto *Smart Dust* es que este buscaba desarrollar nodos sensores en plataformas cúbicas con dimensiones milimétricas enfocándose en sensores, transceptores y microcontroladores diseñados especialmente para alto rendimiento. El primer prototipo incorporó sistemas micro electromecánicos (MEMS), un transmisor óptico, circuitos integrados de aplicación específica (ASIC) y controladores digitales.

Posterior a este desarrollo la empresa Dust Networks Inc comercializó otros dispositivos y aplicaciones, por ejemplo: la implementación de un teclado virtual basado en nodos donde se detectaba los movimientos digitados por cada dedo, aplicaciones en el área de control de inventario, monitoreo de control de calidad de productos.

#### *Sniper Detection System*

Este sistema se basa en la utilización de una red de nodos inalámbricos equipados con sensores acústicos y micrófonos. Por medio de: procesamiento digital de señales, algoritmos de detección en tiempo real y correlación acústica de eventos; se logra identificar la posición del objetivo de interés.

#### *VigilNet*

*VigilNet* es una red a gran escala para la vigilancia y seguimiento en ambientes hostiles. Se implementó con 70 nodos inalámbricos equipados con sensores capaces de detectar el campo magnético generado por vehículos u objetos magnéticos. Para lograr una mayor autonomía en el funcionamiento de la red se implementó una arquitectura jerárquica con algunos nodos especialmente encargados del enrutamiento y la operación basada en eventos, permitiendo mantener la mayoría de nodos en modos de bajo consumo.

### **2.3.2 Aplicaciones Medioambientales.**

En el campo ambiental se han desarrollado variedad de aplicaciones, desde redes de monitoreo y localización de fauna, adquisición de datos de condiciones medioambientales para la validación de investigaciones científicas y agricultura de precisión, hasta aplicaciones orientadas a la exploración espacial, estudios de la composición química, biológica y contaminación en los mares, bosques, atmósfera.

En el caso de Costa Rica estos sistemas son fundamentales para la validación de los objetivos propuestos en la búsqueda de la carbono neutralidad.

#### *Great Duck Island*

Este proyecto fue desarrollado con el objetivo de monitorear el comportamiento de las aves marinas así como el efecto de microclimas en su hábitat. Para ello se utilizó nodos inalámbricos equipados con: sensores de temperatura, presión barométrica, humedad, fotoresistores y detectores infrarrojos. Se distribuyeron en una arquitectura jerárquica de 2 niveles, en el primer nivel se ubican los grupos de nodos sensores y en el segundo nivel se ubican nodos encargados de recibir y transmitir los datos hacia la estación base.

La primera etapa de la comunicación por medio de los nodos se hizo con antenas direccionales que permitían transmisión a una distancia de 365 m. En la segunda etapa se utilizó una plataforma con sistema Linux embebido una tarjeta integrada con IEEE 802.11 y una antena a 12 dBi omnidireccional para un rango de transmisión de 300 metros. El nodo base contó con una conexión satelital a internet para el acceso remoto.

## *Corie*

El proyecto Corie consiste en el estudio y caracterización ambiental en el estuario del río Columbia. La red está conformada por 24 estaciones equipadas con sensores de alta precisión capaces de obtener mediciones de: velocidad, temperatura, salinidad y profundidad del agua, así como valores meteorológicos y de radiación solar.

Las estaciones se comunican por medio del transceptor Freewave DGR-115 de espectro ensanchado, con un sistema complementario que en caso de interrupción de la línea de vista la transmisión se redirige vía satelital.

El objetivo del proyecto fue combinar los resultados obtenidos con complejos modelos matemáticos entorno a la caracterización del ecosistema y de esta manera brindarles validez.

### **2.3.3 Monitoreo de Volcanes**

Un campo de aplicación muy importante de las WSN es el de la prevención y estudio de los desastres naturales en donde la obtención de información remota y rápida puede evitar pérdidas humanas y materiales cuantiosas.

En el caso de los volcanes, estos presentan condiciones realmente difíciles de acceso, aunado a la presencia de gases, vapores tóxicos y riesgo de explosión, por lo que el uso de redes de sensores inalámbricas es una herramienta de gran importancia.

Como dato importante, en el 2004 se utilizó una red de 3 nodos con sensores acústicos para monitorear el Volcán Tungurahua en Ecuador, posterior a esta experiencia se desplegó una red basada en 16 nodos con sensores acústicos y sísmicos con antenas direccionales de alta ganancia para permitir enlaces de mayor distancia. La característica particular de esta aplicación es la generación de gran volumen de datos a transmitir, consideración que debe tenerse presente en el diseño para optimizar consumo energético y ancho de banda.



### **2.3.4 Aplicaciones en la Salud.**

El desarrollo tecnológico en el campo de diseño y fabricación de biosensores ha permitido la implantación de dispositivos en los seres vivos para mejorar el monitoreo de su estado, mejorar diagnósticos, administración de fármacos, seguimiento del paciente, análisis de los procesos internos en el organismo. Un campo sin duda en que las redes de sensores inalámbricas impactan a la sociedad en su búsqueda de mayor calidad de vida.

#### *Retina Artificial.*

Este proyecto busca diseñar una retina artificial para reemplazo en pacientes con degeneración macular o con retinitis pigmentosa, la cual daña el fotorreceptor provocando pérdida de la visión periférica.

Los fotorreceptores estimulan el cerebro a través de impulsos eléctricos proporcionales a la intensidad de la luz que ingresa desde el exterior. El proyecto busca sustituir los fotorreceptores por tipos especializados de microsensores.

Para emular el funcionamiento de la retina una cámara ubicada en unos lentes captura la información del exterior y esta la transmite de forma inalámbrica a un microprocesador donde posteriormente estas señales son enviadas por microelectrodos ubicados en los fotorreceptores, y posteriormente los impulsos llegan al cerebro a través de la estimulación del nervio óptico.

Sobre esta aplicación se ha desarrollado *Argus I* con un modelo matricial de 16 sensores, posteriormente se desarrolló *Argus II* con una matriz de 60 sensores.

### *Monitoreo de pacientes.*

En el campo del monitoreo de pacientes podemos mencionar el proyecto *CodeBlue* para el monitoreo diario de signos vitales con el uso de dispositivos *wearables* incorporando sensores capaces de medir: frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno en sangre, actividad eléctrica del corazón, los movimientos del paciente, así como la actividad muscular.

### *Respuesta ante emergencias.*

Esta aplicación está muy relacionado con el ejemplo anterior ya que con la monitorización del paciente se logra mejorar la respuesta en tiempo a la atención de las emergencias, sobre todo incidir en aquellas donde la respuesta en la atención influyen entre la vida y la muerte, como en el caso de los pacientes cardíacos.

## **2.3.5 Aplicaciones Domésticas**

Nuestras casas poseen gran cantidad de dispositivos eléctricos y electrónicos para diversas tareas comunes. Con el desarrollo de la tecnología en redes de comunicación, los fabricantes han incorporado estos elementos en el diseño con el objetivo de mejorar la experiencia del usuario así como la mejora en el manejo de los recursos como el agua y la energía.

### *Monitoreo de agua y energía.*

Esta área de aplicación es muy importante debido a la necesidad de mejorar el control de recursos como el agua y la electricidad distribuida en las ciudades. El objetivo de estos proyectos es analizar el consumo y crear estrategias de ahorro evitando el desperdicio.

Otro enfoque interesante en este campo es el empleo de nodos de bajo costo que no solo permita analizar el consumo total de una casa, sino también analizar el consumo individual por medio de estos nodos localizados en distintas tuberías de la casa.

El principio de operación se basa en la medición por medio de acelerómetros de las vibraciones de la tubería debido al flujo de agua. Sin embargo este mecanismo requiere de una precisa calibración, la principal ventaja es que este sistema no es invasivo.

### *Aplicaciones Industriales*

Dentro de las aplicaciones en la industria se puede mencionar: monitoreo de procesos, automatización de edificios, control de accesos, mantenimiento preventivo de máquinas y equipos, control de calidad, manejo de inventarios, espacios inteligentes entre otros.

Las principal ventaja en este campo es la fiabilidad, precisión, facilidad de instalación y bajo costo de los nodos.

## **2.4 Retos en el diseño de Redes de Sensores Inalámbricas (WSN)**

Según Nanhao Zhu (2013) la construcción de nodos para redes de sensores inalámbricas incorpora por sus características de aplicación una serie de retos de diseño que se describen a continuación.

En cuanto al concepto de QoS (Calidad de servicio) los parámetros de confiabilidad, es decir que la información recibida es la correcta y la latencia, que se define como: la suma de retardos temporales dentro de una red, donde un retardo es producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la misma red, son muy importantes.

La red debe garantizar un tasa de envío de datos exitosa de tal forma que se garantiza la fiabilidad del enlace así como la latencia entre el envío y la recepción. Ambos parámetros son cruciales en algunas aplicaciones como el control industrial y en la monitorización en salud. Es necesario recalcar que para lograr ambos objetivos por lo general implica un compromiso con el consumo energético.

La seguridad y privacidad entendida desde el enfoque de que la información no sea accedida por otros, es un reto importante debido a que toda la comunicación se establece inalámbricamente, lo que la vuelve vulnerable en términos de seguridad si no se cuenta con algoritmos de encriptación adecuados y mecanismos de autenticación. En el caso del proyecto *SESBeacon* el tema de seguridad no se toma en cuenta debido a las características del problema, no sin antes recalcar que este tema es de vital importancia en el paradigma del “internet de las cosas”.

La limitación de recursos en cuanto a espacio físico, memoria, capacidad de procesamiento, rendimiento, costo económico son factores determinantes a la hora de plantear una solución. Lo anterior implica siempre un compromiso entre estos aspectos que se deben adecuar según las necesidades de la aplicación.

Uno de los aspectos importantes que se busca en el diseño de estas redes es la adaptabilidad y la flexibilidad de manera que un nodo sensor pueda emplearse en múltiples aplicaciones de tal forma que sea un diseño inteligente y robusto capaz de adaptarse ante cambios en la topología de la red.

Finalmente, el tema de la eficiencia energética es uno de los mayores retos de las tecnologías inalámbricas, la mayoría de aplicaciones requieren de nodos móviles o en su defecto los nodos se encuentran en lugares de difícil acceso para el mantenimiento. Por tanto el diseño incorpora técnicas de bajo consumo de energía que permitan maximizar el tiempo de funcionamiento del dispositivo con batería. Dentro de este tema existe gran variedad de herramientas y elementos que inciden en el consumo energético y que se deben considerar por ejemplo: protocolos de comunicación, sistemas operativos, tecnologías de ultra baja potencia.

Es claro que los retos mencionados involucran un compromiso donde el diseñador debe equilibrar entre los objetivos del dispositivo según su aplicación y sus características técnicas finales.

### **2.4.1 Consumo de Energía en Nodos de Redes de Sensores Inalámbricos**

Si se analiza el perfil de consumo de energía de un nodo sensor a nivel de hardware, el mayor consumo lo presenta el microcontrolador y la etapa de comunicación, ya que el primero se encarga de las tareas de control, procesamiento de datos, mientras que el transceptor debido a su complejidad interna conformado por etapas como: modulador, demodulador, mezcladores, osciladores, amplificadores, filtros, entre otros, necesita de mayor energía para transmitir las señales de radio frecuencia.

Con menor peso en el consumo se encuentran: los sensores que dependiendo de su complejidad y aplicación el consumo será mayor o menor, y la memoria del nodo en caso de requerir mayor almacenamiento de datos antes de transmitir.

Por otra parte, los nodos en un entorno de red requerirán de un protocolo de comunicación que defina la interacción con los restantes nodos sensores y la base. La manera en que la comunicación se realiza, como se accede al medio y en rutan o direccionan los datos influirá directamente en el consumo de energía.

### **2.5 Arquitectura Centralizada versus Arquitectura distribuida de Nodos**

Según Juan Cabella (2010), el impulso al desarrollo de redes de sensores ocurre debido a la gran diversidad de opciones para los diseños, miniaturización de los sensores, bajos costos en la fabricación y diversas tecnologías de microcontroladores.

Este autor enfatiza que la estrategia de desarrollar arquitecturas de nodos de sensores cada vez más sofisticados con la incorporación de hardware adicional con el propósito de implementar tareas diferentes y más complejas es contraproducente, ya que a pesar de dotar al nodo de gran versatilidad el consumo de potencia de este se incrementa, además el costo económico de estos sistemas lo vuelven poco factible para su producción a gran escala.

La tendencia actual busca sustituir los nodos complejos por la implementación de gran cantidad de pequeños nodos sensores simples siguiendo el principio fundamental de reducir costes y mantenimiento.

Para lograr este objetivo es necesario incorporar un diseño modular de manera tal que se garantice la portabilidad entre las interfaces, el hardware y el software. Existen principalmente dos arquitecturas: la arquitectura centralizada en la que los nodos se comunican únicamente con el *gateway* y la arquitectura distribuida en la que los nodos sensores se comunican solo con otros nodos sensores que se ubican dentro de su alcance.

En una arquitectura distribuida los nodos trabajan cooperativamente al ejecutar algoritmos distribuidos para obtener un único dato global que envían al nodo coordinador el cual trasmite la información a la estación base.

Ambos enfoques son utilizados dependiendo de la aplicación final. Por ejemplo un enfoque centralizado es una buena opción para sistemas simples que no requieran de gran procesamiento y la distancia entre el nodo sensor y el nodo coordinador no suponga un incremento excesivo en el consumo de energía para lograr una transmisión exitosa de los datos.

Por otra parte el enfoque distribuido optimiza el uso de recursos y logra disminuir costos aprovechando la capacidad de cada nodo para realizar tareas más complejas de forma conjunta.

## 2.5.1 Topologías de Red

Los nodos en una red inalámbrica de sensores se encuentran por lo general organizados en 3 distintas topologías como se muestran en la figura 3.

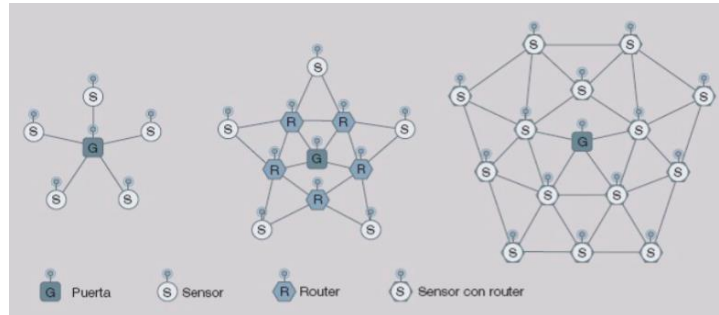


Figura 3. Topologías de red para WSN.

En la topología estrella cada nodo sensor se conecta directamente al *gateway*, el cual permite la recepción de los datos y posteriormente la transmite según sea la aplicación y tecnología empleada.

En la topología de árbol cada sensor se conecta a un nodo de mayor jerarquía que después se conecta al *gateway*, estos nodos intermedios llamados *router* permiten la interconexión entre nodos y se encargan de establecer una lógica de ruta para garantizar la comunicación. Al conectarse solamente con los *routers* permite que el diseño de los nodos sensores sea sencillo en cuanto a exigencias técnicas, de bajo consumo y posea mayor redundancia en la conexión.

En la topología de malla existen varias conexiones entre los distintos nodos que conforman la red por lo que es la topología más confiable al proveer estructuras redundantes. En caso de una falla de un nodo el tráfico de datos se enruta de tal manera que el funcionamiento de la red sea continuo.

## 2.6 Tecnologías de comunicación inalámbricas.

Dentro de las alternativas de conexión entre los nodos sensores existe diversidad de tecnologías inalámbricas. Dentro de los estándares más conocidos se encuentran: el estándar para redes locales (LAN) IEEE 802.11b *Wifi*, el estándar para redes de área personal IEEE 802.15.1 *Bluetooth* y el estándar IEEE 802.15.4 conocido como *ZigBee*.

A continuación en la tabla 2 se observa una comparación entre las tecnologías mencionadas.

*Tabla 2. Comparación de Tecnologías de comunicación Inalámbricas.*

<b>Tecnología</b>	<b>Bluetooth</b>	<b>ZigBee</b>	<b>WiFi</b>
<b>Aplicación</b>	PAN, eliminar conexiones cableadas	Monitoreo y control	Tráfico Web, email, Video
<b>Recursos Necesarios</b>	250 KB+	4KB-32KB	1 MB+
<b>Autonomía con Batería ( días)</b>	1-7	100-1000+	0.5-5
<b>Tamaño de red</b>	8	65000	2007
<b>Velocidad de transmisión</b>	3 Mbit/s	20-250 kb/s	11 Mb/s - 10 Gb/s
<b>Rango de Transmisión(m)</b>	10m	10-100m	100m
<b>Frecuencias</b>	2.4 GHz	0.868/0.915/2.4 GHz	2.4, 5 – 6 GHz
<b>Modulación</b>	GFSK	BPSK, O- QPSK, ASK, FSK, GFSK, MSK	BPSK, QPSK, COFDM, CCK, M-QAM, QAM
<b>Consumo de energía</b>	40mA TX, Standby 0.2mA	30mA TX, Standby 1µA	400mA TX, Standby 20mA
<b>Potencia de transmisión</b>	0 – 30 dBm	Desde 0 dBm (10 mW)	20 dBm



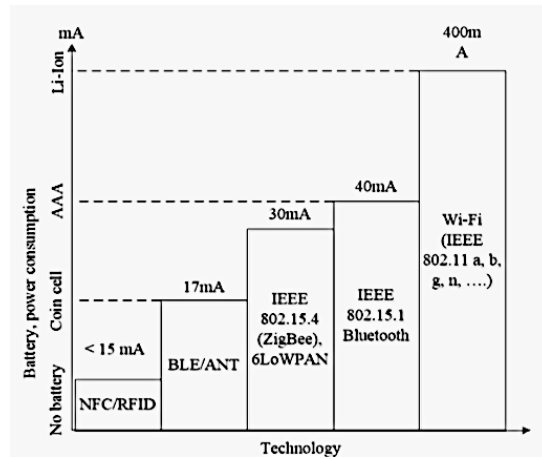


Figura 4. Consumo de energía en distintas tecnologías inalámbricas.

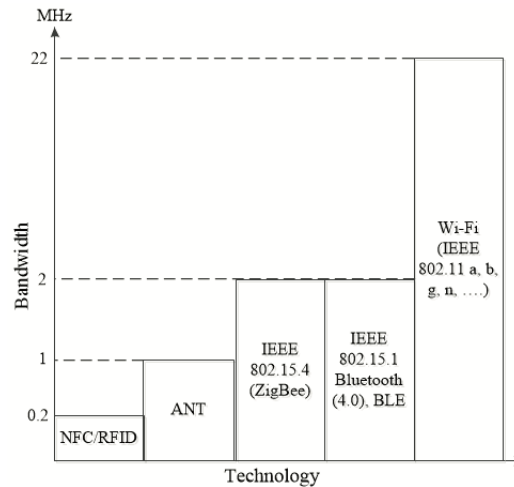


Figura 5. Ancho de banda disponible para distintas tecnologías inalámbricas.

Como muestran los diversos parámetros de comparación, la tecnología *Bluetooth* está orientada a conexiones cercanas con alto tráfico de datos y con pocos dispositivos conectados, mientras que la tecnología *Wi-Fi* requiere mayores recursos y energía por su capacidad de transmisión en cuanto a velocidad y distancia. Ambas tecnologías sugieren aplicaciones a nivel de usuario similares o complementarias.

El caso de la tecnología *ZigBee* orientada al monitoreo y control presenta: mayor rango de distancia que la tecnología *Bluetooth*, menor velocidad de transmisión y opera en diversas

frecuencias. Su principal ventaja es que presenta el menor consumo de energía permitiendo un funcionamiento con batería por muchos días.

La tecnología *ZigBee* surge a partir de la unión de distintas compañías del sector tecnológico agrupadas en la ZigBee Aliance con el objetivo de estandarizar y ofrecer un protocolo de alto nivel, bajo consumo y simple implementación para las comunicaciones inalámbricas. Se basó en el estándar IEEE 802.15.4 para la capa física y de acceso al medio, su aplicación se orientó a la domótica.

Un aspecto común a las tecnologías inalámbricas mostradas es que todas operan en frecuencias de la banda ISM (Instrumentation, Scientific and Medical radio bands) reservadas y definidas internacionalmente por ITU (International Telecommunication Union). Estas frecuencias se especifican de la siguiente forma: para los Estados Unidos las frecuencias 902-928 MHz, para Europa las frecuencias 868-870 MHz, para Estados Unidos y Europa las frecuencias 433.05-434.79 MHz, para Japón las frecuencias 314-316 MHz y finalmente las frecuencias universalmente reservadas se ubican entre los 2.400-2483 GHz.

Para este proyecto fue importante operar a una frecuencia de la banda ISM, ya que no es necesario contar con una licencia para su uso y además se respetarán los niveles máximos de potencia transmitida.

Un aspecto a considerar es que la banda ISM al ser abierta requiere que el diseño del sistema incorpore una mecanismos de protección contra interferencias y cierta tolerancia a errores en la transmisión.

## **2.6 .1 Enrutamiento en las Redes de Sensores Inalámbricas.**

El tema del enrutamiento de los datos en una red conformada por nodos sensores es de suma importancia ya que los modelos que se utilicen afectan directamente el consumo de energía en los nodos.

Debido a la característica dinámica de las redes de sensores inalámbricas los nodos requieren descubrir la topología de red en la que se encuentran. Cuando un nodo se conecta a la red por lo general envía una señal *broadcast* de tal forma que los demás nodos incorporan información acerca de la estructura de la red, el alcance de los nodos y las alternativas para lograr comunicación con otros nodos de la red. De lo anterior radica la importancia del protocolo de enrutamiento en las WSN.

