UNIVERIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN EN UN BANCO DE PRUEBAS PARA REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES COGNITIVAS

Manuel Alarcón Granero

Julio 2015

TRABAJO FIN DE GRADO

Título:	IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN EN UN BANCO DE PRUEBAS PARA REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES COGNITIVAS
Autor:	MANUEL ALARCÓN GRANERO
Tutor:	ELENA ROMERO PERALES
Ponente:	ALVARO ARAÚJO PINTO
Departamento:	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRIBUNAL

Presidente:	D. OCTAVIO NIETO-TALADRIZ GARCÍA
Vocal:	D. ÁLVARO DE GUZMÁN FERNÁNDEZ GONZÁLEZ
Secretario:	D. ALVARO ARAÚJO PINTO
Suplente:	D. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ GARCÍA

CALIFICACIÓN:

Madrid, a de de 2015.

UNIVERIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN EN UN BANCO DE PRUEBAS PARA REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES COGNITIVAS

Manuel Alarcón Granero

Julio 2015

Resumen

Una red de sensores es aquella formada por una serie de dispositivos con acceso a información del medio cuya misión es la de monitorizar diferentes parámetros del entorno. Estas redes, denominadas Wireless Sensor Network (WSN), están formadas por dispositivos con conectividad inalámbrica, lo que les da mayor versatilidad y flexibilidad, siendo un reto la autonomía energética y la fiabilidad de las comunicaciones.

Para hacer frente a los retos de autonomía y seguridad, una evolución de estas redes se ha centrado en proporcionar a los nodos de la red capacidad cognitiva para captar el estado del espectro y así cambiar de forma adaptativa los parámetros de las transmisiones. Esta evolución se denomina Cognitive Wireless Sensor Network (CWSN).

En el contexto de la Universidad Politécnica de Madrid, dentro del B105 - Electronic Systems Lab (B105 lab) del Departamento de Ingeniería Electrónica (DIE), estas redes son uno de los principales objetos de investigación. Uno de los proyectos dentro de éste ámbito es la puesta en marcha de un banco de pruebas para CWSN usando el nodo Cognitive New Generation Device (cNGD) desarrollado en el mismo laboratorio.

El trabajo que se desarrolla en este documento se engloba dentro de este proyecto y ha consistido en la implementación de estrategias de optimización para el banco de pruebas. Se han desarrollado todas las funciones necesarias dentro de la arquitectura cognitiva que despliega el cNGD. Además ha sido necesaria una adaptación de algunas de las funciones para lograr la realización de tareas requeridas.

Para finalizar, se ha realizado una aplicación que muestra el funcionamiento del sistema mediante la modificación de ciertos parámetros de transmisión.

PALABRAS CLAVE: Redes de Sensores Inalámbricas Cognitivas, cNGD, software, implementación, estrategias de optimización, banco de pruebas.

Abstract

A sensor network is one formed by a series of devices with access to information of the medium whose task is to sense various parameters of the environment. These networks, called Wireless Sensor Network (WSN) consist of devices with wireless connectivity, giving them more versatility and flexibility. It is still a challenge the energy independence and reliability of communications.

To address the challenges of autonomy and security, an evolution of these networks has focused on providing network nodes cognitive ability to capture the state of the spectrum to adaptively change the parameters of transmissions. This evolution is called Cognitive Wireless Sensor Network (CWSN).

In the context of the UPM (Universidad Politécnica de Madrid), within the B105 lab (B105 - Electronic Systems Lab) of the DIE (Departamento de Ingeniería Electrónica), these networks are one of the main objects of research. One project in this area is the implementation of a testbed for CWSN using the Cognitive New Generation Device (cNGD) node developed in the same lab.

The work developed in this document is included within this project and it consists in the implementation of optimization strategies into the testbed. There have been developed all the necessary functions within the cognitive architecture that deploys the cNGD. Besides an adaptation of some of the functions it has been necessary to achieve the execution of required tasks.

Finally, there has been developed an application showing the operation of the system by changing certain parameters of transmission.

KEY WORDS: Cognitive Wireless Sensor Network, cNGD, software, implementation, optimization strategies, testbed.

Índice

Lista de figuras, ecuaciones y tablas

Capítulo 1. Introducción

Una red de sensores inalámbrica o WSN (Wireless Sensor Network) consiste en una serie de dispositivos, llamados nodos, distribuidos a lo largo de un área geográfica sobre la que recogen datos. Estos nodos son capaces de conectarse de manera inalámbrica entre ellos y de procesar los datos que recogen para tomar decisiones.

Los nodos de estas redes suelen ser dispositivos sencillos. Suelen constar de un microcontrolador para procesar y almacenar la información que recogen, un transceptor para comunicarse con el resto de nodos de la red y una fuente de energía, normalmente baterías.

El número de nodos que forman una red de este tipo puede variar desde unos pocos hasta varios cientos y pueden conectarse siguiendo diferentes topologías como podemos ver en la Figura 1.1.

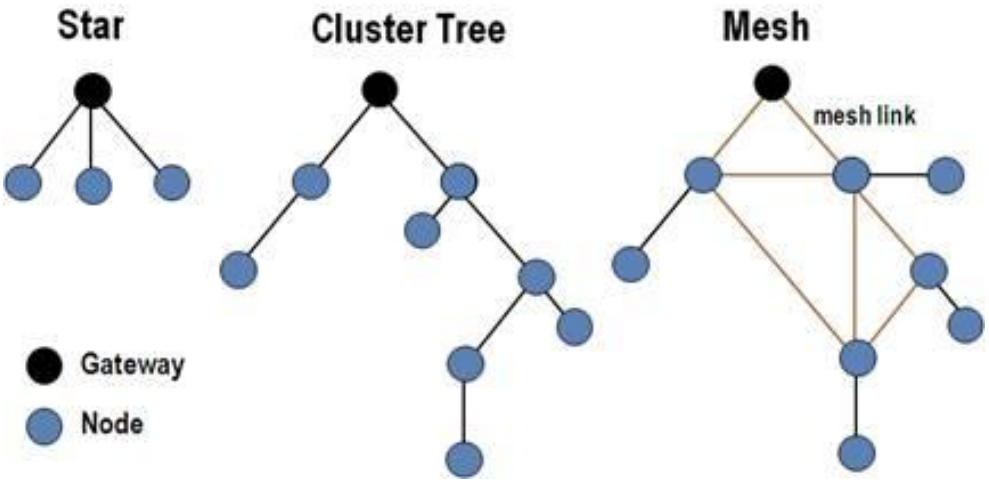


Figura 1.1 Topologías de red WSN, obtenida de [1]

En todas estas topologías de red existe un nodo, con más recursos que el resto, que hace de puerta de enlace o de coordinador para el resto de nodos, como es el caso de las redes *mesh*.

En cuanto a las diferentes tecnologías y protocolos de comunicación implementados en WSN la mayoría están basados en el estándar 802.15.4 del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [2] para WPAN (Wireless Personal Area Network). El propósito de este estándar está centrado en la habilitación de comunicación entre dispositivos con bajo coste y velocidad. Se definen los niveles de enlace (MAC) y físico (PHY) del modelo OSI (Open Systems Interconnection), delegando los protocolos de red a las distintas aplicaciones. Algunos de los protocolos basados en este estándar son ZigBee [3], WirelessHART [4], ISA100.11 [5] y MiWi [6]. Otro estándar muy utilizado es el IEEE 802.11 [7] en el que está basado Wi-Fi [8].

En los últimos años se ha producido un incremento en el uso de dispositivos con conectividad inalámbrica. El uso de las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) por parte de estos dispositivos ha generado saturación en el espectro, lo que ha repercutido en la calidad de servicio (QoS), dificultando la conectividad.

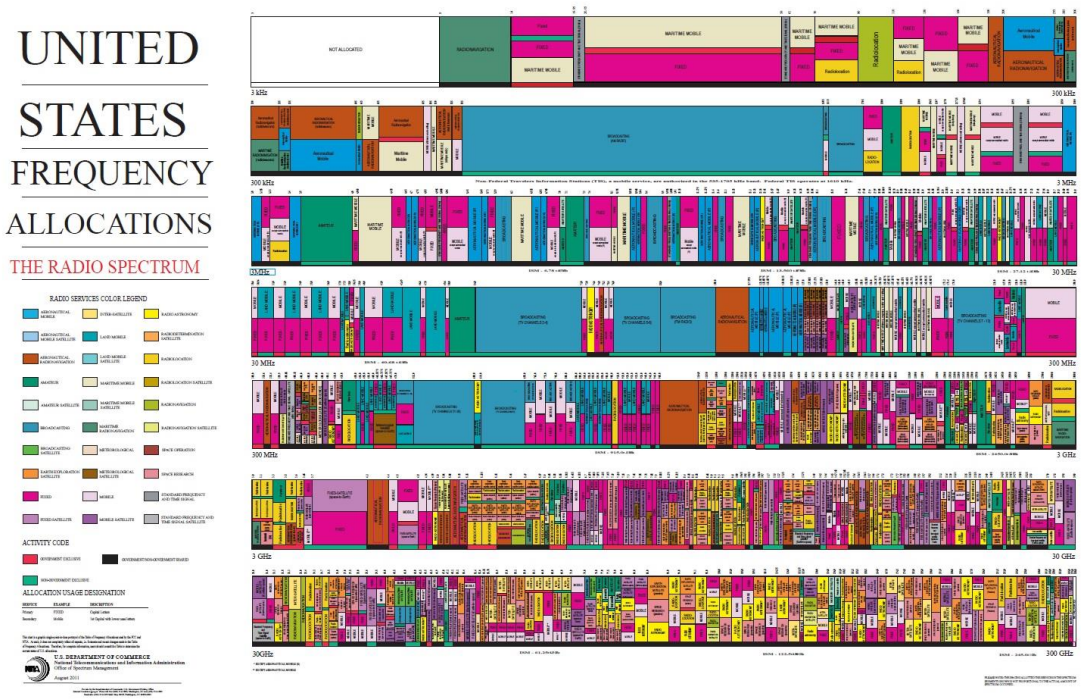


Figura 1.2 Reparto del espectro radioeléctrico en EEUU, de [9]

Como podemos ver en la Figura 1.2, donde se muestra el reparto del espectro en EEUU en el año 2011, el grado de saturación y fragmentación del espectro es enorme, coincidiendo este problema también en Europa. El rango de frecuencias asignado a las bandas ISM es muy pequeño, lo que queda representado en la Figura 1.3. Esta circunstancia ha impulsado la búsqueda de soluciones para disminuir el grado de saturación en estas bandas tan utilizadas.

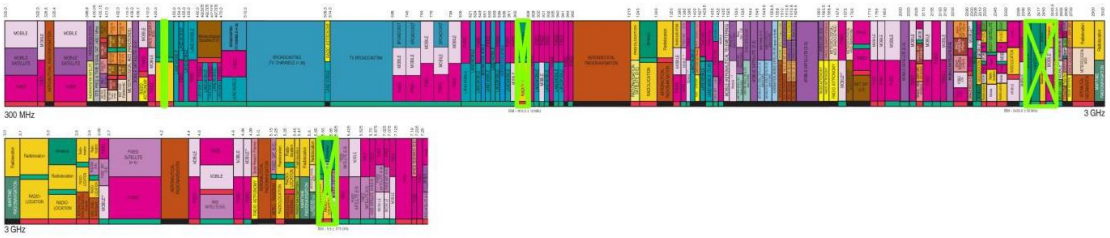


Figura 1.3 Bandas ISM resaltadas en el rango de los 300 MHz a los 8 GHz, obtenida de [10]

Una de las soluciones es la de la Radio Cognitiva (CR) consistente en la colaboración de los diferentes elementos de la red, intercambiándose información del espectro, para mejorar la eficiencia espectral y optimizar parámetros globales como el consumo, la fiabilidad o la seguridad.

La CR es un sistema que implementa un número de componentes hardware tradicionales como pueden ser filtros, moduladores, etc., en software, lo que lo hace totalmente configurable y adaptable. Con esto un transceptor radio es capaz de conocer el estado del espectro electromagnético y de adaptarse a él, transmitiendo en frecuencias que no estén siendo utilizadas o las que tengan menor ruido.

