

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA



Diseño e implementación de una red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.15.4 para equipo marino

TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

Raúl Campos Mendoza

Ensenada Baja California, México. Diciembre 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA

Diseño e implementación de una red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.15.4 para equipo marino

TESIS

Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

Raúl Campos Mendoza

Aprobada por:

MC. Humberto Cervantes de Ávila
Director de tesis

Dr. Juan Iván Hipólito Nieto
Miembro del comité

M.C. Juan de Dios Sánchez López
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Diciembre 2009

RESUMEN de la tesis que presenta **Raúl Campos Mendoza**, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada, Baja California, Diciembre de 2009.

Diseño e implementación de una red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.15.4 para equipo marino

Resumen aprobado por:

MC. Humberto Cervantes de Ávila
Director de Tesis

En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de una red inalámbrica híbrida implementada para equipo marino. Como principal característica se contempla la construcción de un puente (Gateway) entre el estándar de IEEE802.15.4 y estándar NMEA2000®, lo que permite enlazar la red inalámbrica desarrollada con la red NMEA2000® ya existente, la cual fue diseñada por los fabricantes de equipo marino para implementar en forma rápida y eficiente la interoperabilidad de los equipos. Además este enlace permite obtener los datos de un sensor de viento a distancia y desplegarlos en unidades que cuenten con comunicación estándar NMEA2000®. Se describe la metodología de diseño, se presentan figuras de resultados y diagramas de flujo de las distintas tareas que cumplen los microprocesadores para los casos del puente de protocolos y el del sensor de viento. Se realizaron pruebas de campo utilizado en los nodos que conforman la red y se muestran resultados gráficos de alcance de la red en comunicación punto a punto en diferentes posiciones dentro de una embarcación.

Palabras Clave: *Redes inalámbrica, estándar, NMEA2000®, Nodos, Bases, Coordinador*

Dedicatoria

A mis tres amores: Patricia, Itzel e Ix Zazil

“Nunca consideres el estudio como una obligación sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.”

- Albert Einstein (1879-1955)

Agradecimientos

*A mi asesor, MC. Humberto Cervantes de Ávila,
por su atención, consejos y apoyo.
Sobre todo por su confianza y esfuerzo.*

*A mi familia, mis padres y mis hermanos,
por apoyarme y alentarme durante todo momento.*

*A mis amigos y colegas de trabajo en NAVICO,
Que me apoyaron y me ayudaron a ver más oportunidades,
en especial a Marcos, Eduardo y Alán.*

*A los compañeros y amigos de la generación, por
Compartir experiencias y horarios :)*

*A la empresa NAVICO por darme la oportunidad
sin la cual no hubiera
sido posible este trabajo de investigación.*

*A los miembros de mi comité, Dr. Juan Iván Hipólito Nieto
M.C. Juan de Dios Sánchez López,
por su tiempo y apoyo durante mi formación profesional.*

Tabla de Contenido

Dedicatoria.....	4
Agradecimientos	5
Lista de Figuras.....	8
Tablas.....	9
1 Introducción	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Planteamiento del problema.....	12
1.3 Objetivo General	13
1.3.1 Objetivos específicos.....	14
1.4 Metodología	14
1.5 Organización de la tesis.....	15
2 Marco Teórico y Antecedentes	16
2.1 Características NMEA2000®	17
2.1.1 Capa física	19
2.1.2 Capa de Enlace de Datos NMEA 2000 ®	20
2.1.3 Capa de Red.....	22
2.1.4 Administración de Red	23
2.1.5 Capa de Aplicación.....	24
2.3 Conexiones	25
2.2 El Estándar IEEE 802.15.4.....	26
2.2.1 Topologías de Red	28
2.2.2 Arquitectura	29
2.2.3 La estructura de las super-tramas	30
2.2.4 Formato general de las tramas MAC	31
2.2.5 Estructura de Confirmación.....	32
2.2.6 Detalles de la MAC	33
2.2.7 Capa Física	34
Canales de transmisión	36
Modulación.....	37

Sensibilidad y Potencia.....	37
Seguridad	39
3 Desarrollo del Sistema	40
3.1 Conceptos clave.....	41
3.2 Descripción del sistema.....	42
3.3 Plataformas de hardware	43
3.3.1 Módulo LR-WPAN PAN802154	44
3.3.2 Microcontroladores.....	46
3.4 SMAC.....	48
3.4.1 Trama SMAC	50
3.5 Descripción del funcionamiento.....	51
3.6 Diseño de la capa de aplicación SMAC	53
3.6.1 Inicialización	53
3.6.2 Máquina de estados	53
3.6.3 Análisis de información.....	54
3.6.4 Ejecución de decisiones.....	55
3.7 Secuencia de operación	55
3.7.1 Sensor de Viento.....	55
3.7.2 Receptor inalámbrico.....	59
3.7.3 Interfaz CAN	62
4 Pruebas y Resultados	64
4.1 Funcionamiento del enlace con la red	64
4.1.1 Conversión de datos de Velocidad	68
4.2 Calidad de enlace	70
5 Conclusiones	79
5.1 Aportaciones.....	79
5.2 Trabajo futuro.....	80
Apéndice A. Primitivas.....	81
A.1 Transmisión.....	81
A.2 Recepción	81
A.3 Bajo consumo de potencia.....	83