Según Karl (2005) el algoritmo de enrutamiento es de vital importancia para el consumo de energía y tráfico en la red. Un algoritmo que requiera frecuentemente realizar envío de mensajes *broadcast* aumenta el consumo de energía y podría congestionar el funcionamiento de la red.

Los algoritmos de enrutamiento en las redes de sensores inalámbricas deben cumplir con las siguientes características: crear y mantener tablas de enrutamiento pequeñas, elegir la ruta al destino más eficiente, debe ser de convergencia rápida y requerir el envío de pocos mensajes para su funcionamiento.

Según el enfoque de funcionamiento existen distintos modelos de protocolos, entre ellos podemos mencionar: protocolo de difusión directa, protocolo de multi-Salto, modelo esquemático basado en clústers, protocolos basados en datos y protocolos basados en localización.

El protocolo de difusión directa es un modelo simple y funcional ya que todos los nodos en la red transmiten a la estación base. Resulta en conexiones donde la distancia entre los nodos

y la estación base aún permite transmisión con baja potencia, además implica WSN con cantidad baja de nodos conectados para mantener el consumo energético bajo.

El modelo multi-salto (*multi-hops*) realiza la comunicación entre el nodo y la estación base por medio de nodos intermedios, esta alternativa permite aumentar la distancia entre el nodo sensor y la estación base utilizando nodos intermedios y permitiendo bajas potencias de transmisión y por tanto menor consumo energético.

El modelo esquemático basado en clústeres busca disminuir la latencia o el tiempo entre envío y recepción de datos en comparación con el modelo anterior, ya que agrega información para el enrutamiento e integra una estructura de red basada en capas de clústeres los cuales se comunican desde clústeres de capa inferior a superior de manera jerárquica. Permite cubrir mayores distancias y es una alternativa muy importante en redes conformadas por miles de nodos sensores distanciados en el rango de cientos de metros.

Los protocolos centrados en el dato presenta un enfoque muy interesante para el caso de redes conformadas por una gran cantidad de nodos sensores. Este protocolo sectoriza la red de manera tal que los nodos que conforman el sector procesan las mediciones y envían solamente a la estación base un dato válido por sector. Esto permite disminuir los requerimientos de la red para la transmisión y por tanto resultan conexiones que consumen menos recursos.

Finalmente el protocolo basado en la localización simplifica la identificación de los nodos sensores que transmiten, ya que es la estación base la que solicita el dato específico desde una localización previamente conocida.

### 2.6.2 Eficiencia Energética

El desarrollo de la tecnología en las redes de sensores inalámbricos se ha dirigido hacia la obtención de diseños eficientes desde el punto de vista energético, de tal forma que permitan maximizar el tiempo de funcionamiento de la red sin necesidad de mantenimiento.

El diseño de un nodo con características de consumo energético limitadas implica la selección de componentes que cuenten con características de ultra bajo consumo, teniendo claro el compromiso en cuanto a rendimiento del nodo en términos de procesamiento, y distancia máxima de transmisión.

La comunicación inalámbrica consume gran parte de la energía en el nodo, razón por la cual se busca minimizar el número de bits transmitidos, así como ajustar la potencia de transmisión que logre el envío y recepción confiable a la distancia meta de 50 m en línea de vista sin obstáculos. Esta comunicación puede realizarse por eventos o por consulta, en algunas aplicaciones se usan enfoques híbridos para el envío de datos.

También es posible reducir el consumo de energía por medio de técnicas de *software* que buscan una programación eficiente del código, así como estrategias de hardware con la implementación de modos de bajo consumo según los ciclos de funcionamiento del nodo como se muestra en la figura 6.

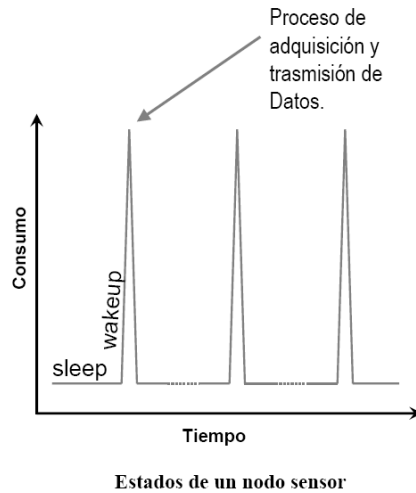


Figura 6. Estados de funcionamiento de un nodo sensor.

Se debe considerar los protocolos de comunicación en cuanto al enrutamiento de datos como se analizó anteriormente, así como las técnicas de acceso al medio de los nodos para la interacción en red.

En las comunicaciones inalámbricas el medio de transmisión es compartido, por ello los nodos sensores deben contar con un protocolo que regule ese acceso al medio para la transmisión.

Con los protocolos de acceso al medio sucede lo mismo que con los modelos de enrutamiento, ambos afectan la eficiencia energética del sistema. En este caso si se da un aumento en las colisiones entre los paquetes de datos transmitidos, se dará un incremento en el consumo energético del nodo ya que será necesario una mayor cantidad de retransmisiones, lo anterior se conoce en inglés como *overmitting*. Además los períodos de escucha o *overhearing* incrementan el consumo de energía debido a que los nodos deben estar mayor tiempo en estado de funcionamiento activo.

Algunos protocolos de acceso al medio requieren ensamblar tramas complejas que incrementan la cantidad de bits a transmitir, esto se conoce en inglés como *protocol overhead*, por tanto el sistema transceptor deberá estar activo mayor tiempo lo que implica

un mayor consumo y menor tiempo de funcionamiento con batería.

Los protocolos MAC (*Medium Access Control*) manejan distintos enfoques de implementación. Por ejemplo el enfoque *Schedule-base* utiliza TDMA (*Time Division Multiple Access*) donde se asigna una ventana de tiempo para cada nodo de tal forma que se eviten colisiones y el *overhearing*. El enfoque *Contention Base* o contención de base, emplea mecanismos CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) para evitar colisiones, existen diversas variaciones a partir de este mecanismo de acceso al medio. Y finalmente existe un enfoque híbrido que mezcla los enfoques anteriores con el objetivo de disminuir colisiones, aumentar la confiabilidad del enlace y disminuir el consumo energético. Este esquema híbrido es utilizado por el protocolo IEEE 802.15.4.

Originalmente el estándar IEEE 802.15.4 fue desarrollado para transmisiones que no requirieran altas tasas de transmisión como alternativa inalámbrica para las redes de área personal. Esta norma especifica la capa física y de acceso al medio y resulta una alternativa de solución para aplicaciones poco exigentes en la eficiencia energética.

Posteriormente otras empresas desarrollaron protocolos de comunicación tomando como base el estándar anterior. En este contexto surge el protocolo *Wireless Hart* donde el acceso al medio se realiza mediante TSMP (*Time Synchronized Mesh Protocol*), este control de acceso al medio por lapsos de tiempo permite gran ahorro de energía.

Otras empresas se sumaron al desarrollo de la tecnología WSN como Dust Networks desarrollando un protocolo igualmente basado en TSMP, Linear Technology impulsó la tecnología Eterna ultra Low power SoCs basado también en TSMP y Nordic Semiconductor propone el protocolo embebido Enhance ShockBurst (ESB) que introduce modos de ultra bajo consumo y un acelerador de protocolo por hardware, lo que le permite un excelente rendimiento y flexibilidad.

## 2.7 Etapa de comunicación en nodos sensores inalámbricos

La etapa de comunicación en la estructura genérica de un nodo sensor es fundamental, ya que esta etapa permite el envío y recepción de los datos. Dentro del modelo OSI (Open System Interconnection) o modelo de referencia para protocolos de red, la etapa de comunicación se ubica en la capa física.

Según Akyldyz (2011) en la capa física se realiza la conversión de la información en forma de bits a señales u ondas electromagnéticas adecuadas para su propagación en el aire. Más específicamente en la capa física: se selecciona la frecuencia de operación, se genera una frecuencia portadora, se realiza detección de señales, modulación, demodulación, encriptación de los datos. La confiabilidad de la comunicación depende de: las propiedades del hardware de los nodos, la circuitería del transceptor y de las características de la antena.

La mayoría de las ventajas en las redes de sensores se sustentan en la utilización de comunicación inalámbrica como por ejemplo: facilidad de implementación, creación de redes sin infraestructura, difusión de mensajes en *broadcast* o a todos los elementos de la red. A pesar de las enormes ventajas la comunicación inalámbrica también trae una serie de retos en la implementación y diseño como por ejemplo: distancias de comunicación cada vez mayores con menor requerimientos de potencia, disminución de la tasa de error en la transmisión y la reducción de los problemas de interferencia.

Por lo anterior , en el diseño de nodos sensores la selección de la etapa de comunicación corresponde a criterios técnicos específicos como: protocolo de comunicación, frecuencia de operación , consumo de corriente en transmisión-recepción y modo de bajo consumo, tasa de transmisión de datos por segundo, costo económico, facilidad de implementación y escalabilidad.



### 2.7.1 Estructura de los transeptores

En la mayoría de nodos de sensores se incorpora hardware para comunicación por radio frecuencia. El espectro de radiofrecuencia se sitúa desde los 3 kHz hasta los 300 GHz, lo que permite el uso de diversidad de bandas para la comunicación, en el caso de los nodos sensores se puede utilizar la banda ISM (*Industrial Scientific Medical*) que se emplea en aplicaciones industriales, científicas o médicas. Esta banda de frecuencia no requiere de una licencia para su uso en la mayoría de países. A pesar de la popularidad de la comunicación por radio frecuencia algunos nodos incorporan hardware especialmente diseñado para comunicación óptica, comunicación acústica en el caso de redes de sensores acuáticas o comunicación por inducción magnética para el caso de redes subterráneas.(Akyldyz, 2011)

Nos enfocamos a la estructura de un sistema de comunicación por radio-frecuencia como se observa en la figura 6.

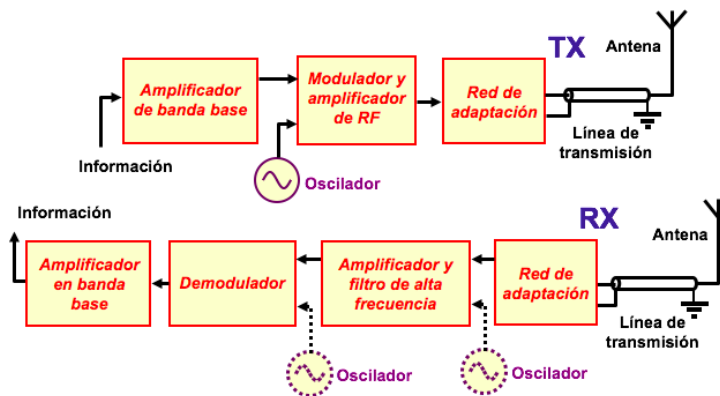


Figura 7. Bloque general de un transmisor y un receptor RF genérico.

La circuitería interna de un transmisor como un receptor es compleja, diversa e involucra un alto grado de integración. Algunos de los bloques internos que conforman un sistema de comunicación son: amplificadores, modulador, demodulador, osciladores, detectores de señales, mezcladores, filtros, redes separadores de canales, redes adaptadoras de impedancia, sintonizadores, entre otros.

En la figura 8 se observa el concepto de transceptor, este se define como un dispositivo electrónico que cuenta con un transmisor y receptor que comparten parte de la circuitería interna. Debido a esto el transceptor provee una comunicación semidúplex, lo que significa que puede enviarse datos en ambos sentidos pero no de manera simultánea.

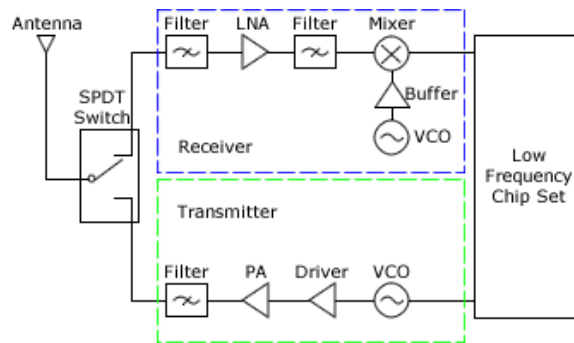


Figura 8. Transceptor de radio frecuencia.

### 2.7.2 Modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana

Los transceptores de radio frecuencia utilizan distintos esquemas de modulación, uno de los esquemas más comunes que permiten diseños bajo costo es el modulador por desplazamiento de frecuencia gaussiana o GFSK. Este esquema de modulación para comunicación digital es utilizado en diversas tecnologías como Bluetooth, DECT o Wavenis.

GFSK es una versión mejorada de la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK), donde la información pasa por un filtro gaussiano antes de modular la señal, lo que permite un espectro de energía más estrecho de la señal modulada y con esto mayores velocidades de transferencia sobre un mismo canal.

La señal transmitida puede representarse como muestra la ecuación 1, donde: la letra A corresponde a la amplitud de la señal portadora,  $f(t)$  la frecuencia de portadora y  $\phi(t)$  representa la fase de la señal portadora.

$$s(t) = A \cos(2\pi f(t) + \phi(t)) \quad \text{Ec. 1}$$

La ecuación 2 describe la fase de la señal portadora, donde:  $h$  es el índice de modulación,  $a_i$  corresponde al valor de la señal moduladora (-1 para un “0” lógico y +1 para un “1” lógico) y  $\gamma(\tau)$  es la función de pulsos.

$$\phi(t) = h\pi \int_{-\infty}^t \sum a_i \gamma(\tau - iT) d\tau \quad \text{Ec. 2}$$

En modulación GFSK a la entrada del modulador se encuentra un filtro paso bajo gaussiano que reduce o “suaviza” las transiciones de la señal de datos, lo que evita que señales de alta frecuencia pasen al modulador y aumente el ancho del pulso por un período mayor que la duración de un bit, lo que podría causar interferencia entre símbolos. (Sabiht Gerez, 2016)  
El comportamiento temporal del filtro gaussiano viene dado por la ecuación 3.

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $\sigma$  se relaciona con el ancho de banda  $B$  como se muestra en la ecuación 4.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\ln 2}}{2\pi B} \quad \text{Ec. 4}$$

Finalmente la figura 9 muestra el principio de filtro gaussiano sobre la banda base.

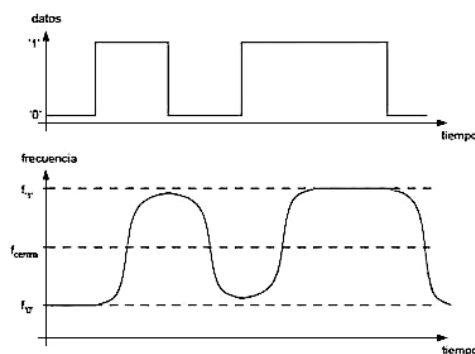


Figura 9. Filtro Gaussiano sobre la banda base.

## 2.8 Tecnologías de bajo consumo utilizadas en microcontroladores electrónicos de los fabricantes Microchip, Atmel, y Texas Instruments.

Un componente primordial en la arquitectura de un nodo sensor es el microcontrolador o *MCU* del inglés *Microcontroller Unit*. El MCU es un circuito integrado complejo de alta integración programable capaz de ejecutar instrucciones definidas. Su estructura interna está conformada por una variedad de periféricos y recursos, sin embargo siempre poseen las tres unidades fundamentales de un computador: memorias tipo ROM y RAM, periféricos de entrada-salida y unidad de procesamiento central o CPU. En la figura 10 se observa la estructura básica de un MCU.

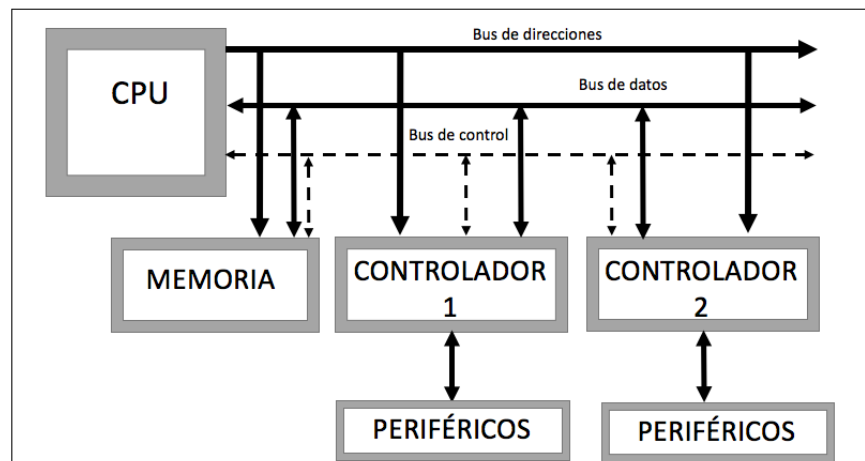


Figura 10. Estructura general de un microcontrolador.

Los fabricantes de componentes electrónicos ofrecen una amplia gama de microcontroladores orientados a múltiples aplicaciones en dependencia de sus características de hardware y rendimiento. En el mercado se encuentran microcontroladores orientados a: aplicaciones de comunicaciones, control, procesamiento digital de señales donde las exigencias en velocidades de reloj y consumo de energía son más altos y aplicaciones donde la prioridad resulta en implementar modos de ultra bajo consumo energético en procura de mayor autonomía de funcionamiento.

Para implementar proyectos con microcontroladores se requiere de software específico de diseño y programación suministrado por el fabricante, la mayoría de MCU se programan en lenguaje ensamblador o en un lenguaje basado en C.

A continuación se aborda de manera general algunas de las principales tecnologías desarrolladas en el campo de los microcontroladores de bajo consumo.

### ***2.8.1 Atmel Pico power Technology***

Atmel es una compañía estadounidense fabricante de semiconductores fundada en 1984 la cual ha desarrollado una gran cantidad de dispositivos electrónicos como: sus microcontroladores basados en el 8051, con arquitecturas propias como AVR y AVR32 además de una serie de microcontroladores basados en la arquitectura ARM.

Posteriormente Atmel incursionó en el desarrollo de dispositivos de radiofrecuencia, memorias EEPROM, Flash, ASICs, WiMax entre otros. Su mercado se centra en las siguientes áreas: electrónica de consumo, telecomunicaciones, computadores, redes, equipos médicos, sector automotriz, aeroespacial y militar.

El objetivo de Atmel con el desarrollo de *Pico power Technology* es reducir el consumo de potencia manteniendo dispositivos con alto rendimiento a través de la implementación de técnicas de diseño de bajo consumo.

La integración de periféricos es fundamental en este enfoque ya que con la incorporación de unidades de hardware como controladores de accesos directos de memoria (DMA), algunas operaciones como las que involucran desplazamientos de memoria pueden realizarse sin necesidad de hacer uso de la unidad de procesamiento central (CPU) la cual podrá mantenerse en modos de bajo consumo, o en su lugar realizar otras labores de procesamiento permitiendo un alto rendimiento.

El sistema inteligente de control de eventos permite a los periféricos tomar decisiones inteligentes durante la ejecución de tareas ya que se encuentran integrados en red con buses

de datos comunes, lo que facilita la comunicación entre los dispositivos para interactuar directamente sin requerir la CPU o hardware adicional .

Otra técnica utilizada por Atmel para lograr bajo consumo energético consiste en la utilización de distintas velocidades de reloj para el sistema, lo que permite utilizar señales de menor frecuencia cuando los requerimientos lo permitan de tal forma que el consumo de energía sea menor.

Además *Pico power Technology* integra la opción de desconexión de módulos y etapas del MCU, esta tecnología involucra un diseño riguroso desde la geometría de los transistores donde los diversos componentes del microcontrolador pueden operar a tensiones bajas alrededor de los 1.6 V como una alimentación variable donde las funciones analógicas del MCU continúan en operación.

Con el concepto *Sleepwalking* se busca reducir la potencia activa del MCU la cual es mayoritariamente consumada por el CPU y la memoria RAM. Por ejemplo: no es necesario que el CPU genere una interrupción para verificar el valor del convertidor analógico-digital que tiene conectado a su entrada un sensor, ya que el convertidor genera la señal solamente en el instante que se cumpla las condiciones de interés en la entrada.

Es importante recalcar que uno de los principales retos de las tecnologías que buscan reducir el consumo de potencia, es generar mecanismos que permitan un rápido *Wake up* o despertar del microcontrolador de manera que el rendimiento no se vea afectado.

### ***2.8.2 Energy Trace Technology de TI***

La empresa norteamericana Texas Instruments es una de las compañías más importantes en la fabricación, desarrollo y comercialización de semiconductores. Actualmente cuenta un amplio espectro de productos y áreas de investigación lo que lo convierte en el mayor productor de procesadores digitales de señales y semiconductores analógicos.

Texas Instruments busca con sus tecnologías crear ciudades inteligentes y energéticamente eficientes. Ofrece diversidad de productos con el objetivo que sus clientes puedan crear nuevos mercados y aplicaciones. En este contexto la empresa desarrolló la serie de microcontroladores MSP430FRXX.

La familia MSP430FRXX está conformada por microcontroladores de 16 bits con ultra bajo consumo de energía diseñados para aplicaciones de redes de sensores, sistemas de administración y automatización en edificaciones, redes inteligentes y diseños industriales.

Estos dispositivos ofrecen: tensiones de alimentación variables desde 1.8 a 3.6 V, en modo activo requiere de 126  $\mu\text{A}/\text{MHz}$  en modo de bajo consumo con un reloj de tiempo real (RTC) solamente requiere 1  $\mu\text{A}$ .

La reducción de los requerimientos energéticos en modo activo se logra por medio de la tecnología *FRAM* (*Ferroelectric Random Access Memory*) utilizada en memorias de ultra baja potencia y un alto rendimiento en cuanto acceso y transferencia de datos. Como se analizó previamente la memoria y el CPU consumen la mayor cantidad de energía en el modo activo, ya allí la importancia de la tecnología *FRAM*.