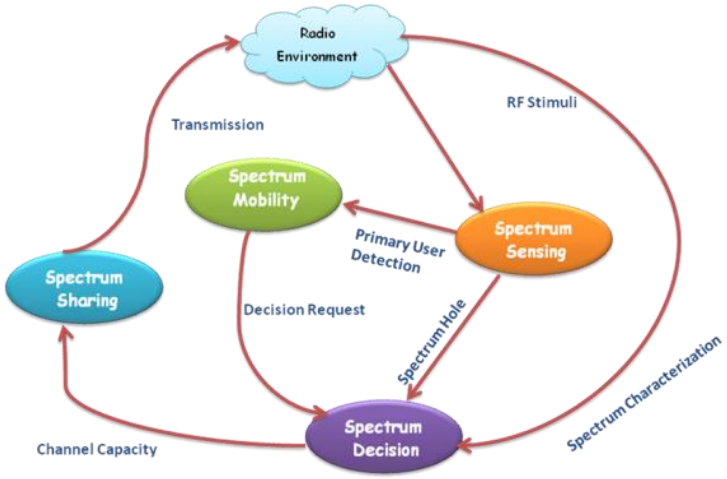


Figura 1.4 Diagrama de funcionamiento de la radio cognitiva, obtenida de [11]

Los dispositivos que incorporen la CR pueden transmitir y recibir en cualquier zona espectral, tanto en bandas libres como en bandas bajo licencia. Algunos de los estándares en los que se está trabajando con este concepto son el grupo 802.22 del IEEE para WRAN (Wireless Regional Area Network), que aprovecha las bandas de televisión que no se usan [12], o el estándar del Grupo 2 del 802.15 del IEEE [13].

Los sistemas de CR deben de poder cambiar sus parámetros de comunicación en función del estado del espectro de manera dinámica. Esto va a derivar en un uso del espectro más óptimo, ya que se van a utilizar los canales con menor ruido e interferencias en cada momento.

Estas técnicas no solo van a ayudar a optimizar las comunicaciones en las redes que lo implementen, sino que será beneficioso para el resto de redes ya que al ajustar los parámetros de transmisión restarán saturación en los canales que utilicen el resto de redes.

De la aplicación de las técnicas anteriores sobre WSN surge el concepto de redes de sensores inalámbricas cognitivas, Cognitive Wireless Sensor Networks (CWSN). Una de las metas principales de este ámbito es el diseño de nodos con las prestaciones necesarias para incorporar el concepto de CR. Además los nodos deben poder alimentarse con baterías y no ser necesaria una continua supervisión de estos.

En este contexto, el objetivo del trabajo es la implementación de estrategias de optimización para el banco de pruebas para CWSN del B105 – Electronic Systems Lab (B105 lab) utilizando de soporte el nodo cNGD (Cognitive New Generation Device).

1.1. Objetivos

El objetivo principal del trabajo es la implementación de estrategias de optimización en un banco de pruebas para CWSN. Para la consecución de este objetivo se dividirá en varios objetivos secundarios que se puedan abordar de forma sencilla. Estos objetivos van a ser los siguientes:

- Familiarización con las herramientas. Va a consistir en la instalación del software que se va a utilizar durante el transcurso del trabajo y la ejecución de aplicaciones ya implementadas en los nodos.
- Estudio y comprensión de los algoritmos. Como el objetivo principal va a ser la implementación de estrategias de optimización, otro objetivo muy importante va a ser la comprensión de dichas estrategias.

- Implementación. Se implementarán dos estrategias. Este objetivo incluye el desarrollo del código y la prueba de las funciones implementadas.
- Desarrollo de la aplicación. Se tendrá que implementar una aplicación demostradora que valide el código desarrollado.
- Pruebas. Por último se realizarán todas las pruebas que sean necesarias para comprobar todos los casos en los que se puedan encontrar los nodos con una red completa y que la ejecución del código sea correcta.

1.2. Desarrollo del trabajo

El trabajo se ha dividido en las siguientes etapas:

- Estudio previo. El primer paso tomado para la consecución de este trabajo ha sido la adquisición de conocimientos sobre las CWSN y con el entorno de trabajo.
    - Estudio de trabajos realizados anteriormente sobre CWSN en el laboratorio y de la documentación facilitada sobre los algoritmos que se han implementado.
    - Familiarización con las herramientas de programación de Microchip, en concreto MPLAB X, y revisión de los conceptos de programación de microcontroladores en C.

- Desarrollo. Consiste en la implementación de los dos algoritmos sobre los nodos disponibles en el laboratorio. Tras esto, se ha desarrollado una aplicación que sirva de demostración del correcto funcionamiento del código implementado.

- Pruebas. Se han realizado las pruebas necesarias para comprobar el comportamiento de los algoritmos en el nodo.

- Documentación. La escritura de esta memoria ha sido simultánea a las etapas anteriores tras terminar la implementación de los algoritmos y de la aplicación de prueba.

1.3. Estructura de la memoria

Este documento va a seguir la siguiente estructura.

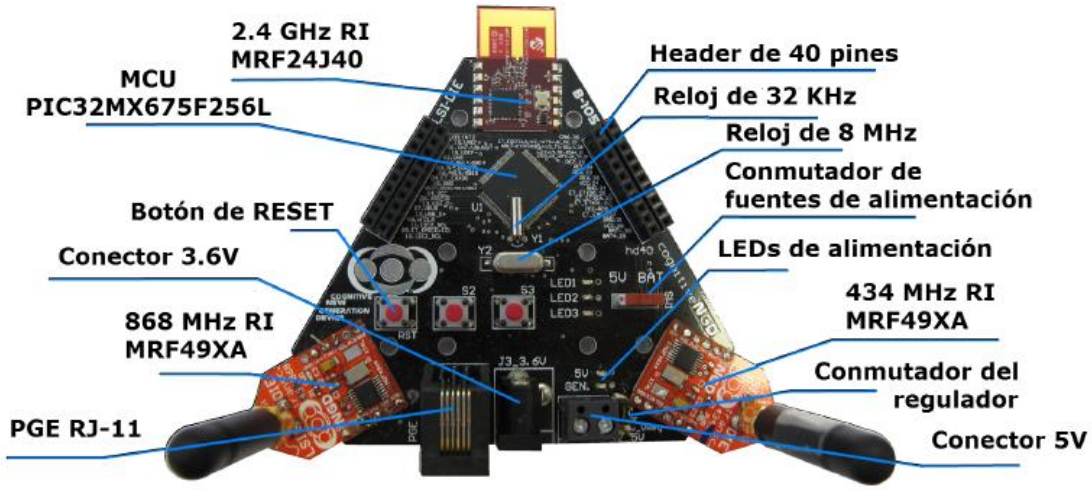
- En el capítulo 2 se caracteriza el HW (Hardware) y el SW (Software) sobre el que se ha realizado el trabajo y se detallan las herramientas que se han utilizado.
- En los capítulos 3 y 4 se detalla el proceso seguido para la implementación de ambos algoritmos, describiendo cada una de las funciones que se han realizado en cada uno de los sub-módulos de la arquitectura cognitiva.
- En el capítulo 5 se explican las decisiones para el diseño y la implementación de la aplicación de prueba de las estrategias.
- Por último, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones y se plantean las líneas futuras de los trabajos relacionados con este.
- Para finalizar, se incluye una lista de referencias y otra de acrónimos utilizados.

Capítulo 2. Estudio previo

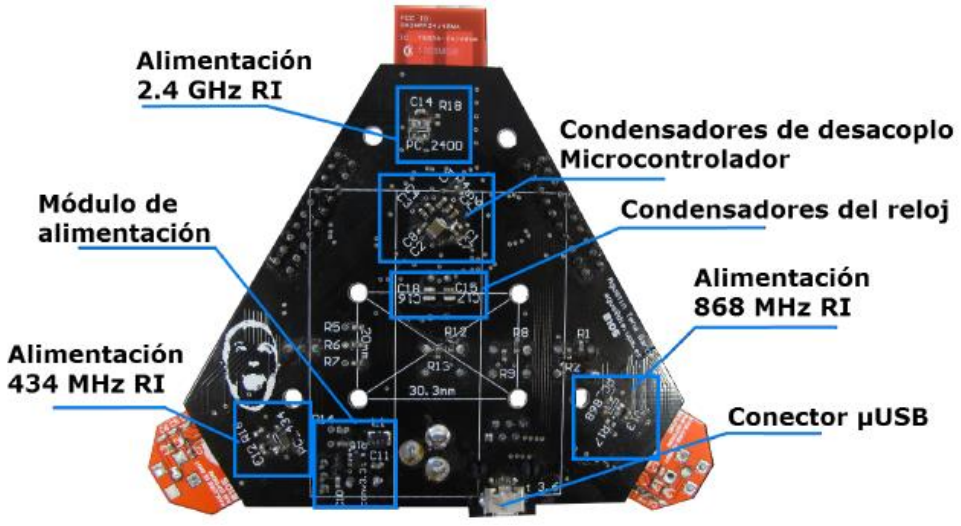
En este capítulo se va a presentar la plataforma sobre la que se ha realizado el trabajo. Se detallarán tanto el hardware como el firmware del que disponen los nodos y la arquitectura cognitiva donde se ha desarrollado este trabajo. Por último, se presentarán los algoritmos que han sido el objetivo de este trabajo.

2.1. Hardware del cNGD

El hardware sobre el que se incluye este trabajo es el nodo cNGD desarrollado en el B105 lab y el cual viene detallado en [14]. Aquí expondremos brevemente algunas de sus características más importantes y que se han tenido en cuenta a la hora de realizar el trabajo ya que influyen a la hora de implementar código sobre el nodo.



(a) Vista superior



(b) Vista inferior

Figura 2.1 Vista detallada del cNGD, obtenida de [15]

El hardware del nodo cumple unos requisitos en cuanto a consumo, bajos recursos, bajo coste y varias bandas de frecuencias para las comunicaciones. El requisito de bajos recursos tiene especial interés a la hora de desarrollar software por lo que pasamos a describir algunas de sus características principales:

- Microcontrolador. El MCU que incorpora el nodo es el PIC32MX675F256L [16], de 32 bits y fabricado por Microchip. Tiene 100 pines y sus características son:
  - Memoria. 256 kB de memoria flash y 64 kB de memoria RAM.
  - Reloj interno. Frecuencia máxima de funcionamiento de 80 MHz.
  - Modos de funcionamiento. Varios modos para reducir el consumo.
  - Timers. Cinco timers de 16 bits, pudiendo utilizar dos de ellos para hacer uno de 32 bits.
- Interfaces radio. El nodo dispone de tres interfaces radio, por lo que es capaz de transmitir y recibir a través de tres frecuencias diferentes. Éstas son 434 MHz, 868 MHz y 2,4 GHz. Con esto se cubren parte de las bandas ISM de Europa. Para poder reducir el consumo de los nodos sin tener que renunciar a tener las tres interfaces, éstas se pueden activar o desactivar cuando no se estén utilizando.
- Alimentación. El nodo tiene varias posibilidades de alimentación, siendo la principal las baterías. También se puede alimentar a través de USB, del conector RJ-11 o del conector de 3.6 V.
- Módulos de expansión. El nodo tiene la posibilidad de expandir su funcionalidad mediante módulos de expansión que se conectan a los *headers* disponibles. Uno de los módulos que se han utilizado en este trabajo es el que permite a los nodos comunicarse a través de línea serie RS232, dando la posibilidad de comprobar la funcionalidad del código mediante trazas.

Como vemos, las características del cNGD satisfacen las especificaciones necesarias de un nodo para CWSN, ya que es capaz de trabajar en diferentes bandas de frecuencia, en este caso alguna de las bandas ISM de Europa, tiene la posibilidad de trabajar en modos de bajo consumo tanto con los diferentes modos de funcionamiento del microcontrolador como apagando las interfaces radio que no utilice. Además, permite el desarrollo de nuevas funcionalidades mediante los módulos de expansión.

2.2. Firmware del cNGD

El firmware implementado en el nodo y que fue desarrollado en [17] tiene la función de optimizar, adaptar e integrar las pilas de protocolos de cada uno de los transceptores en una única pila, y de proporcionar una interfaz que simplifica el trabajo del programador mediante una serie de funciones que son las que acceden al hardware y que denominamos HAL (Hardware Abstraction Layer).

La pila de protocolos de los transceptores se resume en la Figura 2.2. Esta pila es la misma para los protocolos P2P y MiWi que son los que están implementados en el nodo.