A.4	Radio	84
A.5	SMAC.....	85
Apéndice B. Acrónimos.....		86
Bibliografía		88

Lista de Figuras

Figura 1.	Topología de una red típica	20
Figura 2.	Componentes de un cableado de red	25
Figura 3.	Topologías estrella y puerto a puerto	28
Figura 4.	Representación grafica de las capas	29
Figura 5.	Estructura de las super-tramas.....	31
Figura 6.	Forma general de la trama MAC.	32
Figura 7.	Trama de reconocimiento	33
Figura 8.	Estructura de canales del IEEE 802.15.4.....	36
Figura 9.	Diagrama de un sistema comunicación inalámbrico punto a punto	42
Figura 10.	Modelo de un nodo de comunicación.....	44
Figura 11.	Fotografía del módulo LR-WPAN PAN802154	45
Figura 12.	Configuración MC13192 (encapsulado QFN de 32 terminales).....	45
Figura 13.	Configuración de terminales de los microcontroladores	47
Figura 14.	Diagrama a bloques comparativo de los protocolos SMAC y 802.15.4	48
Figura 15.	Estructura de los paquetes SMAC.....	49
Figura 16.	Diagrama a bloques de la SMAC	50
Figura 17.	Interconexión de los microcontroladores (Gateway)	52
Figura 18.	Interconexión del microcontrolador con el sensor de viento.....	52
Figura 19.	Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador del sensor de viento (parte 1).....	57
Figura 20.	Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador del sensor de viento (parte 2).....	59
Figura 21.	Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador GT60 del gateway (parte 1).....	61
Figura 22.	Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador DZ60 del gateway (parte 2).....	63
Figura 23.	Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador DZ60 del gateway (parte 3).....	63
Figura 24.	Gateway SMAC-CAN.....	65

Figura 25. Conexiones de red y alimentación.....	67
Figura 26. Dispositivo de medición de viento (Wind Vane)	67
Figura 27. Pantalla de despliegue de información	68
Figura 28. Instalación con dispositivo de referencia	69
Figura 29. Representación gráfica con métodos Logarítmico y Polinómico.....	70
Figura 30. Representación gráfica de equivalencia de valores	70
Figura 31. Ubicación de puntos de prueba (Vista superior)	71
Figura 32. Ubicación de puntos de prueba (Vista lateral)	72
Figura 33. Gráfica de desempeño para Punto A	73
Figura 34. Gráfica de desempeño para Punto C	74
Figura 35. Gráfica de desempeño para Punto E.....	74
Figura 36. Gráfica de desempeño para Punto F	75
Figura 37. Gráfica comparativa de desempeño para Punto B.....	76
Figura 38. Gráfica comparativa de desempeño para Punto D	76
Figura 39. Gráfica comparativa de PER entre puntos de prueba	77
Figura 40. Gráfica comparativa de PER para puntos con fuente de ruido.....	77

Tablas

Tabla 1. Multi-Packet to Fast-Packet Comparison	22
Tabla 2. Tabla comparativa estándar IEEE 802.15.....	26
Tabla 3. Propiedades y características	27
Tabla 4. Frecuencia de los canales IEEE 802.15.4.	36
Tabla 5. Definiciones de sensibilidad del receptor	38
Tabla 6. Comparativo de protocolos inalámbricos IEEE 802.....	38
Tabla 7. SMAC en números.....	49
Tabla 8. Equivalencia de valores a velocidad de viento	69
Tabla 9. Valores de registro U8PaValue.....	83
Tabla 10. Relación de salida de frecuencias	84
Tabla 11. Tabla de configuración de frecuencias	84

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Cuando las frecuencias de radio aparecieron a finales del siglo XIX pocos pensaban que las comunicaciones inalámbricas podrían ser enviadas a través del aire a grandes distancias y que serian competitivas en un mundo dominado por el telégrafo y el teléfono [1]. En los últimos años, las redes inalámbricas de aparatos portátiles equipados con dispositivos inalámbricos de corto alcance están ganando mucha popularidad y esto se ha ido incrementando conforme sus prestaciones aumentan y se descubren nuevas aplicaciones para ellas. Se ha encontrado un nicho en lo que respecta a de redes inalámbricas para aplicaciones o líneas de productos específicos.

Tradicionalmente se han utilizado cables de propósito específico para interconectar aparatos personales con el fin intercambiar información entre ellos, esto ha generado una gran diversidad de tipos de conectores y configuración de cables que generalmente no son compatibles. La necesidad del desarrollo de soluciones para la interconexión de aparatos, da pie a la creación de una forma eficiente, rápida y confiable de hacer transacciones de información en forma inalámbrica. Estas tecnologías permiten eliminar ataduras y olvidarse de los cables, creando entornos más sencillos, eficaces y prácticos; un escenario que ha pasado a formar parte de nuestra vida cotidiana.

Las tecnologías inalámbricas ofrecen un acceso limpio, sencillo y barato a servicios y redes de Telecomunicación. Las redes inalámbricas personales (WPAN-Wireless Personal Area Network) como Bluetooth y ZigBee, las redes locales, como Wi-Fi (Wireless Fidelity), las redes metropolitanas como Wi-Max (Worldwide Interoperability for Microwave Access) y las redes de difusión como LMDS (*Local Multipoint Distribution Service*), son algunas de las tecnologías inalámbricas desarrolladas como una alternativa y/o complemento a los sistemas actuales.