*Energy Trace Technology* es una herramienta poderosa de análisis que se comunica con el MCU por medio de puertos de acceso *debug* y con ello se obtienen mediciones en tiempo real del perfil de consumo energético del microcontrolador, facilitando la optimización en esta área.

### ***2.8.3 Microchip Xtreme Low Power Technology***

Microchip Technology Inc. es una empresa estadounidense fabricante de una amplia gama de dispositivos como: microcontroladores, memorias, semiconductores analógicos, sistemas de comunicación, dispositivos para la industria automotriz, sistemas embebidos, entre otros. Esta compañía desarrolló la tecnología XLP o *Xtreme Low Power* para microcontroladores con el objetivo de ofrecer una alternativa robusta para aplicaciones: *wearables* o dispositivos que las personas portan con ellos en sus actividades diarias, redes de sensores inalámbricas, *Smart Things* o internet de las cosas; todas estas aplicaciones requieren de ultra bajo consumo de potencia, en algunos casos XLP ofrece autonomía de hasta 20 años con 1 batería.

Microchip incorporó en esta tecnología elementos similares a los utilizados por Atmel previamente discutidos. Los CPIS o *Core Independent Peripherals* permiten ejecutar funciones de manera autónoma sin el núcleo del MCU. Tareas en hardware en lugar de software, permiten que el sistema con XLP alcance prestaciones muy superiores a los habituales microcontroladores de 8 bits, así como reducción en requerimientos en memoria.

Estos modelos de Microchip incorporan soporte para batería respaldo además ofrecen una variedad de MCU que van desde dispositivos entre: 8 -121 pins, 4-256 KB Flash y variedad de encapsulados. Disminuyendo la necesidad de componentes externos adicionales, lo cual es una gran ventaja cuando el espacio físico del diseño es limitado como en el caso de este proyecto.

Los principios de diseño utilizados en el desarrollo de la tecnología XLP se basan en: integración, flexibilidad, inteligencia, facilidad de uso y fácil migración. Combinados crean dispositivos robustos y de amplia gama para cualquier aplicación electrónica

En cuanto al manejo de la energía los microcontroladores de Microchip incorporan los siguientes modos de bajo consumo: *Idle*, *Sleep*, *Low-power retention sleep* y *Deep-sleep*; brindado flexibilidad al diseñador.



Algunos de los *CIPS* incorporados en los MCU con XLP son módulos: LCD, amplificadores operacionales, RTCC, USB, DMA, mTouch, módulos para criptografía, entre otros. Esta alta integración permite soluciones de: bajo consumo energético, costo económico menor y un procesamiento más eficiente. Lo anterior permite desarrollar aplicaciones con mayor complejidad y posibilidades de escalamiento a un nivel más alto con el mismo hardware.

El caso de la incorporación de elementos de encriptación es muy importante sobre todo en las redes de sensores inalámbricas donde los temas de seguridad se vuelven fundamentales para los diseñadores. Ya que brinda una solución robusta por hardware, que en caso de realizarse por software implicaría un alto procesamiento.

En la figura 11 se muestra la amplia gama de microcontroladores PIC con XLP y sus principales características de consumo energético.

Device	Flash Memory (KB)	Pins	Sleep (nA)	WDT (nA)	RTCC (nA)	1 MHz Run (µA)
PIC16F14XX	14	14/16/20	25	290	-	25
PIC16F15XX	14	28	20	300	600	35
PIC16F17XX	3.5-9	28/40/44	50	500	-	35
PIC16F18XX	3.5-7	8-20	20	300	600	39
PIC16F19XX	7-28	28/44	60	500	600	150
PIC18LFXXK50	8-16	20	24	450	790	170
PIC18LF14K22	8-16	20	34	460	650	150
PIC18F46J11	16-64	28/44	13	813	813	272
PIC18F46J50	16-64	28/44	13	813	813	272
PIC18F87K90	32-128	64/80	25	350	720	181
PIC18F97J94	32-128	64/80/100	80	290	400	100
PIC16F1619	3.5-14	8/14/20	50	500	-	32
PIC16F1719	3.5-28	14/20/28/40	50	500	-	32
PICF18345	3.5-14	8/14/20	40	250	-	37
PIC16F18877	7-56	28/40	50	500	-	32
PIC18F45K22	8-64	28/40	10	300	-	20
PIC24F16KL402	4-16	14/20/28	-	210	690	150
PIC24F16KA102	8-16	20/28	20	350	490	181
PIC24F16KM204	8-16	20/28/44/48	25	500	700	204
PIC24F32KA304	16-32	20/28/44	20	400	500	204
PIC24FJ64GA104	32-64	28/44	20	220	520	250
PIC24FJ64GB004	32-64	28/44	20	220	520	250
PIC24FJ128GB204	64-128	28/44	18	240	300	178
PIC24FJ128GA310	64-128	64/100	10	270	400	150
PIC24FJ128GC010	64-128	64/100	75	270	350	178
PIC24FJ256GB412	64-256	64/100/121	80	100	170	155

\*Base sleep current included in WDT and/or RTC numbers. Typical I/O pin leakage current  $\pm 5$  nA  
All numbers are typical values at minimum V<sub>DD</sub>, taken from the datasheet.

Figura 11. Características de consumo de microcontroladores PIC con XLP de Microchip.

Microchip además cuenta con software y compiladores con versiones gratuitas para la programación. Otro aspecto importante es la plataforma *XLP Battery Life Estimator* o estimador del tiempo de vida de la batería, dicho programa permite seleccionar: modelo del PIC, tipo de batería, tiempos de ejecución y de modo de bajo consumo así como seleccionar

los periféricos empleados. Con los parámetros anteriores es posible estimar: el tiempo de vida de la batería, la corriente máxima y promedio. La interfaz de este software se observa en la figura 12.

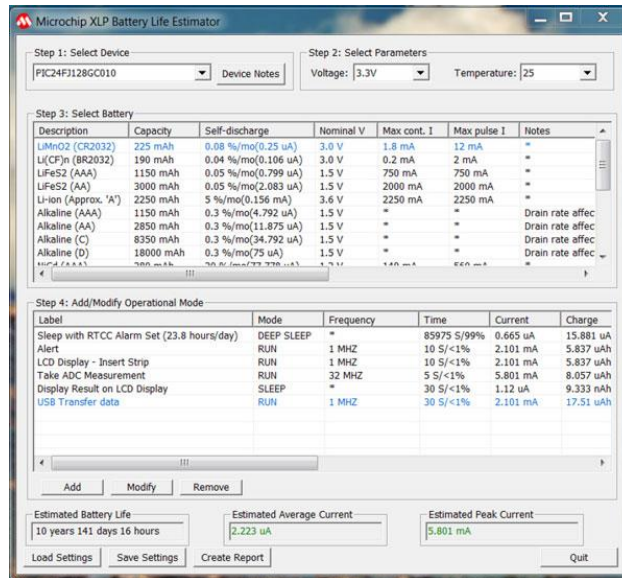


Figura 12. Software XLP Battery Estimator de Microchip.

## 2.9 Descripción y funcionamiento del protocolo de comunicación SPI

La mayoría de microcontroladores incorporan diversos periféricos para la comunicación entre diversos dispositivos. En este apartado se analiza y explica el protocolo de comunicación serial SPI.

SPI proviene de las siglas en inglés correspondientes a Serial Peripheral Interface. Es un bus estándar de comunicación para la transferencia de información digital entre circuitos electrónicos. En este protocolo el flujo de bits es transmitido y regulado de forma serial por un reloj de manera que la comunicación es sincrónica.

En la siguiente figura se observa las conexiones requeridas por el protocolo SPI.

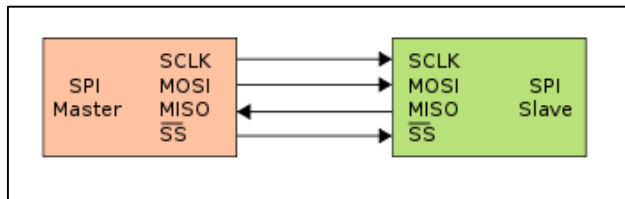


Figura 13. Conexión entre módulos SPI.

El protocolo SPI maneja un estructura Maestro-Eslavo donde el maestro inicia la comunicación activando en bajo el pin SS, este mecanismo permite conectar un Maestro a distintos esclavos como se observa en la figura.

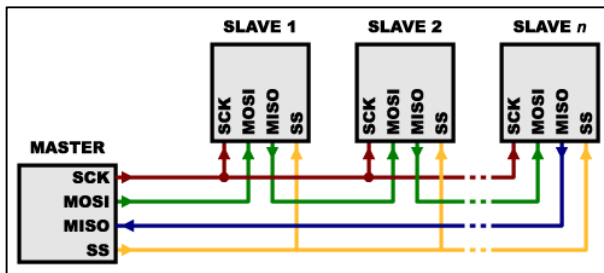


Figura 14. Conexión módulos SPI en configuración Maestro-Eslavo.

El pin SCK corresponde al reloj, los pulsos generados marcan la sincronización donde en cada flanco ( positivo o negativo según se configure) se lee o se envía un bit con o sin retraso.

El pin MOSI (Master Output Slave Input) comunica los datos que salen del maestro y entran en el esclavo mientras que el pin MISO (Master Input Slave Output) maneja el sentido contrario de comunicación permitiendo de esta manera la comunicación full dúplex entre los dispositivos.

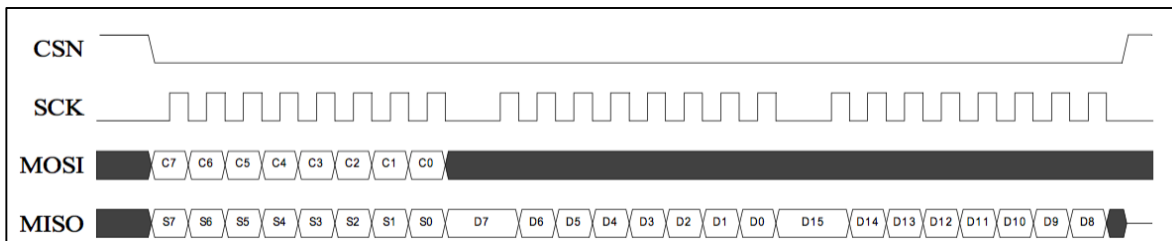
En la siguiente tabla se muestran algunas ventajas y desventajas de este protocolo de comunicación.

*Tabla 3. Ventajas y desventajas del protocolo Serial Peripheral Interface (SPI).*

Ventajas	Desventajas
Comunicación Full Dúplex.	Requiere más conexiones que I2C
Mayor velocidad de transmisión que I2C.	La selección de cada dispositivo esclavo requiere de una conexión física por cada elemento
Es un protocolo flexible y con alto control de los bits.	No hay un control de flujo por hardware
Implementación en hardware sencilla.	Funciona para conexiones a distancias cortas.
Consume menos energía que I2C	
Requiere menos pines que una comunicación paralela	

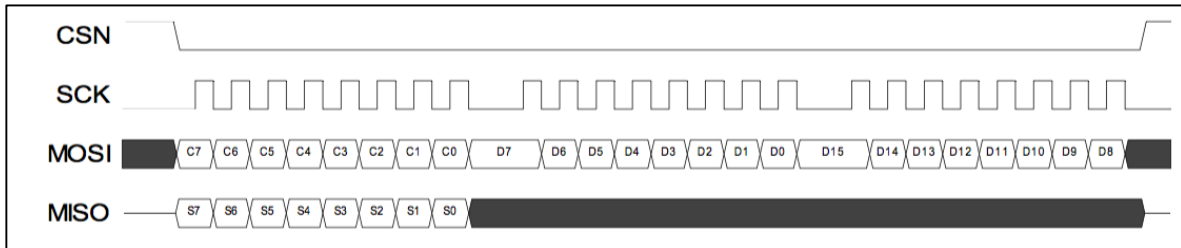
El protocolo SPI es muy popular ya que básicamente el hardware podría ser tan simple y barato como un registro de desplazamiento.

Finalmente las figuras 14 y 15 ilustran la comunicación entre el microcontrolador maestro y el transceptor esclavo utilizando el protocolo SPI. La transmisión se realiza desde el bit menos significativo (LSBit) al más significativo (MSBit), y desde el byte menos significativo (LSByte) al más significativo (MSByte).



*Figura 15. Operación de lectura del transceptor por medio de SPI.*

Durante el envío del comando por parte del microcontrolador, se recibe el registro de estado del transceptor. Cada bit es recibido o transmitido en el flanco negativo del reloj, por tanto para leer los bits es necesario hacerlo en el flanco positivo del reloj.



*Figura 16. Operación de escritura del transceptor por medio de SPI.*

## Capítulo 3

### Diseño del nodo sensor SESbeacon

El presente capítulo muestra el proceso de diseño del nodo sensor a partir de fundamentos teóricos adquiridos durante la etapa de investigación. Se discuten los enfoques de solución a partir de criterios de diseño en ingeniería con el objetivo de brindar la mejor solución acorde al problema en cuestión.

#### 3.1 Enfoque de diseño del nodo sensor: A.

El primer enfoque de solución se muestra en la figura 17. Este enfoque recibe 2 bloques de entradas correspondientes el primero a las señales provenientes de los sensores de acuerdo a la aplicación específica donde se interconecte el nodo sensor, y la selección de intervalo de tiempo para el envío de las alertas.

Las señales de los sensores ingresan a un bloque comparador donde se determina el tipo de alerta correspondiente, la salida de este bloque comparador ingresa al bloque generador de señales el cual en dependencia de la alerta se genera una señal a una frecuencia específica que será posteriormente transmitida.

El manejo de tiempo se realiza en el bloque específico de control y temporización, donde a su vez este módulo genera la señal de habilitación para la transmisión de la alerta en el momento en que se cumpla la condición definida por el intervalo de tiempo seleccionado.

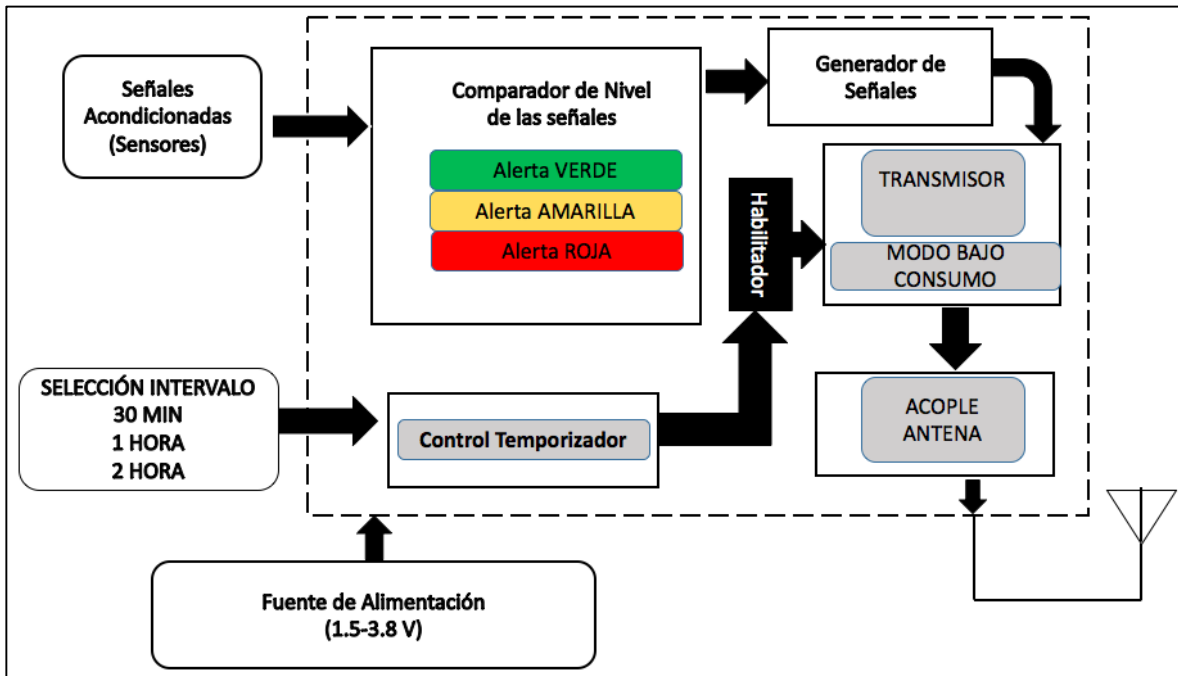


Figura 17. Primer enfoque de solución del proyecto SESbeacon.

En este primer enfoque se buscó la simplificación del diseño al utilizar dispositivos simples y específicos para una función determinada por ejemplo: el uso de un circuito comparador o un generador de señales para distintas frecuencias basado en circuito integrado similar a un LM555, o incluso incorporar tecnologías como la del fabricante de dispositivos electrónicos Semtech denominada: *Power and Go* que facilita la implementación de la etapa de comunicación por radiofrecuencia sin necesidad de un microcontrolador.

La propuesta anterior tiene como principales ventajas: empleo de componentes de bajo costo, facilidad de implementación, reducción del número de componentes necesarios (no utilizar MCU) lo que implica una disminución del tamaño de la placa final del nodo sensor.

Sin embargo, este enfoque de solución presenta aspectos importantes a considerar y que limitan esta alternativa. Prescindir de un microcontrolador implica una pérdida en el control de las características del nodo sensor, por ejemplo: en el manejo e incorporación de técnicas de bajo consumo, adaptabilidad a distintos entornos de aplicación, ajuste de parámetros relacionados con la etapa de comunicación (potencia y velocidad de transmisión) y sobre

todo limitaciones en el desarrollo o implementación de un protocolo de comunicación que finalmente impactan la versatilidad de la solución.

Además es importante mencionar que en este enfoque de diseño y particularmente la etapa de generación de señales, implica retos importantes en cuanto a que se requiere obtener señales con precisión utilizando componentes de bajo costo. Aunando a lo anterior en la implementación del receptor es necesario diseñar un sistema de filtrado que permita detectar de manera confiable el tipo de alerta recibido.

### **3.2 Enfoque de diseño del nodo sensor: B.**

La figura 18 resume un segundo enfoque de solución del nodo sensor. Este recibe igualmente que el enfoque anterior las señales provenientes de los sensores según la aplicación específica e ingresan al microcontrolador según corresponda a una entrada digital o analógica. A su vez un reloj de tiempo real se encarga del bloque de temporización en función al intervalo de envío de la alerta escogido.

La generación de la alerta se computa en el microcontrolador y este se interconecta al transmisor para su configuración, control y finalmente el envío de la alerta. La ventaja de utilizar este enfoque radica en la capacidad de procesamiento, control y versatilidad en el diseño que implica el uso de un microcontrolador. Además este diseño permite un mayor control del consumo de potencia del nodo sensor.

La comunicación interna entre el microcontrolador y la etapa de transmisión permite implementar un protocolo de comunicación de manera más simple que el enfoque de solución A, permitiendo de esta forma un enlace de comunicación confiable al poder incorporar mecanismos de control de errores y retransmisión de la señal de alerta en caso de fallas.

Los aspectos anteriormente analizados permiten seleccionar este enfoque como la mejor solución para el diseño del nodo sensor SESbeacon ya que sus características se ajustan a los objetivos y funcionamiento esperado del nodo como lo son: bajo costo económico,



dimensiones reducidas, bajo consumo energético y estructura genérica para diversas aplicaciones.

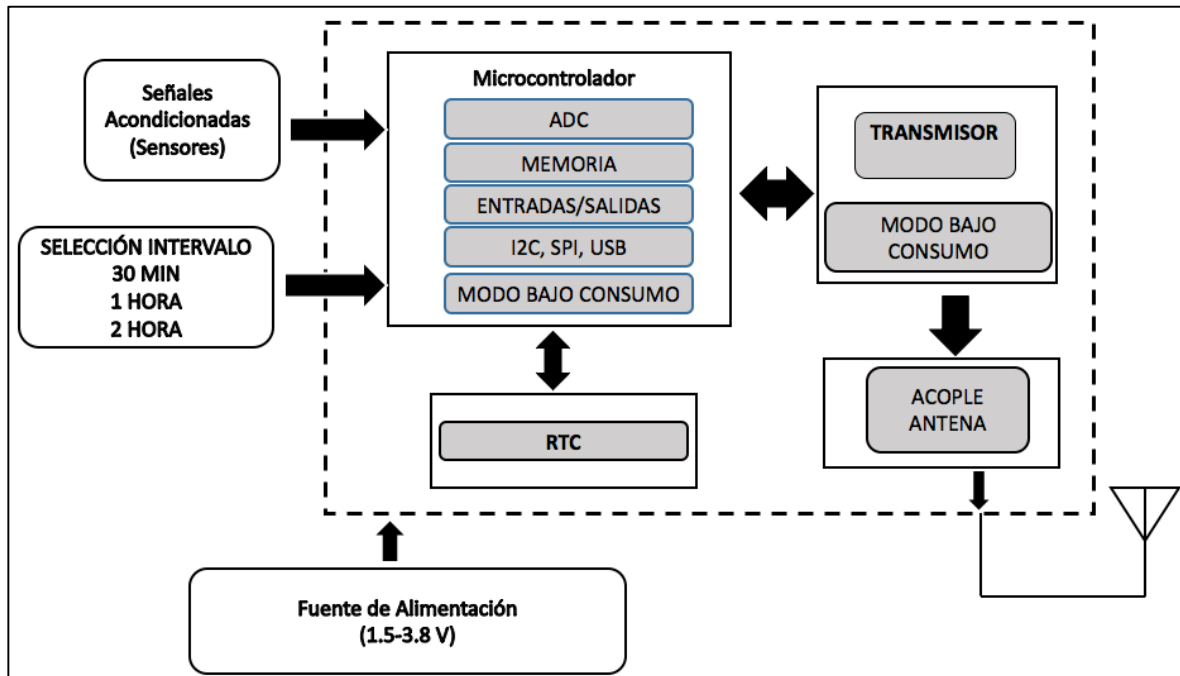
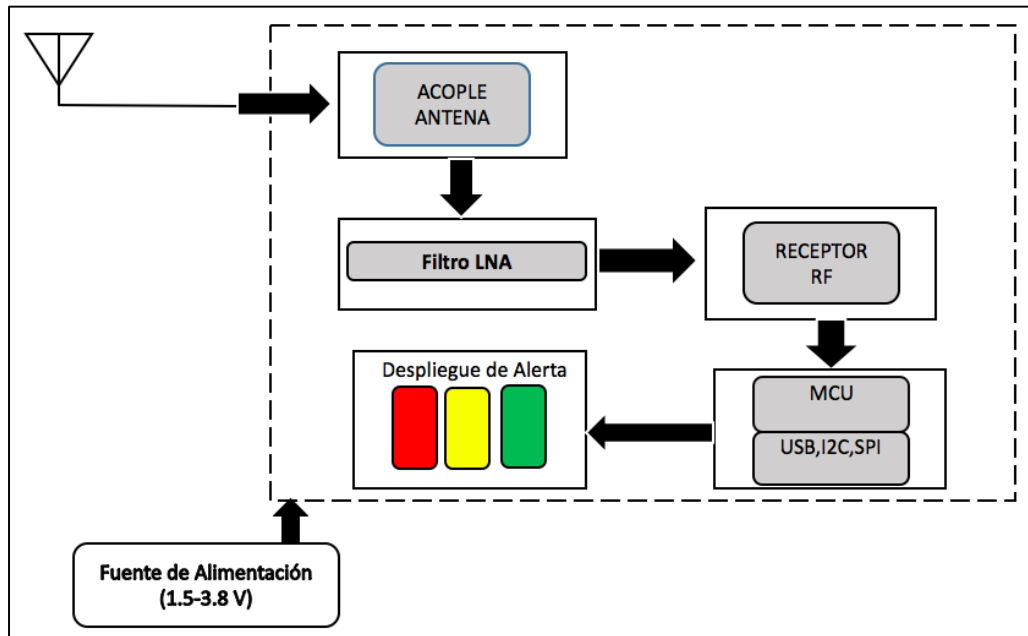


Figura 18. Segundo enfoque de solución del proyecto SESbeacon.