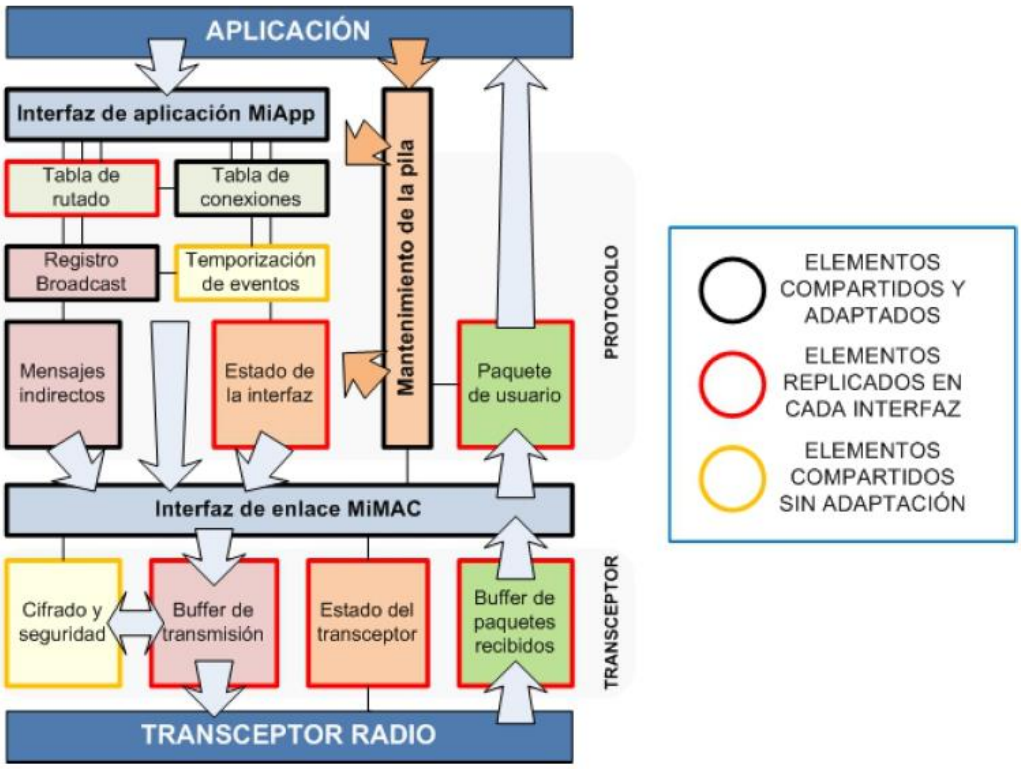


Figura 2.2 Diagrama de bloques de la adaptación software de la pila de protocolos MiWi, obtenida de [17]

Con el desarrollo de la HAL realizada en [17], lo que se consigue es simplificar la labor del programador a la hora de utilizar la pila de protocolos de las interfaces, teniendo que hacer llamadas a funciones para acceder a los recursos y, además, la HAL da flexibilidad para cambiar los transceptores, añadir nuevos o implementar nuevas funcionalidades. La arquitectura del firmware y la función de la HAL quedan resumidas en la Figura 2.3.

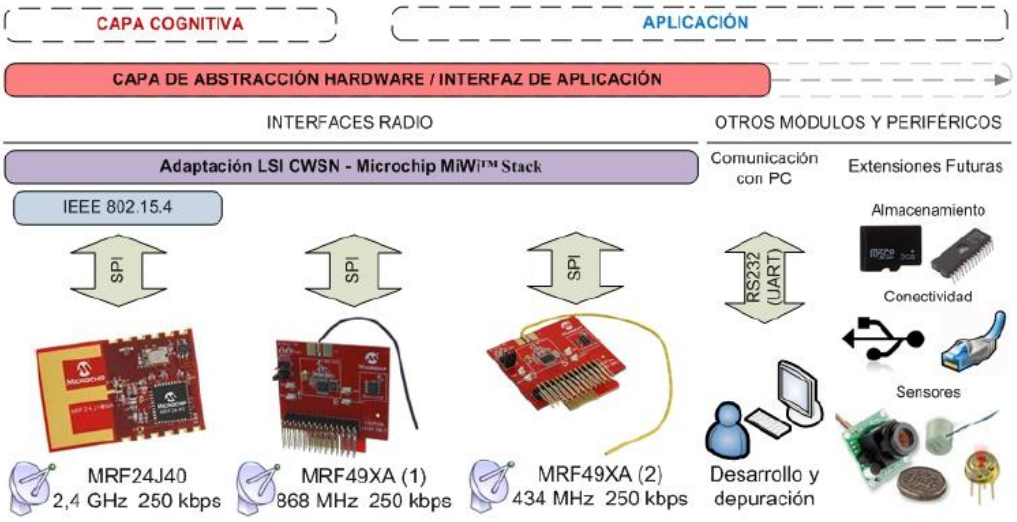


Figura 2.3 Arquitectura del firmware del cNGD, obtenida de [17]

Las funciones implementadas actualmente en la HAL van desde la inicialización del nodo hasta la gestión de las comunicaciones. Algunas de las funciones que interesan en este trabajo son: conocer el canal activo en una interfaz, enviar y recibir paquetes, comprobar la tabla de conexiones, etc.

2.3. Arquitectura cognitiva

La implementación de la arquitectura cognitiva realizada en [10] es la encargada de dar soporte a la implementación de estrategias cognitivas en el nodo. El esquema general de la arquitectura se puede ver en la Figura 2.4.

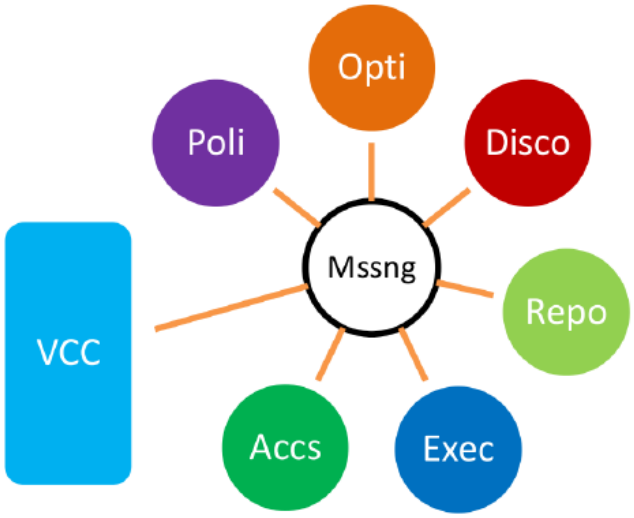


Figura 2.4 Arquitectura del CRModule, obtenida de [10]

El trabajo anterior se basó en la arquitectura presentada en el *Conectivity Brokerage* [18] que se realizó con la colaboración de las universidades de *UC Berkeley*, *TU Berlin*, universidad de Ozyegin, Universidad Politécnica de Madrid e IMEC. El modelo de esta arquitectura lo podemos ver en la Figura 2.5.

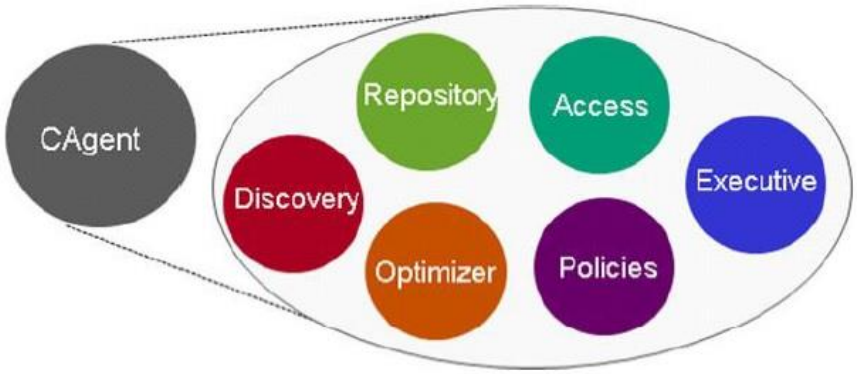


Figura 2.5 CAgents del Conectivity Brokerage, obtenido de [18]

La función de cada sub-módulo de la arquitectura es:

- Repository. Sub-módulo encargado de almacenar la información necesaria para la estrategia cognitiva. Aquí se recibirá la información y se almacenará para cuando otro sub-módulo de la arquitectura lo requiera.
- Discovery. Es el encargado de caracterizar diferentes parámetros del entorno. Este sub-módulo será el encargado de obtener el nivel de ruido en los canales.

- Optimization. En este sub-módulo se implementarán las rutinas de las estrategias cognitivas. Mientras este sub-módulo realiza el proceso cognitivo podrá realizar peticiones a otros sub-módulos del CRModule o incluso a otros sub-módulos en otros nodos.
- Execution. Los resultados del proceso de optimización tendrán que ser ejecutados. Este sub-módulo es el encargado de ejecutar las decisiones tomadas por el sub-módulo Optimization.
- Access Control. Debido a la naturaleza cooperativa de las estrategias cognitivas, son necesarios mecanismos de seguridad y control que sepan qué nodos tienen permisos para hacer acciones sobre el resto de nodos de la red. Éste sub-módulo se encarga de manejar la información de los permisos que tienen los nodos conocidos para realizar acciones en los sub-módulos del CRModule al que pertenece.
- Policy Support. Las estrategias cognitivas tienen unos valores que determinan las decisiones que se toman. Este sub-módulo tiene la información sobre esos valores y es consultado por el resto de sub-módulos para tomar las decisiones oportunas.
- Messenger. Se encarga de conectar el resto de sub-módulos entre ellos. Maneja los mensajes que se mandan el resto de sub-módulos y comprueba, si el mensaje proviene de otro nodo, si tiene permisos o no mediante petición al sub-módulo Access Control.

La implementación realizada en [10] fue desarrollada para funcionar directamente sobre la pila de protocolos de Microchip y para funcionar sobre una plataforma hardware distinta. Por ello, posteriormente, en [19], se realizó una adaptación de esta arquitectura para funcionar con la pila de protocolos y el firmware mencionados en el apartado anterior.

2.4. Herramientas utilizadas

En este apartado se van a presentar las herramientas que se han utilizado para la realización del trabajo.

2.4.1. MPLAB X

Esta herramienta es la IDE (Integrated Development Environment) que proporciona Microchip para la programación de sus microcontroladores. Está basado en NetBeans IDE, open-source de Oracle. El compilador utilizado ha sido el XC32 que proporciona Microchip en la última versión disponible. Los compiladores son compatibles hacia atrás, lo que quiere decir que se puede seguir compilando el código con compiladores más recientes. Algunas de las opciones que ofrece y que se han utilizado para este trabajo son las siguientes:

- Herramientas de depuración.
- *Parsing* y control de sintaxis en tiempo real.
- Hipervínculos que permiten una navegación rápida para acceder a las declaraciones.

Para más información acerca de esta herramienta se puede consultar el manual disponible en [20].

2.4.2. Programador ICD 3

Este dispositivo es el que permite programar el microcontrolador. El dispositivo que vamos a usar es el ICD (In-Circuit Debugger) 3 [21], desarrollado por Microchip para programar sus productos. La característica principal de este dispositivo es que, en combinación con MPLAB X, ofrece la posibilidad de depurar en tiempo real el *software* que se ejecute en el MCU. Permite un máximo de 6 puntos de parada.

2.4.3. RS232SHIELD

Es una placa de expansión para el cNGD que fue desarrollada en [14]. Esta placa permite la conexión del nodo con el ordenador mediante puerto serie haciendo posible la depuración y las pruebas de la ejecución del código mediante el envío de trazas por este puerto. La configuración necesaria del puerto serie para la comunicación con el nodo es la siguiente:

- *Bit rate:* 115200 bits/s
- Bits por trama: 8 bits
- Paridad: No
- Bits de parada: 1 bit

Esta placa ha sido utilizada para la depuración mediante trazas y la realización de pruebas de la funcionalidad del código implementado.

Capítulo 3. Implementación del algoritmo de seguridad

Este algoritmo, desarrollado en [22], consiste en evitar que un nodo se haga pasar por usuario primario de la red denegando el uso de la misma a otros nodos.

Los usuarios primarios son los nodos que ocupan el canal durante más tiempo. Al resto de nodos se les denomina usuarios secundarios.

Para la detección de los nodos intrusos, o que tienen un funcionamiento anómalo, el algoritmo requiere de dos fases:

- Fase de aprendizaje. En esta fase el nodo procesa los paquetes que recibe, guardando el valor del RSSI (Received Signal Strength Indicator) y el tiempo que ha transcurrido entre dos paquetes. Con esto construye una lista de clústers que tienen de coordenadas el valor del RSSI y del tiempo entre paquetes y un radio. Para la creación de los clústers primero se normalizan los valores almacenados y luego se van procesando cada par de coordenadas incluyéndolas en un clúster.
- Fase de detección. Es el tiempo restante que el nodo esté trabajando. En esta fase el algoritmo se encargará de coger el valor del RSSI y tiempo entre paquetes de los paquetes que va recibiendo y comprobando que están contenidos en un clúster de los anteriores. Si un paquete no está contenido en un clúster, se marca el nodo del que procedía como atacante y se informa al resto de nodos de la red. Si un número determinado de nodos detectan a un mismo nodo como atacante desconectan ese nodo de la red.

3.1. Funciones de la arquitectura cognitiva

Durante la ejecución del algoritmo se va a necesitar medir el tiempo durante el que se ha ejecutado el algoritmo y el tiempo entre paquetes de aplicación. Para medir el tiempo de ejecución del algoritmo se ha usado la rutina de atención a la interrupción del *timer 4*, que se ha configurado cada un milisegundo, ya que no se necesita una precisión muy elevada al ser necesario medir segundos.

Para medir el tiempo entre paquetes se ha decidido usar la función `MiWi_TickGet()` de la librería `SymbolTime.c` que tiene una precisión de 16 microsegundos. Con esto podemos medir con precisión suficiente el tiempo transcurrido entre paquetes de aplicación que puede ir desde los pocos milisegundos hasta varios segundos.

