

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Diseño e implementación del módulo de comunicación inalámbrica de un nodo  
CRTECMOTE para enlaces de tipo punto-multipunto**

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

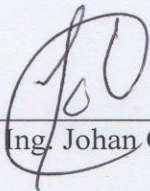
**Sebastián A. López González**

**Cartago, junio 2010**

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**TRIBUNAL EVALUADOR**

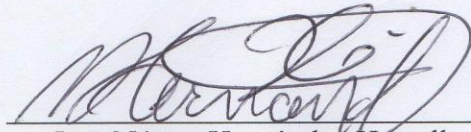
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



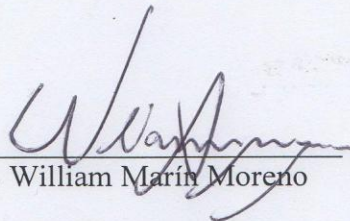
Ing. Johan Carvajal Godínez

Profesor lector



Ing. Néstor Hernández Hostaller

Profesor lector



Ing. William Marín Moreno

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 23 junio 2010

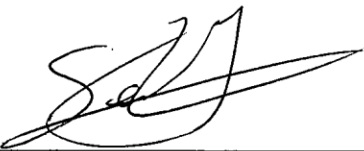
## **Declaratoria de autenticidad**

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

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo realizado y por el contenido del correspondiente anteproyecto.

Cartago, junio 2010



---

Firma del autor

Sebastián A. López González

Cédula: 1-1206-0477

## Resumen

La elaboración de este documento presenta una descripción analítica del proceso realizado para el desarrollo de una pila de red para la implementación de un módulo de comunicaciones inalámbricas sobre el sistema operativo de tiempo real SIWA-RTOS, el cual trabaja sobre un microcontrolador con arquitectura PIC32MX. El módulo utiliza el transceptor de radiofrecuencia MRF24J40MA y es capaz de crear una red inalámbrica de sensores de área personal en topología estrella si se configura como coordinador, o de asociarse a una red con estas características en caso contrario. La red tiene una capacidad máxima de 5 nodos (4 esclavos y un nodo actuando como coordinador). El nodo principal elige el canal de operación más óptimo (el de menos interferencia electromagnética) a partir de una exploración de energía en todos los canales disponibles. Inmediatamente después, crea la red y recibe las peticiones de conexión de nodos secundarios. Por otro lado, los dispositivos secundarios realizan una detección activa de redes disponibles dentro del espectro de los 2.4 GHz. Una vez asociados a alguna red personal, solo se pueden comunicar con el coordinador.

El sistema contiene una versión del protocolo MiWi™ P2P adaptado para sistemas operativos de tiempo real. Las modificaciones realizadas permiten conservar la característica principal de bajo consumo del sistema operativo SIWA-RTOS. Se ofrecen características no presentes en la versión original del protocolo como lo son la capacidad de asignación de direcciones de forma dinámica y la identificación de la dirección de destino de mensajes. Además se mejoró el algoritmo de re-sincronización de dispositivos en caso de pérdidas de conexión con el coordinador, contemplando casos más generales.

Palabras clave: red de área personal, protocolo de redes inalámbricas, RTOS, transceptores de radiofrecuencia, IEEE 802.15.

## Summary

This document presents an analytical description of the process of developing a network stack for the implementation of a wireless communication module running on the real time operative system SIWA-RTOS, which in turn runs on a PIC32MX architecture microcontroller. The module uses the RF MRF24J40MA transceiver and it's able to create a wireless personal area network (WPAN) in a star topology, if the configuration applies for network coordinator, or to associate to an existing WPAN otherwise.

The network has a maximum capacity of 5 nodes (4 slaves and one node acting as a PAN coordinator). The coordinator chooses the operating channel after scanning all the available channels. Then it immediately creates the network and waits for incoming connection requests of the slave nodes. On the other hand, the secondary nodes start an active scan to detect existing networks in the 2.4 GHz spectrum. Once associated to some personal network, there able to communicate only with the coordinator.

The system contains a version of the MiWi™ P2P protocol, adapted for real time operative systems. The modifications made allow keeping the main feature of SIWA-RTOS, which is low power consumption. It offers some features not present in the original protocol, such as the capacity to make dynamic address assignment and the destination address ID of the message being received. Also, the re-synchronization algorithm has been improved, as the new one, contemplates more general cases.

Keywords: personal area network, sensing nodes, wireless network protocol, RTOS, RF transceivers, IEEE 802.15.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>10</b>
1.1	Problema existente e importancia de su solución.....	11
1.1.1	Definición del Problema .....	11
1.1.2	Síntesis del Problema e importancia de su solución .....	12
1.2	Solución seleccionada.....	13
<b>2</b>	<b>Capítulo 2: Meta y Objetivos.....</b>	<b>18</b>
2.1	Meta.....	18
2.2	Objetivo general .....	18
2.3	Objetivos específicos .....	18
<b>3</b>	<b>Capítulo 3: Marco Teórico.....</b>	<b>19</b>
3.1	Descripción del PIC32 USB Starter Kit II .....	19
3.2	Descripción del sistema operativo SIWA-RTOS .....	19
3.3	Redes inalámbricas de área personal de bajo costo (LR-WPAN) [18].....	21
3.4	Protocolo de comunicación inalámbrica IEEE 802.15.4™ [6,17].....	23
3.5	Pila de protocolo de red inalámbrica MiWi™ .....	26
3.6	Protocolo de comunicación punto a punto MiWi™ P2P.....	27
3.7	Transceptores para comunicación en RF .....	29
<b>4</b>	<b>Capítulo 4: Procedimiento Metodológico .....</b>	<b>30</b>
4.1	Métodos y actividades .....	30
4.1.1	Caracterizar los requerimientos de SIWA-RTOS como sistema operativo de tiempo real .....	30
4.1.2	Comparación de los transceptores disponibles en el mercado y selección del que mejor se adapte a los requerimientos del proyecto.....	31
4.1.3	Determinar los requisitos a nivel de red para la implementación de una topología estrella.....	31
4.1.4	Selección y migración del protocolo de comunicaciones inalámbricas a utilizar, al sistema operativo SIWA-RTOS .....	32
4.1.5	Implementación de una topología estrella sobre un nodo .....	32
4.1.6	Realizar un banco de pruebas que permita caracterizar al nuevo sistema implementado .....	33
4.1.7	Determinar el funcionamiento del módulo de comunicaciones inalámbricas ante variación del periodo de refrescamiento (tick quantum).....	33
<b>5</b>	<b>Capítulo 5: Descripción Detallada de la Solución.....</b>	<b>34</b>
5.1	Caracterización del tipo de tareas o procesos para un nodo CRTECMOTE compatibles con SIWA-RTOS .....	34
5.2	Diseño del módulo de comunicación inalámbrica de un nodo CRTECMOTE .....	35
5.3	Implementación del módulo de comunicación inalámbrica de un nodo CRTECMOTE .....	39
5.3.1	Migración de la API para la capa física del protocolo de red MiWi™ P2P.....	39
5.3.2	Migración de la API para la capa de control de acceso al medio (MAC) del protocolo de red MiWi™ P2P .....	40
5.3.3	Migración de la API para la capa de aplicación del protocolo de red MiWi™ P2P.....	42

5.3.4	Modificación del protocolo de red para habilitar el servicio de direccionamiento dinámico.....	47
5.3.5	Modificación de la función de re-sincronización .....	49
5.4	Implementación de una red en topología estrella sobre SIWA-RTOS .....	50
5.4.1	Creación de la red personal y asociación de nodos .....	51
5.4.2	Creación de una tarea que permita evaluar el funcionamiento de un nodo CRTECMOTE dentro de una red personal .....	53
5.4.3	Atributos de red implementados para evaluar el funcionamiento de la red ...	54
5.4.4	Otros atributos de red implementados .....	55
5.5	Evaluación del módulo de comunicación inalámbrica de un nodo CRTECMOTE .....	56
5.5.1	Medición de la corriente en los nodos de la red .....	56
5.5.2	Medición del valor RSSI durante una exploración de energía ante varios ambientes de operación .....	61
5.5.3	Medición de potencia de recepción ante varias distancias .....	63
5.6	Evaluación del funcionamiento del la pila de red ante variaciones del quantum del sistema .....	65
6	CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	68
6.1	Conclusiones .....	68
6.2	Recomendaciones .....	69
	Bibliografía y Referencias.....	71
	Apéndices .....	73
A.1	Glosario y abreviaturas.....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Configuración en topología estrella [19].....	14
<b>Figura 1.2</b> Arquitectura del sistema operativo SIWA_RTOS [2] .....	15
<b>Figura 3.1</b> Topologías de punto a punto y estrella [6] .....	22
<b>Figura 3.2</b> Topología de árbol (a) y malla (b) [19] .....	23
<b>Figura 5.1</b> Diagrama de flujo para el acceso a los registros largos o cortos del MRF24J40MA .....	40
<b>Figura 5.2</b> Formato de la trama de bits generada para la transmisión de información .....	41
<b>Figura 5.3</b> Diagrama de flujo del funcionamiento general de la función P2Ptask .....	43
<b>Figura 5.4</b> Diagrama de flujo del proceso de asociación de dispositivos.....	44
<b>Figura 5.5</b> Diagrama de flujo del proceso de re-sincronización.....	46
<b>Figura 5.6</b> Diagrama de flujo del proceso de asociación de dispositivos con la característica de direccionamiento dinámico .....	48
<b>Figura 5.7</b> Diagrama de flujo del algoritmo de re-sincronización modificado.....	50
<b>Figura 5.8</b> Proceso de creación de red y asociación de nodos .....	53
<b>Figura 5.9</b> Gráfica de variación de corriente en un nodo coordinador .....	56
<b>Figura 5.10</b> Gráfica de variación de corriente en un nodo secundario .....	59
<b>Figura 5.11</b> Gráfica de variación de corriente en un nodo secundario con un Tick quantum de 100 HZ .....	65



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b> Bandas de frecuencias del estándar 802.15.4 [6].....	25
<b>Tabla 5.1</b> Cuadro comparativo de transceptores de radiofrecuencia [1,9].....	36
<b>Tabla 5.2</b> Duración de los picos de corriente señalados en la figura 5.9 .....	57
<b>Tabla 5.3</b> Muestras de corriente para un nodo coordinador para diferentes intervalos.....	58
<b>Tabla 5.4</b> Muestras de corriente para un nodo esclavo para diferentes intervalos .....	61
<b>Tabla 5.5</b> Mediciones del valor RSSI durante una exploración de energía ante varios ambientes de trabajo.....	62
<b>Tabla 5.6</b> Mediciones del valor RSSI y LQI ante variaciones de la distancia de transmisión.....	64
<b>Tabla 5.7</b> Comparación de los picos de corriente en los instantes C y D de las figuras 5.10 y 5.11 .....	66

# 1 Capítulo 1: Introducción

Los avances en tecnologías de redes de comunicación inalámbrica han permitido el crecimiento del número de aplicaciones disponible, de gran y pequeña escala, en donde se requiera el manejo de información en lugares donde la conexión física no es posible o deseada. La clasificación de las aplicaciones de este tipo de redes se puede ver según su ambiente de operación, el consumo de potencia, el costo de implementación, las tasas de transmisión o simplemente el alcance máximo, cuyo rango puede ir desde un nivel personal, hasta la cobertura de un área del orden de los kilómetros cuadrados.

Por ejemplo, en Costa Rica las reservas forestales constituyen una gran parte del país y existen puntos específicos que requieren de mayor protección. Una red inalámbrica de área personal, es ideal para el monitorizar de variables ambientales y así reducir los riesgos de incendios, tala ilegal, caza ilegal, etc. Este es el tipo de aplicaciones para las que se están diseñando los nodos de captura de datos CRTECMOTE, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica por un grupo de trabajo bajo la dirección del Ing. Johan Carvajal Godínez [1], que ha producido un nodo que trabaja sobre un microcontrolador con arquitectura PIC32MX, administrado por un sistema operativo de tiempo real de bajo consumo denominado SIWA-RTOS. El siguiente paso consiste en la implementación del módulo de comunicaciones inalámbricas del dispositivo para que pueda ejecutar las funciones de un protocolo de comunicaciones.

El propósito del proyecto es conformar una red inalámbrica de sensores a partir de estos nodos conectados en una topología de red en estrella y ejecutando tareas de tiempo real. Sin embargo, se presentó la problemática de migrar un protocolo de comunicaciones operando en conjunto con un sistema operativo de tiempo real, teniendo en cuenta sus requisitos y los propios de la red, sin que se afecte la compatibilidad entre ellos.

Bajo esta problemática, el presente proyecto comprende el proceso investigativo, comparativo, analítico y práctico para la producción del módulo de comunicaciones. Más específicamente, se realizó un estudio, a nivel de programación y hardware a utilizar. En seguida, se diseñó e implementó un protocolo de comunicaciones sencillo que cumple con las necesidades de una red de área personal, sobre un sistema de tiempo real de bajo consumo de potencia y bajo costo y que brinda los recursos necesarios por el módulo para un eficiente funcionamiento.

## **1.1 Problema existente e importancia de su solución**

### **1.1.1 Definición del Problema**

Para la definición del problema se parte del hecho de que un microcontrolador con arquitectura PIC32 presenta características favorables para un nodo CRTECMOTE, además de que por el tipo de variables a medir y por los requerimientos de respuesta en el tiempo, se requiere de un sistema operativo en tiempo real. Sin embargo, el microcontrolador y el sistema operativo fueron creados para aplicaciones generales y obviamente su diseño no fue optimizado para la operación junto con la tarjeta de comunicación inalámbrica. Dadas estas circunstancias, se encuentran varios impedimentos para la administración del transceptor de comunicación inalámbrica MRF24J40MA por parte del nodo de CRTECMOTE.

En primer lugar, el sistema operativo en tiempo real, SIWA-RTOS, no cuenta con ninguna biblioteca que permita la administración del dispositivo (detección e inicialización) ni mucho menos para la administración de tráfico de la información para su óptimo funcionamiento.

Para la implementación de una red inalámbrica de sensores, el dispositivo de comunicación inalámbrica puede soportar el protocolo de interfaz MiWi Stack™ diseñado por Microchip Technology® bajo licencia de software propietario. Las funciones que desarrolla esta pila de protocolo son extensas y requieren bastante tiempo de procesador. Por otro lado, el sistema operativo en tiempo real SIWA-RTOS que trabaja sobre el microcontrolador, posee requisitos de tiempo para los procesos y exige que estos sean programados considerando que se trata de un sistema multitarea que comparten un solo procesador. Por lo tanto, no existe compatibilidad entre el protocolo de red disponible que el dispositivo soporta y el sistema operativo del nodo CRTECMOTE.

En cuanto a la estructura de las tramas de la información, la tarjeta MRF24J40MA sigue el estándar de interfaz de la IEEE 802.15.4, el cual naturalmente no fue contemplado en la implementación del SIWA-RTOS sumando así otro elemento a la incompatibilidad.

Finalmente, como unidad que maneja múltiples dispositivos e información que debe ser brindada en cualquier instante, la característica de respuesta en tiempo mínimo para la administración de recursos a cada uno de los dispositivos es de suma importancia para un nodo CRTECMOTE.

### **1.1.2 Síntesis del Problema e importancia de su solución**

¿Cómo se puede lograr que un nodo de medición de datos para red inalámbrica de sensores CRTECMOTE, con microcontrolador PIC32MX y el sistema operativo SIWA-RTOS, sea capaz de administrar eficientemente el transceptor de comunicación inalámbrica MRF24J40MA?

Existe una gran diversidad de aplicaciones, más allá de las ambientales, en las que una red inalámbrica de sensores cubre las carencias de otros sistemas en los que es necesario el flujo de información entre varios puntos. Los nodos de medición de datos CRTECMOTE, están pensados para la protección de bosques en Costa Rica ante caza ilegal o incendios, situaciones críticas o de emergencia que deben ser resueltas rápidamente.

Una red inalámbrica de sensores con sus nodos bien distribuidos permite un tiempo de respuesta mucho menor ante dichos eventos. Por esta razón se torna importante lograr un eficiente flujo de información datos a través de la red y al mismo tiempo asegurar la integridad de los datos. El sistema operativo que administre de manera eficiente los recursos del módulo de comunicaciones del nodo, permite esta característica de sistema preventivo, lo cual lo vuelve oportuno dado el nivel de riesgo de los bosques en nuestro país.