### 3.3 Enfoque para el receptor del enlace de comunicación.

La etapa de recepción de la alerta por lo general se encuentra en una estación o nodo central, es en este punto donde la información recibida es procesada o almacenada. La figura 19 muestra el diagrama general de esta estructura conformada por el receptor de radio frecuencia. Este elemento requiere de una etapa de acople de impedancia y un amplificador de bajo ruido. Una vez recibida la alerta el microcontrolador la identifica y la despliega.

Es común que esta etapa cuente con mayor recursos de hardware ya que por lo general recibe información proveniente de toda la red de sensores. De lo anterior es importante destacar que la estructura del receptor debe permitir su escalabilidad, esto quiere decir que el sistema es capaz de manejar el crecimiento de las operaciones sin afectar su calidad o en general estar preparado para un manejo de la operación más grande y complejo.



*Figura 19. Enfoque del receptor del proyecto SESbeacon.*

### **3.4 Desarrollo de la etapa de comunicación del nodo sensor.**

Para el proyecto SESbeacon en su primera etapa se decidió emplear un protocolo simple orientado a la difusión directa, ya que el envío de los datos será controlado por el mismo nodo por medio de temporización de tal forma que se reduce el consumo de energía. Sin embargo, para una segunda etapa el mismo nodo permitirá la implementación de un modelo multi-salto con las ventajas discutidas de bajo consumo energético, mayor distancia de transmisión y baja latencia, con solamente modificaciones en el software del nodo.

Para seleccionar la mejor alternativa para la etapa de comunicación por medio de criterios de diseño de ingeniería se utilizó la tabla 4. Esta tabla muestra la comparación de diversos transceptores disponibles en el mercado, algunos de ellos utilizados en nodos de sensores comerciales por ejemplo: el transceptor CC1000 utilizado por el nodo Mica2, el CC2420 utilizado por los nodos TelosB, MicaZ e Imote2.

*Tabla 4. Comparación de Transceptores de radio frecuencia para aplicaciones de Redes de Sensores Inalámbricas.*

<b>Transceptor</b>	<b>Protocolo de comunicación</b>	<b>Velocidad de Transmisión (kbps)</b>	<b>Banda de operación (MHz)</b>	<b>Corriente modo bajo consumo (<math>\mu</math>A)</b>	<b>RX a 0 dBm (mA)</b>	<b>TX a 0 dBm (mA)</b>	<b>RX (nJ/bit)</b>	<b>TX (nJ/bit)</b>
CC2420	802.15.4	250	2400	1	18.8	17.4	248	229
MRF24J40	802.15.4	250	2400	2	19	23	250	303
CC1000	No Aplica	76.8	433-915	0.2	9.6	16.5	319	446
CC1100	No Aplica	250	433-915	0.4	16.4	16.9	216	223
nRF2401A	Nordic SB	1000	2400	0.9	19.0	13.0	62	42
nRF24L01+	Nordic ESB/SB	2000	2400	0.9	13.5	11.3	18	22

Los parámetros de comparación de la tabla 4 fueron seleccionados debido a su importancia para lograr que el dispositivo SESbeacon sea de bajo consumo, facilidad para adaptarse a aplicaciones más demandantes en cuanto a una alta transmisión de datos sin comprometer el consumo del transceptor y por tanto el del nodo sensor. Finalmente se consideró la posibilidad de implementar un protocolo de comunicación que permita el control del enlace, así como escalabilidad al poder manejar más nodos sensores en la red como continuación futura del proyecto.

Para evaluar dichas características la tabla 5 presenta un estándar de calificación o rúbrica. En la escala la calificación 0 implica que el dispositivo no cumple con la característica evaluada, y la calificación 5 implica que satisface la característica evaluada de manera tal que incrementa la capacidad del nodo sensor en general.

Tabla 5. Rúbrica de evaluación de los dispositivos transceptores.

Calificación	Descripción
0	No cuenta con la característica requerida. (No posee un protocolo de comunicación implementado)
1	Es deficiente con respecto a la característica requerida. (Velocidad de transmisión $\leq 100$ kbps, corriente modo <i>sleep</i> $\geq 1.5$ $\mu$ A, corriente en RX y TX entre 18-20 mA , energía por bit en TX y RX mayor a 200nJ/bit.
2	Cumple parcialmente con la característica requerida. Velocidad de transmisión $\leq 200$ kbps, corriente modo <i>sleep</i> entre 1.4-1 $\mu$ A, corriente en RX y TX entre 18-17 mA , energía por bit en TX y RX entre 100-200 nJ/bit.
3	Cumple con la característica requerida de manera básica. Cumple parcialmente con la característica requerida. Velocidad de transmisión $\leq 250$ kbps, corriente modo <i>sleep</i> entre 0.9-0.5 $\mu$ A, corriente en RX y TX entre 16-15 mA , energía por bit en TX y RX entre 40-100 nJ/bit.
4	Satisface la característica requerida de manera completa. Velocidad de transmisión $\leq 1$ Mbps, corriente modo <i>sleep</i> entre 0.5-0.3 $\mu$ A, corriente en RX y TX entre 14-10 mA , energía por bit en TX y RX entre 25-40 nJ/bit.
5	Satisface de la mejor manera la característica requerida e incrementa considerablemente la capacidad del nodo sensor. Velocidad de transmisión $\leq 2$ Mbps, corriente modo <i>sleep</i> $\leq 0.2$ $\mu$ A, corriente en RX y TX $\leq 10$ mA , energía por bit en TX y RX entre $\leq 25$ nJ/bit.

En la tabla 6 se reúnen los resultados de esta evaluación para cada transceptor, mientras que la tabla 7 resume el costo económico de cada transceptor.

*Tabla 6. Resultados de la evaluación de los dispositivos transceptores para el diseño del nodo SESbeacon.*

Transceptor	Protocolo de comunicación	Velocidad de transmisión	Banda de operación	I modo bajo consumo	RX	TX	RX (nJ/bit)	TX (nJ/bit)	Total (40 Max)
CC2420	3	3	5	2	1	2	1	1	18
MRF24J40	3	3	5	1	1	1	1	1	16
CC1000	0	1	5	5	5	2	1	1	20
CC1100	0	3	5	4	3	2	1	1	19
nRF2401A	4	4	5	3	1	4	2	2	25
nRF24L01+	5	5	5	3	4	5	5	5	37

*Tabla 7. Comparación del costo económico de los distintos transceptores evaluados.*

Componente Electrónico: Transceptor	Costo (USD)
nRF24L01+	2.90
nRF24L01+,PA,LNA	9.0
CC1000	10.59
CC1100	6.45
CC2420	9.18

Como se muestra en la tabla 5 los transceptores CC2420, MRF24J40, CC1000, CC1100 obtienen puntuaciones muy cercanas entre sí, sin embargo el transceptor nRF24L01+ obtiene una puntuación muy superior del 93%.

Técnicamente el transceptor nRF24L01+ posee la mayor velocidad de transmisión, un parámetro importante que posibilita tener una plataforma adaptable a requerimientos mayores en dependencia de la aplicación final, brindando versatilidad en el diseño. Por otra parte posee ultrabajo consumo energético, esto quiere decir que requiere bajas corrientes

tanto para transmisión como recepción, por tanto utiliza 20 veces menos energía por bit que el transceptor CC1000. Opera en la banda ISM por lo que no requiere de permisos para su utilización, cuenta con potencia de transmisión configurable e integra el protocolo por hardware ESB a un costo bajo entre los 2 y 9 USD; convirtiéndolo en la mejor opción para el diseño del SESbeacon.

En el mercado se encuentran 2 opciones de transceptor que utilizan el circuito integrado nRF24L01+. La diferencia entre ambas es la inclusión de un amplificador de potencia de 20 dB y un amplificador de bajo ruido de 10 dB para la parte receptora con el objetivo de incrementar la distancia de transmisión.

A continuación se analiza y presenta aspectos en detalle sobre el transceptor basado en el chip Nordic nRF24L01+. Si el lector ya conoce este dispositivo se sugiere omitir esta parte.

### **3.4.1 Características del transceptor nRF24L01+**

El transceptor nRF24L01+ es un chip integrado provisto con un protocolo embebido para el manejo de la comunicación llamado protocolo ESB o *Enhanced ShockBurst*. Este dispositivo transceptor se diseñó para aplicaciones inalámbricas de ultra bajo consumo y opera en la banda de frecuencia desde 2.400 hasta 2.4835 GHz.

Para el diseño del sistema de comunicación del nodo sensor, el chip nRF24L01+ requiere conectarse a un microcontrolador y pocos componentes pasivos externos.

La configuración y operación del transceptor se realiza a través del bus SPI (*Serial Peripheral Interface*). Todos los registros de configuración son accesibles a través de SPI en todos los modos de operación del chip.

El protocolo *Enhanced ShockBurst* (ESB) basa la comunicación por medio de paquetes, soporta además diversos modos de operación manual y modos autónomos avanzados. Esto permite brindar un enlace de comunicación confiable.

La figura 20 muestra el diagrama de bloques de la compleja circuitería interna del chip nRF24L01+.

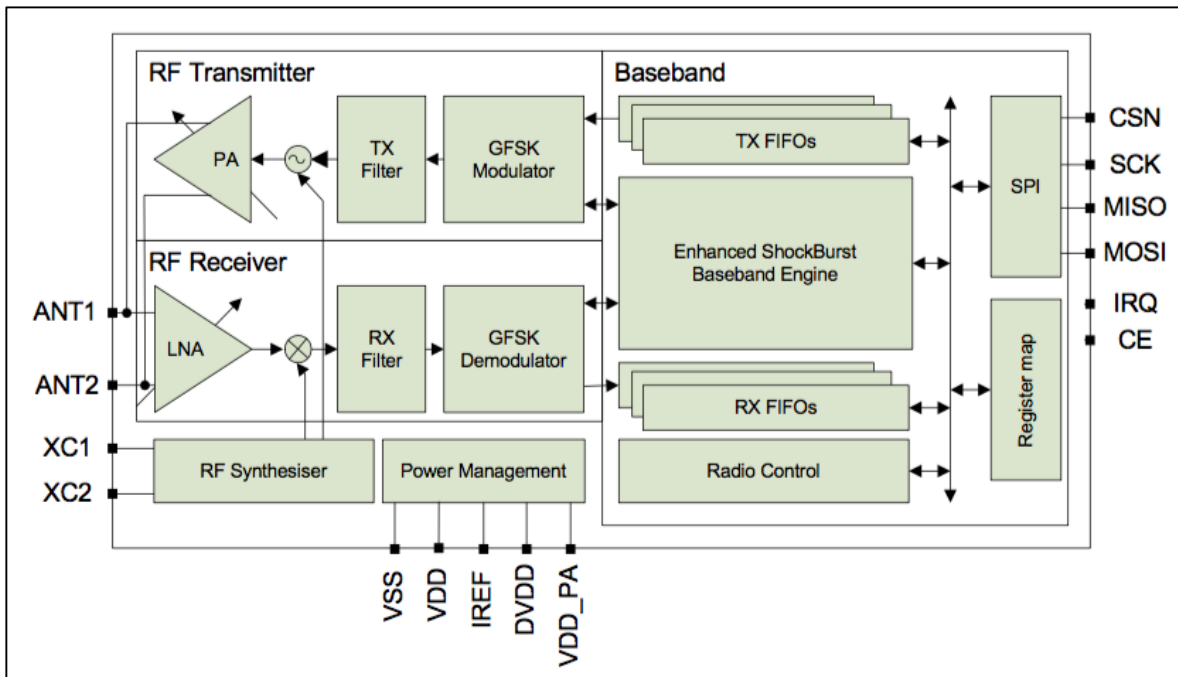


Figura 20. Diagrama de bloques del transceptor Nordic nRF24L01+.

Las pilas internas *FIFO* facilitan el manejo de datos que se transmiten y se reciben así como la conexión con el microcontrolador. El protocolo embebido ESB reduce de esta forma el costo en energía y rendimiento del sistema al realizar un manejo de alta velocidad y operaciones en la capa de datos del modelo OSI.

El transmisor incorpora una etapa de amplificación de potencia variable, mientras que el receptor incorpora un amplificador de bajo ruido. Ambos además cuentan con: filtros, mezclador, sintetizador de radio frecuencia y conexión a la antena común.

El módulo nRF24L01+ soporta transmisiones a 250 kbps, 1 Mbps y 2 Mbps con ultrabajo consumo de energía y es programable a través de los registros de configuración.

En cuanto al manejo de energía este transceptor requiere para transmisión a 0 dBm 11.3 mA y para recepción 12.3 mA RX a 2 Mbps , además cuenta con 2 modos de ultra bajo consumo: el modo sleep consume alrededor de 900 nA y el modo standby-I consume 22 uA. La alimentación del chip es variable entre 1.9 a 3.6 V.

### **3.4.2 Protocolo ESB (*Enhanced ShockBurst*)**

El protocolo embebido ESB permite un manejo de la comunicación inalámbrica de manera rápida y eficiente sin recargar funciones complejas en el microcontrolador que lo maneja lo que permite un alto rendimiento con ultra bajo consumo.

Dentro de las características del protocolo ESB podemos mencionar: carga útil o *payload* variable de 1 a 32 bytes, manejo automático de paquetes, envío de acuses de recibo de mensaje, auto retransmisión, soporta topología en estrella para WSN con 6 *data pipe*.

El protocolo embebido Enhanced ShockBurst (ESB) realiza el manejo automático de los paquetes y la temporización en la comunicación. Durante la transmisión, los datos a enviarse son recibidos por el chip nRF24L01+ vía comunicación serial y posteriormente la información es ensamblada en paquetes. Durante la recepción el protocolo busca una dirección válida de paquete, una vez que lo identifica el paquete es procesado y validado por verificación de redundancia cíclica o CRC, el cual es un algoritmo comúnmente utilizado en redes digitales que permite la detección de errores durante la transmisión. Posterior a esto el dato es almacenado en la pila tipo FIFO dentro de la etapa de recepción.

La utilización del protocolo ESB permite simplificar el complejo proceso de la comunicación inalámbrica y la temporización durante la recepción de los bits que conforman el dato, brindando un enlace de comunicación confiable y bidireccional.

El proceso de comunicación siempre es iniciado por un dispositivo transmisor primario o PTX mientras que el receptor de la comunicación se denominada dispositivo primario



receptor o PRX. La comunicación es completada cuando el PTX recibe un paquete de acuse de recibo o ACK desde el elemento PRX.

La transferencia automática de paquetes que provee el protocolo trabaja de la siguiente manera:

1. Envío desde PTX a PRX, el PTX automáticamente se habilita en modo receptor para esperar por ACK.
2. PRX recibe el paquete, es validado y automáticamente ensambla el paquete de acuse ACK.
3. Si PTX no recibe el paquete de ACK, el protocolo retransmite el paquete originalmente enviado después de un tiempo programado, además es posible configurar el número máximo de reenvíos.

### 3.4.3 Estructura de los paquetes en el protocolo ESB

En la figura 21 se observa la estructura del paquete que es ensamblado y desensamblado durante la comunicación inalámbrica utilizando el protocolo ESB.

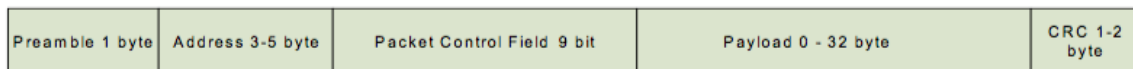


Figura 21. Estructura de paquete para la comunicación con el protocolo ESB.

El primer byte del paquete está conformado por el *Preamble*, este byte contiene una secuencia de bits que puede ser 01010101 ó 10101010 en dependencia del primer bit de la dirección y se utiliza para sincronización.

El *Address* contiene la dirección del receptor del mensaje y éste puede tener una longitud entre 3 o 5 bytes. Se utiliza para evitar comunicaciones cruzadas en un entorno con varios transceptores nRF24L01+ en funcionamiento.

El *Packet Control Field* está conformado por 9 bits que incluyen 6 bits que definen el número de bytes que conforman el *payload*, 2 bits sirven de identificador de paquete este permite conocer si el paquete a enviar es nuevo o se trata de una retransmisión y el último bit corresponde a la bandera de no acuse de recibo.

Una de las características interesantes de este protocolo es que permite un *payload* configurable de manera estática entre 1 o 32 bytes por paquete o puede configurarse de manera dinámica. Por lo que brinda flexibilidad y permite adaptarse a la aplicación específica del sistema de comunicación, impactando directamente el consumo de energía ya que se puede reducir el número de bits transmitidos o reducir el número de transmisiones necesarias.

Finalmente 1 o 2 bytes almacenan el valor de redundancia cíclica *CRC* para la comprobación de errores en la transmisión.

#### 3.4.4 *Funcionamiento Multiceiver.*

La función *Multiceiver* es una característica importante del transceptor Nordic nRF24L01+ ya que permite la comunicación entre un PRX y diversos PTX por medio de canales lógicos en el canal físico de radio frecuencia a través de direcciones únicas asignadas a cada dispositivo. Este principio de funcionamiento se observa en la siguiente figura.

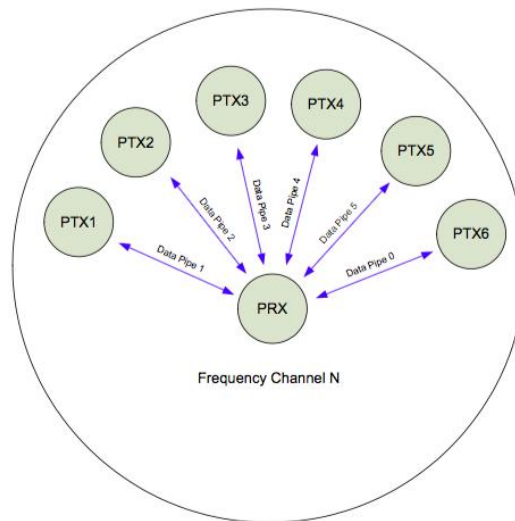


Figura 22. *Funcionamiento Multiceiver nordic nRF24L01+.*

Podemos ver en la figura anterior los PTX como los nodos sensores y al PRX como la estación base. En este esquema el dispositivo PRX espera la recepción de datos provenientes de cualquiera de los PTX, pero solamente puede recibir un paquete a la vez. Esta característica brinda versatilidad y funcionalidad al protocolo Enhanced ShockBurst.

La figura 23 muestra el proceso de transmisión de datos con ACK donde el microcontrolador envía el dato al transceptor PTX y este activa el protocolo ESB, por otra parte el PRX se encuentra en espera del paquete, lo recibe y desensambla. El microcontralor requiere un lapso de 130µs para estar habilitado, acceder el dato recibido y generar el ACK exitoso de la comunicación.

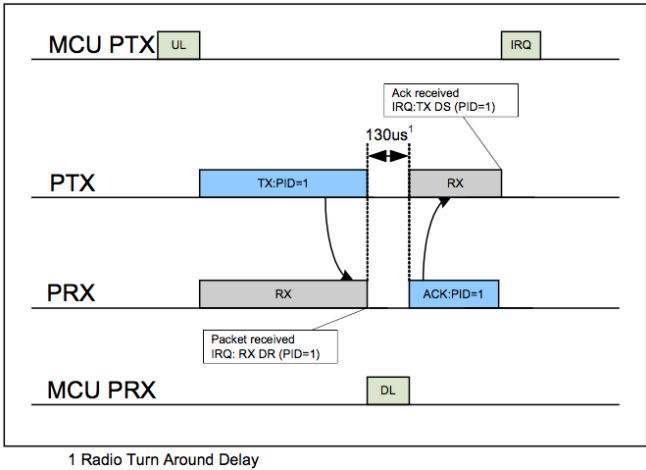


Figura 23. Transmisión y Recepción de datos con ACK utilizado por el chip nRF24L01+.