Las etapas que sigue el algoritmo quedan resumidas en la Figura 3.1.

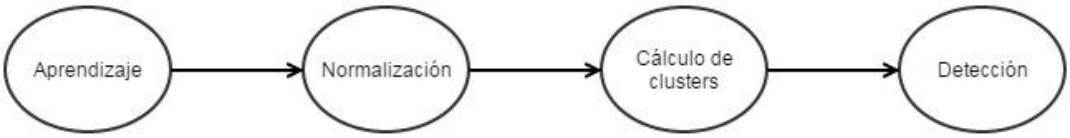


Figura 3.1 Etapas del algoritmo de seguridad

En cada paso de una etapa a otra se activa un *flag* que hace que no se vuelva a entrar a esa etapa ya que no es necesario volver nunca a una etapa anterior.

A continuación se van a describir las estructuras que se han definido para almacenar los datos necesarios para la implementación del algoritmo y las funciones que se usan durante la ejecución del mismo. Se han definido tres nuevas estructuras de datos:

- Coordenadas. En esta estructura se almacena la potencia de cada paquete recibido y el tiempo transcurrido entre éste y el anterior. Ambos parámetros se almacenan en una variable tipo *double* ya que serán necesarios decimales cuando se normalice. La etiqueta definida para esta estructura es "coord".

```
typedef struct coordenadas {
      double RSSI;
      double tiempo;
} coord;
```

- Clusters. En esta estructura se guardan los clusters generados durante la etapa de cálculo de clusters. Cada cluster está definido por un centro que es una coordenada definida anteriormente, un radio, de tipo double ya que es un número con decimales, y el número de paquetes con el que se ha formado el cluster necesario para hacer los cálculos que se detallarán en la explicación del método correspondiente. La etiqueta que define un cluster es "cl".

```
typedef struct cluster {
      coord centro;
      double radio;
      int nMuestras;
} cl;
```

- Atacantes. En las variables de este tipo se guardará la información relativa a la detección de un nodo atacante. Los parámetros almacenados son la dirección del nodo que se ha detectado como atacante, la dirección del nodo que lo ha detectado y un byte que indica si ha sido detectado como atacante o no. Éste último byte será el que se compruebe para saber cuántas veces se ha detectado el mismo nodo como atacante. La etiqueta para definir variables de este tipo es "at".

```
typedef struct atacantes {
      BYTE direccionAtacante[MY_ADDRESS_LENGTH];
      BYTE direccionDetector[MY_ADDRESS_LENGTH];
      BYTE esAtacante;
} at;
```

Para almacenar todos los datos recibidos se han definido tres listas:

- `coord Lista_Paq_Rec_Aprendizaje[MAX_PAQ_APRENDIZAJE]`
  Aquí se almacenará la información de cada paquete que se reciba durante la etapa de aprendizaje. El tamaño es fijo y definido por `MAX_PAQ_APRENDIZAJE` que se puede configurar en el archivo `ConfigRepository.h`.

- `cl Lista_Clusters[MAX_CLUSTERS]`
  En esta lista se guardarán los clusters que se generen a partir de los paquetes de la lista anterior. En este caso también tendrá un tamaño fijo y definido por `MAX_CLUSTERS` que también se puede configurar en el archivo `ConfigRepository.h`.

- `at Tabla_Atacantes[(CONNECTION_SIZE+1)*(CONNECTION_SIZE+1)]`
  Esta lista guardará los datos de los atacantes detectados por el resto de nodos de la red y por el propio nodo que almacena la lista. En este caso el tamaño dependerá del número de nodos que tenga en la tabla de conexiones y variará cada vez que se conecte un nodo. Inicialmente la tabla contiene las direcciones de todos los nodos tanto en el campo de `direccionAtacante` como en el de `direccionDetector` y el campo `esAtacante` a cero.

Una vez definidas todas las listas a utilizar en el algoritmo se pasa a detallar cada una de las funciones implementadas en cada uno de los sub-módulos:

3.1.1. Optimizer

Este sub-módulo es el encargado de las funciones de procesamiento de los paquetes que se van recibiendo. También se encarga de temporizar la ejecución de las etapas de aprendizaje, normalización y cálculo de clusters cambiando el *flag* que indica que se ha terminado cada etapa. La estructura de los mensajes dirigidos a este sub-módulo y que se usará posteriormente para enviarle información desde otros sub-módulos es la siguiente:

```
typedef struct _OPTM_MSSG_RCVD
{
      INPUT BYTE OrgModule;
      INPUT OPTACTION Action;
      IOPUT void *Param1;
      IOPUT void *Param2;
      INPUT radioInterface Transceiver;
      INPUT BYTE *EUINodo;
} OPTM_MSSG_RCVD;
```

Para la ejecución de las etapas descritas en la Figura 3.1 se ha utilizado la rutina de atención a la interrupción del *timer* 4. Cada vez que se produce esta interrupción el algoritmo comprueba si hay datos en el *buffer* de recepción de la interfaz que se está usando en ese momento. Dependiendo de la etapa en la que se encuentre el algoritmo se va a ejecutar una de las funciones que se describen a continuación.

Durante la etapa de aprendizaje la función que se va a ejecutar es:

```
BOOL CRM_Optm_Calculo_Coordenadas()
```

Esta función se encarga de obtener la potencia y el tiempo transcurrido entre dos paquetes y mandárselos a Repository para almacenarlos en la lista de paquetes recibidos. Con cada potencia y tiempo obtenidos, se comprueba si es mayor que el máximo de entre los que se han procesado y si lo es lo guarda para después normalizar.

El tiempo que transcurre en la etapa de aprendizaje es ajustable mediante la variable `AprendizajeMax` definida en el archivo `ConfigOptimizer.h`. Una unidad de esta variable equivale a 50 milisegundos.

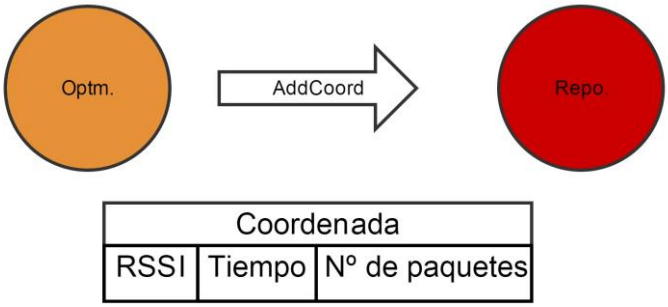


Figura 3.2 Paso de coordenadas de Optimizer a Repository

Una vez transcurrido el tiempo de aprendizaje, se activa el *flag* que indica que se ha realizado esta etapa y se pasa a la siguiente. En la siguiente interrupción del *timer* 4 se van a normalizar los paquetes que se han recibido en la etapa anterior. La normalización de las coordenadas de los paquetes se realiza mediante la ejecución de la siguiente función:

```
void CRM_Optm_Normalizar_Coordenadas(coord *listaPaquetes)
```

Esta función necesita el puntero a la lista de paquetes recibidos. Para normalizar las coordenadas obtenidas se recorre la lista dividiendo cada valor de potencia y tiempo entre el máximo obtenido durante la etapa de aprendizaje. Los valores resultantes se vuelven a almacenar en la lista de paquetes recibidos.

Una vez finalizada la ejecución de esta función se activa el *flag* que indica que se ha terminado de normalizar las coordenadas de todos los paquetes recibidos. Al volver a producirse una interrupción del *timer* 4 se ejecutará la etapa de cálculo de clusters. Esta etapa consiste en incluir cada paquete recibido en una estructura que denominamos cluster y que consta de un centro, que va a ser una coordenada como la de los paquetes y un radio. A un mismo cluster van a poder pertenecer varios paquetes. La función para calcular los clusters es la siguiente:

```
void CRM_Optm_Calculo_Clusters()
```

Esta función es la encargada de crear los clusters que se usarán posteriormente para detectar si un nodo es atacante o no. Para ello, se recorre la lista de paquetes recibidos, que se le pide a Repository, comprobando si pertenece a un cluster ya creado o no. Para saber si un paquete pertenece a un cluster se calcula la distancia entre el centro de cada uno de ellos y el paquete y si es menor que el radio se dice que pertenece al cluster. Si un paquete no pertenece a ninguno, se crea uno nuevo con centro las coordenadas de ese paquete y un radio inicial configurable. Cuando un paquete pertenece a alguno ya creado, se añade al cluster calculando el nuevo centro y radio usando las siguientes fórmulas:

$$radio = radio\ anterior + distancia$$

$$RSSI_{nuevo} = \frac{(RSSI_{cluster} * n) + RSSI_{paquete}}{n+1}$$

$$tiempo_{nuevo} = \frac{(tiempo_{cluster} * n) + tiempo_{paquete}}{n+1}$$

Ecuación 3.1 Cálculo de nuevo radio y centro cuando se recibe un paquete que pertenece a un cluster

Cuando termina de procesar todos los paquetes que se han recibido quedaría un mapa de clusters como el de la Figura 3.3.

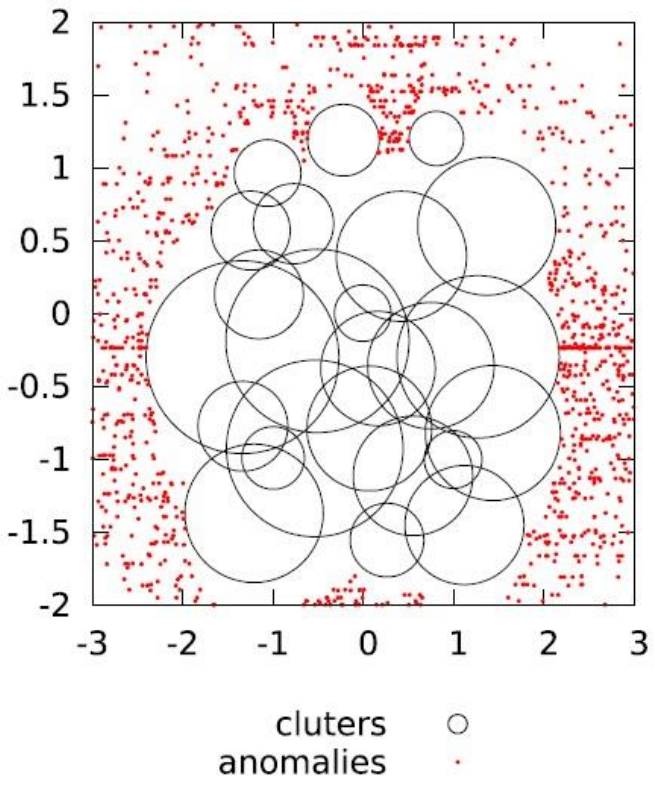


Figura 3.3 Ejemplo de mapa de clusters, obtenido de [22]

Para calcular la distancia entre dos coordenadas se ha definido la siguiente función:

```
double CRM_Optm_Calculo_Distancia(coord pto1, coord pto2)
```

Esta es una función auxiliar para calcular la distancia de dos puntos con dos dimensiones, en nuestro caso las coordenadas de los paquetes y de los centros de los clusters. Se llama a esta función cada vez que se tiene que comprobar que un paquete recibido pertenece a un cluster. La ecuación para calcular la distancia es la siguiente:

$$distancia = \sqrt{(RSSI_{cluster} - RSSI_{paquete})^2 + (tiempo_{cluster} - tiempo_{paquete})^2}$$

Ecuación 3.2 Cálculo de la distancia entre dos puntos

Por último, en la etapa final de detección se ejecuta la siguiente función:

```
BOOL CRM_Optm_Detectar_Atacante()
```

Esta función es la encargada de procesar los mensajes de aplicación que llegan durante la fase de detección del algoritmo. Con cada paquete comprueba que pertenezca a un cluster y si no pertenece a ninguno añade al nodo que lo envió a la lista de atacantes. Tras añadirlo a la lista se manda un mensaje a través de VCC al resto de nodos notificando que se ha detectado un nodo como atacante. Por último, se comprueba si el nodo que se ha detectado ha sido detectado por más nodos de la red y si ha ocurrido manda un mensaje a Execution para que lo desconecte de la red.

El paso de mensajes entre sub-módulos que se realiza en esta función si se detecta un atacante se detalla en la Figura 3.4.