Por otro lado, las aplicaciones de los nodos CRTECMOTE bajo una red inalámbrica, se pueden extender a otros tipos de manejo de información, en donde se requiera la transferencia de información entre varios puntos.

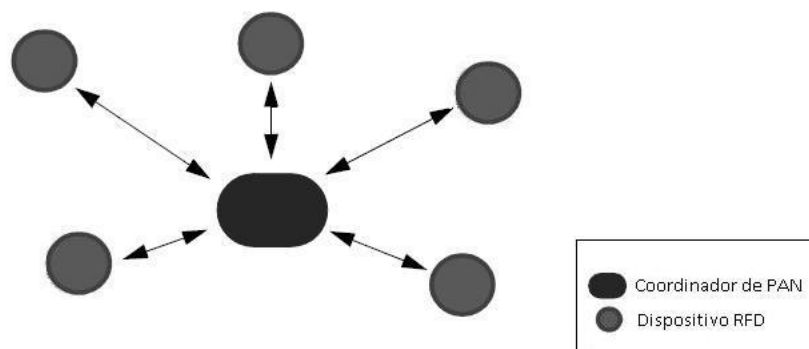
## **1.2 Solución seleccionada**

Se debe tener claro que el propósito de la solución del problema planteado anteriormente será la integración de la tarjeta de comunicación inalámbrica MRF24J40MA junto con el microcontrolador PIC32MX que ejecuta el sistema operativo en tiempo real SIWA-RTOS, de manera que este último brinde al transceptor los mínimos recursos necesarios para su funcionamiento.

En este sentido, se debe obtener un amplio conocimiento y entendimiento del sistema operativo en tiempo real, sobre todo en lo referente al manejo de procesos y petición de recursos del sistema. Lo que se pretende es determinar detalladamente

los parámetros, requisitos y limitaciones, así como todas las características que tengan relación con la administración de recursos de hardware que la tarjeta de comunicación inalámbrica necesitará para su adecuada operación. Para esto se cuenta con el trabajo realizado por otro estudiante de la Escuela de Ingeniería Electrónica, quien desarrolló su proyecto de graduación sobre el sistema operativo SIWA-RTOS [2]. Además se deberá investigar a fondo el manual propio del sistema operativo, FreeRTOS, sobre el cual se basa SIWA [3].

El controlador de dispositivo deberá encargarse de la integración del transceptor dentro del nodo de captura. Una vez cumplida la detección, configuración e inicialización del transceptor, se deberá adaptar la pila de protocolo de interfaz de comunicación inalámbrica MiWi Stack™ al sistema operativo. Posteriormente, utilizando las herramientas de programación se evaluará la compatibilidad de la pila de red con el sistema operativo. Igualmente se deberá contar con la capacidad de formar redes en topología estrella como lo muestra la figura 1.1, en donde se muestra 5 nodos secundarios comunicándose con un nodo coordinador.

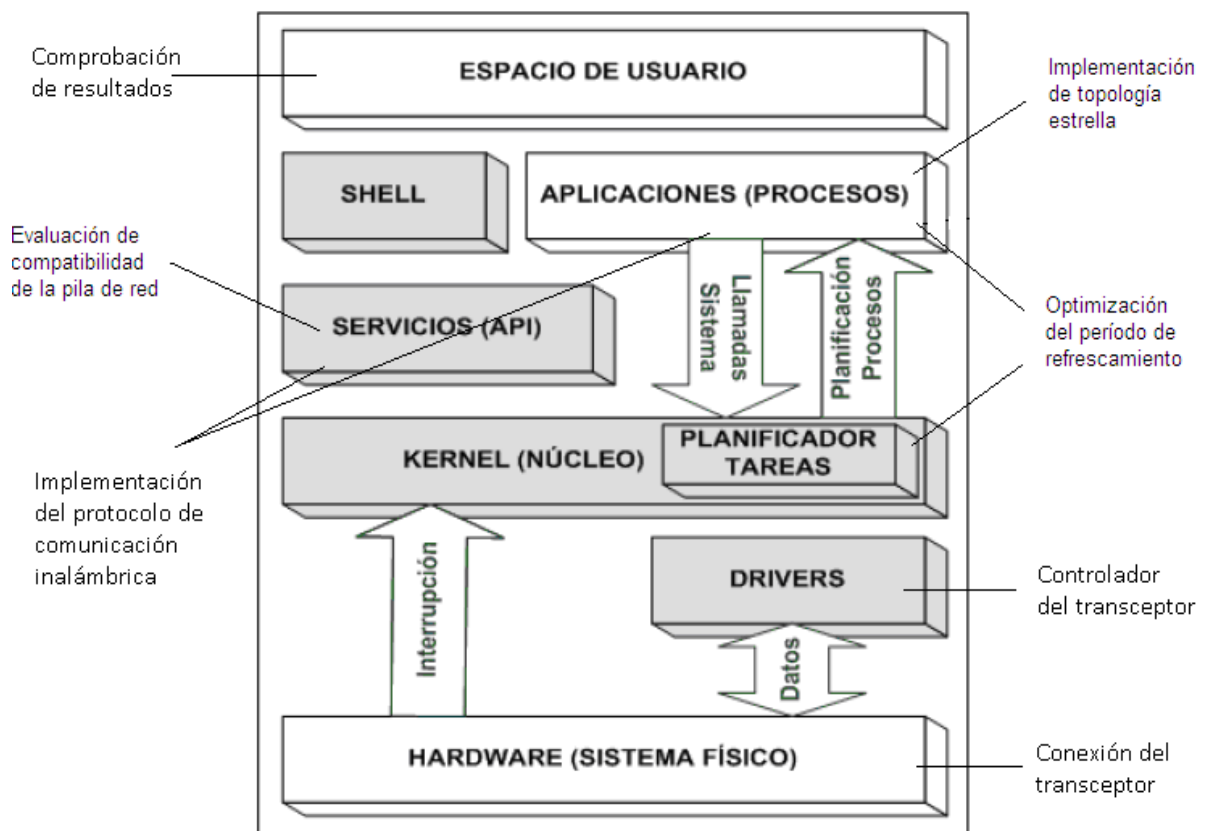


**Figura 1.1** Configuración en topología estrella [19]

Por otro lado, uno de los requisitos de sistemas de adquisición de datos ambientales es el de proveer una pronta respuesta ante una petición de recursos del sistema por parte de los módulos que lo conforman y en especial de los módulos de

comunicación. Por esta razón se debe asegurar que el sistema operativo brinde la mejor atención al transceptor en el sentido de cumplir con un mínimo requerimiento de respuesta en el tiempo en dichos casos. Para tal efecto, se deberá implementar una aplicación de programación que permita evaluar variaciones de este tiempo, teniendo en cuenta el compromiso que el RTOS tiene hacia los demás procesos en ejecución, además de la potencia consumida y la frecuencia de trabajo.

En la figura 1.2 se muestra a grandes rasgos las modificaciones e implementaciones que se pretenden realizar sobre el sistema operativo SIWA-RTOS. La imagen muestra la arquitectura del sistema operativo y sobre ella se señala los cambios que se presentarán a nivel de hardware, controladores, aplicaciones de programación, Kernel, entre otros.



**Figura 1.2** Arquitectura del sistema operativo SIWA\_RTOS [2]

A continuación se enlistan los requisitos que debe cumplir el proyecto. Con respecto al estándar IEEE 802.15.4™ [6]:

1. El sistema deberá operar bajo alguno de los canales dentro de las 3 bandas que soporta el estándar: 868MHz, 915MHz o 2450 MHz [6].
2. La implementación del protocolo deberá cumplir con las especificaciones del estándar en cuanto a:
  - Acceso y valoración del canal.
  - Recepción, rechazo y transmisión de tramas de información.
  - Formato de cada trama de información.
  - Reconocimiento de tramas.

Con respecto a la pila de protocolo de red a implementar basado en MiWi™:

- Debe soportar una red en topología estrella.
- Se debe asegurar el 90% de la integridad de la información.
- El manejo de datos a nivel de programación deberá tomar en cuenta que se trabaja sobre un microcontrolador con arquitectura PIC32MX.
- Identificación de dispositivos
- Re-sincronización de dispositivos
- Servicio de enrutamiento entre dispositivos (por ejemplo, direcciones IP)
- Modo de operación de bajo consumo
- Límite de nodos
- Operación en varios ambientes



Con respecto al sistema operativo SIWA-RTOS:

- Se debe mantener un nivel de confianza del tiempo de respuesta del procesador ante petición de recursos por parte de una tarea, mayor al 95%.
- Se debe considerar una programación anticipativa y no cooperativa ya que así fue implementado el sistema operativo.
- Por ser un sistema inalámbrico e implementado en zonas alejadas se debe mantener un bajo consumo de potencia a nivel físico y de programación

## **2 Capítulo 2: Meta y Objetivos**

### **2.1 Meta**

Realizar la integración de la administración de la tarjeta de comunicación inalámbrica MRF24J40MA junto con el sistema operativo SIWA-RTOS para operar en aplicaciones de tiempo real.

### **2.2 Objetivo general**

Integrar la administración de la tarjeta de comunicación inalámbrica MRF24J40MA dentro del sistema operativo en tiempo real SIWA-RTOS mediante la determinación de compatibilidad de la pila de red, la evaluación de la calidad de los recursos asignados y la validación funcional del resultado.

### **2.3 Objetivos específicos**

- Determinar el grado de compatibilidad de la pila de protocolo de red inalámbrica con el sistema operativo de tiempo real SIWA-RTOS, mediante la implementación de una interfaz de aplicación de programa (API) que permita la administración de las funciones de la pila desde el RTOS.
- Optimizar el periodo de refrescamiento o tick quantum de asignación de los recursos del SIWA-RTOS para el logro de la calidad de servicio de tiempo real requerido por la tarjeta MRF24J40MA con un nivel de confianza mayor al 95%.
- Ejecutar un plan de recolección de datos que permita la validación funcional del protocolo de pila de la tarjeta MRF24J40MA siendo administrada por el SIWA-RTOS mediante la implementación una red en topología estrella.

## **3 Capítulo 3: Marco Teórico**

### **3.1 Descripción del PIC32 USB Starter Kit II**

Para sistemas de bajo costo, la empresa Microchip Technology® produjo el PIC32 USB Starter Kit II. El dispositivo consiste en un kit de desarrollo basado en un microcontrolador con arquitectura PIC32MX y proporciona la funcionalidad de implementar aplicaciones que requieran comunicación USB, además de las típicas características que ofrecen los periféricos del microcontrolador y las cualidades del procesador. Para este caso, se consideran el uso de los microcontroladores PIC32MX795F512L, PIC32MX460F512L y PIC32MX360F512L. [14,15]

La familia PIC32MX constituye la última generación en microcontroladores que la empresa Microchip ha sacado al mercado, aportando varias características y mejorando las de las familias anteriores, entre las cuales se puede mencionar el uso de buses de 32 bits de donde se origina su nombre. En general, PIC32MX constituye una reestructuración de la arquitectura interna de los microcontrolador de las familias anteriores en 4 diferentes bloques: el procesador, un sistema de memoria, un sistema de integración y los periféricos [14].

### **3.2 Descripción del sistema operativo SIWA-RTOS**

El SIWA-RTOS es un sistema operativo en tiempo real desarrollado para trabajar específicamente sobre un microcontrolador con arquitectura PIC32MX y su diseño completo consiste en una reducción sustancial del sistema operativo del código fuente que implementa al Free-RTOS y aún más importante, una disminución del consumo de potencia requerido para la ejecución de las tareas de un 50% con respecto al Free-RTOS [2].

Debido a que SIWA-RTOS es un sistema descendiente del Free-RTOS, presenta gran parte de sus características y por lo tanto constituye un micro Kernel de tiempo real con propósito multitarea. Para asegurar esta particularidad, el sistema operativo implementa el modelo de planificación llamado Round Robin, que define un espacio de tiempo específico y periódico llamado quantum, en el que cada tarea se “adueña” del procesador. Al cabo de dicho periodo, el planificador es capaz de intercambiar la ejecución de una tarea por otra para que esta en su lugar se apropie de los recursos del procesador. A esto se le llama cualidad apropiativa de un sistema operativo y asegura un uso repartido y eficiente del procesador.

Por otro lado, el Kernel de SIWA-RTOS está basado en la priorización de las diferentes tareas. Esto obliga al calendarizador a ejecutar siempre, al final de cada quantum, la tarea de mayor prioridad, apropiándose del procesador por encima de las de menor prioridad. A esto se le llama cualidad anticipativa de un sistema operativo. Para que una tarea de muy alta prioridad no se adueñe del procesador eternamente, se definen 4 diferentes estados en los que se puede encontrar una tarea: bloqueada, suspendida, lista y en ejecución. A nivel de programación existen varias formas de situar una tarea en cualquiera de estos estados. De esta manera una tarea de alta prioridad se puede, por ejemplo, bloquear, permitiendo que tareas de menor prioridad tengan acceso al procesador.

SIWA-RTOS fue diseñado para sistemas embebidos cuyas aplicaciones de tiempo real requieran de características de código portable, sencillo y multifuncional. Por esta razón, el código que lo conforma, desarrollado en lenguaje C, es simple y no muy extenso. Tres archivos fuente componen el Kernel, mientras que un archivo único está destinado al manejo de la memoria principal y otro último, propio de la arquitectura del microcontrolador para el manejo de interrupciones, controladores de dispositivos de entrada y salida, etc.

Para agregarle más funcionalidad al sistema operativo, este ofrece otros atributos como la comunicación y sincronización entre procesos, el manejo de recursos compartidos y la creación de tareas periódicas y aperiódicas. Además se cuenta con una tarea de prioridad mínima para los instantes en que no se ejecuta ninguna tarea. Este es uno de los aspectos principales que diferencian a SIWA-RTOS de Free-RTOS, ya que es en esta tarea, llamada *Idle\_Task* en la que se ejecuta el modo de bajo consumo del microcontrolador. Esto constituye una particularidad muy importante al lograr reducir considerablemente el consumo de potencia del sistema en general.

El sistema operativo, por ser de código abierto, también permite la creación de controladores de dispositivos periféricos (comúnmente llamados drivers) por si se desea implementar aplicaciones sensibles a eventos externos o que simplemente necesiten comunicarse con otros dispositivos o sistemas, logrando además obtener información que debe ser manipulada por medio de las tareas del RTOS.

Por estar directamente ligado al Free-RTOS, SIWA-RTOS también fue desarrollado como código abierto bajo licencia GPL.

### **3.3 Redes inalámbricas de área personal de bajo costo (LR-WPAN)**

**[18]**

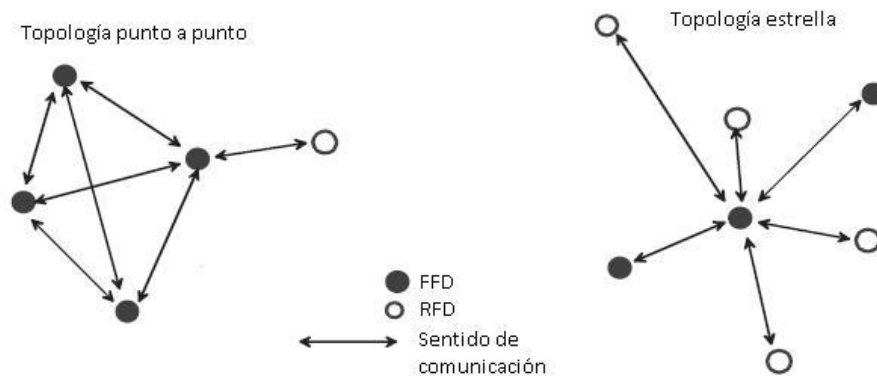
Existen redes inalámbricas destinadas a aplicaciones que se concentran en áreas relativamente pequeñas por lo que su alcance es de 10 a 100 m aproximadamente. De la misma forma, las tasas de transmisión de la información no son muy elevadas. Este tipo de redes reciben el nombre de redes inalámbricas de área personal.

Igualmente, se puede dar el caso, dependiendo de la aplicación, en el que el bajo costo y consumo de potencia, así como la baja velocidad de transmisión de 20 a 250

kpbs en la mayoría de los casos, sean requisitos de gran importancia en el diseño. A este tipo de redes se les llama redes inalámbricas de área personal de bajo costo.