Las WPAN son redes que normalmente se utilizan para conectar varios dispositivos personales portátiles sin la necesidad de utilizar cables. Esta comunicación de dispositivos puerto a puerto (peer-to peer) normalmente no requiere de altas tasas de transmisión de datos, por ejemplo, la tecnología inalámbrica Bluetooth tiene una distancia nominal de 10 metros con tasas de transmisión de datos de hasta 1 Mbps [1]. El tipo de ámbito y la baja tasa de datos, tienen

como resultado un bajo consumo de energía, haciendo a la tecnología WPAN adecuada para el uso con dispositivos móviles pequeños, que funcionan con baterías, tales como teléfonos celulares, asistentes personales PDAs o cámaras digitales [3].

La característica principal de este tipo de redes, es que enfocan sus sistemas de comunicaciones a una área típica de 10 metros a la redonda que envuelve a una persona o algún dispositivo ya sea que este en movimiento o no. A diferencia de las redes inalámbricas de área local (WLAN- *Wireless Local Area Network*), una conexión hecha a través de una WPAN involucra muy poca o nula infraestructura o conexiones directas hacia el mundo exterior. Este tipo de tecnología también procura hacer un uso eficiente de recursos, por lo que se han diseñado protocolos simples y lo más óptimos para cada necesidad de comunicación y aplicación. En WPAN, el usuario es relacionado con los dispositivos electrónicos de su posesión, o en su proximidad en vez de a un lugar geométrico en particular o en alguna localidad de la red. El término red de área personal se concibió para describir este tipo de conexión de red diferente. La versión inalámbrica de dicho concepto es WPAN, la cual puede entenderse como una “cápsula personal de comunicación” alrededor de la persona. Dentro de dicha cápsula, que se mueve en la misma forma en que lo hace una persona, los dispositivos personales se pueden conectar entre ellos [2].

Otros estándares WPAN desarrollados para comunicación inalámbrica dentro de una gama diferente de aplicaciones en las que se incluyen el control y monitoreo industrial; la seguridad pública, la detección y ubicación de personas en lugares de desastres; la medición en automóviles (monitoreo de la presión neumática en las llantas y tarjetas o placas inteligentes); la agricultura de precisión (medición del nivel de humedad en el suelo, pesticidas, herbicidas, niveles de PH) (3; 4), son los estándares 802.15.4 y ZigBee, que a diferencia de bluetooth, tienen un alcance de cobertura más amplio (aproximadamente 100 metros).

El estándar IEEE 802.15.4 está desarrollado para soluciones que requieren una baja transmisión de datos y una duración en las baterías de meses e incluso años, así como una complejidad relativamente baja.

Por su lado, el estándar de ZigBee, proporciona la red de comunicaciones y la seguridad; con algoritmos empotrados y los servicios de apoyo para aplicaciones que operan encima de la capa IEEE 802.15.4 (Control de acceso al medio (MAC- Media Access Control) y la capa física (PHY-

Physical Layer), y una topología de red tan variada como aplicaciones pudieran ser imaginadas [5]. Donde la topología elegida se encontrara en función de la aplicación final que se pretende implementar.

El mercado de los productos marinos no es la excepción en la aplicación de esta tecnología, así como muchas compañías han empezado a incursionar agregando características de interconexión inalámbrica en sus productos, actualmente se encuentran productos con conexión inalámbrica para sonares, los cuales permiten la conexión con palm y pocketPC; otros más cuentan con conexión punto a punto entre ellos (ejemplo, transductor-despliegue). En la actualidad se encuentra en desarrollo la implementación de redes inalámbricas para productos marítimos, provocando esta situación una oportunidad para esta aplicación específica.

Por su parte, las redes cableadas empiezan a perder poco a poco popularidad debido a que su infraestructura no es completamente estética y el problema se hace mayor si se cuenta con un gran número de equipos; aunado a esto, el concepto de movilidad, también sigue una tendencia lineal a la baja, la cual es directamente proporcional al número de equipos que queremos conectar. En definitiva, la presencia de cableado dificulta la reubicación de los equipos en red y la rapidez en su la instalación, lo cual deriva en mayores costos. Estas utilizan regularmente conductores de cobre. Una de las principales desventajas de las redes cableadas, es en general su baja tolerancia a fallas en el cable, si el cable se rompe se puede tener incomunicados desde un nodo hasta la totalidad de la red (dependiendo de la topología). Otra característica importante de las redes cableadas, es que necesita elementos terminales al principio y/o fin de ésta; con el fin de evitar la pérdida de propagación de las señales en el medio.

1.2 Planteamiento del problema

Buscando libertad en la movilidad de equipos conectados a una red y en un futuro conectar dispositivos portátiles a ella, salta a luz la necesidad de una red inalámbrica como solución única.

Aun cuando redes inalámbricas han sido incorporadas a diferentes dispositivos de la vida cotidiana y se encuentran en diferentes áreas de aplicación, en el mercado de los productos marinos su presencia es poca.