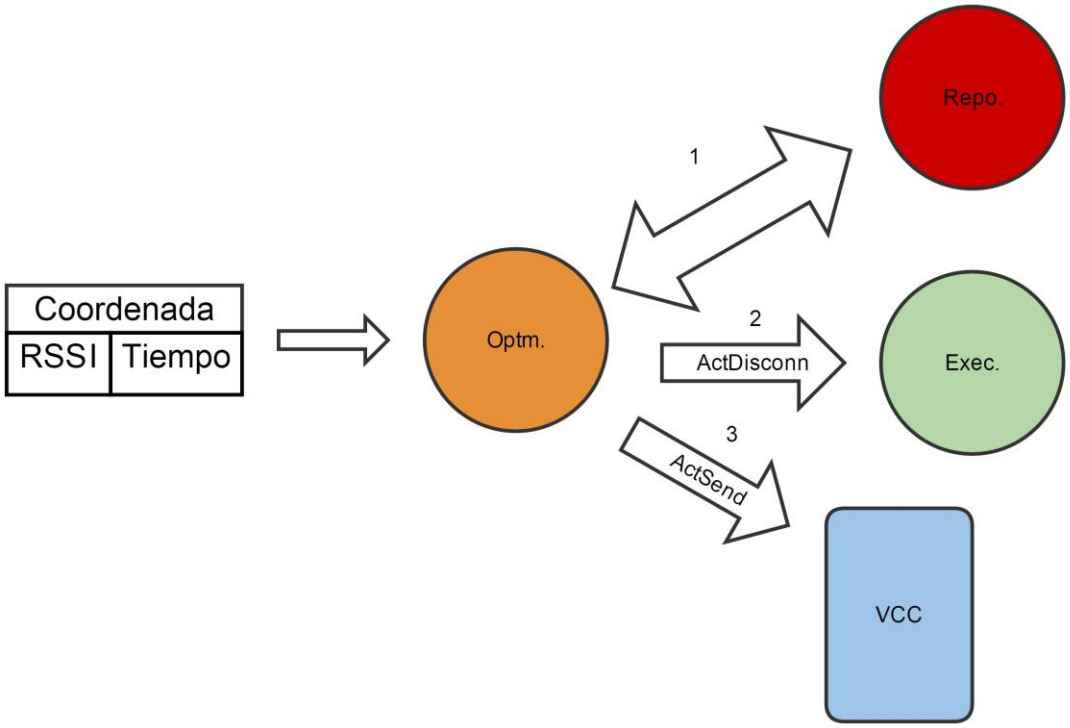


Figura 3.4 Paso de mensajes cuando se detecta un nodo atacante

Otra tarea que realiza este sub-módulo es la de reiniciar la tabla donde se guardan las detecciones de atacantes que se han detectado. Esto se puede modificar mediante la variable `ReinicioMax` en el archivo de cabecera `ConfigOptimizer.h`. Esto se ha hecho para que cada cierto tiempo se tenga que volver a detectar a un atacante, asegurándose así que las detecciones son correctas y evitando que un nodo que haya sido detectado incorrectamente como atacante no tenga la posibilidad de volver a conectarse a la red.

3.1.2. Repository

La estructura de los mensajes que tiene que recibir este sub-módulo es la siguiente:

```
typedef struct _REPO_MSSG_RCVD
{
      INPUT BYTE OrgModule;
      REPACTION Action;
      INPUT BYTE *EUINodo;
      INPUT REPODATATYPE DataType;
      INPUT radioInterface Transceiver;
      IOPUT void *Param1;
      IOPUT void *Param2;
      IOPUT void *Param3;
      IOPUT void *Param4;
} REPO_MSSG_RCVD;
```

Los valores que puede tomar el parámetro Action de estos mensajes para este algoritmo se resumen en la siguiente tabla:

REPACTION	Acción que se realiza
ActStr	Almacenar dato
ActSndDta	Enviar dato

Tabla 3.1 Valores del parámetro Action de los mensajes dirigidos a Repository

Los valores que puede tomar el parámetro DataType son los siguientes:

REPODATATYPE	Acción que se realiza u objeto que se devuelve
AddCoord	Almacenar coordenadas
DetAtt	Almacenar detección de otro nodo
InitTAtt	Inicializar tabla de atacantes
EnvListaPaq	Devuelve puntero a la lista de paquetes
EnvListaCl	Devuelve puntero a la lista de clusters
EnvTablaAt	Devuelve puntero a la tabla de atacantes

Tabla 3.2 Valores del parámetro DataType de los mensajes dirigidos a Repository

Las funciones que se han implementado en este sub-módulo se detallan a continuación:

- `void inicializarTablaAtacantes()`
  Es la función encargada de inicializar la tabla de atacantes al iniciar el nodo y cuando se pasa el tiempo prestablecido para reiniciarla. La inicialización se hace de la siguiente manera:
  1) Se crea una tabla con las direcciones de todos los nodos de la red, incluyendo la dirección del propio nodo.
  2) Se rellena el campo direccionAtacante de todas las entradas de la tabla de atacantes con todas las direcciones de la tabla anterior repetidas el número de conexiones que haya más uno, ya que el propio nodo también cuenta, y se inicializa el campo esAtacante a cero.
  3) Se vuelve a recorrer la tabla esta vez rellenando el campo direccionDetector con una dirección de la tabla creada en el punto 1) hasta introducirlas todas y repitiéndolas hasta llegar al final.

  Un ejemplo en el que un nodo sólo estuviese conectado a otro la tabla de conexiones quedaría de la siguiente forma:

		direccionDetector	
		Dir. nodo 1	Dir. nodo 2
direccionAtacante	Dir. nodo 1	0	0
	Dir. nodo 2	0	0

Tabla 3.3 Ejemplo de tabla de atacantes inicializada con dos nodos en la red

- `BOOL CRM_Repo_Proc_Mens_Att(REPO_MSSG_RCVD *Peticion)`
  Función encargada de procesar los mensajes con datos de atacantes procedentes de otros nodos. Cuando se ha incluido el nodo atacante en la tabla correspondiente se manda la información a los nodos que estén conectados al que recibe el mensaje difundiéndose así el mensaje por toda la red. Al hacer esto se pueden recibir varios mensajes iguales por lo que se comprueba si el campo esAtacante es cero antes de repetir el mensaje al resto de nodos.

3.1.3. Execution

Este sub-módulo se va a encargar de desconectar de la red a los nodos que sean detectados como atacantes por varios nodos. La estructura de los mensajes con destino este sub-módulo es la siguiente:

```
typedef struct _EXEC_MSSG_RCVD
{
      INPUT BYTE OrgModule;
      INPUT EXECACTION Action;
      INPUT radioInterface Transceiver;
      INPUT BYTE Action2;
      INPUT BYTE Param1;
      INPUT void *Param2;
      INPUT void *Param3;
      OUTPUT void *Param4;
} EXEC_MSSG_RCVD;
```

El parámetro Action que se va a utilizar para desconectar los atacantes va a ser ActDisconn. Al recibir un mensaje con este parámetro se ejecutará la función:

```
BOOL CRM_Exec_DisconNode(EXEC_MSSG_RCVD *Peticion)
```

A la que hay que pasarle el mensaje que se ha recibido en el sub-módulo con la posición de la dirección del nodo atacante en la tabla de conexiones en el parámetro Param1.

Capítulo 4. Implementación del algoritmo de reducción de consumo

Este algoritmo, detallado en [23], trata de reducir el consumo de los nodos de la red mediante teoría de juegos.

El algoritmo aprovecha que es más costoso transmitir por un canal ruidoso que cambiar todos los nodos a un canal con mejor calidad de enlace. Por tanto, el algoritmo consiste en conocer el estado del canal por el que se está transmitiendo mediante el número de retransmisiones que se producen al enviar un mensaje, si se supera un número de retransmisiones se lanzará el proceso de decisión de cambio de canal. La decisión se toma calculando los costes asociados a transmitir por un canal ruidoso, con un número de retransmisiones por paquete, y el coste de sensar el medio y enviar mensajes para cambiar de canal. Si se decide cambiar de canal, el coste de cambiar es menor que el coste de transmitir en el canal en el que se está transmitiendo, se procede a elegir el canal menos ruidoso y a decidir entre todos los nodos de la red a qué canal se cambia definitivamente.

4.1. Funciones de la arquitectura cognitiva

La implementación de este algoritmo se ha realizado siguiendo un esquema de máquinas de estados finitos tal y como se presenta en la Figura 4.1.

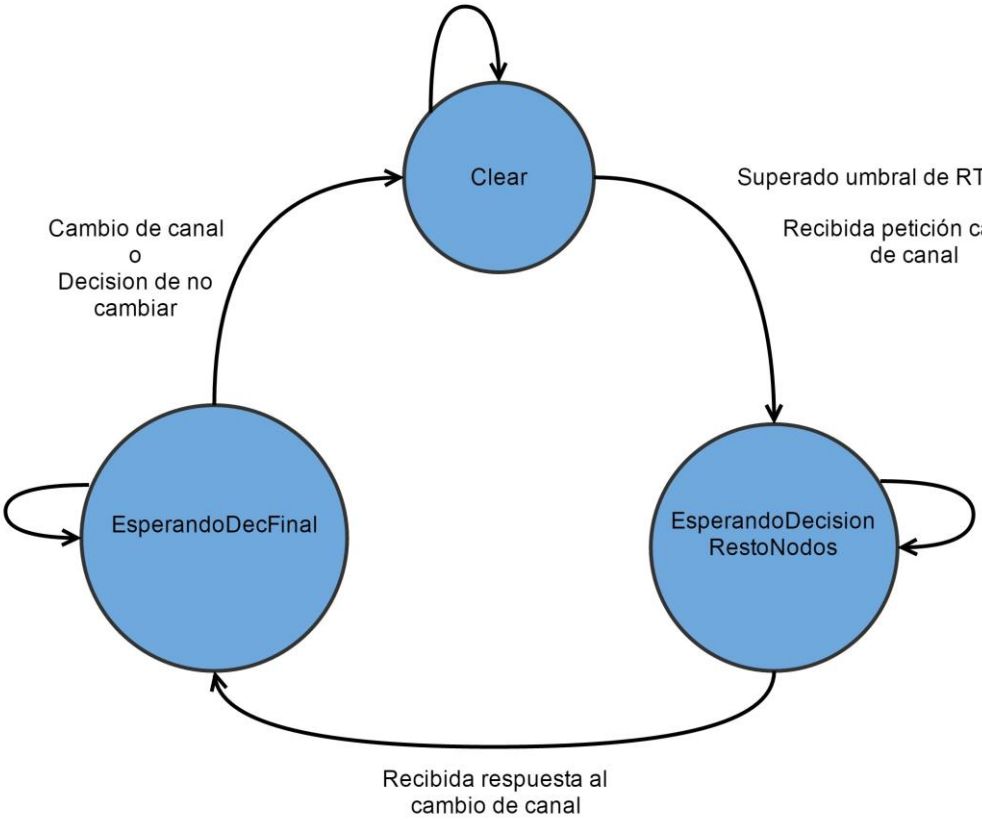


Figura 4.1 Diagrama de estados de la implementación propuesta

Las transiciones entre estados de la Figura 5.1 dependen de las respuestas de los otros nodos a las peticiones de cambio de canal que se les hace. Todos los nodos comenzarán en estado

"Clear" en el que comprobarán, con cada mensaje de aplicación que envíen, el número de retransmisiones que se han realizado. Tras enviar el mensaje de aplicación y en la ejecución de la rutina de atención a la interrupción del *timer* 4, que se produce cada milisegundo, el nodo calcula los costes asociados a la transmisión en el canal en el que está transmitiendo y los costes asociados al cambio de canal. Cuando el coste de cambio es menor que el coste de transmitir en el canal actual, ese nodo inicia el proceso de elección del canal al que cambiar y notifica al resto de nodos en su red.

El paso de mensajes de petición de cambio de canal y las respuestas se producen a través de VCC, habiendo reservado la interfaz de 434 MHz disponible en los nodos para tal efecto.

A continuación se pasa a describir las funciones de cada uno de los sub-módulos del CRModule para procesar las peticiones de cambio y obtener el resultado final.

4.1.1. Optimizer

El sub-módulo Optimizer es el encargado de la ejecución del algoritmo. Decidirá el inicio del cambio de canal, procesará las respuestas de los otros nodos de la red y pedirá al resto de sub-módulos la ejecución de determinadas acciones o la información que necesite durante el proceso. La estructura de los mensajes dirigidos a este sub-módulo se puede consultar en el capítulo anterior en el apartado 3.1.1. El parámetro Action de dicha estructura puede tomar los valores que se indican en la siguiente tabla:

OPTACTION	Acción que se realiza
ActCons	Iniciar algoritmo reducción de consumo
ActProcRq	Procesar mensaje recibido por VCC
SubActCambio	Sensar el espectro y decidir canal optimo
SubActRespCambio	Decidir canal con los datos de otro nodo

Tabla 4.1 Valores del parámetro Action de los mensajes con destino Optimizer

En el caso de recibir un mensaje con parámetro Action igual a ActProcRq el parámetro Param1 tendrá que tener uno de los siguientes valores:

OPTPROCACTION	Acción que se realiza
ProcCambioCanal	Procesar el mensaje de cambio de canal recibido
ProcRespCambio	Procesar la respuesta a la petición de cambio
ProcDecFinal	Procesar decisión final de cambio de canal

Tabla 4.2 Valores del parámetro Param1 cuando se recibe un mensaje con Action igual a ActProcRq

Las funciones que se han implementado o modificado en este sub-módulo se exponen a continuación:

- `BOOL CRM_Optm_Cons(OPTM_MSSG_RCVD *Peticion)`
  Es la función encargada de pedir al sub-módulo Discovery la información del ruido en los canales de las interfaces de 868 MHz y 2,4 GHz, obteniéndose así un canal óptimo por cada interfaz y el valor del RSSI del ruido en ese canal. De esos dos canales se elegirá el más óptimo y se guardará la interfaz a la que pertenece.
  Una vez hecho esto se distingue entre si el algoritmo ha sido iniciado en el propio nodo, es decir, el parámetro Action del mensaje que se ha recibido era SubActCambio, y lo que hace es enviar un mensaje por VCC dirigido al sub-módulo Repository del resto de nodos con la información sensada. O por el contrario, lo que ha iniciado el algoritmo ha sido un mensaje de otro nodo, que lo que hace es procesar la información que se ha recibido, detectando si el canal que ha recibido del otro nodo estaba entre sus cuatro mejores (o

con un valor de ruido muy próximo al de su cuarto mejor) y acepta el canal propuesto o le manda su mejor canal al resto de nodos. Esto último se realiza cuando el parámetro Action del mensaje que recibe es SubActRespCambio. Todo esto queda resumido en la Figura 4.2.