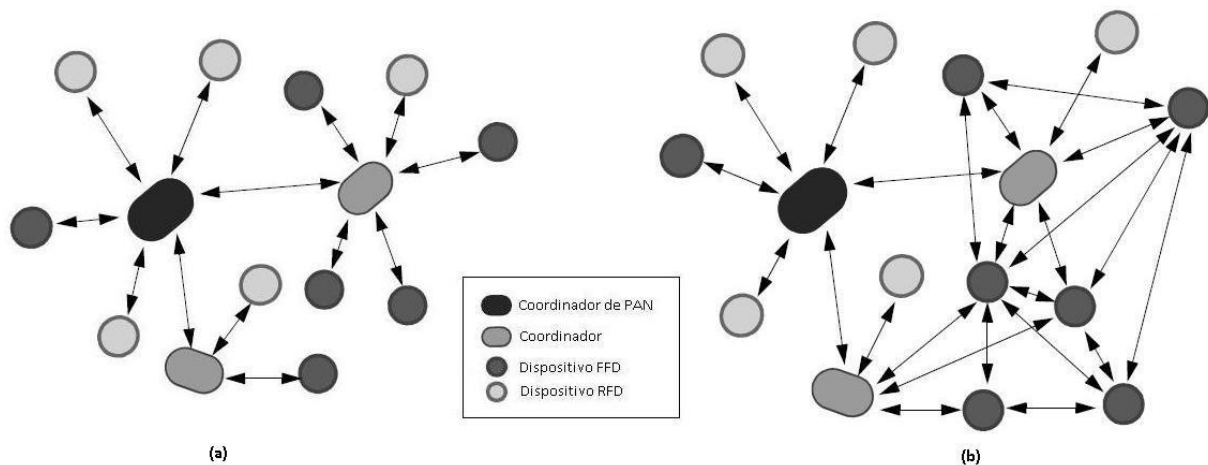
### Topologías de red

En una red personal se pueden encontrar diferentes modelos de red. La figura 3.3 muestra las topologías de red más sencillas que se pueden implementar. A la izquierda se puede apreciar una topología de conexiones punto a punto, en donde un nodo se puede comunicar con un nodo a la vez. Por otro lado, a la derecha se muestra la topología de red en estrella, administrada por un nodo coordinador, denotado en la figura por el nodo del centro. En esta última los nodos secundarios solo se pueden comunicar con el principal.



**Figura 3.1** Topologías de punto a punto y estrella [6]

La figura 3.2 a y b muestra topologías más complejas que se pueden formar a partir de las anteriores, a partir de las anteriores. Estas tienen la característica de de cubrir un área mucho mayor que las anteriores.



**Figura 3.2** Topología de árbol (a) y malla (b) [19]

## Protocolos de comunicación inalámbrica

Para el establecimiento y ordenamiento de las comunicaciones dentro de la red, se implementan protocolos de comunicación inalámbrica. Específicamente, los protocolos para redes personales, poseen la característica de ser relativamente sencillos y de poco tamaño ya que en general no manejan gran cantidad de información como lo hacen las redes inalámbricas de área local (WLAN). Además, como se mencionó anteriormente, en la mayoría de las redes personales, el bajo costo y consumo de potencia son requisitos.

### 3.4 Protocolo de comunicación inalámbrica IEEE 802.15.4™ [6,17]

La IEEE dentro de sus grupos de trabajo ha desarrollado varios estándares destinados a las WPAN. Se trata del IEEE 802.15 que se divide en 5 grupos:

- IEEE 802.15.1: desarrolla un estándar basado en el protocolo Bluetooth.
- IEEE 802.15.2 establece la coexistencia entre una WLAN y una WPAN.
- IEEE 802.15.3: se especializa en redes personales de alta velocidad (11-55Mbps).

- IEEE 802.15.4: desarrolló un estándar para aplicaciones de baja velocidad (20-250kbps).
- IEEE 802.15.5: desarrolla un estándar para redes personales con topología de malla.

El estándar IEEE 802.15.4<sup>TM</sup> fue destinado a aquellas redes inalámbricas de área personal de bajo costo, bajo consumo de potencia y que requieran bajas tasas de transmisión (de 20 a 250 Kbps) debido al corto rango de dicha aplicación. Aún así, el estándar permite ampliar el alcance intercambiando el aumento de la distancia por una reducción en la velocidad de transmisión, conservando la funcionalidad requerida para sistemas empotrados.

El protocolo de red soporta las topologías estrella y de punto a punto. Esta última con la posibilidad de expandirse a topología de malla ya que posee patrones arbitrarios de conexión y su límite de expansión es únicamente la distancia entre nodos. La topología estrella brinda, sobre todo, independencia entre redes cercanas. Se especifican dos tipos de dispositivos como los componentes básicos que pueden existir dentro de una red: dispositivos de funcionalidad completa (FFD) y dispositivos de funcionalidad reducida (RFD). El primero tendrá capacidad de operar en tres modos diferentes, actuando como coordinador general de la red, coordinador de subred o un simple dispositivo. Un RFD posee funciones muy sencillas y cortas y no maneja gran cantidad de datos. Cada uno de los dispositivos FFD o RFD, posee una identificación única de 64 bits que lo diferencia de los demás, además de una dirección opcional de 16 bits propia de cada uno.

IEEE 802.15.4 está basado en el modelo de capas para interconexión de sistemas abiertos (OSI), aunque únicamente define las primeras dos, la capa física y la de control de acceso al medio (MAC), dejando al usuario la implementación del servicio a las demás capas superiores. Existen protocolos como ZigBee<sup>TM</sup>,



WirelessHART, MiWi™ y MiWi™ P2P que complementan al estándar 802.15.4 brindando la interconexión con las demás capas.

En la capa física, se realiza la transmisión y recepción de datos de protocolo a nivel físico (PPDU) a través del transceptor RF. También se pueden encontrar información importante sobre la gestión de la capa como detección de energía (ED), calidad del enlace (LQI), selección de canal, evaluación de canal libre (CCA). La siguiente tabla muestra la frecuencia del canal de operación a la que opera el estándar según la localización geográfica:

**Tabla 3.1** Bandas de frecuencias del estándar 802.15.4 [6]

<b>Banda de frecuencias (MHz)</b>	<b>Canales</b>	<b>Utilización</b>
868,0-868,6	3	Europa
902,0 – 928,0	30	Estados Unidos
2400,0 – 2483,5	16 (o 14 cruzados)	Resto del Mundo
500,0 y 3100,0 – 10600,0	16	UWB (varía por región)

La subcapa de control de acceso al medio, MAC, provee acceso a la capa física para todo tipo de transferencia. En este nivel se habilita la transmisión y recepción de datos de tipo MAC a través de los servicios de la capa física. Otros atributos de esta capa son el control de flujo de tramas de datos, acceso al canal, asociación entre dispositivos, validación de tramas, garantía de espacios de tiempo para conexión y manejo de balizas. Además provee servicios de seguridad para la protección de la información y mecanismos para mejorar la probabilidad de transmisiones exitosas como el algoritmo para evitar la colisión de datos ante múltiples accesos (CSMA-CA) o ALOHA en el caso de UWB y la entrega de señales de reconocimiento de trama de datos.

Siguiendo con el modelo de capas OSI, cada capa del protocolo le agrega información de control, tratando de conservar el mayor nivel de simplicidad. Esto mejora el rendimiento de una transferencia ante canales ruidosos. En 802.15.4 se

soportan 4 tipos de estructuras o tramas de datos: baliza, usada para sincronización de dispositivos, de datos, de reconocimiento para confirmar recepciones y de comandos usada por la capa de enlace de datos para el control de flujo de transferencias.

### **3.5 Pila de protocolo de red inalámbrica MiWi™**

La pila de protocolo de redes inalámbricas MiWi™ fue producida por Microchip Technology® especialmente para aplicaciones pequeñas de poco costo donde el mínimo consumo de potencia es un requisito esencial. Consiste, por ende, en una serie de aplicaciones de interfaz programables (API), con código simple en lenguaje C, que satisface las necesidades de cualquier red de área personal de corto alcance a velocidades de hasta 250 kbps [19].

Este es uno de los protocolos que complementan al estándar IEEE 802.15.4, al crear aplicaciones que facilitan los servicios a capas superiores a la de enlace de datos. Basado en dicho estándar, el protocolo también contempla los mismos tipos de dispositivos estableciendo 3 niveles basados en sus funciones: un dispositivo de tipo FFD coordinador principal de la red, un coordinador secundario opcional de tipo FFD y un dispositivo terminal que realiza monitoreo o funciones de control. Además, en MiWi™ también se utilizan las identificaciones propias de cada dispositivo.

El diseño del protocolo permite una capacidad máxima de 1024 nodos en una misma red, en donde cada coordinador es capaz de tener 127 dispositivos bajo control. Por esta razón, MiWi™ soporta la implementación de las topologías estrella, punto a punto, de malla y de árbol. También se permite la habilitación de seguridad para la protección de la información, aunque no permite el uso de balizas.

A continuación se presentan algunas funcionalidades del protocolo:

- Creación de una red independiente
- Conexión a una red
- Búsqueda de redes disponibles
- Búsqueda de dispositivos específicos
- Creación de conexiones indirectas entre 2 dispositivos
- Protocolo de seguridad
- Trasmisión y recepción de información

MiWi™ opera sobre el espectro de 2.4GHz (16 canales disponibles) y fue diseñado para trabajar con el transceptor MRF24J40MA sobre arquitecturas como PIC16, PIC18, PIC24 y dsPIC33. Aunque es un código propietario de Microchip, es gratuito y no requiere ningún tipo de licencias.

### **3.6 Protocolo de comunicación punto a punto MiWi™ P2P**

Otra variante de complemento para el estándar IEEE 802.15.4 es el protocolo de comunicación MiWi™ P2P, muy ligado a la pila de protocolo MiWi™, pero destinado a conexiones punto a punto. Además presenta algunas otras diferencias, sobre todo a nivel de programación del código (también en lenguaje C), que permiten un protocolo más flexible y entendible, conservando las características de bajo costo, mínimo consumo, alcance de hasta 100m y velocidad de hasta 250 kbps [10].

De igual manera se reconocen los mismos 3 dispositivos con los mismos tipos de identificación única (64 y 16 bits). También se trabaja bajo el espectro de los 2.4GHz y soporta las topologías punto a punto y estrella, aunque se debe recordar que la topología punto a punto es expandible a otras más complejas.

Una de las características más importantes y tal vez la mayor diferencia con respecto a MiWi™ es que, siguiendo más de cerca al modelo de capas OSI, MiWi™ P2P fue desarrollado igualmente a nivel de capas por lo que en el código se pueden encontrar funciones dedicadas al servicio de la capa física, funciones a nivel de control de acceso al medio y como completar el estándar 802.15.4, se implementan funciones de nivel de la capa de aplicación.

Por otro lado, este protocolo P2P conserva características propias y únicas con respecto a los demás protocolos. Aún cuando se puede decir que se reduce la funcionalidad con respecto otros protocolos, igualmente se puede afirmar que se ofrecen, al usuario, numerosas ventajas, debido a la reducción considerable de código, su flexibilidad y facilidad de manejo. MiWi™ P2P presenta las siguientes características.

1. Código reducido
2. Reduce aún más el consumo de energía al habilitar el modo de bajo consumo en nodos RFD
3. Mensajes indirectos
4. Protocolo de seguridad
5. Búsqueda de redes disponibles
6. Conexión a una red independiente
7. Exploración de energía para determinar canales con poco ruido electromagnético
8. Capacidad para cambiar de canal de operación si se detecta mucha interferencia en el actual

### 3.7 Transceptores para comunicación en RF

En las redes inalámbricas, la transmisión y recepción de la información se realiza a través de un transceptor. Este se encarga de modular o demodular los datos y dejarlos listos para ser manipulados digitalmente. En la mayoría de las WPAN se trabaja sobre el espectro de radiofrecuencia y por ende se utilizan transceptores de radiofrecuencia. Esto se debe al largo alcance y alta velocidad de transmisión que poseen portadoras en este espectro. Además, existen espacios comerciales dentro del espectro de radiofrecuencia.

Por esta razón, es conveniente que el dispositivo tenga ciertas características particulares para ser aplicado en redes personales:

- Eficiencia energética o diferentes estados de operación (bajo consumo, transmisión, recepción)
- Varios canales de operación
- Bajas emisiones fuera de banda
- Alta sensibilidad
- Detección de portadora y manejo del valor RSSI (valor que representa un estimado de la potencia recibida dentro de un canal en las bandas de IEEE 802.15.)
- Largo alcance
- Bajo costo
- Bajo consumo de potencia, etc.

## **4 Capítulo 4: Procedimiento Metodológico**

### **4.1 Métodos y actividades**

#### **4.1.1 Caracterizar los requerimientos de SIWA-RTOS como sistema operativo de tiempo real**

Antes de comenzar a implementar cualquier tipo de aplicación se debe conocer a fondo el sistema operativo sobre el que se va a trabajar, SIWA-RTOS. Se trata de detallar cuáles son los aspectos a nivel de programación, rendimiento y consumo de potencia que deben ser considerados a la hora de desarrollar cualquier código sobre él, logrando que el sistema operativo conserve las cualidades para las que fue implementado. También se busca determinar cuáles recursos propios de SIWA utiliza un nodo CRTECMOTE completamente funcional; y cuáles no. Por esta razón se realizó una completa investigación sobre la estructura interna para especificar los parámetros más importantes que determinan el funcionamiento del sistema. Estos parámetros deben ser tomados en cuenta para que una o varias tareas simultáneas de tiempo real puedan ejecutarse sin interrupción y de forma correcta.

Teniendo en cuenta la ligadura entre Free-RTOS y SIWA-RTOS, la investigación se basó en primera instancia en el manual del primero para investigar a fondo la forma en que estos sistemas operativos manejan todo lo referente al Kernel, controladores y módulos que lo componen [3].

A partir de [2] este documento se logró determinar la nueva estructura del sistema operativo, su funcionamiento con la arquitectura de un microcontrolador PIC32MX y las particularidades que lo diferencian de su predecesor.

#### **4.1.2 Comparación de los transceptores disponibles en el mercado y selección del que mejor se adapte a los requerimientos del proyecto**

En el capítulo 3 se establecieron los requisitos que debe tener un transceptor de radiofrecuencia que sea aplicable a una red inalámbrica de área personal. Basado en estos criterios y sumados a los atributos propios que aportaron los dispositivos encontrados en el mercado, se realizó una comparación para determinar el transceptor que mejor se ajusta a los requerimientos de un nodo CRTECMOTE, teniendo en cuenta el tipo de datos a manejar dentro del sistema, el ambiente de operación (inicialmente bosques o ambientes semejantes) y el manejo del dispositivo.

Posteriormente se escogió el transceptor a utilizar en el módulo de comunicaciones del CRTECMOTE. Se hizo un estudio detallado de las especificaciones del dispositivo y del microcontrolador, para lograr la más óptima administración del transceptor por parte del sistema operativo para trabajar dentro del nodo de captura de datos.

#### **4.1.3 Determinar los requisitos a nivel de red para la implementación de una topología estrella**

Como paso previo a la selección del protocolo de comunicaciones para la red inalámbrica a implementar, se realizó un análisis sobre las características de una topología estrella, en cuanto a las especificaciones y necesidades de los dispositivos que lo componen, así como su nivel de funcionalidad dentro de la red.

#### **4.1.4 Selección y migración del protocolo de comunicaciones inalámbricas a utilizar, al sistema operativo SIWA-RTOS**

Una vez estudiada a fondo la topología estrella, se procedió a la selección del protocolo de comunicaciones, buscando en primer lugar, la característica de código abierto del protocolo y modificable, ya que de lo contrario se reduciría la funcionalidad de los nodos CRTECMOTE a las aplicaciones para las que fue diseñado el protocolo. Enseguida se consideró la portabilidad del protocolo para trabajar sobre diferentes arquitecturas.

Por último se tomo en cuenta el hecho de que la red personal debería coexistir junto con otras tareas sobre SIWA-RTOS. Debido a esto, para la migración del código del protocolo escogido, se realizaron algunos cambios tanto a nivel del sistema operativo como del protocolo.

#### **4.1.5 Implementación de una topología estrella sobre un nodo**

Como paso siguiente, luego de obtener un comportamiento funcional de la red personal implementada sobre SIWA-RTOS, se procedió con el desarrollo de la topología estrella, teniendo en cuenta los requisitos de red establecidos anteriormente. De la misma forma se implementaron las especificaciones que demanda la red de sensores para la que fueron diseñados los nodos CRTECMOTE.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Los requisitos que demanda la red personal fueron establecidos por el director proyecto, Ing. Johan Carvajal Godínez.