A partir de esta necesidad, surge la idea de desarrollar el presente proyecto de investigación que pretende implementar un método de comunicación entre dispositivos inalámbricos para formar una red híbrida que ofrezca movilidad de sus dispositivos sin perder comunicación con ninguno de sus integrantes, siempre que estos se encuentren dentro del área de cobertura.

Es importante denotar que no se pretenden diseñar los receptores y transmisores de RF, así como el protocolo de comunicación, ya que se pretende utilizar la capa física del estándar 802.15.4 con la finalidad de dar versatilidad con respecto a futuras aplicaciones. Lo que lleva a buscar el uso de tecnología de vanguardia y comercial que brinde la oportunidad de seleccionar entre diferentes plataformas.

La conexión entre dispositivos es fundamental para evaluar el diseño de la red en el ámbito de embarcaciones, para lo que se estarán utilizando unidades de despliegue donde se muestre la información proveniente del enlace inalámbrico y algunas herramientas de análisis para interpretación de los resultados.

1.3 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de comunicación inalámbrica bajo el estándar 802.15.4 que permita compartir información entre un dispositivo en aplicaciones de equipo electrónico marino, que brinde flexibilidad, movilidad, seguridad y facilidad de implementación.

1.3.1 Objetivos específicos.

- Analizar los requerimientos para una comunicación inalámbrica de RF en embarcaciones.
- Proponer una interfaz inalámbrica como complemento a la red cableada existente (NMEA 2000®) para la comunicación de equipos marinos.
- Diseñar e implementar una interfaz inalámbrica que soporte el tráfico de comunicación equivalente a la red existente (NMEA 2000®).
- Desarrollar el programa de aplicación requerido para lograr la comunicación entre la unidad sensor y unidad de despliegue.
- Evaluar el prototipo en embarcaciones de pesca deportiva.

1.4 Metodología

La realización de este trabajo inició con una revisión de literatura en el área general de redes inalámbricas de sensores con la finalidad de comprender sus características específicas, para posteriormente realizar la revisión de literatura sobre soluciones de comunicación de datos inalámbricas y determinar cuál podría ser útil para la aplicación propuesta. Durante esta etapa, analizaron diferentes soluciones, se lograron entender las necesidades que debe cumplir un sistema para comunicación de dispositivos con sensores.

La estrategia que se utilizó en este trabajo es una metodología que se divide en tres partes.

En la primera consistió en revisar los requerimientos básicos de funcionamiento de la red dentro del medio en que se desea implementar y conocer la plataforma de comunicación ya existente, lo cual permitió definir la topología de red a utilizar de acuerdo a las necesidades de comunicación y del entorno en el que se encuentra situada dicha aplicación.

En la segunda parte se estudiaron los estándares existentes para aplicaciones similares al planteado, de esta forma se tuvo un panorama general dentro del mercado. Con ello se examinó las mejores opciones comerciales, lo cual permitió hacer la elección que mejor se adaptó a las necesidades del presente proyecto.

La tercera parte se centró en el diseño del algoritmo de comunicación en red para la topología y estándar seleccionados.

Una vez que se definió el concepto de red inalámbrica personal a utilizar y definieron las características específicas para el proyecto, se abordó la etapa de diseño para finalmente implementar la solución propuesta.

Una vez concretada la fase de desarrollo, el diseño se probó para verificar que los resultados obtenidos cumplieran con las expectativas, evaluándolo en campo para dejar como referencia los resultados obtenidos para futuros trabajos dentro de esta área.

1.5 Organización de la tesis

Se encuentra dividido en cinco capítulos los que a continuación se detallan:

El capítulo 1, da una introducción al tema de estudio ubicando el tema en cuestión en el contexto de las redes inalámbricas, además define el alcance de este trabajo y los objetivos a alcanzar en el desarrollo del mismo.

El capítulo 2, comprende el marco teórico que ha sido enfocado a la descripción de los protocolos utilizados, NMEA 2000® e IEEE802.15.4. Se pueden observar la estructura de cada protocolo e identificar las diferencias y necesidades de cada uno de ellos.

El capítulo 3, se detalla el desarrollo del sistema, como finalmente forma parte de la red NMEA 2000®. También se describen las consideraciones de interconexión y especificaciones del hardware utilizado así como los algoritmos de software utilizados para el funcionamiento del enlace inalámbrico.

En el capítulo 4, se muestran los resultados en un sistema de prueba y en la implementación del enlace en el entorno real donde es implementado. Los resultados obtenidos permitieron hacer el análisis y evaluar su desempeño para el tipo de aplicación a la que está enfocado este trabajo.

El capítulo 5, como lo menciona el nombre se presentaron las conclusiones y resultados obtenidos del desarrollo de este trabajo, también se incluye las líneas de investigación que se abren para un futuro.

Al fin del trabajo se anexa una sección de apéndices que se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

Apéndice A: Presenta las principales primitivas disponibles para el manejo de la SMAC.

Apéndice B: Acrónimos.

2 Marco Teórico y Antecedentes

En los últimos años el incremento de los equipos eléctricos/electrónicos dentro de las embarcaciones ha sido una tendencia dominante. Los sistemas computarizados han evolucionado de una computadora que controla todo, a un conjunto de computadoras cada una con su propia área de trabajo dentro de ámbito marítimo. Veleros y botes están equipados con aplicaciones electrónicas de todo tipo que incluyen hasta computadoras de escritorios, laptops, GPS, sonares con datos de cartas náuticas y muchas otras.