El caso en que no se recibe ACK o confirmación de recepción de la información se inicia retransmisión del paquete según la configuración del transceptor.

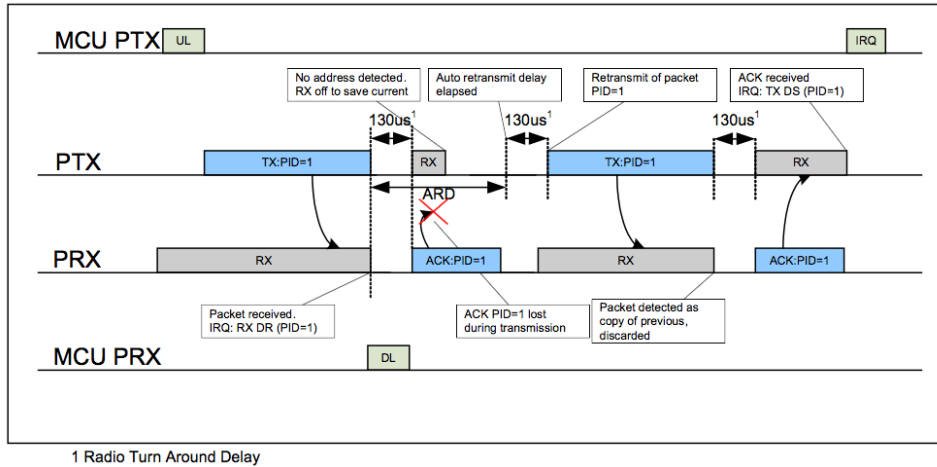


Figura 24. Transmisión y Recepción de datos utilizado por el chip nRF24L01+ en el caso de que no se recibe ACK.

En la figura 25 se visualiza el proceso de transmisión de 2 paquetes, en el cual no se recibe ACK de un paquete.

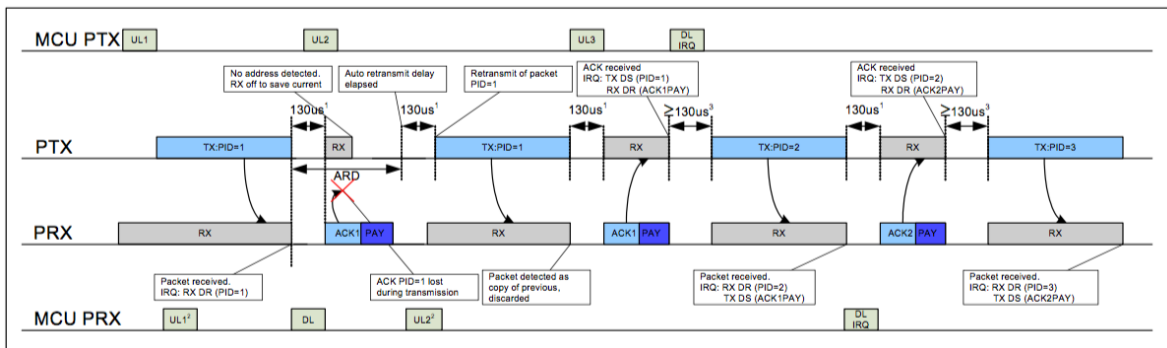


Figura 25. Transmisión y Recepción de 2 datos utilizando el chip nRF24L01+ en el caso de que no se recibe ACK.

La configuración del modo *Multiceiver* se realiza por medio de la escritura en los registros internos del chip a través del protocolo SPI.

Finalmente, se considera el transceptor nRF24L01+ como un dispositivo electrónico: de bajo costo, versátil debido a sus opciones de configuración, con características de rendimiento acordes a los requerimientos del proyecto SESbeacon. Este transceptor tiene la capacidad de

potenciar el nodo sensor para aplicaciones exigentes en cuanto: a velocidad de transmisión y consumo de energía.

### **3.5 Aspectos de diseño relevantes en la selección del microcontrolador para el nodo SESbeacon.**

En el diseño del nodo sensor SESBeacon la selección del microcontrolador fue una etapa muy importante ya que este dispositivo se encarga del control y configuración del nodo. Para la selección se tomaron en cuenta los siguientes criterios de diseño: ultra bajo consumo de energía, disponibilidad de periféricos que permitan temporización para el envío de datos cada cierto tiempo, módulo de comunicación serial para el manejo del transceptor, así como puertos de entrada-salida, convertidor analógico-digital y encapsulado.

Se buscó diseñar una plataforma sencilla, robusta con capacidad de utilizarse en múltiples aplicaciones y a muy bajo costo. Para lograr esto se evaluaron diversas tecnologías empleadas en microcontroladores específicamente de los fabricantes Microchip, Atmel, y Texas Instruments. Estas tecnologías se encuentran analizadas en el marco teórico.

#### **3.5.1 Microcontroladores Atmel**

Las siguiente tabla muestra las características de consumo de energía tanto en el modo activo como de bajo consumo de los microcontroladores: ATmega328P, ATtiny1634 y ATmega1284. Todos estos microcontroladores incorporan la tecnología *Pico Power*.

Tabla 8. Evaluación de consumo de energía en distintos modos de operación de tres MCU de Atmel.

Característica	Microcontrolador Atmel (1.8 V, 1 MHz, 25°C)		
	ATmega328P-PN	ATtiny1634	ATmega1284
Active mode	0.20 mA	0.20 mA	0.40 mA
Power Down mode	0.10µA	1.00µA	0.10µA
Power Save Mode con RTC	0.75 µA	-	0.60µA

El modelo ATmega 328 corresponde a un MCU de gama media AVR de 8 bits. Además cuenta con 6 distintos modos de bajo consumo. La serie ATtiny fue desarrollada para proyectos económicos y sobre todo de bajo consumo, sin embargo para lograr una alta miniaturización cuenta con recursos periféricos limitados. El ATmega1284 es similar al ATmega328 sin embargo en su modo activo consume el doble de corriente en idénticas condiciones de medición, es especialmente utilizado en algunos nodos sensores comercializados por la empresa Libelium.

### 3.5.2 Microcontroladores Microchip.

La siguiente tabla muestra las características de los microcontroladores: PIC16LF1826, PIC16LF1508 y PIC24F08KA102. Estos microcontroladores incorporan la tecnología XLP o *Xtreme Low Power*.

*Tabla 9. Evaluación de consumo de energía en distintos modos de operación de tres MCU de Microchip con tecnología XLP.*

Característica	Microcontrolador PIC de Microchip (1.8 V, 1 MHz, 25°C)		
	PIC16LF1826	PIC16LF1508	PIC24F08KA102
Active mode	75 $\mu$ A	30 $\mu$ A	8 $\mu$ A
Power Down mode	30 nA	20 nA	20 nA
Power Save Mode con RTC	600 nA	700 nA	490 nA

Como se observa en la tabla 9 el PIC24F08KA102 ofrece un ultrabajo consumo de energía. Es importante destacar que estos microcontroladores ofrecen como periférico integrado el módulo RTCC, esto posibilita realizar la temporización para el envío programado de las alertas sin necesidad de requerir componentes electrónicos adicionales esto es beneficioso para el proyecto debido a la limitación de las dimensiones finales de la tarjeta PCB.

El PIC24F08KA102 es un microcontrolador de gama media con bastante flexibilidad y capacidad de procesamiento máximo de 16 MIPS con un set de instrucciones optimizado. Sus características permiten el desarrollo de múltiples aplicaciones con distintos grados de complejidad, esto es ideal para cumplir con el objetivo de diseño genérico del nodo SESbeacon de manera que facilite la adaptación para distintos escenarios de aplicación.

### ***3.5.3 Evaluación de las distintas alternativas de microcontrolador para el diseño del nodo sensor SESbeacon***

Las tablas 10 y 11 muestran la evaluación de las tecnologías de los diversos fabricantes descritas anteriormente y el costo económico. La escala empleada es la misma a la utilizada en la evaluación del transceptor, donde 5 es el puntaje máximo por categoría y 0 corresponde al puntaje mínimo.

*Tabla 10. Comparación del costo económico de los microcontroladores de ultra bajo consumo disponibles por los fabricante: Microchip, TI y Atmel.*

<b>Componente Electrónico: MCU</b>	<b>Costo (USD)</b>
PIC24F08KA102	2.77
ATmega328P-PN	3.70
MSP430FR2633	5.34

*Tabla 11. Evaluación de los microcontroladores de ultra bajo consumo disponibles por los fabricante: Microchip, TI y Atmel.*

<b>Característica</b>	<b>Fabricante</b>		
	<b>XLP Microchip</b>	<b>FRAM TI</b>	<b>Pico Power Atmel</b>
Versatilidad	5	5	4
Rendimiento	5	4	3
Consumo Energético	5	5	3
Facilidad de implementación	3	3	5
Disponibilidad	4	1	5
Costo Económico	5	3	4
<b>Total Puntuación (Máximo 30)</b>	<b>27</b>	<b>21</b>	<b>24</b>

Como se observa en la tabla 11 Microchip obtiene la mayor ponderación. Sus fortalezas radican en la versatilidad, bajo consumo y rendimiento. En modo activo el PIC24F08KA102 consume 50 veces menos corriente que el ATmega1284 y en modo de bajo consumo la relación es de 1/5.

Microchip además cuenta con software y compiladores gratuitos para la programación. Otro aspecto importante es la plataforma *XLP Battery Life Estimator*, que facilita estimar la autonomía del nodo sensor.



### 3.6 Diseño final del nodo sensor.

Una vez analizados los distintos enfoques de solución y realizada la selección de sus bloques a partir de criterios de diseño como: tecnología del chip, características de consumo, rendimiento, capacidad de actualización del dispositivo, facilidad de implementación para diversas aplicaciones y el coste económico. La figura 26 muestra la arquitectura final del nodo en un diagrama de bloques.

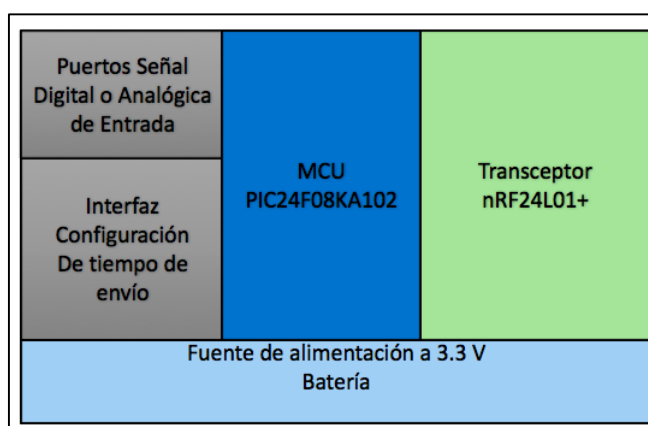


Figura 26.Arquitectura del Nodo SESbeacon.

#### 3.6.1 Interconexión del MCU PIC24F08KA102

La figura 27 muestra la configuración física del MCU PIC24F08KA102

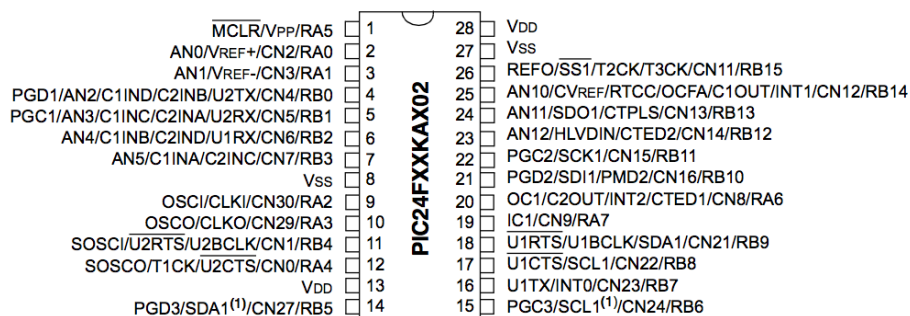


Figura 27.Diagrama de conexión del PIC24F08KA102.

Este microcontrolador posee un encapsulado SPDIP de 28 pines. La mayoría de pines funcionan como entrada o salida compartida para los diferentes periféricos internos del dispositivo. La configuración de pines utilizado en este proyecto se muestra en la siguiente tabla.

*Tabla 12. Distribución de pines del PIC24F08KA102 utilizados en el nodo sensor SESbeacon.*

<b>PIN del PIC24F08KA102</b>	<b>Función utilizada</b>
AN0	Entrada Analógica 0
RA1-RB2	Entradas digitales
PGD1-PGC1	Pines de programación
SOSCI-SOSCO	Oscilador Secundario
RB6-RB8-RB9	Entradas digitales de configuración
RB15	Salida Multifunción: señal de TX o variables de RTCC
SS1	Módulo SPI
SDO	Módulo SPI
SDI	Módulo SPI
SCK	Módulo SPI
RB12	CS de nRF24L01+
RESET	Reset del sistema y la configuración del tiempo de envío de alerta

El nodo SESbeacon recibe ya sea una señal analógica proveniente del exterior o de algún sensor, o señales digitales para la generación de las alertas: verde, amarillo o rojo.

Las entradas SOSCIN y SOSCO correspondientes al oscilador secundario de 32.768 kHz son fundamentales para el funcionamiento del sistema ya que permite la operación del

módulo RTCC integrado en el microcontrolador aun cuando se encuentre en modo de bajo consumo de energía.

Por medio de interruptores conectados a las entradas: RB6, RB8 y RB9 se seleccionan los tiempos pre configurados para el envío de las alertas.

El módulo SPI requiere 4 líneas que se conectan al transceptor nRF24L01+ para su configuración, control y transmisión de la alerta.

El microcontrolador PIC24F08KA requiere de muy pocos componentes externos para su funcionamiento, esto es una ventaja para el nodo sensor debido a las limitaciones de espacio para el prototipo.

Para reducir aún más la necesidad de componentes externos se utilizó el oscilador interno de 8 MHz, este reloj se utiliza durante el operación de inicialización del dispositivo y cuando no se encuentra en modo de bajo consumo, con ello se logra un alto rendimiento para la comunicación entre el MCU y el transceptor vía *SPI*.

Se diseñó el sistema de forma tal que la mayor parte del tiempo de operación el nodo se encuentre en modo de bajo consumo, esto se posibilita sin afectar la comunicación inalámbrica, la cual es una etapa sensible a variaciones de temporización, ya que el PIC24F08KA102 cuenta con un “despertar rápido” o *fast wake up* desde el modo sleep inferior a 100  $\mu$ s.

Por lo anterior, los componentes externos requeridos se centran en capacitores de filtrado para la alimentación del sistema, así mismo para la generación de la señal del RTCC con el oscilador secundario, resistencias varias *pulldown* para los interruptores, un diodo led para la verificación del funcionamiento del sistema y un botón pulsador para el reinicio general del sistema.

Por otra parte el transceptor nordic nRF24L01+ requiere de mayor componentes pasivos externos para su funcionamiento, como se observa en la figura 28 según recomienda el fabricante .

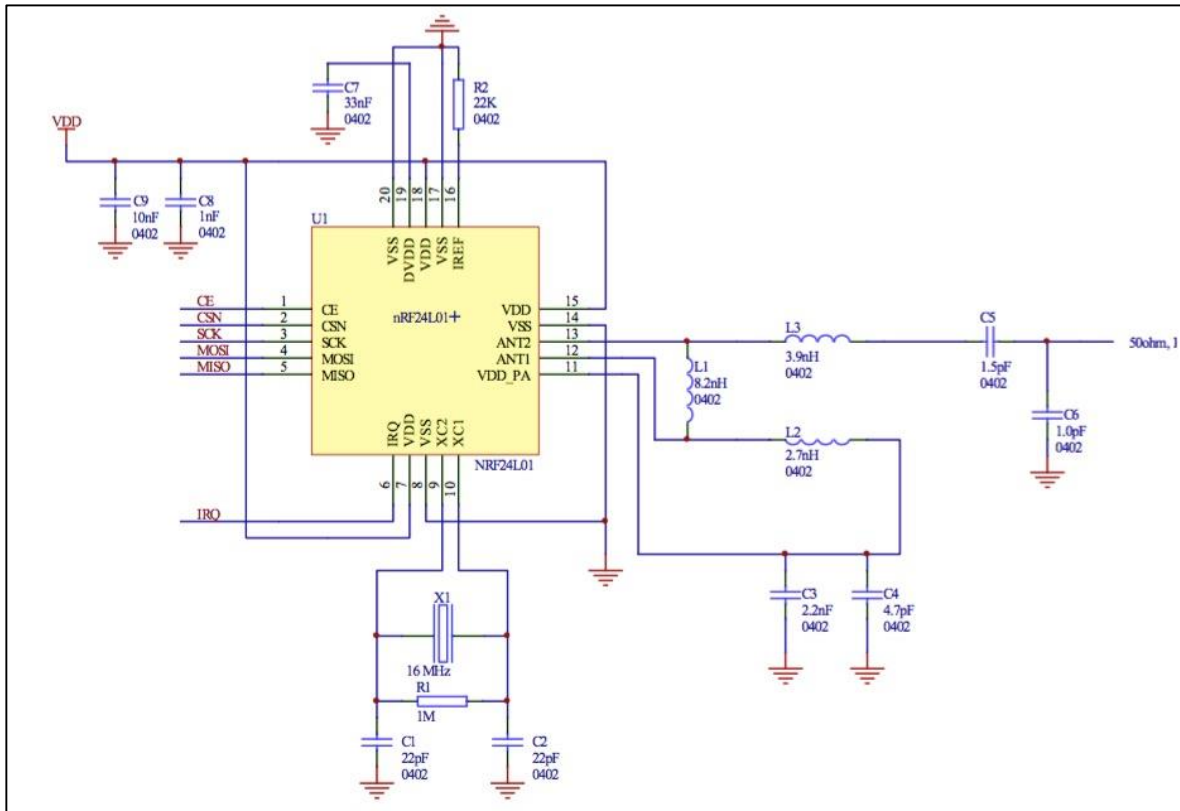


Figura 28. Conexión del chip nRF24L01+.

La etapa más importante mostrada en la figura anterior es la que se ubica entre las salidas de la antena ANT2 y ANT1 ya que estos componentes hacen la función de acople de impedancias para un valor de 50  $\Omega$ . Afortunadamente estos elementos se encuentran ensamblados de fábrica y son de montaje superficial por lo que la dimensión del PCB de esta etapa abarca solamente 39x15mm.

El diagrama esquemático final del diseño del nodo sensor SESbeacon se muestra en la figura 29. Mientras que la figura 30 muestra el diagrama de interconexión utilizado para la programación del microcontrolador PIC por medio del pickit3 de Microchip.

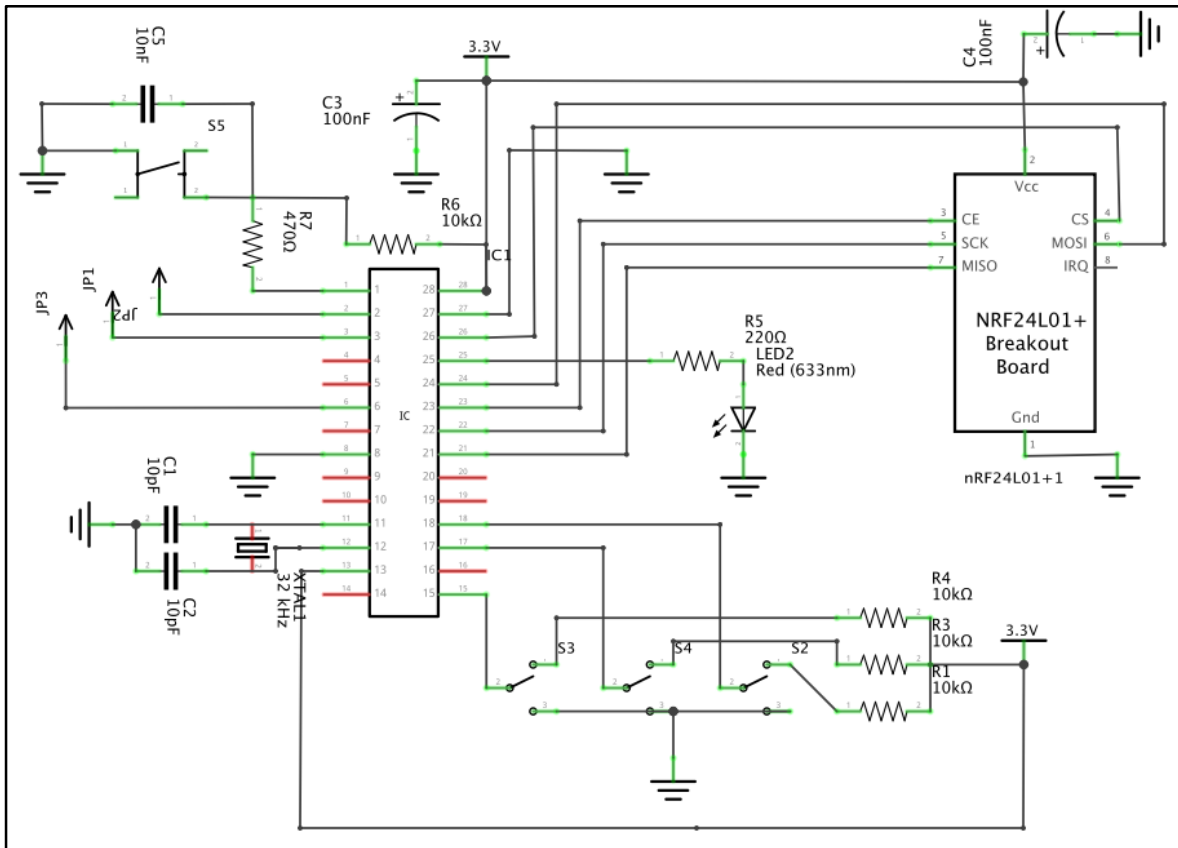


Figura 29. Diagrama esquemático del circuito del nodo SESbeacon.