#### **4.1.6 Realizar un banco de pruebas que permita caracterizar al nuevo sistema implementado**

Al obtener una red inalámbrica de área personal funcionando sobre el sistema operativo SIWA-RTOS se realizó un procedimiento a nivel de laboratorio para obtener mediciones y parámetros de todo el sistema en general trabajando como una unidad. A partir del análisis de los datos obtenidos, se pudo caracterizar la operación de la red personal implementada ante diferentes ambientes de trabajo. Asimismo, se determinaron algunas características de los nodos CRTECMOTE según su funcionalidad dentro de la red.

#### **4.1.7 Determinar el funcionamiento del módulo de comunicaciones inalámbricas ante variación del periodo de refrescamiento (tick quantum)**

Finalmente, se realizaron pruebas sobre el sistema completo variando el quantum o periodo de refrescamiento para determinar el efecto que este tiene sobre la operación de la red implementada. El objetivo fue encontrar el valor óptimo de este parámetro que permitiera a su vez el mejor rendimiento del módulo de comunicaciones.

## **5 Capítulo 5: Descripción Detallada de la Solución**

La obtención de una red inalámbrica de área personal operando junto con un sistema operativo de tiempo real sobre un microcontrolador PIC32MX, se dividió en varias etapas. En primer lugar se realizó una etapa investigativa de las partes que componen al sistema, a nivel físico y de programación. En seguida, se procedió a la etapa de diseño en la que se determinaron los requisitos para la implementación de una red personal. Una tercera etapa consistió en la implementación y obtención del sistema deseado. Finalmente se pasó al aspecto evaluativo y analítico para caracterizar el sistema completo.

### **5.1 Caracterización del tipo de tareas o procesos para un nodo CRTECMOTE compatibles con SIWA-RTOS**

SIWA-RTOS es un sistema operativo de tiempo real que opera sobre un microcontrolador PIC32MX; por tanto, requiere una forma de programación específica, ya que tiene una manera de manejar procesos, diferente a un microcontrolador o a otros sistemas operativos. Además, el papel de las prioridades, la comunicación y sincronización entre procesos, la priorización de las interrupciones y el manejo de memoria juegan un papel importante en el diseño de aplicaciones sobre SIWA. Por otro lado, se deben determinar los módulos periféricos disponibles en el microcontrolador, para no afectar al funcionamiento del sistema operativo.

Esta primera parte de la solución consistió en determinar el nivel en el que las características anteriores pueden influir sobre futuras aplicaciones de un CRTECMOTE. En primera instancia se consideró que un nodo de captura utilizando SIWA-RTOS, contempla el uso de varios canales del módulo ADC del microcontrolador, así como la implementación de varias tareas de monitoreo y de comunicación entre nodos. Lo que se buscó fue la forma de utilizar las prioridades de

manera que todas las tareas funcionen correctamente y no se vean afectadas por las cualidades apropiativa y anticipativa del sistema operativo.

Seguidamente, teniendo en cuenta que la información recaudada por un nodo de medición de datos debe ser enviada a otro nodo o a una estación central, se investigó todo lo referente a la comunicación de datos o banderas entre procesos para que sea una sola tarea, la encargada de realizar las transmisiones de los datos capturados por las demás tareas. En este sentido, a partir del manual de FreeRTOS, se investigó sobre el manejo de colas de datos, que soportan tipos y tamaños variables a nivel de programación. Esto con el fin de almacenar datos que diferentes tareas pueden necesitar.

Una recepción de datos a través del transceptor y en ciertos casos, una transmisión, son eventos que deben ser atendidos inmediatamente, por lo que son necesarias las interrupciones. De la misma manera que para comunicación entre procesos, se estudió el manejo de interrupciones por parte del sistema operativo. Con esta investigación se buscó determinar el nivel de prioridad y sub-prioridad (características propias del microcontrolador) que deben tener las rutinas de interrupción implementadas en SIWA. La caracterización de tareas para CRTECMOTE terminó con el estudio sobre el manejo del procesador y de memoria por parte de SIWA-RTOS.

## **5.2 Diseño del módulo de comunicación inalámbrica de un nodo CRTECMOTE**

La etapa de diseño de la red inalámbrica personal trabajando sobre SIWA-RTOS, consistió principalmente en la selección de las partes físicas y de programación necesarias para su implementación.

Al existir varios transceptores comerciales con diferentes atributos, se realizó un análisis comparativo de las especificaciones técnicas de algunos de ellos para determinar el dispositivo que mejor cumple con los requisitos de una red personal para nodos CRTECMOTE. El estudio abarcó parámetros como banda de operación, potencia de transmisión, sensibilidad de recepción, tasas de transmisión, consumo de potencia, tipo de modulación, soporte del estándar IEEE 802.15.4, tipo de interfaz, costo entre otros. La tabla de la figura 5.1, muestra los resultados.

**Tabla 5.1** Cuadro comparativo de transceptores de radiofrecuencia [1,9]

Transceptor	MRF24J40	MRF49XA	CC1000	TR1000	Chipcon CC2420
<b>Banda</b>	2.4GHz	433, 868 y 915 MHz	300 a 1000 MHZ	916.5 MHz	2.4GHz
<b>Potencia TX</b>	0 dBm	7 dBm	-20 a 10 dBm	1.5 dBm	-25 a 0 dBm
<b>Sensibilidad</b>	-94 dBm	-110 dBm	-110 dBm	-106 dBm	-95 dBm
<b>IEEE 802.15.4</b>	Si	No	No	No	Si
<b>MiWi</b>	Si	Si	No	No	-
<b>Modulación</b>	O-QPSK	FSK	FSK - OOK	OOK - ASK	O-QPSK
<b>Valor RSSI</b>	Si	Si	Si	No	O-QPSK
<b>Consumo</b>	Rx: 19mA Tx: 23 mA Sleep: 2 $\mu$ A	Rx: 11 mA Tx: 15 mA Sleep: 0.3 $\mu$ A	Rx: 7.4 mA Tx: 10.4 Sleep:	Rx: 3 mA Tx: 12 mA Sleep: 0.7 $\mu$ A	Rx: 19.7 mA Tx: 17.4 mA Sleep:
<b>Tasa de TX</b>	250 Kbps	115.2 a 256 kbps	76.8 kBaud	115.2 kbps	250 kbps
<b>Costo</b>	18.95 \$	40 \$	-	13.57 \$	45\$/5u

De la tabla anterior se determinó que el mejor dispositivo de radiofrecuencia que cumple con los requisitos de los nodos CRTECMOTE es el MRF49XA, producido por la empresa Microchip Technology Inc. Este presenta el menor consumo de corriente en recepción y transmisión, la mayor velocidad de transmisión y sensibilidad. Sin embargo, el director del proyecto, Ing. Johan Carvajal G., sugirió la utilización del transceptor MRF24J40MA, para ser utilizado en el proyecto. Esto se debió al bajo costo por unidad y al soporte que tiene el dispositivo hacia el protocolo MiWi™, el

cual posee la característica de código abierto y es por tanto compatible con el estándar IEEE 802.15.4 dedicado a redes personales de bajo costo.

La interfaz del transceptor utiliza el protocolo SPI, por lo que se procedió a la creación de 3 funciones dedicadas al manejo apropiado del módulo de puerto SPI del microcontrolador PIC32MX. Se trata de las funciones de inicialización del módulo, transmisión y recepción de datos. Para estas funciones se tomó en cuenta las siguientes características que requiere el transceptor para establecer una interfaz:

- Se transfieren datos de 8 bits
- Máxima frecuencia de operación: 2 MHz
- Polaridad y fase de la señal de reloj: modo 0,0
- Utiliza la característica de “interrupción en cambio” del microcontrolador (específicamente INT1) para indicar una recepción, final de transmisión, salir del modo dormido, entre otras.
- Ocupa una señal de RESET para reiniciar el dispositivo y otra de WAKE para salir de modo “dormido”

El MRF24J40MA maneja aproximadamente unos 100 registros de control y almacenamiento que pueden tener direcciones largas de 10 bits o cortas de 6 bits. Estos registros son los encargados de la administración eficiente del transceptor. Por ejemplo, a través de uno de estos registros se determina el origen de interrupciones habilitadas. El acceso a ellos se realiza a través de los servicios de la capa física del protocolo a utilizar. Este punto se detalla más adelante en la sección 5.3.1.

De esta manera, la selección del protocolo de comunicaciones a migrar, se redujo a dos posibles: MiWi™ y MiWi™ P2P. Ambos cumplen con el requisito establecido anteriormente de crear una red en topología estrella para los nodos CRTECMOTE. Sin embargo, el primero también contempla el modelo de red de árbol y en malla. Por otro lado, el segundo fue diseñado para conexiones punto a punto.

El estudio realizado sobre ambos demuestra que los dos poseen la misma implementación de la capa física pero no así de la de control de acceso al medio. Al ser ambos complemento del estándar IEEE 802.15.4, ofrecen los servicios de algunas de las capas superiores aunque bajo diseños diferentes. De la misma forma, los dos protocolos fueron desarrollados mediante la creación de una interfaz de aplicación de programa y su código abierto permite su modificación.

Una diferencia muy importante entre estos 2 protocolos y que marcó el punto de selección de uno de ellos, fue el hecho de que MiWi™ P2P fue programado a nivel de capas, es decir, se puede apreciar fácilmente los límites de una y el comienzo de la otra. Específicamente el protocolo provee la programación de las capas física, MAC y de aplicación. En la primera, se ofrecen los servicios de acceso y control del transceptor, a través del cual se puede obtener información sobre la gestión de este nivel de red. Luego, en la capa de acceso al medio, MiWi P2P presenta atributos como control de la potencia, selección del canal, manejo de los modos de operación del transceptor, valoración del canal, direccionamiento y control de flujo de la trama de datos en transmisión y recepción. Por último, en la capa de aplicación, este protocolo permite al usuario el control de la información que circula por la red y de la red misma.

En el protocolo MiWi™, aunque se proveen muchos de estos servicios, no se distingue esta demarcación de las capas de red. Por esta programación modular y sencilla, sumada al bajo consumo de potencia que esto implica sobre la operación del sistema operativo, se escogió MiWi™ P2P para la creación de una red en topología estrella.

### **5.3 Implementación del módulo de comunicación inalámbrica de un nodo CRTECMOTE**

Por un lado se tienen las necesidades que deben cumplirse en la implementación, propias de una red en topología estrella funcional. Por otro lado se tienen los requisitos establecidos por el director del proyecto para que la red funcione bajo las condiciones de una aplicación de los nodos CRTECMOTE. Teniendo en cuenta este compromiso, como primer paso se elaboró un análisis sobre las especificaciones a nivel de red propios de una topología estrella y de los requisitos establecidos por el director del proyecto para la implementación de la red.

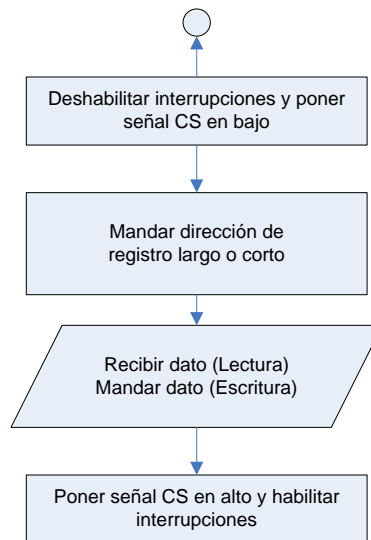
Considerando las especificaciones físicas y de programación, establecidas en la etapa de diseño, así como el transceptor y el protocolo escogidos, se procedió a la migración del protocolo sobre un nodo CRTECMOTE. El proceso consistió, en primer lugar, en la inclusión de los archivos fuente (extensión “.c”) y de cabecera (extensión “.h”) al proyecto que conforma el sistema SIWA-RTOS. En seguida se realizaron los cambios necesarios para generar la compatibilidad entre el protocolo de comunicaciones y el sistema operativo.

#### **5.3.1 Migración de la API para la capa física del protocolo de red MiWi™ P2P**

Como se menciona anteriormente, el transceptor se controla a través del acceso a sus registros. Para esto fue necesaria la implementación de 4 funciones especiales para poder leer y escribir registros cortos y largos, teniendo en cuenta que se transfieren datos de 8 bits por medio del puerto SPI. Dichas funciones siguen la secuencia del diagrama de flujo de la figura 5.1.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Para mayor detalle sobre el direccionamiento y manejo de los registros del transceptor, consultar la hoja de datos del MRF24J40 en [8].



**Figura 5.1** Diagrama de flujo para el acceso a los registros largos o cortos del MRF24J40MA

Con el fin de identificar y delimitar la capa física de las demás, el nombre de cada una de estas 4 funciones, contiene el prefijo “PHY”. En un archivo de cabecera llamado MRF24J40.h, se define la dirección de todos los registros largos y cortos del transceptor.

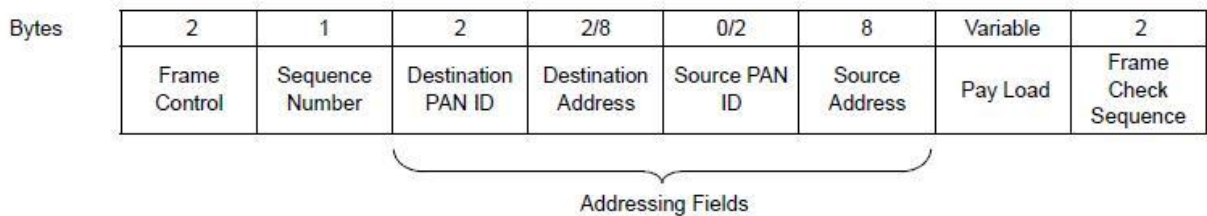
Para efectos de prueba de la capa física, se realizó el proceso de inicialización del dispositivo. Esta consiste en la especificación de parámetros de operación del transceptor, como por ejemplo la potencia de salida, el canal de operación, dirección de identificación del dispositivo, habilitación de interrupciones deseadas, habilitar el valor RSSI, especificación del tipo de nodo sobre el cual se trabaja (FFD o RFD). El dispositivo se mantiene en estado de recepción luego de la inicialización.

### **5.3.2 Migración de la API para la capa de control de acceso al medio (MAC) del protocolo de red MiWi™ P2P**

El siguiente paso fue la migración de la capa de control de acceso al medio. La API que conforma esta capa provee los siguientes servicios implementados mediante funciones:



- Transmisión de tramas: en esta función se determina la forma de transmisión de la información. Por ejemplo, se establece la estructura y el tamaño de la trama de datos a ser transmitida. Dependiendo de si se trata un comando, un dato o una simple señal de reconocimiento, se agregan los respectivos bits de configuración al encabezado de cada trama de datos. También se establece el tipo de direccionamiento a usar considerando el destino de la información que se desea transmitir. Además se incluye información sobre el dispositivo que transmite. La figura 5.2 muestra el formato de la trama de bits generada para la transmisión según el protocolo MiWi P2P.



**Figura 5.2** Formato de la trama de bits generada para la transmisión de información

- Inicialización de la capa MAC: esta función inicializa todos los registros y variables pertenecientes a la capa de acceso al medio. Asimismo realiza la inicialización del transceptor.
- Recepción de tramas: esta función verifica si se ha recibido una trama. Si este es el caso, se almacena toda la trama en una estructura de datos global para que sea manipulada por las capas superiores.
- Valoración del canal de operación: aquí se determina el nivel de interferencia electromagnética presente en el canal sobre el cual se está operando mediante el valor RSSI del canal.

- Direccionamiento alterno: los dispositivos en una red compatible con el estándar IEEE 802.15.4, tienen una dirección de identificación única de 8 bytes y una alterna de 4 bytes. Esta función establece la dirección alterna del transceptor.
- También se encuentran funciones para el cambio del modo de operación del transceptor, establecer el canal de operación y la potencia de salida.