Esto implica cambiar la forma en que un dispositivo se comunica con cada una de los otros para compartir información de los procesos que están controlando o procesando. La solución la ofrece NMEA 2000®, el protocolo que permite a los fabricantes de equipo marino implementar en forma rápida y eficiente la interoperabilidad de los equipos.

El estándar contiene los requerimientos para la implementación mínima de la red de comunicación serie para interconectar equipo electrónico marino en embarcaciones y veleros. El equipo diseñado para este estándar deberá tener la habilidad de compartir datos, incluyendo comandos y estados, con otros equipos compatibles sobre un solo canal de señalización [6].

El protocolo de comunicaciones diseñado para redes CAN (Controller Area Network) procesa mensajes sensibles e insensibles al tiempo real [7]. NMEA2000® es un protocolo de comunicaciones basado a su vez en el protocolo CAN con una arquitectura de ducto para transferencia de mensajes en un ambiente distribuido; logrando que los sistemas basados en este protocolo cuenten con tasas de transmisión de hasta 250 Kbps con gran confiabilidad.

Otras fortalezas del ducto son su arquitectura multimaestro capaz de proveer características de respuesta en tiempo real y tolerancia a fallas en la recepción de mensajes por mal funcionamiento de los nodos. El intercambio de información en el ducto se hace de una manera inteligente gracias a su forma de arbitraje, es decir, todos los nodos de la red son considerados maestros y cada uno puede enviar mensajes en cualquier momento. Cada mensaje tiene una sección de identificador, este identificador determina la prioridad en el mensaje. Los identificadores con valor más pequeño tienen la más alta prioridad. Aunque varios mensajes sean enviados al mismo tiempo, este sistema de prioridad provocará que un mensaje permanezca en el ducto y no que todos sean destruidos. Una característica más e interesante es que este ducto está diseñado para trabajar en ambientes hostiles, donde existe interferencias (como en los automóviles, o ambientes industriales) gracias a que es un ducto diferencial. Una de las principales razones por las cuales el ducto CAN ha sido tan difundido en el área industrial es por su resistencia al ruido electrónico (interferencia electromagnética). En la capa física de este

protocolo está definido que el ducto del mismo debe ser diferencial; es decir, la información transmitida y/o recibida es interpretada mediante una resta o diferencia de dos señales existentes. Al afectar el ruido electrónico a estas dos señales, las afecta a ambas en la misma proporción; manteniendo una diferencia semejante al caso donde el ruido no estuviera presente. Haciendo este protocolo inmune a la interferencia electromagnética (EMC). Esto es muy importante porque tanto en el área automotriz, marítima, como industrial la existencia de motores es inevitable y por consecuente el ruido eléctrico.

En resumen, los principios básicos de la red CAN son: el ducto se forma de dos señales (CAN H y CAN L), todos los nodos de la red son maestros, gracias al diseño del ducto éste puede ser empleado en ambientes donde la interferencia electromagnética es densa. Su arbitraje inteligente, provoca que cuando dos mensajes se presentan en el ducto, uno prevalece en el mismo y el otro espera su turno. Es un ducto asíncrono, por lo tanto sus mensajes empiezan con un bit de inicio y terminan con un bit de paro. Entre estos dos bits existen el campo de identificador, datos, CRC (Cyclic redundancy check, que permite comprobar posibles errores) y otros bits de propósito especial. El protocolo se originó para ser usado en el área automotriz, su eficiencia logro que se extendiera en el ámbito marítimo e industrial.

2.1 Características NMEA2000®

La interface estándar NMEA está enfocada para servir al interés público facilitando la interconexión e intercambio de datos en equipos digitales, minimizando la incompatibilidad y confusión entre fabricantes de equipo marino con un relativo bajo costo.

Este protocolo es una marca registrada de la National Marine Electronics Association que ha sido desarrollada con un conjunto de conocedores y fabricantes de equipo. Debido a la naturaleza de la tecnología de hoy en día este estándar es revisado y actualizado regularmente. La red NMEA2000® puede interconectar fácilmente equipo de navegación, generadores de potencia, maquinaria, motores, pilotos automáticos, sistemas hidráulicos de timoneo, alarmas de fuego y controles. Los datos, comandos y estados comparten el mismo cableado a velocidades 26 más rápidas que su antecesor NMEA 0183 (interface serial). NMEA 2000® se auto configura, no necesita de inicialización y tampoco de un controlador maestro. El equipo puede ser agregado o removido sin apagar la red.

Mensajes de datos son transmitidos como una serie de tramas de datos, cada trama cuenta con una verificación de error robusta, confirmando la entrega y garantizando la latencia de los datos. Como el contenido actual de la trama de datos es en el mejor de los casos un 50% de los bits

de información transmitidos, este estándar se basa primordialmente en el envío de mensajes de datos cortos, los cuales pueden ser periódicos, y transmitidos como sea necesario o bajo petición con el uso de comandos. Los datos típicamente incluyen parámetros como la posición en latitud y longitud, valores de estado del GPS, comandos para auto pilotaje, parámetros como marcas de trayectoria y moderados bloques de datos como actualizaciones para cartas electrónicas. Este estándar no necesariamente intenta soportar aplicaciones con gran ancho de banda como el radar, cartas electrónicas, datos de video, o algunas aplicaciones con bases de datos o transferencias de archivos.