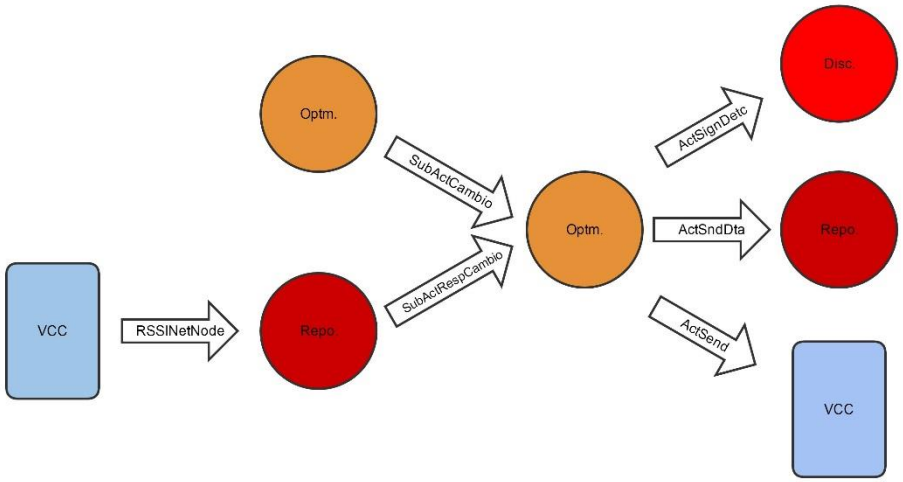


Figura 4.2 Diagrama con las acciones que realiza la función Cons y los parámetros Action que se pasan.

- `BOOL CRM_Optm_Calcular_Costes(BYTE n_rtx)`
  Esta función se encarga de calcular los costes asociados a la transmisión en un canal ruidoso y los costes de cambiar de canal para decidir si iniciar o no el proceso para cambiar de canal. Se pide de argumento el número de retransmisiones del último mensaje de aplicación que se ha intentado enviar y el valor de salida es *TRUE* o *FALSE* dependiendo de la decisión de cambio de canal.

- `BOOL CRM_Optm_Processor(OPTM_MSSG_RCVD *Peticion)`
  Esta función es la que se encarga de procesar los mensajes provenientes de otros nodos. Existen tres tipos de mensajes de respuesta, una petición de cambio de canal, una respuesta a la petición de cambio o una decisión final.
  Dependiendo del estado en el que se encuentre el nodo receptor y del mensaje que reciba se realizará una acción u otra. Las acciones realizadas se detallan a continuación:
  - Estado “Clear”. Cuando se esté en este estado sólo se procesarán los mensajes de petición de cambio de canal. El parámetro Action del mensaje dirigido al sub-módulo Optimizer tiene que ser ProcCambioCanal.
    Cuando llegue un mensaje con ese parámetro se calculan los costes de cambio de canal y de transmisión en el canal actual y se manda respuesta al resto de nodos. Si la respuesta es positiva se llama a la función `CRM_Optm_Cons` para que se realice el sensado del medio se decida el canal óptimo. Todo esto queda resumido en la Figura 4.3.

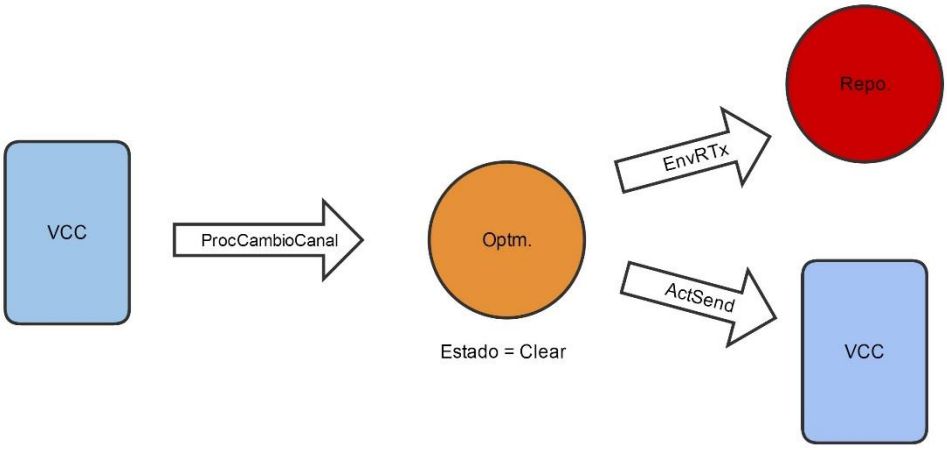


Figura 4.3 Diagrama de mensajes entre sub-módulos cuando se recibe una petición de cambio de canal

- Estado "EsperandoDecisionRestoNodos". En este estado se esperan las respuestas al cambio de canal de todos los nodos que estén conectados. Si se recibe una respuesta negativa se evalúa el porcentaje de mensajes de aplicación que se han intercambiado los dos y si hay uno con el que ha intercambiado más de un 10% de los mensajes enviados y recibidos se rechaza el cambio de canal; si no ha intercambiado más del 10% sigue con el proceso de cambio. El parámetro Action del mensaje dirigido al sub-módulo Optimizer tiene que ser ProcCambioCanal.
  Los pasos de mensajes entre los sub-módulos cuando se recibe una respuesta a un mensaje de cambio de canal queda resumido en la Figura 4.4.

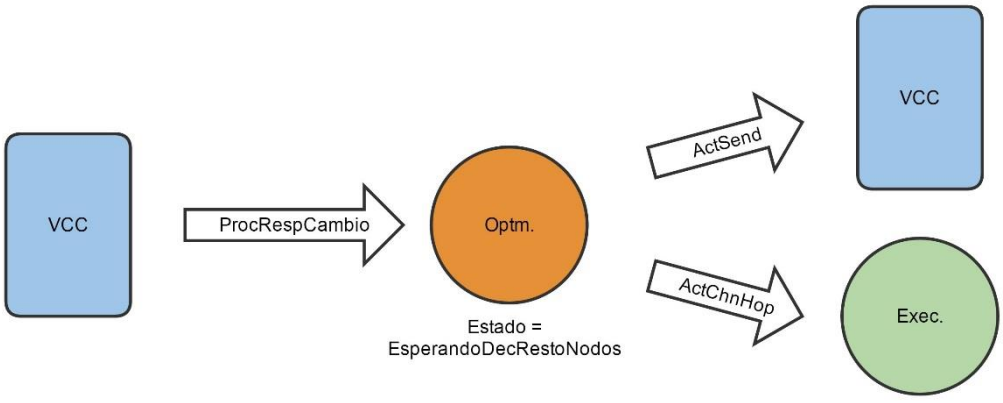


Figura 4.4 Diagrama de mensajes entre sub-módulos cuando se recibe una respuesta a una petición de cambio de canal

- Estado "EsperandoDecFinal". En este estado todos los nodos en la red deciden a qué canal cambiarse. Cada nodo recibe la información del espectro del resto de nodos y comprueba si el canal elegido está entre sus cuatro mejores. Si está entre los cuatro manda un mensaje al resto de nodos confirmando que se va a

cambiar y se cambia de canal. Si no está entre esos cuatro comprueba si el nivel de ruido del cuarto mejor canal es parecido al del canal que le han enviado y si lo es acepta el cambio. El resultado de este estado siempre va a ser un cambio de canal. El parámetro Action del mensaje dirigido al sub-módulo Optimizer tiene que ser ProcRespCambio si es un mensaje de respuesta afirmativa o negativa a una petición, o ProcDecFinal si ya se ha recibido el canal óptimo de ese nodo y se ha decidido no cambiar a ese. Los pasos de mensajes entre sub-módulos cuando se recibe una respuesta con un canal distinto al que se propuso inicialmente viene resumido en la Figura 4.5.

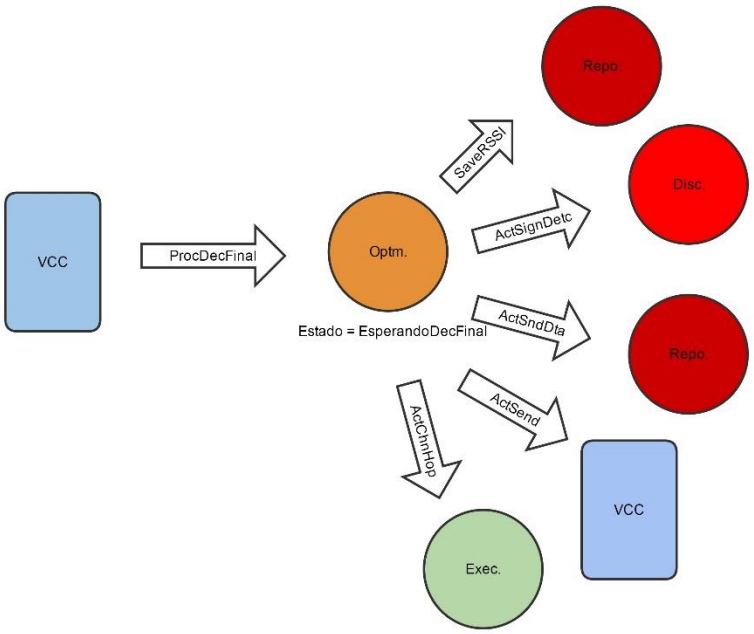


Figura 4.5 Diagrama de mensajes entre sub-módulos cuando se recibe una respuesta de cambio de canal con un canal diferente al propuesto inicialmente

4.1.2. Repository

Este sub-módulo será el encargado de almacenar la información que se reciba del resto de nodos de la red y enviarla al resto de sub-módulos si se la piden. La estructura de los mensajes con destino este sub-módulo es la siguiente:

Cuando le lleguen mensajes de VCC los datos se almacenarán en Param2 como se explicará en la siguiente sección y cuando le lleguen mensajes de Optimizer devolverá la información en diferentes parámetros dependiendo del dato pedido. La información que se puede pedir y almacenar en Repository y las funciones implementadas se detallan a continuación:

- `BOOL CRM_Repo_SendDat(REPO_MSSG_RCVD *Peticion)`
  Esta función es la encargada de enviar la información que se le pide al sub-módulo Repository desde otros sub-módulos. Para la implementación de este algoritmo se ha añadido la posibilidad de devolver el número de retransmisiones en un canal, el canal y el RSSI en una posición de la lista de canales ordenada y el número de mensajes intercambiados con otro nodo.
  Para devolver el canal y el RSSI de una posición, se ordena la lista de RSSI de menor a mayor, ocupando la menor potencia la posición cero, y ordenando una lista con los

números de canal de la misma forma que la de RSSI. El algoritmo de ordenación usado para esto ha sido *Bubble Sort.*

- `void CRM_Repo_NodoPropio(REPO_MSSG_RCVD *Peticion)`
  En esta función se ha añadido la opción de almacenar el número de retransmisiones de un paquete de aplicación mediante el envío de un mensaje a Repository con el campo Param1 del mensaje con el valor EnvRTx.

- `BOOL CRM_Repo_NodosRed(REPO_MSSG_RCVD *Peticion)`
  Esta función se encarga de recibir los mensajes de otros nodos con información de sensado del otro nodo. Almacena el valor del canal óptimo y de su potencia de ruido para las interfaces de 868 MHz y 2,4 GHz además del mejor canal de entre esos dos y la interfaz a la que pertenece. Dependiendo del estado en el que se encuentre el nodo en el momento en que recibe el mensaje, manda una petición al método `CRM_Optm_Processor` con diferente Param1 para que el sub-módulo Optimizer procese la información del mensaje.
  El paso de mensajes entre Repository y Optimizer cuando recibe información del espectro de otros nodos y el campo Param1 para cada estado queda detallado en la Figura 4.6.