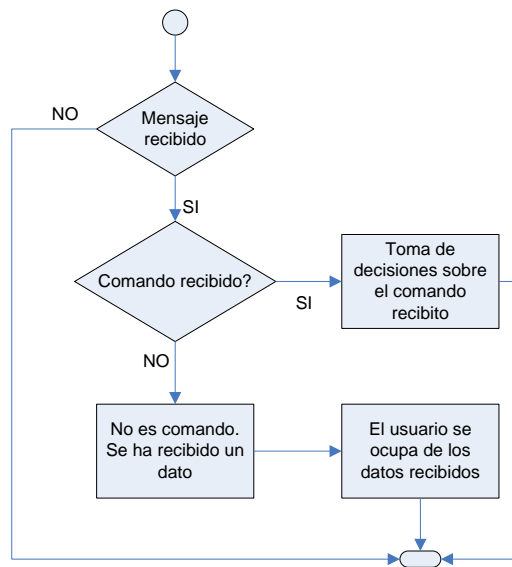
Los nombres de las funciones creadas en esta segunda capa contienen el prefijo “MiMAC” para la identificación de la capa. Todas estas funciones están incluidas en un archivo fuente llamado MRF24J40MA.c. En este archivo también se pueden localizar las funciones de la capa física. También existe un archivo de cabecera llamado MCHP\_MAC.h que contiene la estructura global de la trama recibida y otra para las tramas a transmitir. También contiene los prototipos de las funciones “MiMAC”.

### **5.3.3 Migración de la API para la capa de aplicación del protocolo de red MiWi™ P2P**

La API para la capa de aplicación constituye la interfaz más directa que tiene un usuario para crear y administrar la red personal. Las funciones de aplicación permiten a su vez el manejo de las funciones de la capa de control de acceso al medio. Esto le permite al usuario controlar los servicios de dicha capa, como el tipo de información que se envía o recibe, con la ventaja de que no se tiene que preocupar por la estructuración de las tramas ni de la compleja administración de los registros del transceptor. Basándose en el protocolo de conexión punto a punto, se implementó esta capa con las características que se detallan a continuación.

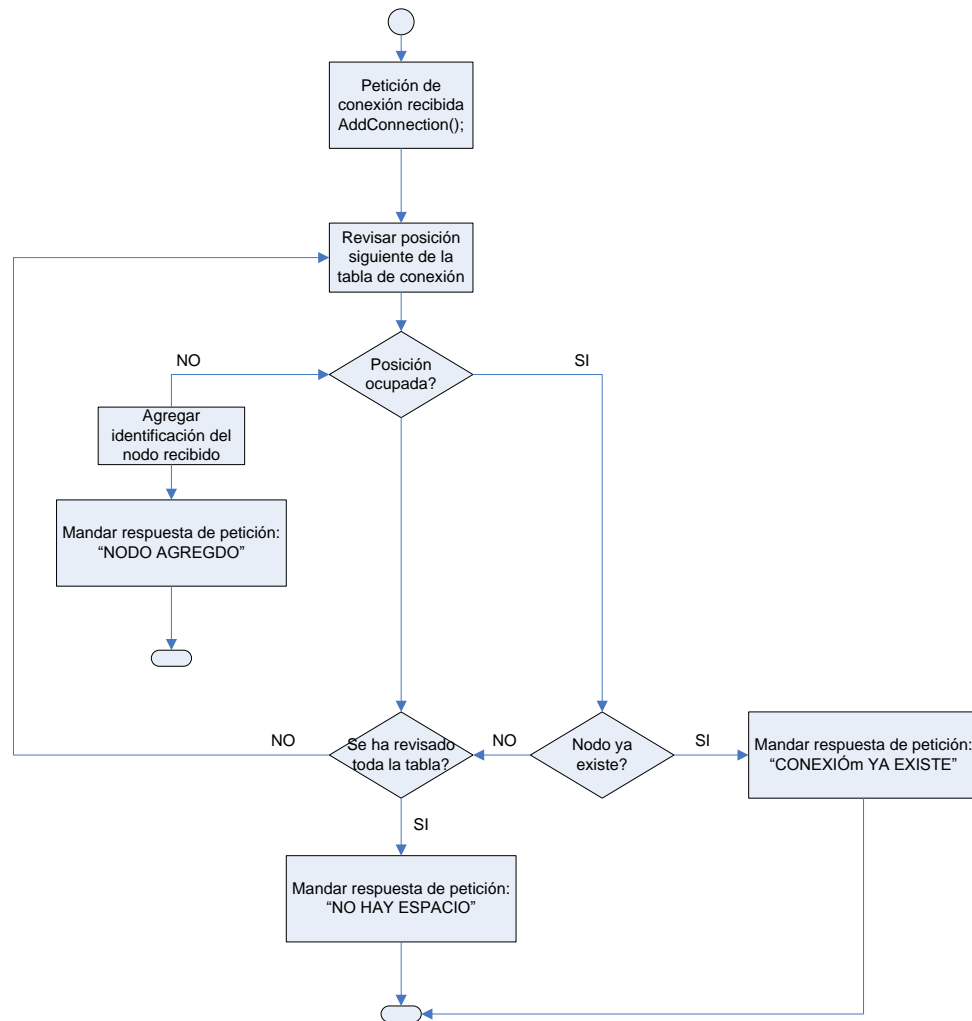
Una función principal llamada *P2Ptask*, es la encargada de mantener el funcionamiento de la red. En general, esto se logra revisando el estado de las diferentes funciones que proveen control a la red personal. Por ejemplo, se evalúa

constantemente la función de mensajes recibidos, directa e indirectamente. Es en esta función donde se toman las decisiones sobre los tipos de comandos que se reciben, entre ellos las peticiones o respuestas de conexión. En la primera, el dispositivo que la envía puede enviar o no la información propia. La respuesta de petición se realiza en función de esta información. El diagrama de flujo que sigue esta función, se muestra en la figura 5.3.



**Figura 5.3** Diagrama de flujo del funcionamiento general de la función P2Ptask

Por otro lado, es en esta capa de aplicación donde se realiza la asociación de los dispositivos a la red. Esta se realiza mediante la función llamada *Addconnection*, la cual se encarga de la administración de una tabla de conexiones, donde se almacena la información sobre los nodos que han sido agregados a la red por parte del coordinador. Igualmente se toma la decisión del tipo de respuesta de petición de conexión a enviar. La función sigue el algoritmo del diagrama de flujo de la figura 5.4.



**Figura 5.4** Diagrama de flujo del proceso de asociación de dispositivos

Ante una petición de conexión, el coordinador verifica primeramente, la cantidad de bytes que trae consigo la petición, si son menos de 3, lo que corresponde a una petición de conexión reducida, quiere decir que no contiene información del dispositivo que la envía, por lo que se asume que este dispositivo solo está en proceso de búsqueda de redes disponibles y se manda una respuesta de tipo *STATUS\_ACTIVE\_SCAN*. En seguida se determina si el nodo que realiza la petición ya está dentro de la tabla de conexiones, en cuyo caso le manda una respuesta de tipo *STATUS\_EXISTS*. Si el nodo no existe, pero sin embargo no hay espacio, se

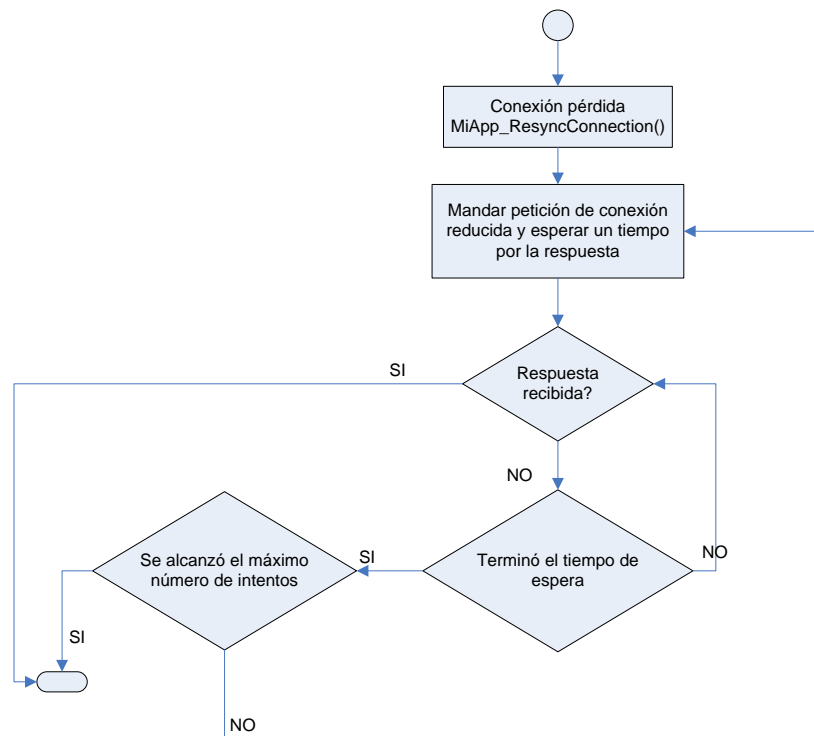
manda una respuesta de tipo *STATUS\_NOT\_ENOUGH\_SPACE*. Por último si hay espacio disponible, se agrega el nodo a la tabla y se manda una respuesta de tipo *STATUS\_SUCCESS*.

También se encuentran algunas otras particularidades de la capa:

- Inicialización del protocolo: esta función se encarga de la inicialización de toda la red, variables globales, estructuras de recepción, transmisión, de mensajes indirectos, tablas de conexiones e inicialización de la capa de acceso al medio.
- Creación de una red, realizada por el coordinador; o búsqueda de redes disponibles, realizada por un RFD. Esta última se realiza mandando peticiones de conexión reducidas, las cuales son recibidas por cualquier coordinador, el cual le envía una respuesta, indicando así la existencia de una red personal.
- Exploración de energía para determinar niveles de interferencia: se utiliza una función "MiMAC" para determinar niveles de ruido electromagnético en todos los canales. Al final se escoge el de menor interferencia.
- Transmisión de mensajes indirectos: dado que los RFD tienen la posibilidad de pasar a modo de bajo consumo dormido, estando en este estado no serían capaces de recibir datos, por lo que en estos casos, el coordinador almacena la información destinada para este RFD específico durante cierto tiempo, esperando por una petición de datos.
- Emisión de mensajes generales (en inglés: Broadcast): esta característica permite transmitir información sin especificar la dirección de destino, es decir, va dirigida hacia todos los nodos RFD de la red.

- Re-sincronización de dispositivos: si un RFD pierde conexión con la red, por ejemplo, si se sale del alcance de la red, el dispositivo intenta comunicarse de nuevo, mandando peticiones de conexión reducidas, es decir, sin la información propia del nodo RFD. El número de intentos se define en los archivos de cabecera. Esta función requirió algunas modificaciones, ya que solo soportaba el caso en el que la pérdida de conexión se daba por encontrarse fuera del alcance del coordinador. Otro inconveniente es que ante este tipo de peticiones, cualquier dispositivo, sea coordinador o no, puede contestarle al nodo que intenta re-sincronizarse.

La figura 5.5 muestra el diagrama de flujo para la re-sincronización.



**Figura 5.5** Diagrama de flujo del proceso de re-sincronización

Al igual que para las capas inferiores, los nombres de las funciones creadas en esta capa de aplicación, contienen el prefijo “MiApp” para la identificación de la capa. Las funciones están incluidas en un archivo fuente llamado P2P.c, en un archivo de cabecera llamado P2P.h; y en otro denominado MCHP\_API.h, se definen las estructuras de recepción transmisión de datos desde la capa de acceso al medio, así como los prototipos de las funciones del API de la capa de aplicación.

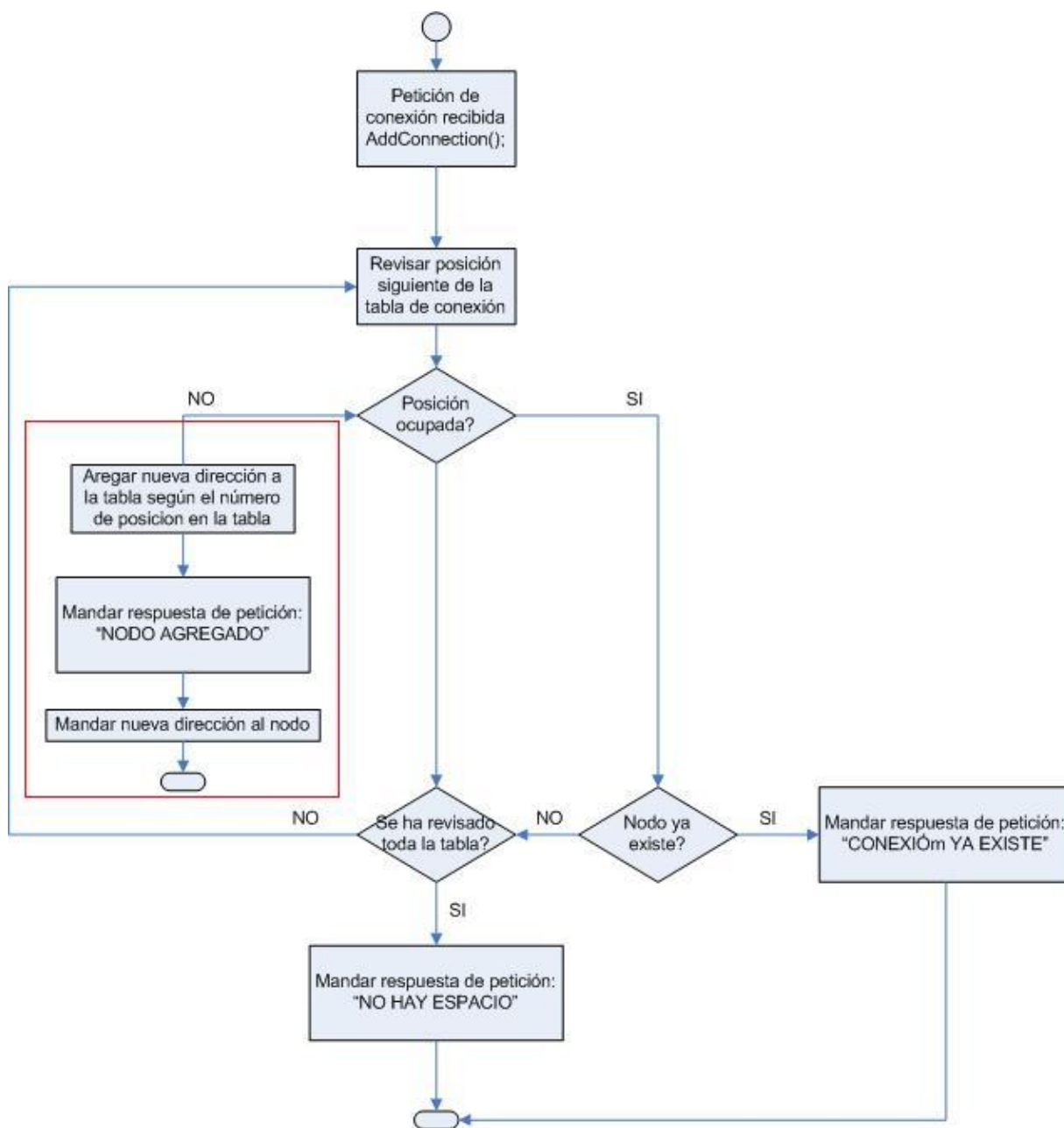
#### **5.3.4 Modificación del protocolo de red para habilitar el servicio de direccionamiento dinámico**

Para obtener una migración funcional del protocolo, teniendo en cuenta su aplicación final, se realizaron algunas modificaciones. Esto se debe a que originalmente el protocolo de conexión punto a punto fue desarrollado para aplicaciones de este tipo, por lo que no contempla por ejemplo asociaciones de varios dispositivos controlados por un solo nodo. En esta sección se detalla la modificación del protocolo de red para habilitar el servicio de direccionamiento dinámico.

Como se mencionó en secciones anteriores, los dispositivos, poseen una dirección específica y única de 8 bytes. Esto es el equivalente a las direcciones IP manejadas en los protocolos de internet. Sin embargo, dentro del protocolo MiWi™ P2P, la asignación de estas direcciones se realiza a nivel de programación, es decir, estáticamente, teniendo que reprogramar el dispositivo si se deseara cambiarla en algún momento.

Como los nodos CRTECMOTE están diseñados para distintas aplicaciones, se decidió implementar la asignación de direcciones de forma dinámica tal y como lo hace el protocolo de redes DHCP (siglas en inglés para Dynamic Host Configuration Protocol). De esta manera, luego de recibir la respuesta de conexión, cada nodo esclavo recibe una nueva dirección que lo identifica dentro de la red. Para lograr esto

se agregó y modificó código del protocolo, en varios puntos diferentes dentro del archivo fuente P2P.c, tanto para el coordinador como para los nodos. La figura 5.6 muestra el diagrama de flujo que sigue el algoritmo de asignación dinámica a nivel de la función *Addconnection*.