Este estándar define todas las capas pertinentes del modelo International Standards Organization Open Systems Interconnect (ISO/OSI), desde la capa de aplicación hasta la capa física, necesaria para implementar la funcionalidad necesaria para la red NMEA2000® .

Las componentes de una red NMEA2000® son:

- Capa física
- Capa de enlace de datos
- Capa de red
- Administración de red
- Capa de aplicación

El estándar NMEA2000® ha sido creado para alcanzar una gran variedad de necesidades. Un requerimiento importante ha sido cubrir la necesidad de la operación de redes con datos críticos. Este requerimiento es canalizado a través de múltiples niveles de mensajes de certificación y prioridades del Grupo de Parámetros. Las prioridades de mensaje del Grupo de Parámetros son afectados por las asignaciones de numero del grupo de Parámetros, Códigos de Clase del Dispositivo, Código de Función del Dispositivo, bits de prioridad del mensaje CAN y algunos grados de búsqueda. Cualquier dispositivo que algún fabricante desee que sea compatible con NMEA2000® debe cumplir los requerimientos de este estándar, a través de software automatizado de prueba y validación de mensajes.

Este estándar define formatos de datos, protocolo de red, y la capa física mínima necesaria de los dispositivos a la interface. Condiciones de falla de punto a punto pueden existir y serian capaces de interrumpir la operación de la red. Para aplicaciones criticas pueden ser necesarias el empleo de diseños anti-falla (por ejemplo, redes espejo, cables redundantes y circuitos de interface a red) para reducir la posibilidad de la falla de la red.

2.1.1 Capa física

Esta capa define los aspectos físicos y mecánicos entre el enlace físico y las conexiones de red. Dentro de los aspectos físicos, la señalización diferencial indica que los circuitos de interfaz de potencia y la señal de referencia común a todos los nodos en la red sean indispensables. Un punto de común de referencia es utilizado para evitar radio-interferencia causada por los lazos de tierra y a su vez para mantener el control de los niveles de voltaje y tierra, donde los circuitos transceptores de la red permanecen dentro de un intervalo de modo común (aproximadamente ± 2.5 volts).

El estándar permite utilizar una batería de 12 volts para alimentar la red en embarcaciones, esto si la longitud del cableado y el número de nodos son lo suficientes pequeños. Otra opción es utilizar una o más fuentes reguladas para energizar la red.

Características de la Capa física

Arquitectura de la red:

- Direcciones de red: 254
- Un solo canal
- Configuración del Ducto (paralelo).
- Red lineal con terminadores de red y múltiples nodos de conexión individual.
- Acceso a la red: Acceso múltiple con detección de portadora y arbitraje de colisión.
- Operación de red Multi-maestro, auto-configurable.

Tamaño de la red física:

- Hasta 50 nodos de conexión.
- Razón de señalización – longitud de la dorsal: 250 kbits/segundos – 200 metros. La máxima longitud de la red es controlada por los requerimientos del CAN para que todos los nodos muestren el mismo bit al mismo tiempo, la longitud máxima actual estará determinada por el tiempo de retardo en la red cableada y los circuitos de interface.

Futuras versiones de este estándar pueden tener razones de señal adicionales:

- 1000 kbits/segundo – 25 metros
- 500 kbits/segundo – 75 metros
- 125 kbits/segundo – 500 metros
- 62.5 kbits/segundo – 1000 metros

- Separación del nodo, mínimo : 0

Tamaño de la red funcional:

- 252 direcciones de red máximo (dos son reservadas para uso de protocolo).

Circuitería de control de acceso al medio:

- Controlador de área de red (CAN). Versión 2.0 formato extendido.

Topología de Red:

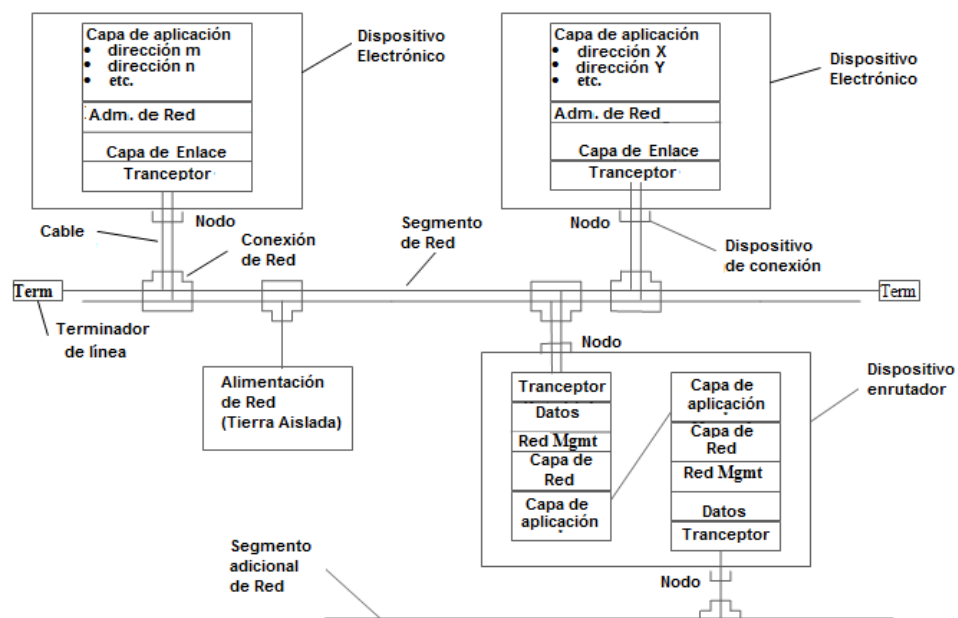


Figura 1. Topología de una red típica

2.1.2 Capa de Enlace de Datos NMEA 2000 ®

La capa de enlace de datos es prácticamente el estándar ISO 11783-3 con algunos requerimientos adicionales, por lo tanto cualquier requerimiento que se refiera a ISO 11783-3 también es cubierto por el NMEA2000®. ISO 11783-3 se puede encontrar con su título en inglés como Tractors and Machinery for Agricultural and Forestry, Serial Control and Communications Data Network – Part 3 Data Link Layer. Cuando hay discrepancias entre el estándar ISO 11783-3 y el estándar NMEA 2000®, el NMEA 2000® tendrá precedencia para aplicaciones relacionadas con botes y veleros; esto debido a que ISO 11783-3 se enfoca aplicaciones relacionadas a vehículos, tractores, camiones, maquinaria, equipo forestal o agrícola, etc.

Métodos de transferencia de datos

El estándar NMEA2000® soporta tres métodos de transferencia de datos a diferencia de ISO 11783-3 provee transferencia de datos solo por dos de estos tres métodos

- Mensajes de trama simple
- Mensajes multi-paquetes conteniendo desde 8 a 1785 bytes.
- Paquete veloz (fast packet)

El primer método de transferencia es capaz de transmitir de 1 byte hasta 8 bytes, lo que lo hace el método más sencillo y ligero ya que no requiere de inter-tramas y el tiempo de ocupación del ducto es mínimo, haciéndolo particularmente práctico para mensajes cortos.

A continuación se describe el segundo método en detalle:

Mensajes multi-paquetes de transferencia de datos, utilizan el Protocolo de Transporte de Transferencia de Datos (PGN 60160) y el Protocolo de Transporte de Manejo de Conexión (PGN 60416). Protocolos multi-paquetes requieren de la identidad del Grupo Parámetro (PGN) para ser transferidos, contenidos en campos de datos (equivalentes al identificador de campo CAN); requiere control de flujo (Manejo de conexión), y la inserción de un espacio mínimo de inter-trama de 50 ms para mensajes de radiodifusión usando el formato PDU2.

El tercer método es capaz de transferir hasta 223 bytes de datos sin usar un protocolo de transporte y sin requerir un espacio de inter-trama más allá de lo especificado en el estándar CAN (ISO 11898). El conjunto de parámetros de Paquete-veloz están definidos en la etapa de diseño del Grupo de Parámetros (PGN) y el PGN es contenido en el campo del identificador de cada mensaje de la misma manera que en un mensaje de trama simple.

La tabla siguiente resalta alguna de las características más significativas de los Parámetros de Grupo definidos por el NMEA2000®.

Simple Trama	ISO 11783 Multi-paquete	NMEA 2000® Paquete rápido
8 bytes de datos	Hasta 1785 bytes de datos	Limitados a 223 bytes de datos
Destino definido por PGN	Puede ser utilizado por cualquier PGN global (mayor a 8 bytes) para un dispositivo específico.	Destino definido por PGN
Sin sincronización	Sincronización, por ejemplo métodos de transferencia	Sin sincronización
Sin retardos de protocolos de transferencia	Toma más tiempo que el paquete rápido el mandar la misma cantidad de datos	Toma menos tiempo al mandar arriba de 223 bytes. Sin retardos de protocolos de transferencia
Implementado por todas las industrias	Implementado por todas las industrias	Nuevo protocolo

Tabla 1. Multi-Packet to Fast-Packet Comparison

El estándar NMEA2000® define los métodos de transferencia para todos los Grupos de Parámetros soportados por este estándar. La mayoría de estos métodos de transferencia de datos son de Paquete-rápido debido al tamaño de los datos. Los mensajes que contienen menos de 9 bytes de datos son definidos usando un método de transferencia de simple trama. Los mensajes definidos para usar el método de transferencia de datos de paquete-rápido también pueden ser enviados y recibidos por el método de transferencia multi-paquete al igual que si los paquetes son mayores de 8 bytes. Por lo que dispositivos con NMEA 2000® deben soportar los tres métodos de transferencia de datos.

2.1.3 Capa de Red

Esta capa fue implementada a partir de la versión NMEA2000®, y define los datos son enrutados a través de la red desde la fuente al destino donde más de un segmento de red está incluido en sistema.

Esta capa no es necesaria en aplicaciones donde la instalación de dispositivos se realiza en mismo segmento de red, lo cual es una práctica muy común dentro de las redes para embarcaciones. Para aplicaciones donde es deseable tener segmentos separados o para

configuraciones donde se exceda la máxima longitud del cable de red, se excedan el número máximo de conexiones de red, o se excedan el número máximo de direcciones funcionales, la red puede ser separada en más de un segmento de red.