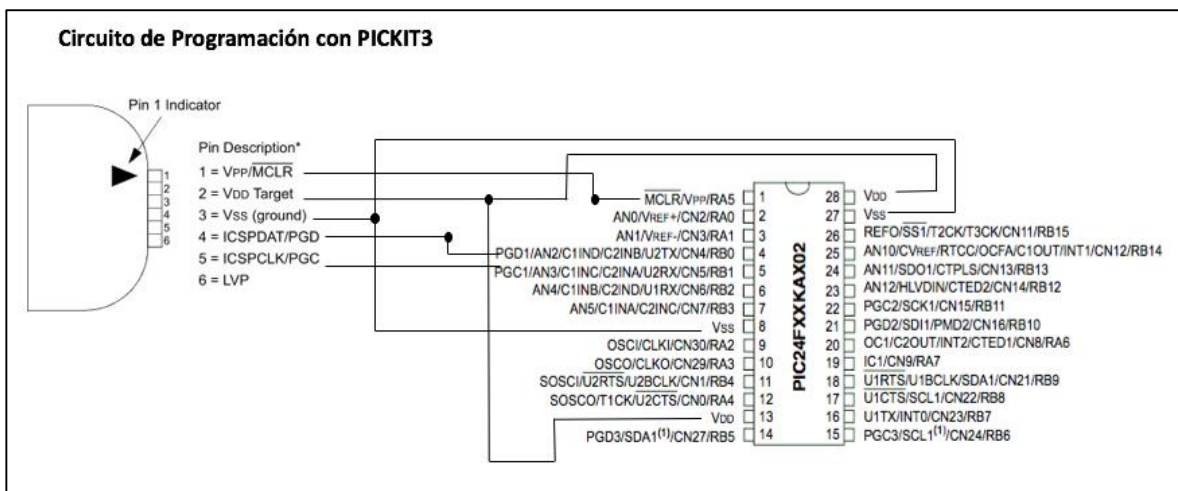


Figura 30. Diagrama del circuito programador del nodo SESbeacon.

### 3.7 Lógica de Programación diseñada para el nodo SESbeacon

Dentro del diseño y la implementación del nodo, la etapa de programación del microcontrolador es la más importante ya que esta etapa se encarga de: configuración, manejo de interrupciones, modos de bajo consumo, lógica de transmisión-recepción de la alerta.

La figura 31 resume de manera global el diagrama de flujo de la programación.

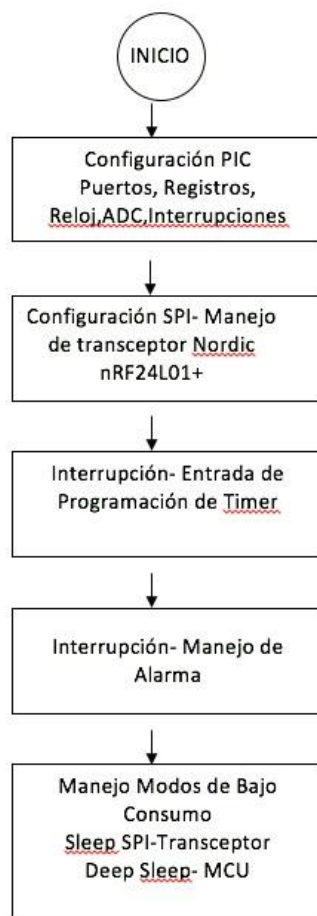


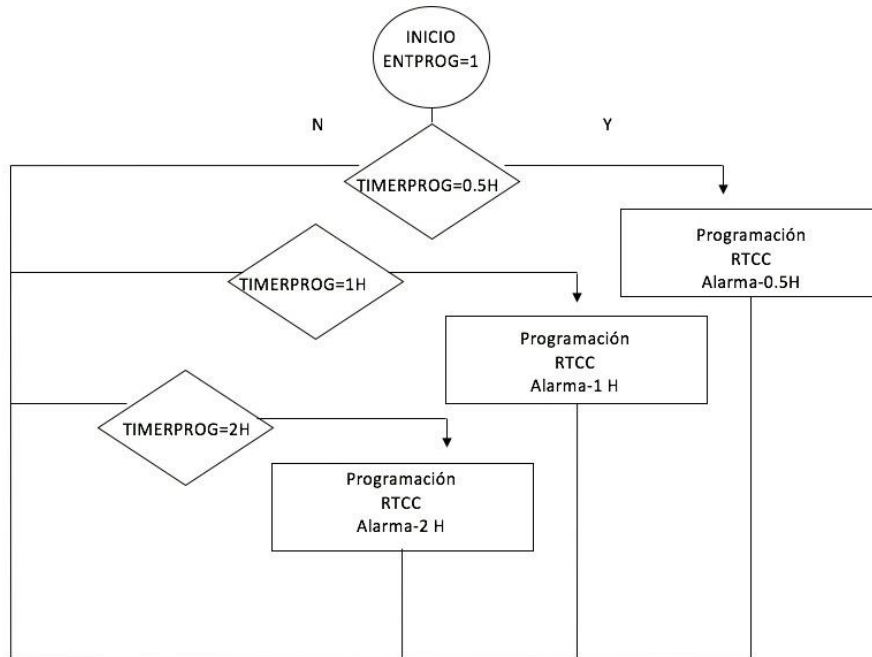
Figura 31. Diagrama de flujo general de la programación del MCU.

En la etapa de configuración del microcontrolador se define la función de los pines de los puertos A y B como entradas y salidas según se definió en la tabla 12. También es necesario definir la configuración de la señal de reloj del sistema, en este caso se definió como señal de reloj el oscilador interno de 8 MHz y como reloj secundario un oscilador de cristal que proporciona una frecuencia de 32.768 kHz. Este reloj secundario es primordial para el funcionamiento del RTCC aun cuando el microcontrolador se encuentra en modo de bajo consumo. La habilitación de este reloj secundario requiere una secuencia de código en ensamblador específica, sin esta secuencia no es posible ninguna configuración en el RTCC. El manejo de interrupciones es igualmente configurado en esta etapa, para ello el PIC24F08KA102 dispone de diversos registros en los cuales se configuró: prioridad de la interrupción(en este caso la alarma RTCC para la transmisión de la alerta posee mayor prioridad), fuentes de interrupción (RTCC, reinicio y configuración de tiempo de transmisión de alerta), se “limpian” o se ponen a cero las banderas de las interrupciones y finalmente se habilitan.

Para la utilización del módulo RTCC es necesario una vez habilitado el oscilador secundario generar una secuencia de código en ensamblador que permite el desbloquear el periférico para realizar la escritura en los registros correspondientes para la configuración de calendario y hora, una vez finalizada esta la protección de escritura es habilitada. Dicha secuencia se recopila en el apéndice 2.

Posterior a la configuración de hora y calendario se realizó la rutina de configuración de alarma, la cual en dependencia del parámetro de tiempo seleccionado por el usuario por medio de los interruptores se configuran los registros correspondientes y finalmente se habilita. Esta etapa se observa en la figura 32.

Un aspecto muy importante en la implementación fue la utilización de la interrupción generada por el RTCC mientras el núcleo del microcontrolador se encuentra desactivado en modo de bajo consumo. Esta capacidad permite alargar el tiempo de funcionamiento con baterías.



*Figura 32. Diagrama de flujo de la configuración del alarma.*

Para la comunicación con el transceptor fue necesario utilizar el módulo SPI del microcontrolador. Su configuración inicial incluyó la habilitación en modo Master con la sincronización generada desde el PIC por el pin SCK1, y un ancho de palabra de comunicación de 8 bits. Para lograr una comunicación confiable se utilizó una frecuencia de 1 MHz y se configuró el manejo de los bits con cambios desde la transición activa (en 1) al estado idle(en 0).

Para la recepción y envío de bytes fue necesario programar una función que permitiera la comunicación y regulara por medio de la verificación de banderas en los registros, cuando la transferencia de bits es completada de tal forma que no se inicie otra transmisión antes de tiempo, lo que generaría un error en la configuración del transceptor.

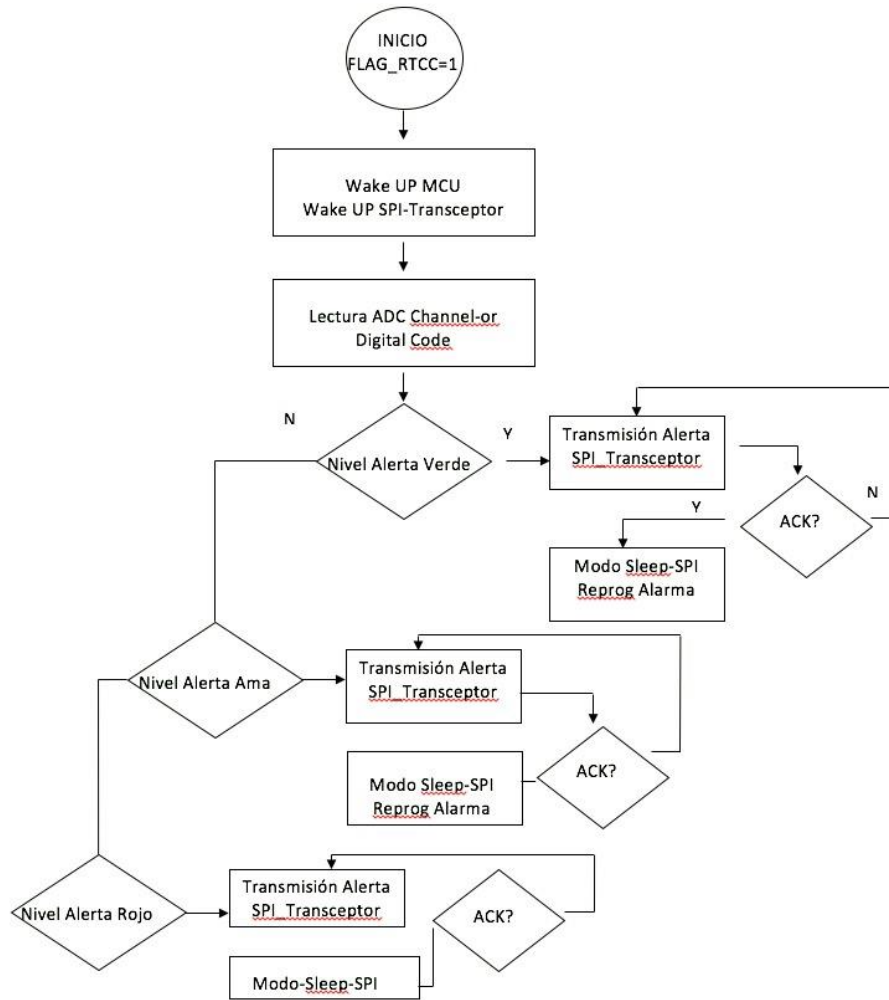


Una vez operativo el módulo SPI se implementó las siguientes funciones resumidas en la tabla 13 para el manejo del transceptor nRF24L01+.

*Tabla 13. Funciones desarrolladas para el control del transceptor nRF24L01+.*

<b>Función Programada</b>	<b>Objetivo</b>
WriteRegister (registro, valor)	Escritura de registro en la memoria del transceptor.
WriteCommand (comando)	Escritura de comando del transceptor.
WriteAddress (registro, #bytes, *addr)	Escritura de la dirección del dispositivo PTX.
WritePayload (alerta)	Escritura de la alerta en la pila de transmisión del transceptor.
FlushTXRX()	Se eliminan los datos almacenados en pila de transmisión y recepción.
TXMode()	Habilitación en modo de transmisión
PowerDown()	Activación del modo de bajo consumo en el transceptor

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo general ante la generación de una interrupción por el RTCC. En el momento en que el nodo sensor transmite la alerta el transceptor ingresa a modo de bajo consumo, se reconfigura la temporización de la alarma y activa el modo de bajo consumo del microcontrolador PIC24F08KA102. En caso de que se encuentre habilitado la retransmisión de paquetes se espera la recepción de un acuse de recibo (ACK) por cada paquete recibido en el receptor, si este paquete no llega el protocolo ESB inicia la retransmisión del mensaje.



*Figura 33. Diagrama de flujo general de la atención a la interrupción del RTCC para el envío de la alerta.*

El apéndice 2 recopila algunos elementos claves en la programación necesarios para la implementación del módulo: RTCC, SPI, así como el empleo de modos de bajo consumo en el PIC24F08KA102.

## Capítulo 4

### Análisis y resultados experimentales de la implementación

A continuación se resumen los principales resultados de la implementación del nodo SESbeacon.

#### 4.1 Comportamiento y verificación del enlace de comunicación.

Como parte de los objetivos planteados en este proyecto, se desarrolló un protocolo de pruebas que permitiera la caracterización del funcionamiento del enlace de comunicación. Este procedimiento de pruebas se estructuró de la manera mostrada en la tabla 14.

*Tabla 14. Estructura del procedimiento de pruebas implementado.*

<b>Etapa</b>	<b>Descripción</b>
1	Ajuste de la velocidad de transmisión a 250 kbps, selección de canal 110 potencia TX 0 dBm, envío de 200 distintos códigos de alerta.
2	Transmisión 200 paquetes continuos a una distancia de 80 m ambiente cerrado.
3	Transmisión 200 paquetes continuos a una distancia de 80 m ambiente cerrado y con obstáculos sin orientación en línea de vista.
4	Transmisión 200 paquetes continuos a una distancia de 60 m ambiente cerrado.
5	Transmisión 200 paquetes continuos a una distancia de 60 m ambiente cerrado con obstáculos.
6	Transmisión total de 400 paquetes continuos a una distancia de 50 m ambiente cerrado.
7	Transmisión de 200 paquetes a distancias de: 40, 30, 20 y 10 m. Estas mediciones realizadas en un entorno cerrado, con y sin presencia de obstáculos y con el nodo sensor en movimiento.
8	Recolección de los datos recibidos: número de transmisión, código de alerta, duración entre envío y recepción. La anterior información recibida vía serial para su procesamiento estadístico.

Cabe recalcar que la configuración del nodo sensor se ajustó de acuerdo al modo básico de operación. Para la transmisión del código numérico de la alerta se ajustó la carga útil o *payload* de la trama del protocolo ESB a 1 byte por tanto una velocidad de transmisión de 250 kbps es suficiente para el envío de los paquetes.

Por otra parte, la selección del canal dentro de la banda de 2.4 GHz es muy importante para el funcionamiento del enlace de comunicación. Durante las pruebas iniciales se notó una mejora considerable en el comportamiento del enlace en cuanto a distancia y coherencia entre las alertas enviadas al cambiarse del canal 1 al canal 110. Este ajuste centra el canal a la frecuencia de 2.510 GHz , esto implica una frecuencia por encima de los canales utilizados por los estándar 802.11.b/g/n por tanto se elimina los problemas de comunicación debido a esta interferencia. Con esta consideración se logró transmisión y recepción de alertas a una distancia de 200 metros lo que significa una distancia 4 veces superior a la distancia meta del enlace de 50 m.

Los resultados obtenidos por medio de la implementación del protocolo de pruebas se muestran en las tablas 15 y 16.

En 3 de las 10 pruebas realizadas se detectó la pérdida de menos del 2% de paquetes transmitidos. Particularmente estas pérdidas se evidenciaron a distancias mayores a los 60 m es decir en distancias un 20% superior a la distancia requerida por el nodo SESbeacon. Es importante acotar que para la realización de las pruebas se buscó incorporar condiciones complejas como: entornos cerrados , presencia de obstáculos en línea vista y nodo sensor en movimiento con la finalidad de caracterizar las posibilidades reales de aplicación del nodo sensor diseñado.

La tabla 16 resume el comportamiento estadístico de las pruebas realizadas, donde se logró un 99.45% de éxito en la transmisión y recepción, esto significa que de 2000 alertas enviadas se recibieron 1989.

*Tabla 15. Comportamiento del enlace comunicación utilizando el nodo sensor SESbeacon a 0 dBm y velocidad de transmisión 250kbps en un entorno cerrado o con obstáculos.*

<b>Distancia de separación entre el nodo y la estación Base (m)</b>	<b>Número de Alertas Emitidas</b>	<b>Número de Alertas recibidas</b>	<b>Porcentaje de mensajes transmitidos con éxito</b>	<b>Latencia (ms)</b>	<b>Desviación Máxima entre tiempo de envío y recepción (ms)</b>
10	200	200	100	212	2
20	200	200	100	212	3
30	200	200	100	212	3
40	200	200	100	212	3
50	200	200	100	212	3
50	200	200	100	211	3
60	200	196	98	212	200
60	200	197	98.5	211	200
80	200	200	100	212	3
80	200	196	98	212	200

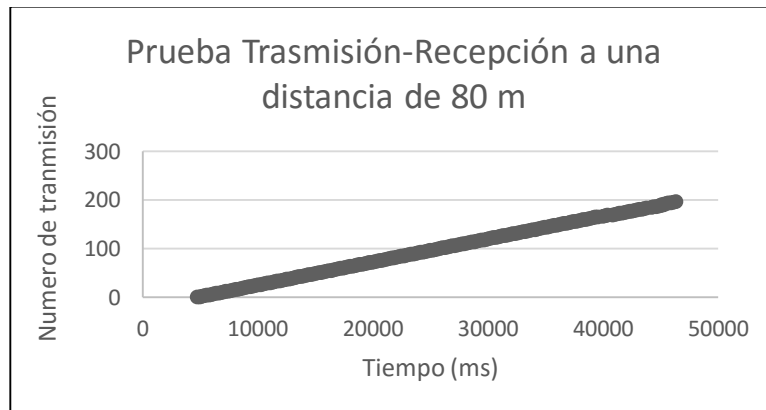
*Tabla 16. Estadística del comportamiento del enlace comunicación utilizando el nodo sensor SESbeacon a 0 dBm y velocidad de transmisión 250kbps en 10 escenarios de transmisión.*

<b>Distancia Promedio de separación TX-RX</b>	<b>Total de Transmisiones</b>	<b>Total de Recepciones</b>	<b>Porcentaje de comunicaciones Exitosas.</b>	<b>Latencia Promedio (ms)</b>	<b>Desviación entre envío y recepción promedio (ms)</b>
48 m	2000	1989	99.45	211.8	62

*Tabla 17. Objetivos esperados para el enlace comunicación utilizando el nodo sensor SESbeacon.*

<b>Distancia Promedio de separación TX-RX</b>	<b>Total de Transmisiones</b>	<b>Total de Recepciones</b>	<b>Porcentaje de comunicaciones Exitosas.</b>	<b>Latencia Promedio (ms)</b>	<b>Desviación entre envío y recepción promedio (ms)</b>
50±5 m	100	90	90	-	5000

La tabla 17 muestra los indicadores esperados para este proyecto, al contrastarse con los de la tabla 16 se evidencia que se cumplió con los objetivos propuestos muy por encima de los indicadores inicialmente definidos.



*Figura 34. Comportamiento del sistema de comunicación a 80 m con pérdida de 2% de los datos.*

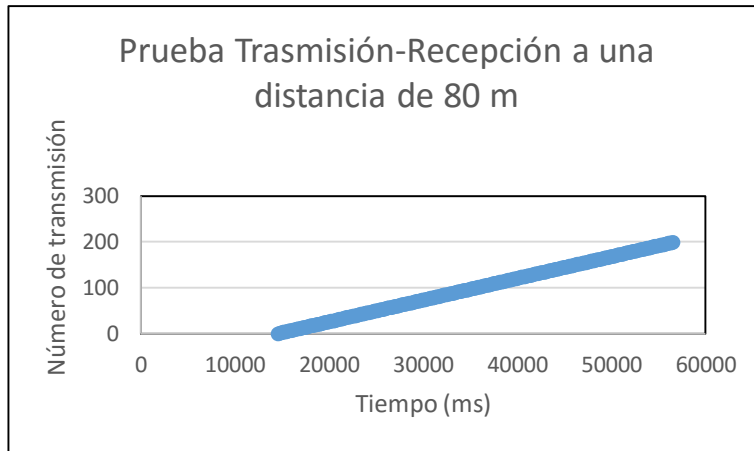


Figura 35. Comportamiento del sistema de comunicación a 80 m sin pérdida de datos.

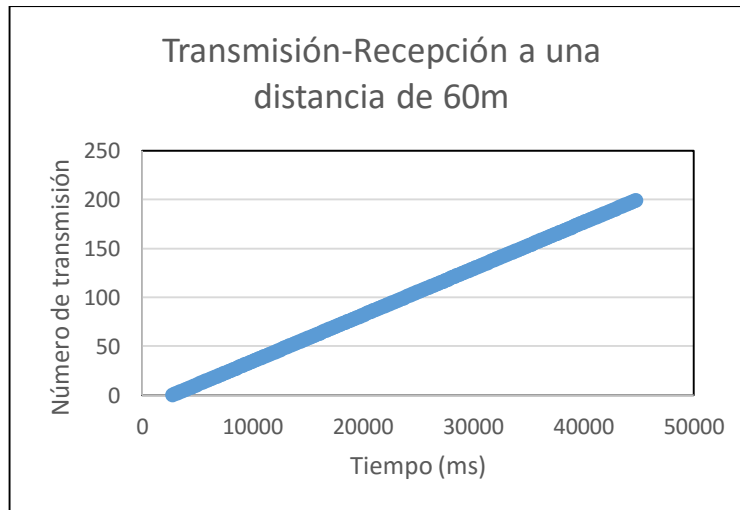


Figura 36. Comportamiento del sistema de comunicación a 60 m sin pérdida de datos.