**Figura 5.6** Diagrama de flujo del proceso de asociación de dispositivos con la característica de direccionamiento dinámico



El proceso de asignación dinámica inicia con la programación de una misma dirección genérica en cualquier dispositivo, la cual consiste en un arreglo de 8 posiciones inicializado con un carácter hexadecimal cualquiera. Una vez que el coordinador crea la red, si se recibe una petición de conexión, se detecta la dirección genérica del solicitante. Luego se asocia el dispositivo como se describió anteriormente y se almacena en alguna posición de la tabla de conexiones la nueva dirección para el dispositivo creada según la posición en esta tabla y el arreglo general para nuevas direcciones. Finalmente se envía la nueva dirección al dispositivo como parte de la respuesta de petición de conexión “STATS\_SUCCES”.

### **5.3.5 Modificación de la función de re-sincronización**

La función original de re-sincronización cubría únicamente el caso en el que la conexión se perdía si se salía del alcance del coordinador. Sin embargo, existen casos más generales de pérdida de conexión e igual de comunes que el anterior. En esta sección se describe la modificación realizada a esta función para contemplar también la situación en la que, por alguna razón, el coordinador debe reiniciarse o ha cambiado el canal de operación. Si este es el caso, se reinicia la tabla de conexiones y desaparecen todos los nodos agregados, ocasionando pérdida de conexión del RFD.

Para solucionar este inconveniente, se modificó el código de re-sincronización para que, en cada intento, se realice el proceso de asociación de nodo, o sea, mandar una petición de conexión completa y recibir la respectiva respuesta de éxito. De esta forma se agrega nuevamente el nodo a la red y mediante el algoritmo de direccionamiento dinámico, se le asigna una nueva dirección al dispositivo. También se eliminó el número máximo de intentos y se agregó una exploración de todos los canales para contemplar el caso en el que el coordinador simplemente cambió de canal de operación. El algoritmo se muestra en la figura 5.7.

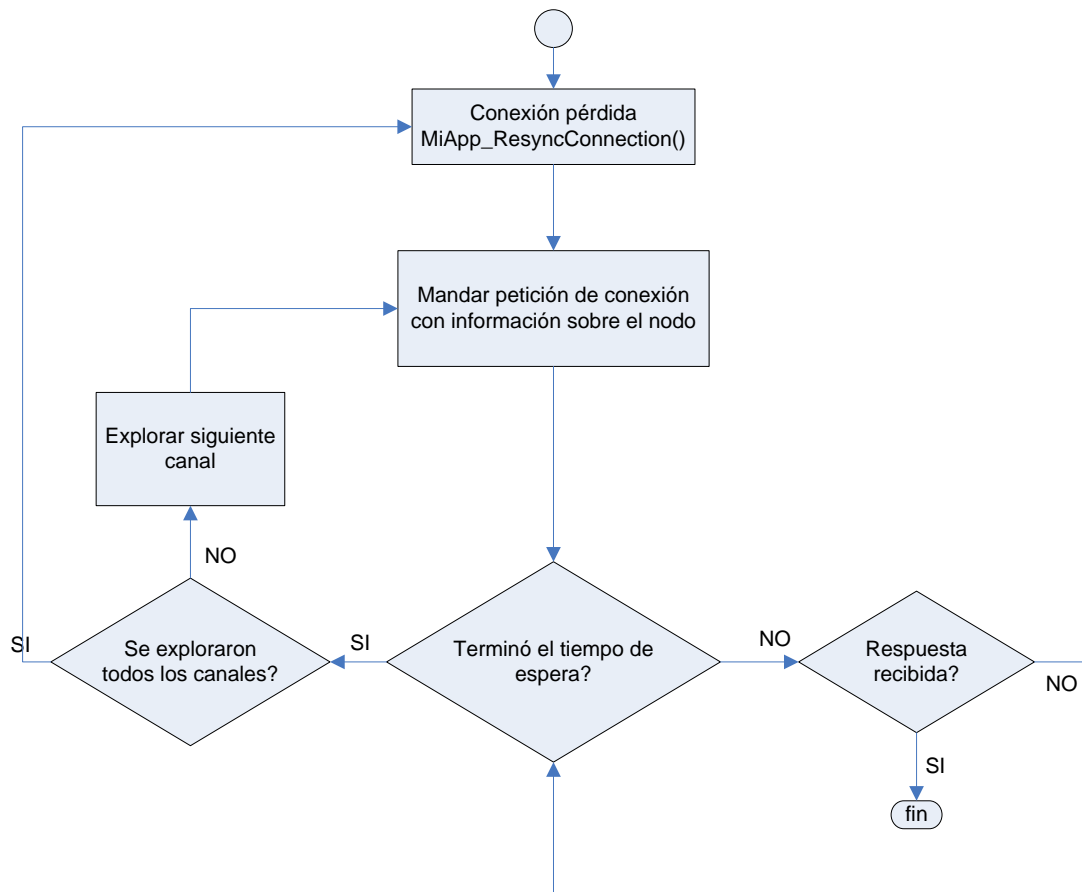


Figura 5.7 Diagrama de flujo del algoritmo de re-sincronización modificado

#### 5.4 Implementación de una red en topología estrella sobre SIWA-RTOS

En esta sección se describe la parte de la solución en el que, una vez que se completó la migración del protocolo de red inalámbrico MiWI™ P2P, se implementó la red en topología estrella teniendo en cuenta las especificaciones establecidas en la etapa de diseño y utilizando principalmente las funciones de la API de la capa de aplicación.

Antes de empezar con el detalle de la implementación, se debe mencionar que para el funcionamiento del protocolo de red, el uso del TIMER1, utilizado por SIWA-

RTOS para realizar el cambio de contexto periódico, se cambió por el TIMER5, que posee las mismas características. Esto se debió a que, en general, las librerías de los programas de Microchip®, utilizan el TIMER1 para algunos procesos. Posteriormente se comprobó el funcionamiento correcto de SIWA con el TIMER5.

El funcionamiento de un nodo CRTECMOTE utilizando la red personal que se implementó, puede verse como una serie de pasos. En un principio, un nodo se define como coordinador, el cual crea la red operando sobre el canal de menor interferencia y finalmente crea una tarea en SIWA-RTOS que se encarga de mantener la operación de la red.

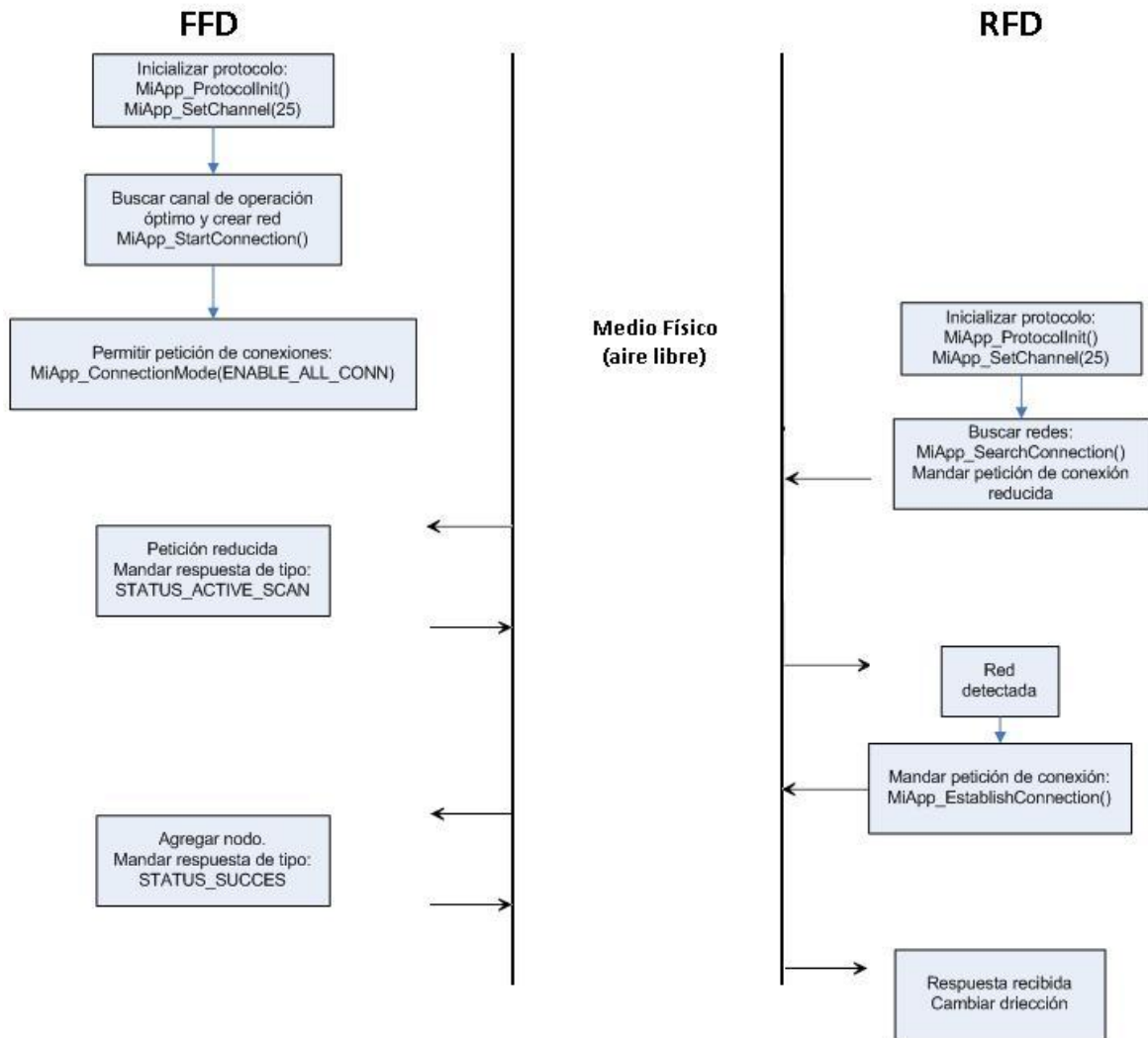
Por otro lado, cada nodo secundario que desee unirse a la red, envía una petición de conexión al coordinador. Una vez asociado a la red, se crean 3 tareas. La primera se encarga, en general, de mantener la operación de las funciones de red, en este caso, reducidas por ser un nodo secundario. Una segunda tarea se encarga de indicar si se ha perdido la conexión o no. La última consiste en una tarea que utiliza el módulo ADC del microcontrolador para capturar el valor de un potenciómetro. Esto con el fin de simular la conexión de un sensor al nodo CRTECMOTE.

#### **5.4.1 Creación de la red personal y asociación de nodos**

El proceso de creación de la red en topología estrella se realizó como se muestra la figura 5.8, en donde se puede observar que la red es iniciada, por un FFD, arbitrariamente en canal 25. De esta manera, en primera instancia, se inicializa el protocolo, las variables y funciones de red, en seguida realiza el proceso de selección de canal e menos interferencia. Esto se realiza dentro de la función *MiApp\_StartConnection*. Finalmente, se sitúa en un estado de espera de petición de conexión a través de la función *MiApp\_ConnectionMode (ENABLE\_ALL\_CONN*". Posteriormente se crea la tarea taskMIWI que realiza mantiene la operación funcional

de la red. En este punto del proceso, este dispositivo ha creado la red pero no existe ningún nodo bajo su control.

A nivel del dispositivo RFD, en cada nodo se inicializa igualmente el protocolo, funciones y variables de red. Posteriormente se llama a una función de nombre *MiApp\_SearchConnection* que realiza una exploración activa de todos los canales para determinar en cuál de ellos existe una red disponible a la que se pueda asociar. Específicamente se envía una petición de conexión reducida y se espera un determinado intervalo de tiempo por la respuesta de petición. Si se detecta alguna red, se llama a la función *MiApp\_EstablishConnection* donde se procede a mandar una petición de conexión adjuntando la información propia del nodo. En seguida se espera por una respuesta de petición de tipo "STATUS\_SUCCESS" por parte del coordinador, el cual envía también la nueva dirección de identificación que sustituye a la genérica con la que se inicializó. Por último se crean las 3 tareas mencionadas anteriormente.



**Figura 5.8** Proceso de creación de red y asociación de nodos

#### 5.4.2 Creación de una tarea que permita evaluar el funcionamiento de un nodo CRTECMOTE dentro de una red personal

Una aplicación muy probable de los nodos CRTECMOTE, consiste en establecer la red personal descrita anteriormente y que los nodos RFD monitoricen variables ambientales cuyos datos sean capturado por el ADC y enviados al coordinador periódicamente o cuando este realice una petición por ellos.

Para efectos de simulación, se creó una tarea, que se realiza en cada nodo RFD, en donde se utiliza el módulo ADC para capturar el valor de un potenciómetro de 10 KΩ. Este valor es pasado, cada segundo, a través de una cola de datos, hacia la tarea principal que realiza las funciones de red para que cuando el coordinador envía una petición de datos, se transmita una respuesta con el promedio de las últimas 5 muestras del ADC.

Para efectos de prueba, en el nodo coordinador, se realiza la petición al presionar el interruptor 1 del kit de desarrollo utilizado. Igualmente un nodo RFD puede enviar la última muestra del ADC al presionar el interruptor 1.

#### **5.4.3 Atributos de red implementados para evaluar el funcionamiento de la red**

Como el proceso de inicialización del transceptor hace uso completo de la capa física, no se implementaron pruebas de evaluación sobre este nivel. Por el contrario, si diseñaron pruebas que permitieron probar otras funciones de la pila de protocolo diferentes a las de transmisión, recepción y las necesarias en el proceso de asociación de nodos.

Específicamente, se desarrolló código que permitiera el uso de las funciones para dormir y despertar el transceptor, y la función de re-sincronización modificada. Las primeras 2 se probaron al presionar los interruptores 2 para dormir al dispositivo y deshabilitar las recepciones y el interruptor 3 para despertar nuevamente al MRF24J40MA. Para confirmar la operación se manda un mensaje antes de dormir y después de despertar el dispositivo.

Para simular casos posibles de pérdida de conexión, se implementó el envío de una petición de datos indirectos cada 30 segundos. En cada una de estas solicitudes, el coordinador envía una respuesta simple de confirmación de conexión. Si no se

recibe esta respuesta se aumenta un contador de peticiones fallidas. Si se obtienen 4 transmisiones fallidas consecutivas, se llama a la función de re-sincronización.

#### **5.4.4 Otros atributos de red implementados**

Otra mejora realizada a la pila de protocolo, consistió en incluir el código necesario para que cada nodo presente en la red identifique si el mensaje que se recibe está en verdad dirigido hacia ese nodo. El protocolo que ofrece Microchip® incluye en la trama de transmisión la dirección de destino. Sin embargo, en ninguna parte del código se maneja la recepción de esta dirección. En pruebas realizadas con dos nodos asociados a un coordinador, se dio el caso en el que luego de una petición de datos a un nodo específico, se recibían los datos del otro nodo. En la revisión del código se encontró que no existía ninguna línea de código que decidiera si un nodo debía descartar mensajes que no eran para él.

Lo que se hizo, primeramente fue determinar el tipo de datos recibidos que no son necesarios descartar y cuáles sí. Se encontró que solo es necesario descartar los mensajes de tipo datos directos e indirectos, a menos que estén dirigidos hacia ese nodo. Luego se procedió a determinar en qué parte de la trama de datos se localiza la dirección de destino del mensaje. En la función de transmisión de mensajes de la capa de acceso al medio, se encontró la inclusión de esta dirección, en las posiciones de la trama, previas a las de la dirección de origen. A partir de esta localización, se agregó una variable a la estructura general de recepción de mensajes para almacenar dicha dirección de destino. Finalmente en la tarea que mantiene la operación de red se pregunta si la dirección de destino coincide con la propia.

## 5.5 Evaluación del módulo de comunicación inalámbrica de un nodo CRTECMOTE

En este apartado se describen las mediciones realizadas para obtener una caracterización de la red personal que se implementó sobre SIWA-RTOS.