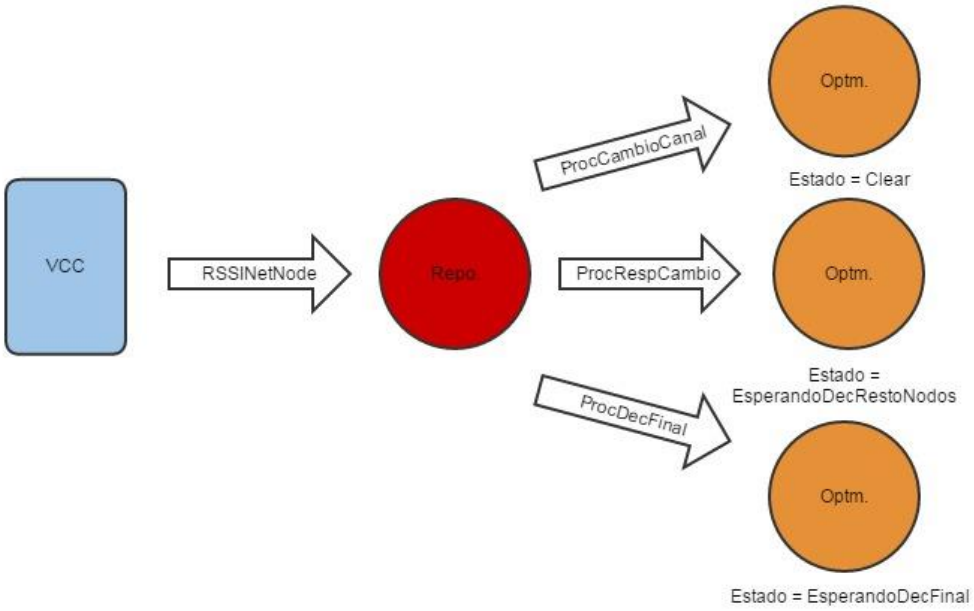


Figura 4.6 Diagrama de peticiones a Optimizer cuando se recibe información de sensado de otro nodo

- `void CRM_Repo_NRTx(BYTE n_rtx, BYTE canal, radioInterface ri)`
  Es la función encargada de almacenar el número de retransmisiones que se producen al enviar un mensaje de aplicación. Los parámetros de entrada son la interfaz radio con la que se está transmitiendo, el canal en el que se han producido las retransmisiones y el número total de retransmisiones que se han producido.

- `void CRM_Repo_Mensajes_Intercambiados(BYTE *Address)`
  Esta función es la encargada de actualizar el número de mensajes que se han recibido de un mismo nodo durante la ejecución de la aplicación. La llamada a esta función se

realiza mediante un mensaje a Repository con el campo DataType con el valor AddMsg. El mensaje se envía cuando en la interrupción del timer 4 se comprueba si hay datos en el buffer de recepción.

- `void CRM_Repo_Str_RSSI(radioInterface ri)`
  Esta función se encarga de guardar el valor de la potencia de ruido térmico obtenida del sensado del espectro realizado anteriormente por el sub-módulo Discovery. Posteriormente se utiliza esta información para decidir si el canal al que quiere cambiar otro nodo de la red es adecuado para el nodo que hace el sensado.

- `BOOL CRM_Repo_Reiniciar_RTx(void)`
  Es una función auxiliar. Se llama a esta función cada vez que se decide no cambiar de canal debido a que se decide no cambiar de canal porque un nodo con el que se ha intercambiado un porcentaje elevado de mensajes ha decidido no cambiar de canal. Poniendo a cero el número de retransmisiones producidas se evita que se inicie el algoritmo dos veces consecutivas sin que se intente enviar un mensaje de aplicación nuevo.

4.1.3. VCC

En este sub-módulo se ha tenido que modificar el modo en el que se pasaban los mensajes recibidos con destino Repository. Al tener que enviar un número de datos superior al número de campos en el mensaje con posibilidad de incluir datos personalizados, y al disponer de punteros con la capacidad de incluir cualquier tipo de dato, se ha procesado la información útil de cada mensaje, incluyéndolo en un vector y pasando ese vector a través del puntero al sub-módulo destino.

4.1.4. Execution

La funcionalidad de este sub-módulo no ha sido modificada. Las peticiones que se le hacen desde Optimizer son para cambiar el canal en el que se está transmitiendo. La función que se utiliza es:

```
BOOL CRM_Exec_ChanHoping(EXEC_MSSG_RCVD *Peticion)
```

El cometido de esta función es cambiar al canal que se le pasa en el parámetro Param1 del mensaje con destino Execution.

Los posibles valores del parámetro Action para los mensajes de este submódulo se exponen en la siguiente tabla:

EXECACTION	**Acción que se realiza**
ActSleepMCU	Dormir MCU
ActResetMCU	Resetear MCU
ActChnHop	Cambiar de canal
ActTxPwr	Cambiar potencia de transmisión
ActTurnOn	Encender interfaz radio
ActSleep	Dormir interfaz radio
ActWake	Despertar interfaz radio
ActTurnOff	Apagar interfaz radio
ActDisconn	Desconectar nodo de la red

Tabla 4.3 Posibles valores del parámetro Action de los mensajes para Execution

Para que se realice el cambio el parámetro Action del mensaje recibido deberá ser ActChnHop.

4.1.5. Discovery

La funcionalidad de este sub-módulo tampoco ha sido modificada. La estructura de los mensajes con destino este sub-módulo es la siguiente:

```
typedef struct _DISC_MSSG_RCVD
{
      INPUT BYTE OrgModule;
      INPUT DISCACTION Action;
      INPUT radioInterface Transceiver;
      INPUT void *Param1;
      INPUT void *Param2;
      INPUT void *Param3;
      OUTPUT void *Param4;
} DISC_MSSG_RCVD;
```

Los mensajes que le envía Optimizer son para pedir la información del canal óptimo de cada interfaz y el valor del RSSI de ruido térmico que reciben. La función que se utiliza es:

```
BYTE CRM_Disc_SignalDetection(DISC_MSSG_RCVD *Peticion)
```

El cometido de esta función es la de escanear los canales de la interfaz radio que se le pase en el parámetro Transceiver de la petición y devolver el canal óptimo y el valor del RSSI de ruido térmico de ese canal. El canal lo devuelve como salida de la función y el valor del RSSI a través del parámetro Param4 de la petición. Por último, puntualizar que el valor necesario del parámetro Action para que se realice esta acción es ActSignDetect.

4.2. Comentarios

La funcionalidad de enviar mensajes *broadcast* mediante el sub-módulo VCC no estaba implementada en la HAL ni en el sub-módulo por lo que se ha modificado la estructura de los mensajes que se envían a VCC añadiendo el parámetro AddrMode. Además se ha modificado la función `Send_Buffer` en la HAL añadiendo un parámetro de entrada con el mismo nombre. Con esto, pasando el parámetro BROADCAST_ADDRMODE a los mensajes dirigidos a VCC se consigue la nueva funcionalidad.

Capítulo 5. Aplicación de prueba de los algoritmos

En este capítulo se expone el proceso seguido para el diseño e implementación de la aplicación utilizada para comprobar el correcto funcionamiento de los dos algoritmos. Principalmente se va a simular el comportamiento de una aplicación de paso de mensajes entre diferentes nodos de la red.

5.1. Diseño

Como se ha mencionado anteriormente, la finalidad de la aplicación demostradora es la de simular el comportamiento de una aplicación que pueda tener una WSN. El escenario que se va a utilizar para la aplicación va a tener un tiempo entre paquetes de 1 segundo y se transmitirá inicialmente a la máxima potencia de transmisión que permiten las interfaces.

Figura 5.1 Propuesta de escenario de CWSN en el B-105 lab

Para el nuestra aplicación se va a hacer que los nodos envíen mensajes de aplicación cada segundo, variando aleatoriamente con un retardo de hasta cien milisegundos para comprobar el funcionamiento del algoritmo de seguridad. Se usarán dos nodos ya que son suficientes para comprobar la correcta implementación del código. Para el algoritmo de seguridad se van a implementar los siguientes cambios en tiempo de ejecución:

- Un nodo cambia su potencia transmitida en cierto momento, comprobando que el otro lo detecta como atacante.
- En otro momento el segundo nodo cambia el tiempo entre paquetes detectándolo el nodo anterior como atacante.

Para la prueba del funcionamiento del algoritmo de reducción de consumo es necesario que haya retransmisiones en el canal por el que se transmiten los mensajes de aplicación por tanto, es posible introducir una fuente de ruido en la frecuencia en la que se está transmitiendo para producir las retrasmisiones.

Debido a que van a existir mensajes de aplicación y de control es necesario definir una prioridad para el procesamiento de estos. Se han tomado las siguientes decisiones en cuanto al envío de mensajes de aplicación durante la ejecución de las estrategias:

- Seguridad: Al ser necesario un tiempo de procesamiento muy corto para la toma de decisiones, los mensajes de aplicación se siguen enviando normalmente. Cuando un mensaje de control llega, se procesa antes que todos los de aplicación que estén en el *buffer*.
- Reducción de consumo: Debido a que la decisión de cambiar de canal afecta al envío de mensajes de aplicación y que la decisión se toma teniendo en cuenta la opinión del resto de nodos de la red, se decide parar el envío de mensajes de aplicación durante la ejecución de la estrategia. El procesamiento de mensajes de aplicación sí sigue vigente durante la ejecución.

Con todo esto ya podemos pasar a describir la implementación de la aplicación de prueba.

5.2. Implementación

La implementación de la aplicación tiene dos funciones que realizan las tareas necesarias y una más que se usa para procesar los mensajes recibidos. El código implementado se encuentra en el fichero `Aplicacion.c`. A continuación se detallan las funciones que contiene el fichero:

- `void Enviar_Paquete_Datos_App(radioInterface ri, BYTE modo, BYTE *addr)`
  Esta función envía los mensajes de la aplicación. Para que se pare de enviar cuando se esté ejecutando el algoritmo de reducción de consumo se comprueba un flag siempre que se vaya a enviar un mensaje. También se encarga de contar el número de retransmisiones, guardarlo y de descartar los mensajes si se ha alcanzado el máximo de retransmisiones posibles. En los parámetros de entrada se le puede indicar la interfaz por la que se quiere transmitir, el modo de transmisión (*broadcast* o a un solo nodo) y en caso de que sea a un solo nodo, la dirección a la que se quiere enviar el mensaje.
- `BOOL Proc_Buff(RECEIVED_MESSAGE *Buffer)`
  Es la función que procesa los mensajes recibidos. Principalmente guarda la dirección del nodo que envió el paquete y los datos que contiene. También se encarga de dar prioridad a los mensajes de control haciendo que se procesen antes que los de aplicación si hay de los dos pendientes de procesar. Esto es sencillo ya que se ha reservado la interfaz de 434 MHz para hacer de VCC lo que permite comprobar simplemente si hay datos en el buffer de recepción de esta interfaz o en la que está transmitiendo la aplicación.
- `void Recibir_info(void)`
  Esta función recibe todos los mensajes y comprueba si son de control o de aplicación, almacenándolos o realizando las tareas necesarias para la aplicación. En este caso se ha decidido no hacer nada con los mensajes de aplicación ya que si se decidiese enviar por la UART los mensajes de aplicación recibidos se perderían las trazas más importantes de la ejecución de las estrategias.

Las decisiones tomadas en cuanto a la ejecución de las funciones de la aplicación para que se cumpla la temporización, en el caso del envío de mensajes, y no perder ningún paquete, en el caso de la recepción, han sido la de utilizar el *timer 5* que no estaba siendo utilizado para ejecutar la función de envío de mensajes. El *timer* ha sido configurado con un período de un milisegundo y prioridad inferior al resto de *timers*. Las líneas que configuran el *timer* 5 son las siguientes:

```
WORD TiempoT5 = 1; //En mseg

WORD CuentaT5 =
(TiempoT5)*(CLOCK_FREQ/((1<<mOSCGetPBDIV())*Prescaler*1000));
```

```
OpenTimer5(T5_ON | T1_IDLE_CON | T5_GATE_OFF | T5_PS_1_32 |
T4_SOURCE_INT, CuentaT5);

ConfigIntTimer5(T5_INT_ON | T5_INT_PRIOR_1 | T5_INT_SUB_PRIOR_3);
```

Para que el periodo de transmisión de los paquetes sea mayor se ha definido una variable `mseg` que se aumenta con cada interrupción del *timer* y se ejecuta la función de envío de mensajes cuando se alcanza el valor de una constante definida y con nombre `Periodo`.

Para la recepción de mensajes se ha decidido utilizar el bucle principal del programa ya que no se necesita una temporización estricta y además, para no intentar procesar mensajes que no se han recibido, se comprueba que haya datos en algún buffer de recepción antes de procesarlos.

Con esto conseguimos que se procesen todos los mensajes que se reciban de forma rápida y conforme llegan los datos y se envíen los paquetes de datos con el período que se estime oportuno.