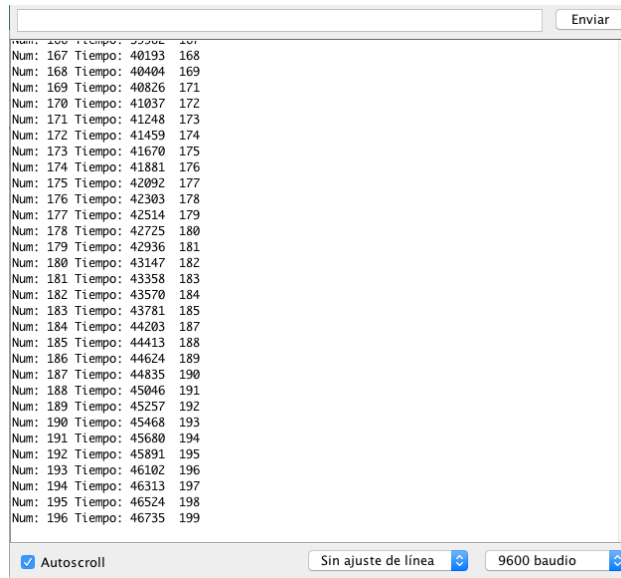


Figura 37. Pérdida de datos en prueba de transmisión-recepción a 80 metros de distancia.

Las figuras 34 y 37 muestra el comportamiento del enlace con pérdida de datos, por esta razón a partir de la transmisión número 190 se observa un punto de inclinación en la recta. Las figuras 35 y 36 por el contrario muestran un comportamiento lineal por tanto se recibieron la totalidad de los datos casi con la misma latencia entre la transmisión y la recepción.

#### 4.2 Aplicación de técnicas de bajo consumo.

Un elemento importante e innovador en el diseño fue la incorporación de técnicas de bajo consumo energético. Por ejemplo: la utilización de un enfoque centralizado con un protocolo de difusión directa, el ajuste del ciclo de trabajo por medio de la temporización en el envío de los datos y el aprovechamiento de la tecnología *Xtreme Low Power* de Microchip.

La tabla 18 muestra los resultados obtenidos con el empleo de los modos de bajo consumo del microcontrolador PIC24F08KA102, es importante destacar la reducción 600 veces del consumo de corriente en estado *Deep sleep* con respecto a la operación en modo activo.



*Tabla 18. Resultados de la implementación de los distintos modos de bajo consumo del PIC24F08KA102 a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo y tensión de alimentación 3.3 V.*

<b>Modo de Operación</b>	<b>Corriente (mA)</b>	<b>Potencia (mW)</b>
Deep Sleep	0.0119	0.0390
Sleep	0.0287	0.0947
Idle	1.94 mA	6.4020
Activo	7.50 mA - 4.10mA	24.75-13.53

*Tabla 19. Características de consumo del nodo SESbeacon a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo, tensión de alimentación 3.3 V, potencia del transceptor -18 dBm.*

Transceptor	Corriente TX(mA)	Potencia TX(mW)	Corriente Sleep (mA)	Potencia Sleep(mW)
nRF24L01+	7.68	25.34	0.28	0.92
nRF24L01+,PA+LNA	9.01	29.73	1.75	5.75

*Tabla 20. Características de consumo del nodo SESbeacon a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo, tensión de alimentación 3.3 V, potencia del transceptor -12 dBm .*

Transceptor	Corriente TX(mA)	Potencia TX(mW)	Corriente Sleep (mA)	Potencia Sleep(mW)
nRF24L01+	8.05	26.56	0.31	1.02
nRF24L01+,PA+LNA	9.26	30.55	1.38	4.55

*Tabla 21. Características de consumo del nodo SESbeacon a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo, tensión de alimentación 3.3 V, potencia del transceptor -6 dBm.*

Transceptor	Corriente TX(mA)	Potencia TX(mW)	Corriente Sleep (mA)	Potencia Sleep(mW)
nRF24L01+	9.23	30.45	0.29	0.95
nRF24L01+,PA+LNA	10.38	34.25	2.02	6.66

*Tabla 22. Características de consumo del nodo SESbeacon a una Frecuencia de 8 MHz, RTCC operativo, tensión de alimentación 3.3 V, potencia del transceptor 0 dBm.*

Transceptor	Corriente TX(mA)	Potencia TX(mW)	Corriente Sleep (mA)	Potencia Sleep(mW)
nRF24L01+	10.63	35.07	0.32	1.05
nRF24L01+,PA+LNA	14.53	47.94	2.05	6.76

En las tablas 19, 20, 21 y 22 se observan los valores de corriente y potencia del nodo sensor para distintas configuraciones de potencia de transmisión. Se utilizó tanto la versión básica como la versión que incluye un amplificador de potencia del transceptor nordic nRF24L01+.

En cuanto a corriente de transmisión los valores medidos indican una variación de 2.95 mA desde la potencia mínima de transmisión a la máxima para la versión básica del chip. En el caso de la versión con amplificador de potencia esta variación es de 5.52 mA.

Para el caso del consumo de corriente cuando no hay transmisión, la versión básica presenta una variación de 0.04 mA, mientras que la versión con amplificador esta variación es de 0.3 mA.

A partir de los resultados anteriores y por medio de la herramienta XLP Battery Estimator se obtienen los siguientes resultados de autonomía de funcionamiento con una batería Li-ion. con capacidad de 2250 mAh.

*Tabla 23. Estimación del tiempo de funcionamiento del nodo SESbeacon con una batería Li-ion de 3.6V y capacidad de 2250 mAh a 25 °C.*

<b>SESbeacon con Transceptor:</b>	<b>Potencia Transmisión -18 dBm</b>	<b>Potencia Transmisión -12 dBm</b>	<b>Potencia Transmisión -6 dBm</b>	<b>Potencia Transmisión 0 dBm</b>
nRF24L01+	218 días, 20 h	218 días, 19 h	218 días, 17 h	218 días, 15h
nRF24L01+, PA, LNA	60 días, 23 h	60 días, 22 h	60 días, 20 h	60 días, 19 h

Para la estimación anterior se tomó en cuenta una configuración de envío de alertas cada 2 horas y una estimación de la duración del pico de corriente de 1 segundo por transmisión. La versatilidad del nodo diseñado permite la modificación de ambos parámetros según la aplicación en la que se utilice. Por tanto se puede obtener mayor autonomía de funcionamiento.

Un aspecto a destacar de los resultados obtenidos es el alto valor de corriente del transceptor Nordic, equipado con el amplificador de potencia con respecto al modelo simple. Esta característica reduce de manera importante la autonomía de funcionamiento con batería, ya que el 99% del tiempo el nodo sensor se encuentra en modo de bajo consumo. Al analizar esta situación se observa que algunos dispositivos no integran las señales de activación del modo de bajo consumo del amplificador de potencia al del circuito integrado del transceptor, y por tanto aunque el transceptor ingrese a un modo de bajo consumo, el amplificador continua en funcionamiento.

Si se incorpora un control de potencia para el transceptor por medio de una señal proveniente del microcontrolador, se estima una autonomía que oscila entre 539 y 543 días de funcionamiento con batería.

### 4.3 Etapa de Temporización

La etapa de temporización se logró con el uso del módulo RTCC del microcontrolador. Para el funcionamiento aún en modos de bajo consumo se incorporó un oscilador externo que proporciona una frecuencia 32.768 kHz. Fue necesario ajustar los valores de los capacitores que se conectan al cristal para lograr mayor precisión en la temporización.

Por medio de software se realiza el ajuste de la alarma y una calibración adicional.

La figura 38 muestra los resultados de la transmisión de 200 alertas cada 10s. Se obtuvo una variación desde 1 a 3 ms en la transmisión. Lo cual para efectos de esta aplicación donde los tiempos de activación son esporádicos esta tolerancia es aceptable.

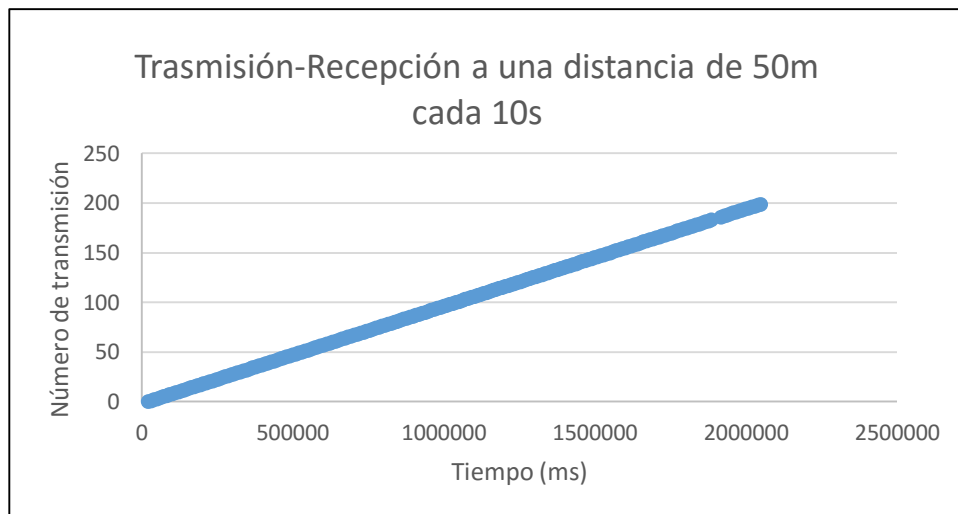
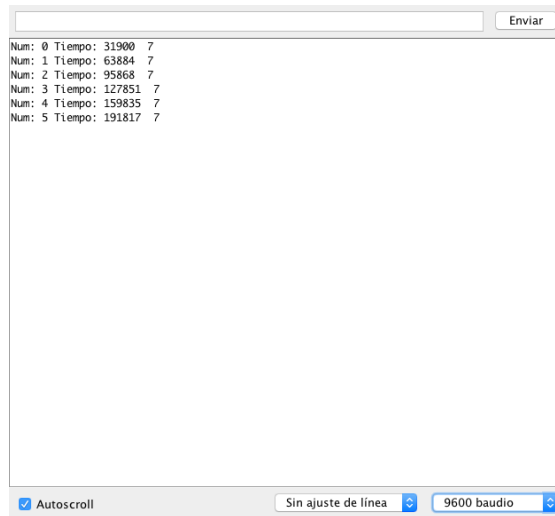


Figura 38. Transmisión-Recepción temporizado cada 10 s.



*Figura 39. Envío de la alerta cada 30 s configurado a partir de la selección del interruptor.*

#### ***4.4 Etapa de comunicación SPI***

Se logró implementar comunicación efectiva entre el módulo SPI del MCU configurado como maestro con el transceptor nordic nRF24L01+ como esclavo a una frecuencia de 1 MHz. Desde el MCU se configuró las distintas características del transceptor entre ellas: potencia de salida, habilitación y selección del canal de comunicación, velocidad de transmisión, habilitación del protocolo de comunicación ESB. Esto permitió la obtención de los distintos resultados mostrados en las tablas desde la 18 a la 22.

#### ***4.5 Etapa Receptora***

Cumpliendo con uno de los objetivos del proyecto se implementó una etapa receptora para la comunicación. Para ello se utilizó el microcontrolador Atmega328P de Atmel programado con la plataforma Arduino, esta implementación permitió validar la interoperabilidad del nodo SESBeacon con otra plataforma distinta que para consideración de una estación central brinda características importantes en cuanto a que puede realizar mayor procesamiento de: alertas o datos, interfaces gráficas y conectividad en la nube a bajo costo.

Con esta implementación se logró la recepción de los datos a través de la conexión entre el receptor y el computador vía consola serial, como se observa en la figura 37.

#### 4.6 Costo final del prototipo.

El costo final del dispositivo se observa en la tabla 24. Ya que el nodo es compatible a las 2 versiones del transceptor, el costo para la versión sencilla es de 14 USD y con el transceptor que permite mayor rango de distancia el costo es de 17 USD. Por tanto se logró un dispositivo funcional un costo 44 % menor con respecto al valor meta de 25 USD.

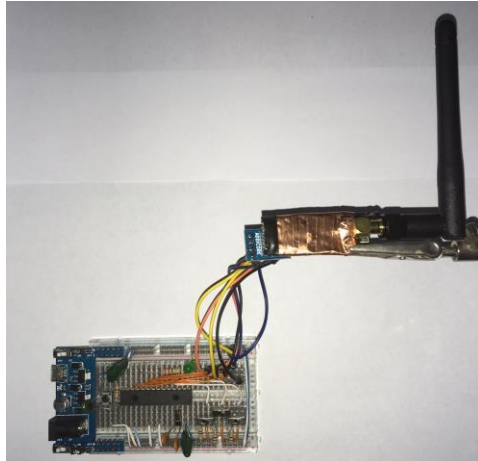
Este valor cumple con la expectativa de costos del proyecto para el SESlab en el sentido en que puede utilizarse el nodo SESbeacon para brindar una solución a la medida. Realizar una comparación con los precios de mercado de dispositivos similares no es extrapolable ya que el cálculo del costo para la venta requiere otros parámetros y metodologías de análisis propios de la ingeniería económica.

*Tabla 24. Costo económico de la implementación del nodo sensor.*

<b>Componente</b>	<b>Costo (USD)</b>
PIC24F08KA102	2.77
Transceptor	5.99 ó 9.00
Cristal	1.95
Capacitores	1.00
Resistencias	1.00
Diodo Led	0.25
Interruptores, pulsador	1.00
<b>Total</b>	<b>14 ó 17</b>

## 4.7 Prototipo SESbeacon desarrollado.

Las figuras 40 y 41 muestran el primer prototipo del nodo SESbeacon.



*Figura 40. Prototipo nodo sensor SESbeacon.*



*Figura 41. Nodo sensor SESbeacon utilizado para las pruebas de caracterización.*

## *Conclusiones*

- El transceptor Nordic nRF24L01+ en la versión que incorpora el amplificador de potencia es la mejor opción para el nodo SESbeacon, ya que brindó la mejor relación entre potencia-distancia en comparación con la versión básica del transceptor.
- El uso de técnicas de diseño orientadas a la disminución del consumo de energía y la utilización de la tecnología XLP de Microchip, permitió estimar un funcionamiento del nodo SESbeacon de 218 días y 20 horas.
- La etapa de transmisión diseñada para el envío de alertas garantiza la comunicación a una distancia promedio de 48 m , con características configurables de velocidad de transmisión y potencia.
- El protocolo ESB garantiza un 99.45 % de transmisiones exitosas por cada 2000 alertas enviadas con una latencia promedio de 211 ms.
- Se logró implementar una etapa receptora, con conectividad al computador para la obtención de las alertas transmitidas logrando un 99.45% de transmisiones recibidas por cada 2000 enviadas.
- El manejo de la temporización por medio del RTCC permitió disminuir la corriente en el microcontrolador en un 98.5 %, con una variación máxima de 3ms entre alertas.
- El diseño del nodo SESbeacon requirió solamente un 56% de presupuesto meta de 25 USD. Lo anterior lo convierte en una opción rentable para el SESlab y aplicable a sus proyectos.



- El diseño e implementación de un protocolo de pruebas facilitó la caracterización del enlace de comunicación, por medio de la realización de 10 experimentos en diversas condiciones de distancia y ubicación del enlace en un ambiente con obstáculos.

## ***Recomendaciones***

- Se recomienda la utilización de un oscilador secundario de precisión, que cuente con un circuito de configuración característico recomendado por el fabricante para obtener mayor precisión en el módulo RTCC.
- Para obtener un mayor rango de comparación y rendimiento con el transceptor recomendando la utilización de diversas tarjetas integradas con el chip nR24L01+. Los procesos de fabricación, la calidad y precisión de los componentes pasivos, el tipo de antena y el PCB son aspectos importantes en el rendimiento del transceptor.
- Si se requiere lograr mayor distancia de transmisión podría diseñarse o utilizarse antenas direccionales.
- La selección del canal de comunicación en la banda 2.4 GHz puede influir en el rendimiento del enlace por lo que es preciso realizar pruebas o un escaneo del espectro para definir el canal que presente menor interferencia. Se recomienda el uso de los canales desde el 108 al 125 en la configuración del nRF24L01+.
- Para aplicaciones inferiores a los 45 m se recomienda el empleo del transceptor nRF24L01+ en su versión de baja potencia, en beneficio de un consumo de energía menor.
- Para lograr una mayor autonomía de funcionamiento utilizando el transceptor en la versión que incluye el amplificador de potencia recomendando implementar un control de potencia por medio de un transistor mosfet que funcione como interruptor activado a través de un pin digital del microcontrolador con el objetivo de desconectar por completo la etapa de alimentación del transceptor. Con estas modificaciones se estima por medio del XLP Battery Estimator una autonomía de 534 días.

- El protocolo ESB permite implementar un funcionamiento multiceiver en estrella con hasta 6 dispositivos, para esto es necesario ajustar por medio de la función WriteAddress (registro, #bytes, \*addr) los valores correspondientes según el esquema mostrado en el anexo B1.
- Para potenciar las características de este nodo sensor, recomiendo incorporar un diseño específico para la etapa de alimentación donde se incluya mecanismos que permitan la obtención de energía proveniente del ambiente y esta se almacene y permita cargar la batería.

## Bibliografía

- A. Proskochylo, A. Vorobyov, M. Zriakhov, A. Kravchuk, A. Akulynichev, & V. Lukin. (2015). Overview of wireless technologies for organizing sensor networks. Paper presented at the *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2015 Second International Scientific-Practical Conference*, 39-41. doi:10.1109/INFOCOMMST.2015.7357263
- Akyildiz, I. F., & Vuran, M. C. (2010). *Wireless sensor networks* John Wiley & Sons.
- Aslam, S., Hannan, S., Haider, A., & Tariq, M. H. (2016). Exploring PIC 24F series microcontroller using MPLAB and proteus. *Journal of Current Research in Science*, 4(2), 164.
- Benavides, C. M. (2013). SESLab promueve e investiga en energías renovables. *Investiga.TEC*, 14(14), 12-13.
- Di Jasio, L. (2007). *Programming 16-bit PIC microcontrollers in C: Learning to fly the PIC 24* Newnes.
- Di Jasio, L. (2011). *Programming 16-bit PIC microcontrollers in C: Learning to fly the PIC 24* Elsevier.
- Hernández Hernández, M. (2014). Radiobalizas y radiogoniometría: Identificación y localización.
- Hernández, C., & Vicente, J. (2010). *Redes Inalámbricas De Sensores: Una Nueva Arquitectura Eficiente y Robusta Basada En Jerarquía Dinámica De Grupos*,
- Isern Keschull, J. M. (2014). Sistema de recolección de información de bajo coste basado en radio wake-up para aplicaciones en ciudades inteligentes.
- Karl, H., & Willig, A. (2007). *Protocols and architectures for wireless sensor networks* John Wiley & Sons.
- L. Ren, X. Chen, J. Huang, T. Xing, W. Nie, C. Liu, & D. Fang. (2013). DE2: Localization with the rotating RSS using a single beacon. Paper presented at the *Ubiquitous Intelligence and Computing, 2013 IEEE 10th International Conference on and 10th International Conference on Autonomic and Trusted Computing*
- M. Johnson, M. Healy, P. van de Ven, M. J. Hayes, J. Nelson, T. Newe, & E. Lewis. (2009). A comparative review of wireless sensor network mote technologies. Paper presented at the *Sensors, 2009 IEEE*, 1439-1442. doi:10.1109/ICSENS.2009.5398442

- S. F. A. Shah, S. Srirangarajan, & A. H. Tewfik. (2010). Implementation of a directional beacon-based position location algorithm in a signal processing framework. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(3), 1044-1053.
- S. Gerasenko, A. Joshi, S. Rayaprolu, K. Ponnaivaikko, & D. P. Agrawal. (2001). Beacon signals: What, why, how, and where? *Computer*, 34(10), 108-110.
- Semiconductor, N. (2008). nRF24L01 single chip 2.4 GHz transceiver preliminary product specification v1. 0. *NRF24L01 Datasheet*,
- Semiconductor, N. (2013). nRF24L01 ultra low power 2.4 GHz RF transceiver. *Online* [Http://www.Nordicsemi.com/eng/Products/2.4 GHz-RF/nRF24L01P](http://www.Nordicsemi.com/eng/Products/2.4%20GHz-RF/nRF24L01P),
- Solís, A. G. Decimonoveno informe estado de la nación en desarrollo humano sostenible.
- Zheng, J., & Jamalipour, A. (2009). *Wireless sensor networks: A networking perspective*
- Zhu, N. (2013). *Simulation and Optimization of Energy Consumption in Wireless Sensor Networks*,

## Apéndice A.1 Glosario.

*ACK*: paquete que la estación base envía como confirmación al recibir un paquete proveniente de un nodo sensor.

*Ad-hoc*: se refiere a un enlace de comunicación solamente entre el transmisor y el receptor

*Asic*: es un circuito integrado de aplicación específica.

*Beacons*: señales de información que se transmiten periódicamente.

*Broadcast*: señal de información que se transmite a través de todos los elementos de la red.

*Deep sleep mode*: modo de funcionamiento de menor consumo de energía en un dispositivo electrónico.

*Enhanced ShockBurst*: protocolo embebido desarrollado por Nordic Semiconductor para el manejo de la comunicación con el chip nRF24L01+.

*Gateway*: nodo salida que trasmite la información que recibe.

*Internet of things*: término novedoso involucra la capacidad de los dispositivos de transmitir información inalámbricamente a otro dispositivo, orientado a gran diversidad de aplicaciones.

*Imote2*: nodo sensor comercial.

*MicaZ*: nodo sensor comercial.

*Multiceiver*: modo de funcionamiento del transceptor que permite la comunicación entre la estación base y varios nodos sensores.

*Overhearing*: incremento del tiempo de escucha de los nodos para acceder al medio de transmisión.

*Overmitting*: incremento del tráfico de una red debido al aumento de las retransmisiones de los nodos.