### 5.5.1 Medición de la corriente en los nodos de la red

Esta prueba consistió en la medición de la corriente consumida por un nodo que se definió como coordinador desde el momento en que inicia la configuración del microcontrolador hasta el punto en el que asocia un nodo a la red y le envía, exactamente, dos peticiones de datos con el promedio de las últimas 5 muestras del ADC, cada una. La gráfica de la figura 5.9 muestra la variación de corriente en función del tiempo para un nodo coordinador. Las muestras de corriente fueron tomadas con el equipo Source Meter Unit modelo 1636A de la marca Keithley, con un periodo de muestreo de 0.03495 segundos

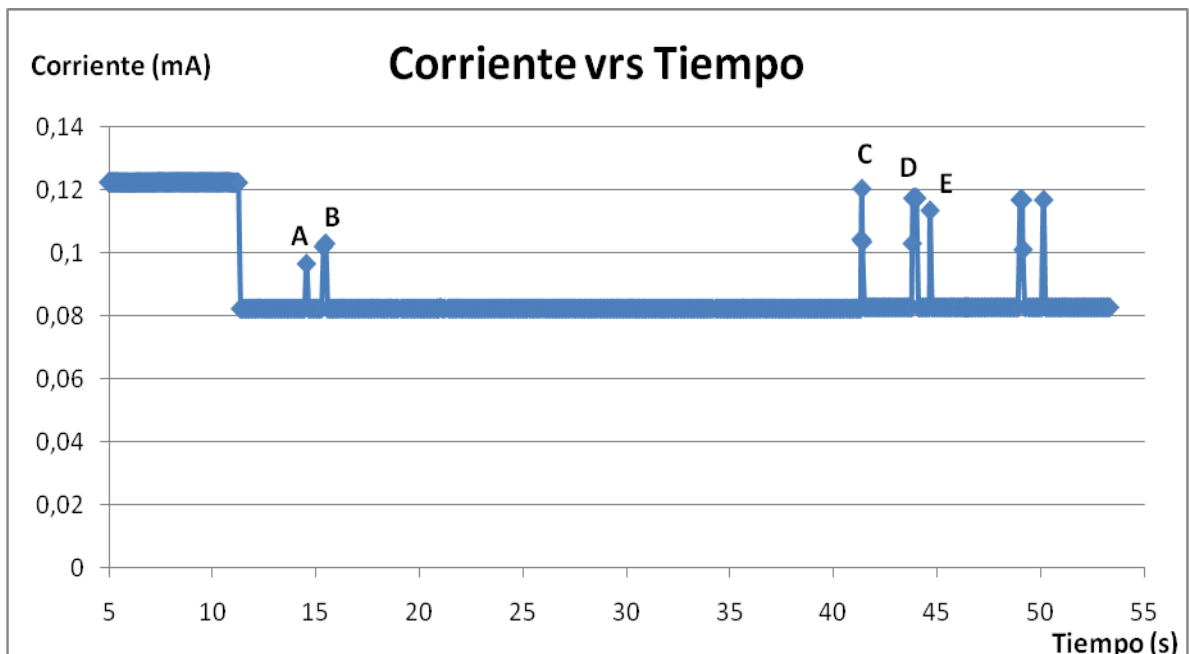


Figura 5.9 Gráfica de variación de corriente en un nodo coordinador



De la gráfica se pueden destacar dos aspectos importantes. El primero consiste en el análisis del proceso de creación de una red y la asociación de un dispositivo RFD. Como puede apreciarse, en los primeros 6 segundos de muestreo, se observa un escalón de corriente. Este es el producto de la inicialización del dispositivo, seguido de la exploración de energía para determinar el canal óptimo de operación y la creación de la red. Luego, si se avanza más en el tiempo, se encuentran dos picos de corriente, correspondientes a los puntos A y B de la gráfica. Dado que inmediatamente después de la creación de la red, viene el proceso de asociación, estos picos corresponden a las petición reducida que se manda durante una detección activa de redes disponibles realizada por parte del nodo secundario, cuyo proceso dura aproximadamente 28 segundos (ver figura 5.10). Por lo que se puede decir que estas peticiones fueron recibidas en el coordinador, en uno de los primeros 4 canales del espectro de 2.4GHz. De lo contrario, los picos se encontrarían más adelante en el tiempo.

En seguida, se encuentra otro pico de corriente denominado punto C en la gráfica. Si se descuentan, aproximadamente 2 segundos, que equivalen al intervalo de tiempo que va desde el momento en que el coordinador termina la creación de la red, hasta el momento en que se alimenta al nodo RFD, comparando con la gráfica 5.10, se puede ver que el punto C corresponde al punto B de esta última y es por lo tanto el instante en el que se realiza la asociación del dispositivo. De la tabla 5.2 a continuación, se observa que agregar un nodo a la red toma cerca de 69.524 milisegundos.

**Tabla 5.2** Duración de los picos de corriente señalados en la figura 5.9

<b>Instante</b>	<b>Comienzo (segundos)</b>	<b>Final (segundos)</b>	<b>Duración (segundos)</b>
<b>C</b>	41.321803	41.391327	0.069524
<b>D a E</b>	43.787617	44.647072	0.859455

De esta manera, los picos de corriente señalados en D y E, corresponden entonces, al envío de una petición de datos por parte del coordinador hacia un nodo RFD y la recepción del promedio de las últimas 5 muestras del ADC de este nodo. Del análisis de los tiempos de muestreo, se determinó que este proceso de petición dura aproximadamente 859.45 milisegundos, mientras que el proceso de asociación dura 6.524 milisegundos. Estos valores se aprecian en la tabla 5.2.

El otro aspecto importante a resaltar de esta gráfica es el consumo de corriente. Como la gráfica representa una operación real del nodo coordinador, se puede decir que el consumo máximo se da en los instantes de inicialización. Posteriormente se obtendrán picos de corriente de no mayores a los 350 milisegundos de duración. La tabla 5.3 contiene un extracto de 10 muestras continuas de corriente. A partir de ellas se puede afirmar que si se excluye el intervalo de inicialización, se obtiene un promedio de corriente<sup>3</sup> de 82.265 mA .Considerando una alimentación fija de 3.3V, esto se traduce en un consumo de potencia de 272.731 mW.

**Tabla 5.3** Muestras de corriente para un nodo coordinador para diferentes intervalos

<b>Muestra</b>	<b>Corriente (mA)</b>	<b>Tiempo (seg)</b>
736	0.08264339	52.385363
737	0.08263159	52.488024
738	0.08263886	52.590678
739	0.08264256	52.693327
740	0.08263946	52.796001
741	0.08266115	52.898649
742	0.08263874	53.001286
743	0.08264506	53.103958
744	0.0826689	53.206613
745	0.08264911	53.309241
<b>Promedio (mA)</b>	<b>0.08264588</b>	
<b>Potencia (W)</b> <sup>4</sup>	<b>0.27273141</b>	

<sup>3</sup> Este valor se obtuvo calculando el promedio de las muestras tomadas luego del proceso de inicialización.

<sup>4</sup> La potencia se obtuvo al multiplicar el promedio de corriente por la alimentación de microcontrolador 3.3V

De igual manera se procedió con la medición de la corriente consumida por un nodo secundario desde el momento en que inicia la configuración del microcontrolador hasta el punto en el que se asocia al nodo coordinador, le envía un mensaje con la última muestra del ADC e inmediatamente se pone en modo de bajo consumo. Igualmente, las mediciones de corriente fueron realizadas con el equipo Source Meter Unit modelo 1636A de la marca Keithley, con un periodo de muestreo de 0.018322. La gráfica de la figura 5.10 muestra la variación de corriente en función del tiempo para un nodo secundario.

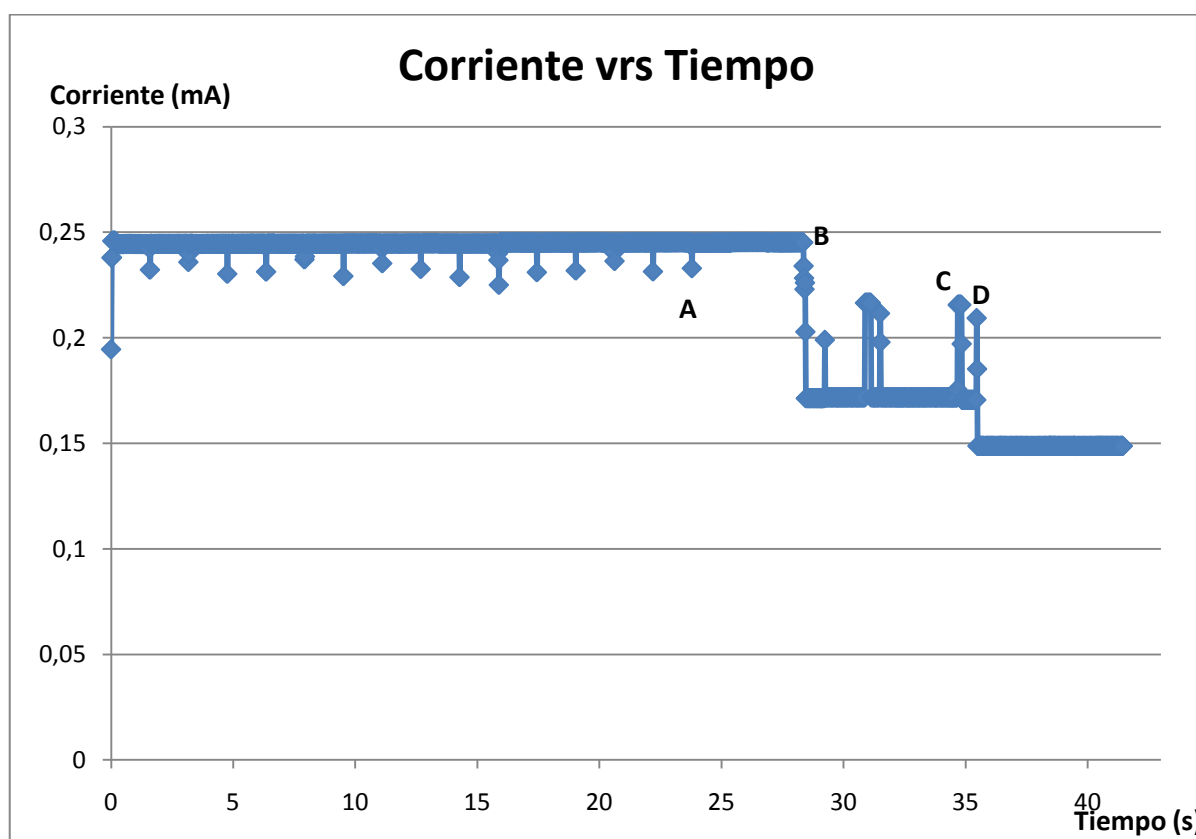


Figura 5.10 Gráfica de variación de corriente en un nodo secundario

Al igual que para el nodo coordinador, la gráfica muestra un escalón de corriente, esta vez de una duración de aproximadamente 28 segundos. Como se mencionó anteriormente, este intervalo corresponde a la detección activa de canales para

encontrar redes disponibles. En efecto, se pueden observar en total 16 picos de corriente, hasta el punto A, señalado en la gráfica, correspondientes al envío de petición reducida en la exploración de los 16 canales del espectro de 2.4 GHz. Los picos se encuentran a un menor nivel (como si fueran hacia abajo) de los instantes en los que no se envía nada. Esto se debe a que en los instantes de envío, no se utiliza ningún otro módulo del sistema más que el transceptor, a diferencia de los demás instantes en los que también se usan los temporizadores 2 y 3. En el punto B, finaliza la asociación.

Más adelante en la gráfica, se encuentran los picos de corriente correspondientes al instante en que se manda un mensaje antes de pasar al modo de bajo consumo del transceptor. En este punto, se puede observar un segundo escalón, del cual se deduce que el dispositivo ha alcanzado su estado de dormido y por lo tanto, el nodo consume a penas  $2\mu\text{A}$  del transceptor, según la hoja de datos del transceptor.

En cuanto al consumo de potencia de un nodo RFD, se puede decir que el mayor consumo se da igualmente en el intervalo de inicialización y asociación, es decir durante los 28 segundos iniciales. Según los datos de la tabla 5.4, de no utilizarse el modo dormido del transceptor, el promedio de consumo de corriente de  $170.513\text{ mA}$ , lo que corresponde a  $562.692\text{ mW}$ , para una alimentación fija de  $3.3\text{V}$ . De la misma tabla 5.4 se aprecia que en modo de bajo consumo de energía del MRF24J40, se utiliza un promedio de  $148.667\text{ mA}$  lo que se traduce en  $490.60\text{ mW}$ , para un 12.8% de reducción en el consumo de energía.

**Tabla 5.4** Muestras de corriente para un nodo esclavo para diferentes intervalos <sup>5</sup>

Modo de operación	Muestra	Corriente (mA)	Tiempo (seg)
Normal	1920	0.1705093	34.855596
	1921	0.1704919	34.873758
	1922	0.1704957	34.891814
	1923	0.1705432	34.909879
	1924	0.170536	34.927943
	1925	0.1705223	34.945969
	1926	0.170535	34.964125
	1927	0.1704694	34.982277
	1928	0.1705062	35.000316
	1929	0.1705189	35.052141
		<b>Promedio (mA)</b>	<b>0.17051279</b>
	<b>Potencia (W)</b>	<b>0.56269221</b>	
Bajo Consumo	2040	0.1486847	37.059168
	2041	0.1486536	37.077226
	2042	0.148679	37.095372
	2043	0.1486788	37.113435
	2044	0.148681	37.131456
	2045	0.148669	37.149505
	2046	0.1486357	37.167654
	2047	0.1486428	37.185714
	2048	0.1486733	37.203864
	2049	0.148677	37.222028
		<b>Promedio</b>	<b>0.14866749</b>
	<b>Potencia (W)</b>	<b>0.49060272</b>	

### 5.5.2 Medición del valor RSSI durante una exploración de energía ante varios ambientes de operación

Posteriormente se hizo otra prueba para la caracterización de la pila de red implementada, consistió en la medición del nivel de interferencia electromagnética en el espectro de 2.4 GHz, obteniendo el valor RSSI durante la exploración de los distintos canales realizada por el nodo coordinador en su inicialización. La tabla 5.5 muestra los resultados obtenidos al ejecutar la prueba en diferentes ambientes de trabajo: un hogar, un cuarto con servidores de internet y al aire libre. De la tabla se

<sup>5</sup> La potencia se obtuvo al multiplicar el promedio de corriente por la alimentación de microcontrolador 3.3V

puede apreciar que el aire libre constituye el ambiente de menor ruido y por lo tanto el más óptimo para un nodo CRTECMOTE, seguido de un hogar o edificio y finalmente un ambiente cercano a un cuarto de servidores. Otro detalle importante, es que en los 3 ambientes, los canales 16 a 19 presentaron el mayor nivel de interferencia con respecto a los demás. Se puede suponer que las conexiones de internet inalámbricas afectan esta zona del espectro. También se puede concluir que los canales 21 a 26 presentan la menor cantidad de ruido y por ende son los canales más óptimos para trabajar con una red personal.

**Tabla 5.5** Mediciones del valor RSSI durante una exploración de energía ante varios ambientes de trabajo

Canal	Aire libre		Hogar		Cuarto servidores	
	RSSI	Potencia (dBm)	RSSI	Potencia (dBm)	RSSI	Potencia (dBm)
11	2	-88	0	<-90	13	-85
12	9	-86	15	-85	13	-85
13	19	-84	9	-86	13	-85
14	24	-83	0	<-90	127	-62
15	25	83	11	-86	188	-71
16	13	-85	207	47	143	-59
17	39	-80	174	-53	202	-48
18	47	-78	185	-52	214	-46
19	35	-81	217	-45	149	-58
20	18	-84	3	-88	104	-67
21	0	<-90	13	-85	110	-66
22	0	<-90	5	-87	0	<-90
23	28	-82	0	<-90	32	-81
24	7	-87	0	<-90	13	-85
25	15	-85	0	<-90	0	<-90
26	0	<-90	11	-86	22	-83

### **5.5.3 Medición de potencia de recepción ante varias distancias**

Al aire libre, se realizó un proceso de medición para estimar la intensidad de potencia de las señales recibidas a partir de la medición del valor RSSI, el cual tiene un rango de 0 a 255 y es calculado por el mismo transceptor. La visualización de este valor se puede obtener por medio de una herramienta de depuración que permite imprimir mensajes durante la operación del microcontrolador. Desde 0 hasta los 150 m aproximadamente, manteniendo la línea vista entre los dispositivos, se obtuvieron los resultados de la tabla 5.7. Como los datos fueron recibidos luego de una petición del coordinador, en la columna derecha se anotó el número de intentos necesarios para recibir el mensaje. De la tabla se aprecia que antes de los 100m exactos, se obtiene un 100% de la integridad de la información, ya que fue necesario únicamente un solo intento de petición. Sin embargo, más allá de los 100m, se empezó a tener dificultades en la recepción, teniendo que presionar el botón de petición hasta 3 veces. Esto concuerda con las especificaciones de la hoja de datos del MRF24J40, en donde se definen un rango de 100m al aire libre y en línea vista. Según las mediciones, se comprueba que después de esta distancia se pierde la integridad de la información.