A continuación se presenta un diagrama con los pasos seguidos por la aplicación y las condiciones que se tienen que cumplir para que se ejecuten las funciones.

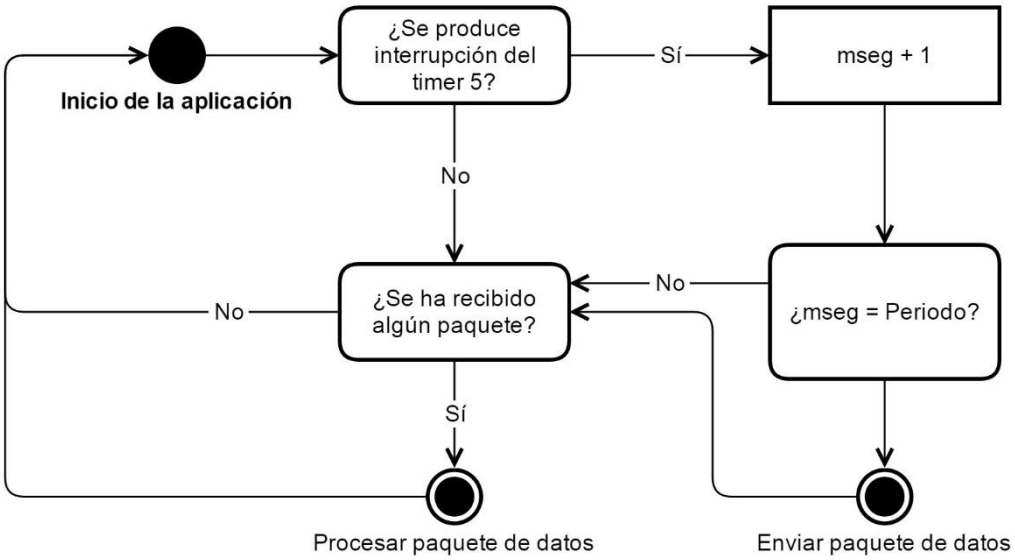


Figura 5.2 Diagrama de ejecución de la aplicación

Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras

En este último capítulo se expondrán las conclusiones obtenidas tras el trabajo mediante la evaluación de los objetivos logrados y se detallarán los pasos a seguir en trabajos posteriores a este.

6.1. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo era la implementación de dos estrategias cognitivas en el *testbed* del laboratorio. La implementación tenía unas condiciones en cuanto al uso de recursos en los nodos ya que la memoria y la capacidad de procesamiento de éstos es limitada. Además las dos estrategias se tenían que diseñar de acuerdo con la arquitectura cognitiva que existe en el nodo.

Adicionalmente, se tenía que desarrollar una aplicación que consiguiese comprobar la funcionalidad de las estrategias y fuese útil para depurar el código.

Para lograr esto, en la sección 1.1 se propusieron objetivos. Las tareas que se han realizado para lograr esos objetivos se detallan a continuación:

- Familiarización con las herramientas. Las tareas que se han realizado para la consecución de este objetivo se detallan a continuación:
    - Instalación de MPLAB X, compilador, drivers de ICD 3, etc.
    - Ejecución de diferentes aplicaciones de prueba en los nodos, usando la herramienta de depuración de MPLAB, ejecutando paso a paso e incluyendo puntos de parada.
    - Lectura y comprensión de trabajos anteriores relacionados con el cNGD, su firmware y la arquitectura cognitiva.
    - Ejecución y comprensión de aplicaciones de prueba realizadas anteriormente en los nodos comprobando el envío de mensajes de aplicación y por VCC.
    - Configuración y prueba de programa para ver las trazas generadas en los nodos en el ordenador.

  El resultado de este objetivo se ve en los capítulos 1 y 2.
- Estudio y comprensión de los algoritmos. Este objetivo era uno de los pasos principales para lograr el objetivo final de la implementación de los algoritmos. Se estudiaron los dos artículos donde se presentaban los algoritmos que se iban a implementar en detalle consultando algunos detalles con los autores de dichos artículos.
- Implementación. Este era el objetivo principal del trabajo. Se han ido implementando funciones que cubrieran una tarea de la estrategia. Cada una de las funciones se han ido colocando en los sub-módulos de la arquitectura cognitiva que tenía que realizar esa acción y se han creado los mensajes necesarios para ejecutar otras funciones que se tuviesen que realizar en otros sub-módulos. Para comprobar que las funciones se ejecutaban correctamente se han incluido trazas para ver por qué zona del programa fallaba. Cuando no era suficiente con las trazas se ha tenido que ejecutar el programa en modo depuración añadiendo puntos de parada en las zonas del código que se querían probar y comprobando que el contenido de la memoria era el correcto.
  Los resultados de este objetivo se desarrollan en detalle en los capítulos 3 y 4.
- Desarrollo de la aplicación. Este objetivo consistía en la elaboración de una aplicación demostradora que imitase el funcionamiento de una aplicación típica de CWSN. Para desarrollarlo se han utilizado las funciones de la HAL que llenan el *buffer* de transmisión

de una interfaz y manda un mensaje de datos. También se ha tenido que crear una función que procesa los mensajes que se reciben y los almacena en la memoria del MCU para liberar el buffer de recepción de la interfaz.
El resultado de este objetivo se ve en el capítulo 5.

- Pruebas. Para las pruebas se han utilizado 3 nodos. Se han realizado diferentes pruebas para cada estrategia. Se detallan a continuación:
    - Algoritmo de seguridad. Se ha hecho que se reduzca la potencia de transmisión de uno de los nodos para que los paquetes que reciben los otros nodos. Además, para probar todos los casos, se ha hecho que un nodo cambie la frecuencia de envío de mensajes de aplicación en un momento dado. Con esas dos pruebas, si el resto de nodos detectan al que cambia los parámetros como atacante se ha comprobado la funcionalidad del código.
    - Algoritmo de reducción del consumo. Para probar la funcionalidad en este caso ha sido necesario hacer que se produzcan retransmisiones en el canal por el que se están transmitiendo los mensajes de aplicación. Para ello se ha reducido la potencia de transmisión de los nodos al mínimo.

6.2. Líneas futuras

Los aspectos en los que se puede seguir avanzando en cuanto al trabajo realizado en este documento y, en general, en la implementación de estrategias de optimización para CWSN van desde diferentes pruebas que se pueden realizar para probar la finalidad y la validez de los algoritmos que se han implementado hasta diferentes mejoras que se podrían realizar para agilizar el trabajo de programación y pruebas en los nodos. Se propone lo siguiente:

- En cuanto a pruebas que se pueden realizar sobre el trabajo realizado:
    - Prueba de funcionalidad en una red con más nodos. Las pruebas que se han realizado en este trabajo incluyen una red compuesta por tres nodos, lo que nos sirve para validar que la implementación ha sido correcta. Ejecutando los algoritmos en una red real con unos 50 nodos se podría comprobar mejor la validez de las simulaciones realizadas.
    - Prueba en diferentes topologías de red. En este trabajo se ha utilizado el protocolo P2P que es uno de los que están implementados en el nodo. Sería interesante probar cómo se comporta cada estrategia en diferentes topologías ya que, por ejemplo, el algoritmo de reducción de consumo podría tener diferente rendimiento para cada topología.
- En cuanto a posibles mejoras que se podrían llevar a cabo sobre el nodo, tanto HW como SW:
    - Mejora de algunos módulos de CRModule. En este trabajo se han realizado algunas modificaciones a funciones de la arquitectura cognitiva. Se puede mejorar este aspecto haciendo que las funciones sean más generales y puedan tratar con más datos.
    - Actualizaciones OTAP (Over The Air Programming). Esta mejora consiste en dotar a los nodos de la posibilidad de ser programados de forma inalámbrica, permitiendo a los desarrolladores de código agilizar el proceso de carga y pruebas de los programas. Además, sería más sencillo reprogramar los nodos una vez que se haya desplegado el banco de pruebas.
    - Nodo pasarela. Puede ser importante tener nodos que actúen como pasarelas para la red hacia el exterior. Para aplicar esta mejora se podría usar el propio

cNGD con módulos de expansión que lo doten de conectividad con redes exteriores como puede ser Wi-Fi o Ethernet.

- Estado de la batería. Ya que los nodos están pensados para que se alimenten con baterías sería interesante poder contar con mecanismos de aviso de que un nodo se está quedando sin batería.
- Despliegue del banco de pruebas. Un aspecto muy importante en la prueba de estrategias de optimización para CWSN es contar con un escenario lo más ajustado a la realidad como sea posible.

Referencias

[1] "¿ Qué es una Red de Sensores Inalámbricos ?," 2009. [Online]. Available: http://www.ni.com/white-paper/7142/es/.

[2] "IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4)." [Online]. Available: http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/TG4.html.

[3] "Zigbee Alliance." [Online]. Available: www.zigbee.org.

[4] "HART Communication Foundation, WirelessHART Technology." .

[5] "ISA, Wireless Compliance Institute. ISA100 Wireless Systems for Automation." [Online]. Available: http://www.isa100wci.org.

[6] Microchip Technology Inc., "AN1066 Microchip MiWi™ Wireless Networking Protocol Stack," 2007.

[7] "IEEE 802.11™ Wireless Local Area Networks." [Online]. Available: http://www.ieee802.org/11/.

[8] "Wi-Fi Alliance." [Online]. Available: http://www.wi-fi.org/.

[9] "United States Frequency Allocations." [Online]. Available: http://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/spectrum_wall_chart_aug2011.pdf.

[10] G. Jara, "Diseño e implementación de una arquitectura para la gestión de comunicaciones de una red de sensores inalámbricas cognitiva.," PFC, ETSIT-UPM, 2013.

[11] "Introduction to Cognitive Radio (CR)." [Online]. Available: http://zoyok.com/blog/introduction-cognitive-radio-cr.

[12] N. C. Carlos, P. R. B. M. NY, C. K., B. D., and Sai Shankar, "IEEE 802.22: The first worldwide wireless standard based on cognitive radios," in *2005 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005*, 2005, pp. 328–337.

[13] "IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 2 (TG2)." [Online]. Available: http://www.ieee802.org/15/pub/TG2.html.

[14] A. Tena García, "Development of a multiple RF interfaced platform for Cognitive Wireless Sensor Networks," Tesis, ETSIT-UPM, 2013.

[15] E. J. Cobo, "Diseño, implementación y prueba de una placa de expansión con sensores y actuadores para nodos inalámbricos con capacidades cognitivas," TFG, ETSIT-UPM, 2014.

[16] Microchip Technology Inc., "PIC32MX5XX/6XX/7XX Family Data Sheet," 2009. [Online]. Available: ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/61156H.pdf.

[17] J. Domingo, “Diseño, optimización y prueba un nodo para una red de sensores inalámbrica con capacidades cognitivas,” PFC, ETSIT-UPM, 2013.

[18] J. Rabaey, A. Wolisz, A. O. Ercan, A. Araujo, F. Burghardt, S. Mustafa, A. Parsa, S. Pollin, I.-H. Wang, and P. Malagon, “Connectivity Brokerage — Enabling Seamless Cooperation in Wireless Networks,” *White*, pp. 1–41, 2010.

[19] J. M. Bermudo, “Adaptación y reestructuración de la implementación de una arquitectura cognitiva para redes de sensores inalámbricas,” TFG, ETSIT-UPM, 2014.

[20] Microchip Technology Inc., *MPLAB ® X IDE User ’ s Guide*. 2012.

[21] Microchip Technology Inc., *In-Circuit Debugger User ’ s Guide For MPLAB X IDE*. 2012.

[22] J. Blesa, E. Romero, A. Rozas, and A. Araujo, “PUE attack detection in CWSNs using anomaly detection techniques,” *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2013, no. 1, p. 215, 2013.

[23] E. Romero, J. Blesa, A. Rozas, and A. Araujo, “Enhancing Energy Efficiency in CRSNs via Channel Selection based on Game Theory and Collaboration.,” 2015.

Lista de acrónimos

WSN	Wireless Sensor Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
WPAN	Wireless Personal Area Network
MAC	Medium Access Control
PHY	Physical Layer
OSI	Open Systems Interconnection
Wi-Fi	Wireless Fidelity
ISM	Industrial, Scientific and Medical
QoS	Quality of Service
CR	Cognitive Radio
WRAN	Wireless Regional Area Network
CWSN	Cognitive Wireless Sensor Network
B105 lab	B105 - Electronic Systems Lab
cNGD	Cognitive New Generation Device
HW	Hardware
SW	Software
µUSB	micro Universal Serie Bus
RI	Radio Interface
MCU	MicroController Unit
HAL	Hardware Abstraction Layer
P2P	Peer to Peer
IDE	Integrated Development Environment
ICD	In-Circuit Debugger
RSSI	Received Signal Strength Indicator
VCC	Virtual Channel Connection
OTAP	Over The Air Programming