*Power and go*: tecnología del fabricante Semtech que permite la puesta en funcionamiento de un transceptor sin requerir de un microcontrolador.

*Router*: dispositivo de una red de sensores que se encargan del enrutamiento de los paquetes de información.

TelosB: nodo sensor comercial.

Transceptor: dispositivo electrónico que permite el envío y recepción de datos a través de ondas de radio.

*Wearables*: dispositivos diseñados para que las personas los utilicen en el cuerpo o adheridos a la ropa.

## Apéndice A.2 Elementos a considerar en la programación de los periféricos del PIC24F08KA102.

Este apéndice contiene la descripción de etapas de código necesarias para el funcionamiento de algunos de los periféricos del microcontrolador PIC24F08KA102.

En cuanto a la programación de las etapas de: configuración inicial de puertos del microcontrolador, configuración de señales de reloj y configuración de tiempo en el RTCC. Es necesario deshabilitar temporalmente todas las interrupciones, ya que esto evita que se deba ejecutar una secuencia de interrupción sin haber finalizado las diversas configuraciones del microcontrolador, lo que podría generar un funcionamiento errático y por tanto distinto al esperado. Para lo anterior se hace uso de la siguiente instrucción.

```
__asm__ volatile("disi #0x3FFF"); // disable temporarily all interrupts

// your code here
// ...

DISICNT = 0; // re-enable all interrupts
```

**Figura A1.1.** Deshabilitación temporal de las interrupciones del MCU.

Por otra parte, para la utilización del módulo RTCC durante modos de bajo consumo es necesario configurar al oscilador secundario (SOSC) como señal principal de este periférico. Por tanto en la siguiente figura se muestra la secuencia de desbloqueo necesaria para poder habilitar el bit SOSSEN que permite el funcionamiento del RTCC con el oscilador externo de cristal a una frecuencia de 32.768 kHz,

```
// OSCCON unlock sequence, setting SOSSEN
asm volatile ("mov #OSCCON,W1");
asm volatile ("mov.b #0x46, W2");
asm volatile ("mov.b #0x57, W3");
asm volatile ("mov.b #0x02, W0"); // SOSSEN =1
asm volatile ("mov.b W2, [W1]");
asm volatile ("mov.b W3, [W1]");
asm volatile ("mov.b W0, [W1]");
```

**Figura A1.2.** Secuencia de desbloqueo para la habilitación de oscilador secundario.

El siguiente código muestra la secuencia necesaria para establecer el tiempo en el módulo RTCC. Es importante deshabilitar el módulo para posteriormente utilizar el puntero del RTCC para escribir en los registros los distintos valores de fecha y hora así como el valor de ajuste o calibración. Al finalizar se activa el módulo a través del bit RTCEN e inmediatamente se bloquea la escritura en los registros del periférico con el bit RTCWREN.



La figura A1.3 muestra la secuencia necesaria para habilitar la escritura en los registros del RTCC.

```
_RTCEN = 0;          // disable the module

// example set 12/01/2006 WED 12:01:30
_RTCPTR = 3;        // start the loading sequence
RTCVAL = 0x2006;    // YEAR
RTCVAL = 0x1100;    // MONTH-1/DAY-1
RTCVAL = 0x0312;    // WEEKDAY/HOURS
RTCVAL = 0x0130;    // MINUTES/SECONDS

// optional calibration
//_CAL = 0x00;

// enable and lock
_RTCEN = 1;         // enable the module
_RTCWREN = 0;       // lock settings
```

**Figura A1.2.** Secuencia de configuración del tiempo del RTCC.

```
// RCFGCAL unlock sequence, setting RTCWREN
asm volatile("disi    #5");
asm volatile("mov #0x55, w7");
asm volatile("mov w7, _NVMKEY");
asm volatile("mov #0xAA, w8");
asm volatile("mov w8, _NVMKEY");

asm volatile("bset    _RCFGCAL, #13"); // RTCWREN =1;
asm volatile("nop");
asm volatile("nop");
```

**Figura A1.3.** Secuencia de habilitación de escritura para el módulo RTCC.

En la figura A1.4 se observa los comandos necesarios para activar los distintos modos de bajo consumo. Es importante destacar que para la habilitación del modo de más bajo consumo que soporta el microcontrolador PIC24F08KA102 es necesario poner en alto (valor lógico de 1) en bit DSEN del registro DSCON seguido de dos ciclos de operación por medio de la incorporación de la sentencia NOP. En caso de que la función *deep sleep* no incluya estas operaciones después de cierto tiempo el microcontrolador ingresará en el modo *sleep* el cual presenta mayor consumo de energía que en el modo *deep sleep*.

```

//Put the device into Sleep mode
PWRSVAV    #SLEEP_MODE;
//
//
//Put the device into Idle mode
PWRSVAV    #IDLE_MODE;
//
//
//Put the device into Deep Sleep mode
BSET       DSCON DSEN
PWRSVAV    #SLEEP_MODE;

```

**Figura A1.4.** Habilitación de los modos de bajo consumo en el PIC24F08KA102.

La figura A1.5 muestra los casos anteriormente mencionados en los siguientes escenarios: simple con *delay* a través de operaciones *nop*, activación del modo de bajo consumo con deshabilitación de interrupciones y finalmente con el enfoque de interrupción en modo de prueba.

```

// Case 1: simplest delay scenario
//
asm("bset DSCON, #15");
asm("nop");
asm("nop");
asm("nop");
asm("pwrsav #0");
//
// Case 2: interrupts disabled
//
asm("disi #4");
asm("bset DSCON, #15");
asm("nop");
asm("nop");
asm("nop");
asm("pwrsav #0");
//
// Case 3: interrupts disabled with interrupt testing
//
asm("disi #4");
asm("bset DSCON, #15");
asm("nop");
asm("nop");
asm("btss INTREG, #15");
asm("pwrsav #0");
// continue with application code here
//

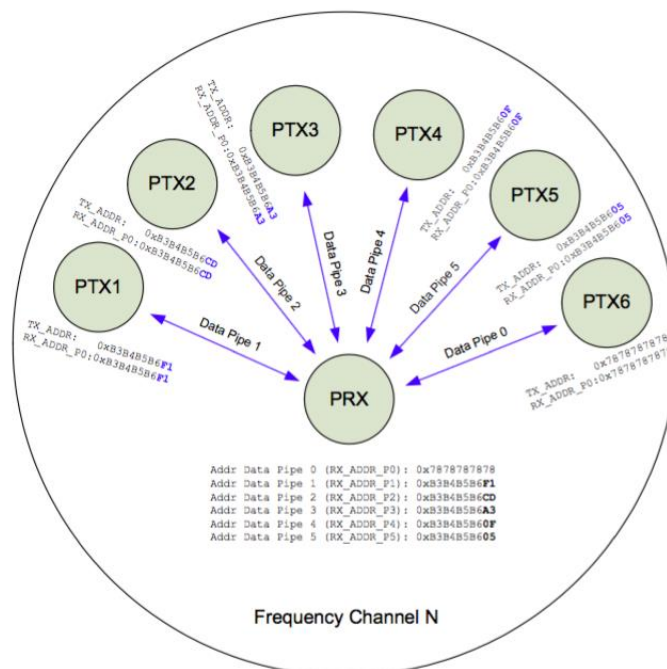
```

**Figura A1.5.** Habilitación de los modos de bajo consumo en el PIC24F08KA102 con manejo de interrupciones.

## Anexo B1

**Tabla B1.1.** Características de potencia y corriente transceptor nRF24L01+

SPI RF-SETUP (RF_PWR)	RF output power	DC current consumption
11	0dBm	11.3mA
10	-6dBm	9.0mA
01	-12dBm	7.5mA



**Figura B1.1.** Direccinamiento para configuración Multiceiver.

**Tabla B1.2** Comandos habilitados para el chip nRF24L01+.

Command name	Command word (binary)	# Data bytes	Operation
R_REGISTER	000A AAAA	1 to 5 LSByte first	Read command and status registers. AAAAA = 5 bit Register Map Address
W_REGISTER	001A AAAA	1 to 5 LSByte first	Write command and status registers. AAAAA = 5 bit Register Map Address Executable in power down or standby modes only.
R_RX_PAYLOAD	0110 0001	1 to 32 LSByte first	Read RX-payload: 1 – 32 bytes. A read operation always starts at byte 0. Payload is deleted from FIFO after it is read. Used in RX mode.
W_TX_PAYLOAD	1010 0000	1 to 32 LSByte first	Write TX-payload: 1 – 32 bytes. A write operation always starts at byte 0 used in TX payload.
FLUSH_TX	1110 0001	0	Flush TX FIFO, used in TX mode
FLUSH_RX	1110 0010	0	Flush RX FIFO, used in RX mode Should not be executed during transmission of acknowledge, that is, acknowledge package will not be completed.
REUSE_TX_PL	1110 0011	0	Used for a PTX device Reuse last transmitted payload. TX payload reuse is active until W_TX_PAYLOAD or FLUSH TX is executed. TX payload reuse must not be activated or deactivated during package transmission.
R_RX_PL_WID <sup>a</sup>	0110 0000	1	Read RX payload width for the top R_RX_PAYLOAD in the RX FIFO.  <b>Note:</b> Flush RX FIFO if the read value is larger than 32 bytes.
W_ACK_PAYLOAD <sup>a</sup>	1010 1PPP	1 to 32 LSByte first	Used in RX mode. Write Payload to be transmitted together with ACK packet on PIPE PPP. (PPP valid in the range from 000 to 101). Maximum three ACK packet payloads can be pending. Payloads with same PPP are handled using first in - first out principle. Write payload: 1– 32 bytes. A write operation always starts at byte 0.
W_TX_PAYLOAD_NOACK <sup>a</sup>	1011 0000	1 to 32 LSByte first	Used in TX mode. Disables AUTOACK on this specific packet.
NOP	1111 1111	0	No Operation. Might be used to read the STATUS register

**Tabla B1.3** Registros del chip nRF24L01+.

Address (Hex)	Mnemonic	Bit	Reset Value	Type	Description
00	CONFIG				Configuration Register
	Reserved	7	0	R/W	Only '0' allowed
	MASK_RX_DR	6	0	R/W	Mask interrupt caused by RX_DR 1: Interrupt not reflected on the IRQ pin 0: Reflect RX_DR as active low interrupt on the IRQ pin
	MASK_TX_DS	5	0	R/W	Mask interrupt caused by TX_DS 1: Interrupt not reflected on the IRQ pin 0: Reflect TX_DS as active low interrupt on the IRQ pin
	MASK_MAX_RT	4	0	R/W	Mask interrupt caused by MAX_RT 1: Interrupt not reflected on the IRQ pin 0: Reflect MAX_RT as active low interrupt on the IRQ pin
	EN_CRC	3	1	R/W	Enable CRC. Forced high if one of the bits in the EN_AA is high
	CRCO	2	0	R/W	CRC encoding scheme '0' - 1 byte '1' - 2 bytes
	PWR_UP	1	0	R/W	1: POWER UP, 0: POWER DOWN
	PRIM_RX	0	0	R/W	RX/TX control 1: PRX, 0: PTX
01	EN_AA Enhanced ShockBurst™				Enable 'Auto Acknowledgment' Function Disable this functionality to be compatible with nRF2401, see <a href="#">page 75</a>
	Reserved	7:6	00	R/W	Only '00' allowed
	ENAA_P5	5	1	R/W	Enable auto acknowledgement data pipe 5
	ENAA_P4	4	1	R/W	Enable auto acknowledgement data pipe 4
	ENAA_P3	3	1	R/W	Enable auto acknowledgement data pipe 3
	ENAA_P2	2	1	R/W	Enable auto acknowledgement data pipe 2
	ENAA_P1	1	1	R/W	Enable auto acknowledgement data pipe 1
	ENAA_P0	0	1	R/W	Enable auto acknowledgement data pipe 0
02	EN_RXADDR				Enabled RX Addresses
	Reserved	7:6	00	R/W	Only '00' allowed
	ERX_P5	5	0	R/W	Enable data pipe 5.
	ERX_P4	4	0	R/W	Enable data pipe 4.
	ERX_P3	3	0	R/W	Enable data pipe 3.
	ERX_P2	2	0	R/W	Enable data pipe 2.

Address (Hex)	Mnemonic	Bit	Reset Value	Type	Description
	ERX_P1	1	1	R/W	Enable data pipe 1.
	ERX_P0	0	1	R/W	Enable data pipe 0.
03	SETUP_AW				Setup of Address Widths (common for all data pipes)
	Reserved	7:2	000000	R/W	Only '000000' allowed
	AW	1:0	11	R/W	RX/TX Address field width '00' - Illegal '01' - 3 bytes '10' - 4 bytes '11' - 5 bytes LSByte is used if address width is below 5 bytes
04	SETUP_RETR				Setup of Automatic Retransmission
	ARD <sup>a</sup>	7:4	0000	R/W	Auto Retransmit Delay '0000' - Wait 250µS '0001' - Wait 500µS '0010' - Wait 750µS ..... '1111' - Wait 4000µS (Delay defined from end of transmission to start of next transmission) <sup>b</sup>
	ARC	3:0	0011	R/W	Auto Retransmit Count '0000' - Re-Transmit disabled '0001' - Up to 1 Re-Transmit on fail of AA ..... '1111' - Up to 15 Re-Transmit on fail of AA
05	RF_CH				RF Channel
	Reserved	7	0	R/W	Only '0' allowed
	RF_CH	6:0	0000010	R/W	Sets the frequency channel nRF24L01+ operates on
06	RF_SETUP				RF Setup Register
	CONT_WAVE	7	0	R/W	Enables continuous carrier transmit when high.
	Reserved	6	0	R/W	Only '0' allowed
	RF_DR_LOW	5	0	R/W	Set RF Data Rate to 250kbps. See RF_DR_HIGH for encoding.
	PLL_LOCK	4	0	R/W	Force PLL lock signal. Only used in test
	RF_DR_HIGH	3	1	R/W	Select between the high speed data rates. This bit is don't care if RF_DR_LOW is set. Encoding: [RF_DR_LOW, RF_DR_HIGH]: '00' - 1Mbps '01' - 2Mbps '10' - 250kbps '11' - Reserved

Address (Hex)	Mnemonic	Bit	Reset Value	Type	Description
	RF_PWR	2:1	11	R/W	Set RF output power in TX mode '00' – -18dBm '01' – -12dBm '10' – -6dBm '11' – 0dBm
	Obsolete	0			Don't care
07	STATUS				Status Register (in parallel to the SPI command word applied on the <b>MOSI</b> pin, the <b>STATUS</b> register is shifted serially out on the <b>MISO</b> pin)
	Reserved	7	0	R/W	Only '0' allowed
	RX_DR	6	0	R/W	Data Ready RX FIFO interrupt. Asserted when new data arrives RX FIFO <sup>2</sup> . Write 1 to clear bit.
	TX_DS	5	0	R/W	Data Sent TX FIFO interrupt. Asserted when packet transmitted on TX. If <b>AUTO_ACK</b> is activated, this bit is set high only when <b>ACK</b> is received. Write 1 to clear bit.
	MAX_RT	4	0	R/W	Maximum number of TX retransmits interrupt. Write 1 to clear bit. If <b>MAX_RT</b> is asserted it must be cleared to enable further communication.
	RX_P_NO	3:1	111	R	Data pipe number for the payload available for reading from <b>RX_FIFO</b> 000-101: Data Pipe Number 110: Not Used 111: RX FIFO Empty
	TX_FULL	0	0	R	TX FIFO full flag. 1: TX FIFO full. 0: Available locations in TX FIFO.
08	OBSERVE_TX				Transmit observe register
	PLOS_CNT	7:4	0	R	Count lost packets. The counter is overflow protected to 15, and discontinues at max until reset. The counter is reset by writing to <b>RF_CH</b> . See <a href="#">page 75</a> .
	ARC_CNT	3:0	0	R	Count retransmitted packets. The counter is reset when transmission of a new packet starts. See <a href="#">page 75</a> .
09	RPD				
	Reserved	7:1	000000	R	
	RPD	0	0	R	Received Power Detector. This register is called <b>CD</b> (Carrier Detect) in the nRF24L01. The name is different in nRF24L01+ due to the different input power level threshold for this bit. See section <a href="#">6.4</a> on <a href="#">page 25</a> .
0A	RX_ADDR_P0	39:0	0xE7E7E7E7	R/W	Receive address data pipe 0. 5 Bytes maximum length. (LSByte is written first. Write the number of bytes defined by <b>SETUP_AW</b> )

Address (Hex)	Mnemonic	Bit	Reset Value	Type	Description
0B	RX_ADDR_P1	39:0	0xC2C2C2C2C2	R/W	Receive address data pipe 1. 5 Bytes maximum length. (LSByte is written first. Write the number of bytes defined by SETUP_AW)
0C	RX_ADDR_P2	7:0	0xC3	R/W	Receive address data pipe 2. Only LSB. MSBytes are equal to RX_ADDR_P1[39:8]
0D	RX_ADDR_P3	7:0	0xC4	R/W	Receive address data pipe 3. Only LSB. MSBytes are equal to RX_ADDR_P1[39:8]
0E	RX_ADDR_P4	7:0	0xC5	R/W	Receive address data pipe 4. Only LSB. MSBytes are equal to RX_ADDR_P1[39:8]
0F	RX_ADDR_P5	7:0	0xC6	R/W	Receive address data pipe 5. Only LSB. MSBytes are equal to RX_ADDR_P1[39:8]
10	TX_ADDR	39:0	0xE7E7E7E7E7	R/W	Transmit address. Used for a PTX device only. (LSByte is written first) Set RX_ADDR_P0 equal to this address to handle automatic acknowledge if this is a PTX device with Enhanced ShockBurst™ enabled. See <a href="#">page 75</a> .
11	RX_PW_P0				
	Reserved	7:6	00	R/W	Only '00' allowed
	RX_PW_P0	5:0	0	R/W	Number of bytes in RX payload in data pipe 0 (1 to 32 bytes). 0 Pipe not used 1 = 1 byte ... 32 = 32 bytes
12	RX_PW_P1				
	Reserved	7:6	00	R/W	Only '00' allowed
	RX_PW_P1	5:0	0	R/W	Number of bytes in RX payload in data pipe 1 (1 to 32 bytes). 0 Pipe not used 1 = 1 byte ... 32 = 32 bytes
13	RX_PW_P2				
	Reserved	7:6	00	R/W	Only '00' allowed
	RX_PW_P2	5:0	0	R/W	Number of bytes in RX payload in data pipe 2 (1 to 32 bytes). 0 Pipe not used 1 = 1 byte ... 32 = 32 bytes
14	RX_PW_P3				
	Reserved	7:6	00	R/W	Only '00' allowed



Address (Hex)	Mnemonic	Bit	Reset Value	Type	Description
	RX_PW_P3	5:0	0	R/W	Number of bytes in RX payload in data pipe 3 (1 to 32 bytes). 0 Pipe not used 1 = 1 byte ... 32 = 32 bytes
15	RX_PW_P4				
	Reserved	7:6	00	R/W	Only '00' allowed
	RX_PW_P4	5:0	0	R/W	Number of bytes in RX payload in data pipe 4 (1 to 32 bytes). 0 Pipe not used 1 = 1 byte ... 32 = 32 bytes
16	RX_PW_P5				
	Reserved	7:6	00	R/W	Only '00' allowed
	RX_PW_P5	5:0	0	R/W	Number of bytes in RX payload in data pipe 5 (1 to 32 bytes). 0 Pipe not used 1 = 1 byte ... 32 = 32 bytes
17	FIFO_STATUS				FIFO Status Register
	Reserved	7	0	R/W	Only '0' allowed
	TX_REUSE	6	0	R	Used for a PTX device Pulse the <code>rfce</code> high for at least 10µs to Reuse last transmitted payload. TX payload reuse is active until <code>W_TX_PAYLOAD</code> or <code>FLUSH_TX</code> is executed. <code>TX_REUSE</code> is set by the SPI command <code>REUSE_TX_PL</code> , and is reset by the SPI commands <code>W_TX_PAYLOAD</code> or <code>FLUSH_TX</code>
	TX_FULL	5	0	R	TX FIFO full flag. 1: TX FIFO full. 0: Available locations in TX FIFO.
	TX_EMPTY	4	1	R	TX FIFO empty flag. 1: TX FIFO empty. 0: Data in TX FIFO.
	Reserved	3:2	00	R/W	Only '00' allowed
	RX_FULL	1	0	R	RX FIFO full flag. 1: RX FIFO full. 0: Available locations in RX FIFO.
	RX_EMPTY	0	1	R	RX FIFO empty flag. 1: RX FIFO empty. 0: Data in RX FIFO.

Address (Hex)	Mnemonic	Bit	Reset Value	Type	Description
N/A	ACK_PLD	255:0	X	W	Written by separate SPI command ACK packet payload to data pipe number PPP given in SPI command. Used in RX mode only. Maximum three ACK packet payloads can be pending. Payloads with same PPP are handled first in first out.
N/A	TX_PLD	255:0	X	W	Written by separate SPI command TX data payload register 1 - 32 bytes. This register is implemented as a FIFO with three levels. Used in TX mode only.
N/A	RX_PLD	255:0	X	R	Read by separate SPI command. RX data payload register. 1 - 32 bytes. This register is implemented as a FIFO with three levels. All RX channels share the same FIFO.
1C	DYNPD				Enable dynamic payload length
	Reserved	7:6	0	R/W	Only '00' allowed
	DPL_P5	5	0	R/W	Enable dynamic payload length data pipe 5. (Requires <code>EN_DPL</code> and <code>ENAA_P5</code> )
	DPL_P4	4	0	R/W	Enable dynamic payload length data pipe 4. (Requires <code>EN_DPL</code> and <code>ENAA_P4</code> )
	DPL_P3	3	0	R/W	Enable dynamic payload length data pipe 3. (Requires <code>EN_DPL</code> and <code>ENAA_P3</code> )