Por otro lado, existe un valor más representativo para determinar la calidad del enlace o de la señal recibida desde otro dispositivo. Este valor es el indicador de la calidad del enlace (LQI), también mostrado en la tabla 5.7 y consiste en un grado de correlación entre la propagación de secuencias del transceptor y las tramas recibidas. El rango de variación es de 0 a 255 en donde 0 indica un pésimo enlace y 255 representa un enlace de muy alta calidad. Como se puede apreciar de los resultados de la tabla 5.7, este valor se mantiene mucho más constante que la estimación de potencia a través del valor RSSI. Además, los resultados obtenidos muestran un tipo de enlace intermedio, que al igual que el valor RSSI se degrada con la distancia, aunque no tan rápidamente. Por esto se puede decir que la calidad del

enlace para la red implementada se mantiene relativamente constante en un nivel intermedio para una distancia menor a los 150m.

**Tabla 5.6** Mediciones del valor RSSI y LQI ante variaciones de la distancia de transmisión

<b>Distancia</b>	<b>RSSI</b>	<b>Potencia (dBm)</b>	<b>LQI</b>	<b>Intentos</b>
0	240	-40	110	1
5	158	-56	115	1
10	127	-63	110	1
15	112	-66	113	1
20	101	-68	113	1
25	71	-74	115	1
30	60	-76	114	1
35	16	-84	117	1
40	4	-87	111	1
45	0	<-90	103	1
50	7	-87	113	1
55	9	-86	111	1
60	2	-88	114	1
65	0	<-90	101	1
70	2	-88	106	1
75	9	-86	111	1
80	0	<-90	109	1
85	0	<-90	108	1
90	0	<-90	108	1
95	0	<-90	108	1
100	0	<-90	110	1
110	0	<-90	106	2
120	0	<-90	109	3
130	0	<-90	108	3
140	0	<-90	109	3
150	0	<-90	105	4



## 5.6 Evaluación del funcionamiento de la pila de red ante variaciones del quantum del sistema

Una vez migrada la pila de red sobre el sistema operativo, probada mediante la implementación de una red personal con topología estrella, se ejecutó una última prueba a nivel de SIWA-RTOS que consistió en variar el periodo de refrescamiento o quantum del sistema y medir el consumo de corriente en un nodo RFD. En el informe final del proyecto de graduación del desarrollador de SIWA-RTOS, se comprobó que estas variaciones no generan una diferencia significativa en el consumo de potencia. Teniendo esto en cuenta, lo que se pretendió con esta prueba fue determinar si las variaciones del quantum se traducían en mejoras en cuanto al funcionamiento de la pila de red. La gráfica de la figura 5.11 muestra el consumo de corriente de un nodo secundario al realizar el mismo procedimiento que anteriormente, pero esta vez con un valor de quantum de 100 Hz, lo que quiere decir que el periodo de refrescamiento se realiza cada 10 milisegundos. Como era de esperarse, no se produjo ninguna variación significativa en el consumo de energía.

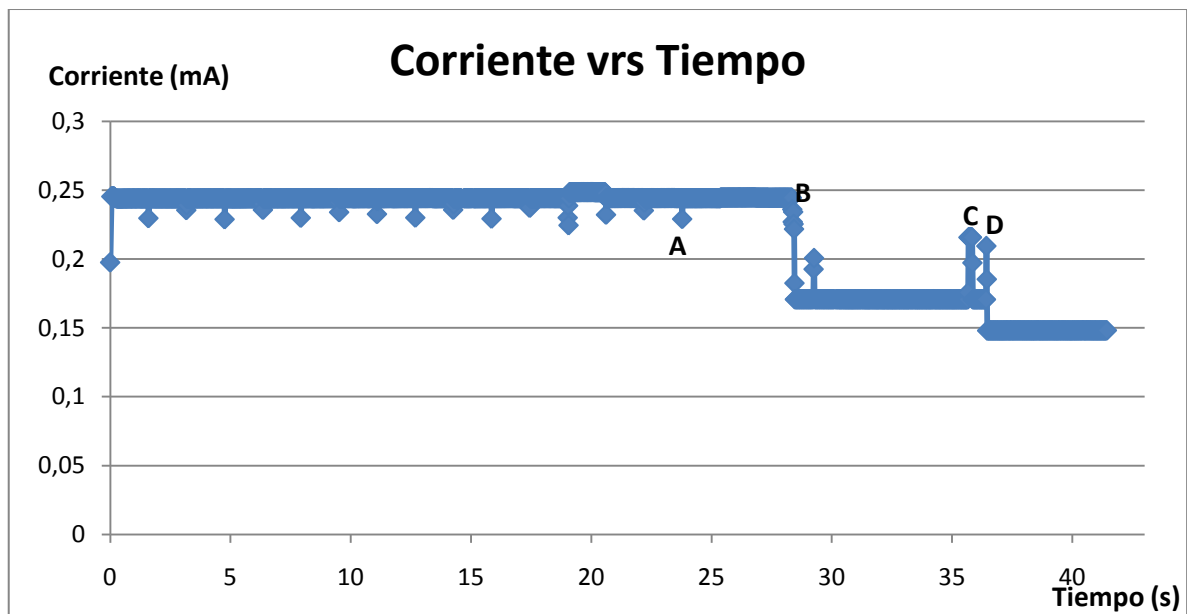


Figura 5.11 Gráfica de variación de corriente en un nodo secundario con un Tick quantum de 100 HZ

Para efectos de comparación, para un quantum de 100 y 1000 Hz, se midió la duración de un envío de mensaje hacia el coordinador en el instante previo a pasar al modo de bajo consumo, es decir, los intervalos de C a D de las figuras 5.10 y 5.11. La tabla 5.7 muestra los resultados obtenidos. En realidad si se registró una diferencia en esta duración. Sin embargo, esta fue apenas una mejora de un 0.723% con respecto al obtenido con un quantum de 1kHz. Aún así, de las recomendaciones de los diseñadores de sistema FreeRTOS para sistemas operativos en tiempo real, no es recomendable un periodo tan grande pues el comportamiento obtenido se aleja de las características de un sistema multitareas. Por ejemplo, podría darse el caso en que una tarea realice sus funciones en mucho menos de 10 ms, y exista otra tarea que esté en verdad esperando la asignación de los recursos, por lo que este tiempo se pierde.

**Tabla 5.7** Comparación de los picos de corriente en los instantes C y D de las figuras 5.10 y 5.11

<b>Instante</b>	<b>Comienzo (segundos)</b>	<b>Final (segundos)</b>	<b>Duración (segundos)</b>
C-D (fig. 5.10)	34.684793	35.468262	0.783469
C-D (fig. 5.11)	35.667685	36.445486	0.777801
<b>Diferencia</b>			0.723 %

En resumen, se obtuvo un módulo de comunicaciones para un nodo CRTECMOTE caracterizado por el protocolo de redes inalámbricas MiWiTM P2P. Un nodo está en capacidad de crear una red en topología estrella y aceptar las conexiones de 4 nodos como máximo. La red posee las características habituales de transmisión y recepción de una trama de datos un límite de 127 bytes, a la cual se le agregan, posteriormente, bits de control y sincronización. La red también presenta la característica de direccionamiento dinámico típica de la capa 3 del modelo OSI para redes. También se encuentran funciones de re-sincronización, identificación del destino de mensajes, transmisión de mensajes indirectos, modos de operación de bajo consumo para nodos esclavos, búsqueda de canales con menos nivel de ruido electromagnético, búsqueda de redes disponibles, entre otras. En cuanto al protocolo en general, la programación a nivel de capas permite una mayor comprensión y simplicidad del protocolo.

En cuanto al consumo de potencia, este se mantiene en un promedio de 272.731mW para un nodo coordinador y de 562.692 mW para un nodo RFD en operación normal, mientras que se consumen 490.6 mW en modo de bajo consumo, para un ahorro de energía del 12.81%. Con respecto al alcance de la red, se puede afirmar que dentro del rango de distancia establecido por el transceptor, se mantiene la integridad de la información al 100% y la calidad del enlace a un nivel intermedio.

## 6 CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

1. Para un nodo coordinador funcionando dentro de una red en topología estrella, el mayor consumo de corriente se da en los instantes de inicialización del dispositivo, de la pila de protocolo de red y de la creación de la red.

2. Para un nodo CRTECMOTE esclavo funcionando dentro de una red en topología estrella, el mayor consumo de corriente se da en los instantes de inicialización del dispositivo, de la pila de protocolo de red y de búsqueda de redes disponibles.

3. A una distancia menor de 100 metros, 2 nodos CRTECMOTE mantiene la calidad del enlace entre dispositivos a un nivel intermedio.

4. El módulo de comunicaciones inalámbricas de un nodo CRTECMOTE mantiene un 100% de la integridad de la información al aire libre y a línea vista, siempre que se esté dentro del rango de 100 metros.

5. Una variación en el periodo de refrescamiento (Tick quantum) no genera ninguna mejora sustancial en el tiempo de asignación de recursos por parte del sistema operativo.

6. Existe un menor nivel de interferencia en los 4 canales superiores del espectro de los 2.4GHz, con respecto a los demás, tanto para un ambiente de operación dentro de un hogar, como al aire libre o cerca de un cuarto de servidores.

## 6.2 Recomendaciones

1. Durante la consecución del proyecto se utilizaron varias versiones del ambiente de desarrollo MPLAM™ y de librerías de Microchip Inc. Sin embargo, en las constantes actualizaciones de las librerías, en su mayoría, se modifican aspectos a nivel de compilador, por lo que es recomendable trabajar sobre las versiones más actualizadas del ambiente de desarrollo.

2. Existe una tendencia a crear tareas sobre el sistema operativo SIWA-RTOS con una capacidad mínima de la pila de memoria. Sin embargo, para la tarea que mantiene la pila de red debe tener un tamaño de pila de memoria mayor a 500 palabras, dado que el proceso de interrupciones, por manejar gran cantidad de datos, puede causar desbordamiento de la pila.

3. Para que las tareas de captura de datos no interfieran con la tarea de la pila red, esta última debe tener una prioridad igual a `tskIDLE_PRIORITY + 1`, mientras que las de captura deben tener una prioridad igual a `configKERNEL_INTERRUPT_PRIORITY + 1`.

4. Para cumplir con las características de sistema operativo multitarea, se debe manejar la comunicación entre procesos y manejar eventos periódicos o aperiódicos.

5. Para reducir aún más el consumo de potencia en un nodo CRTECMOTE esclavo, periódicamente, se puede poner en modo de bajo consumo tanto al transceptor como al microcontrolador.

6. Para obtener un mayor alcance, se puede utilizar el transceptor MRF24J40MB de la empresa Microchip Technology Inc. que presenta las mismas características

que el MRF24J40MA con la adición de un amplificador de salida que proporciona una potencia de salida de 20 dBm, comparado con los 0dBm del MRF24J40MA.

7. Para darle más flexibilidad, se debe encontrar la forma de soportar la característica de multi-salto de mensajes para alcanzar dispositivos en un rango más amplio.

8. El MRF49XA ofrece las mejores características de un transceptor para operar dentro de una red de sensores, por lo que debe considerarse su uso siempre y cuando su precio por unidad baje lo suficiente para ser utilizado en aplicaciones de bajo costo de los nodos CRTECMOTE

## Bibliografía y Referencias

[1] Carvajal Godínez, Johan. (2009). Presentación sobre desarrollo de la red inalámbrica en el ITCR, “**Diseño de un nodo con arquitectura abierta para redes inalámbricas de sensores: CRTECMOTE**”. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

[2] Leiva Delgado, Norwin Alexander. (2009). Informe de Proyecto de Graduación de Ingeniería Electrónica, “**Sistema de administración en tiempo real de los recursos de hardware y software de un nodo de sensado [SIWA-RTOS]**”. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

[3] Barry, Richard. (2009). Versión 1.0.4. **Using the FreeRtos Real Time Kernel, A Practical Guide**.

[4] Wikipedia. **Protocolo ZIGBEE** [En Línea]. Última visita: 5 de junio 2010. URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/ZigBee>.

[5] Wikipedia. **Protocolo MIWI** [En Línea]. Última visita: 5 de junio 2010. URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/Miwi>.

[6] IEEE Std 802.15.4-2003<sup>TM</sup>, **Wireless Medium Acces Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)**, IEEE, 2006.

[7] Escuela de Ingeniería Electrónica. **Guía Informe Final** [En línea]. [Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica], 16 noviembre 2006. <<http://www.ie.itcr.ac.cr/acarrasquilla/Proyecto/>> [Consulta: 1 de junio 2010]

[8] “MRF24J40MA Datasheet” – **2.4 GHz IEEE Std. 802.15.4<sup>TM</sup> RF Transceiver Module (DS70329A)**, Microchip Technology Inc., 2008.

[9] “MRF24J40MA Datasheet” – **IEEE 802.15.4™ 2.4 GHz RF Transceiver** (DS39776), Microchip Technology Inc.

[10] AN1204, “**Microchip MIWI™ P2P Wireless Networking Protocol**” (DS01204), Microchip Technology Inc., 2008

[11] AN1284, “**Microchip Wireless (MIWI™) Media Access Control (MiMAC)**”, Microchip Technology Inc., 2009

[12] AN1283, “**Microchip Wireless (MIWI™) Application Programming Interface (MiApp)**”, Microchip Technology Inc., 2009

[13] Microchip Technology Inc. “**PIC32MX – PIC32 USB Starter Kit II User’s Guide**” (DS61158A)

[14] “PIC32MX5XX/6XX/7XX Data Sheet” – **USB, CAN and Ethernet 32-bit Flash Microcontrollers** (DS61156B), Microchip Technology Inc., 2009.

[15] Microchip Technology Inc. **PIC32MX460F512L Datasheet**. Revisión E, (Julio 2008).

[16] Aguilar Ulloa, Miguel Ángel. (2009). Presentación sobre Sistemas Operativos en el curso Sistemas Embebidos, ITCR, “**Sistemas Operativos**”. *Instituto Tecnológico de Costa Rica*.

[17] Wikipedia. Protocolo IEEE 802.15 [En Línea]. Última visita: 2 de junio 2010. URL: [http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.15](http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15)

[18] Wikipedia. WPAN [En Línea]. Última visita: 2 de junio 2010. URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/WPAN>

[19] AN1066, “**MIWI™ Wireless Networking Protocol Stack**” (DS01066), Microchip Technology Inc., 2007



# Apéndices

## A.1 Glosario y abreviaturas

**API:** *Application Programming Interface*. En español: “Interfaz de Programación de Aplicaciones”. Es el conjunto de funciones y procedimientos que ofrece cierta biblioteca para ser utilizado por otro software como una capa de abstracción.

**Dispositivo móvil:** Dispositivo cuya ubicación lógica en la red cambia con el tiempo.

**ED:** exploración de energía

**FFD:** Dispositivo de funcionalidad completa. Dispositivo capaz de operar como coordinador de una red personal.

**IPC:** *Inter Process Communication*. En español “Comunicación entre procesos”. La IPC provee un mecanismo que permite a los procesos comunicarse y sincronizarse entre sí, normalmente a través de un sistema de bajo nivel de paso de mensajes que ofrece el sistema operativo.

**LQI:** link quality indication. Grado de correlación entre la propagación de secuencias del transceptor y las tramas recibidas.

**LR-WPAN:** low-rate wireless personal area network. Redes inalámbricas de área personal de bajo costo.

**MAC:** Medium Access Control.

**OSI:** Open Systems Interconnection

**QUANTUM:** En español “Cuanto”. Cantidad de tiempo de CPU que puede hacer uso una tarea cada vez que se le asignan los recursos requeridos.

**RFD:** Dispositivo de funcionalidad reducida. Dispositivo que no es capaz de operar como coordinador.

**RSSI:** Indicador de la potencia de la señal recibida

**TRAMA:** Formato de los bits agregados desde la capa de control de acceso al medio (MAC) que son transmitidos a la vez.