2.1.4 Administración de Red

Similar a la capa de enlace de datos, los procedimientos utilizados en la administración de la red NMEA2000 ® están basados en el estándar internacional ISO 11783-3. La administración de red está encargada de lo siguiente:

- Petición y asignación de direcciones dentro de la red.
- Identificación de dispositivos conectados a la red.
- Inicialización de la red al encender.

Es una necesidad indispensable que cada dispositivo tenga asignada una dirección única dentro de la red. Existen 256 posibles direcciones (ya que utiliza un byte para la asignación de direcciones); sin embargo únicamente un total de 252 direcciones (0-251) están disponibles para ser utilizadas, ya que la dirección 255 esta desinada como dirección global (broadcast), y es utilizada para mensajes de direccionados a todos los nodos, la dirección 254 es utilizada como dirección nula para reportar problemas cuando una dirección no puede ser encontrada [8]. Las direcciones 252 y 253 están reservadas para ser utilizadas en un futuro.

De acuerdo al direccionamiento del estándar ISO 11783-3 se definen diferentes tipos de dispositivos. Algunos son auto-configurables y tienen la habilidad de pedir una dirección al encenderse, y en el caso de tomar la dirección de algún otro nodo hacer la petición por una nueva. Otros dispositivos son fijos o configurables manualmente, la dirección no puede ser cambiada y generalmente no puede ser requerida por otros dispositivos. Todos los dispositivos que cumplan con el estándar NMEA2000 ® deben de ser configurables y tener la habilidad de pedir una dirección de acuerdo al ISO 11783-3.

Parte del procedimiento de petición de dirección envuelve el uso del “Nombre” del dispositivo, que es la parte que permite a un dispositivo tomar o no la dirección de otro dispositivo. El “Nombre” es el que contiene los datos del campo del mensaje de petición de dirección, y a su vez este consiste de sub-campos que contienen información adicional acerca del dispositivo. Los parámetros incluidos en los sub-campos son el función del componente,

asignación de prioridad para múltiples dispositivos al mismo tiempo, número de modelo, versión del producto, versión del software y versión compatible del NMEA2000 ®.

Durante el proceso de petición de mensaje, la petición para una misma dirección será asignada al dispositivo que tenga mayor jerarquía dentro de la red. El mensaje de petición con mayor jerarquía es definido en la capa de enlace de datos y puede utilizar la búsqueda de campos dentro del mensaje de “Nombre”, con la finalidad de construir un mapa de la red para identificar el número y tipo de componentes conectados.

2.1.5 Capa de Aplicación

La capa de aplicación define los mensajes aprobados para su transmisión dentro de la red, tanto como para la administración de la red como para los mensajes de datos. Así que mensajes propietarios de fabricantes deberán ser especificados por el protocolo de la capa de enlace de datos.

Los mensajes transmitidos dentro de la red son organizados dentro de grupo de parámetros que son identificados por un número de grupo de parámetro (PGN- Parameter Group Number), este aparece en el campo del identificador del CAN como un valor de 8 bits o de 16 bits dependiendo del grupo de parámetro que ha sido designado, ya sea de direccionamiento o de difusión de mensaje. Dependiendo de la cantidad de datos, el grupo de parámetro puede requerir uno o más paquetes de CAN para transmitir los datos. El contenido de datos para todos los grupos de parámetros es estructurado y organizado utilizando una base de datos conteniendo varias tablas [9]. Los datos de los campos son contruidos de la siguiente manera:

- a) Cada campo de datos tiene una descripción definida por el diccionario de datos de entrada. Los artículos de datos de entrada son reutilizados tanto como sea posible dentro de los grupos de parámetros. Un ejemplo es del artículo del diccionario de dato es:
 - Dirección de Viento, Verdadero – Dirección de donde sopla el viento. Grados relativos al Norte.
- b) Cada artículo del diccionario de datos tiene un formato definido, usualmente representado por el parámetro físico definido. Los parámetros físicos son finitos de manera que existen solo algunos formatos de entrada dentro de las entradas del diccionario de datos. El formato de datos está basado en el sistema internacional de unidades (SI). En el caso del la “Dirección de viento”, el formato es:
 - Ángulo: Unidades = radian, rango = 0 a 2π , resolución = 1×10^{-4} .

c) Cada formato definido de datos es representado por un tipo de dato estándar como carácter, entero, entero sin signo, flotante, o bit. El tipo de dato para el ángulo y velocidad de viento es:

- Unit16: 16 bit entero sin signo, rango 0 a 65, 532, 65,533 = Reservado. 65,534 = Fuera de rango. 65,535 = Dato no disponible.

2.3 Conexiones

Una topología típica de una red NMEA2000® (vea figura 1), consiste de longitudes de cable de red con ramificaciones y con un inicio y fin definido. Un terminador resistivo es conectado a cada extremo para este fin. Las conexiones de comunicación para los dispositivos (nodos) pueden ser insertados a lo largo del cable de red mediante un conector tipo “T”.

En la figura 2 se muestran una foto con los elementos principales de una red. También se puede notar que el elemento “T” muestra dos tipos de conexión física (hembra y macho), lo que permite terminar la red, agregar un nodo o agregar una extensión a la red.

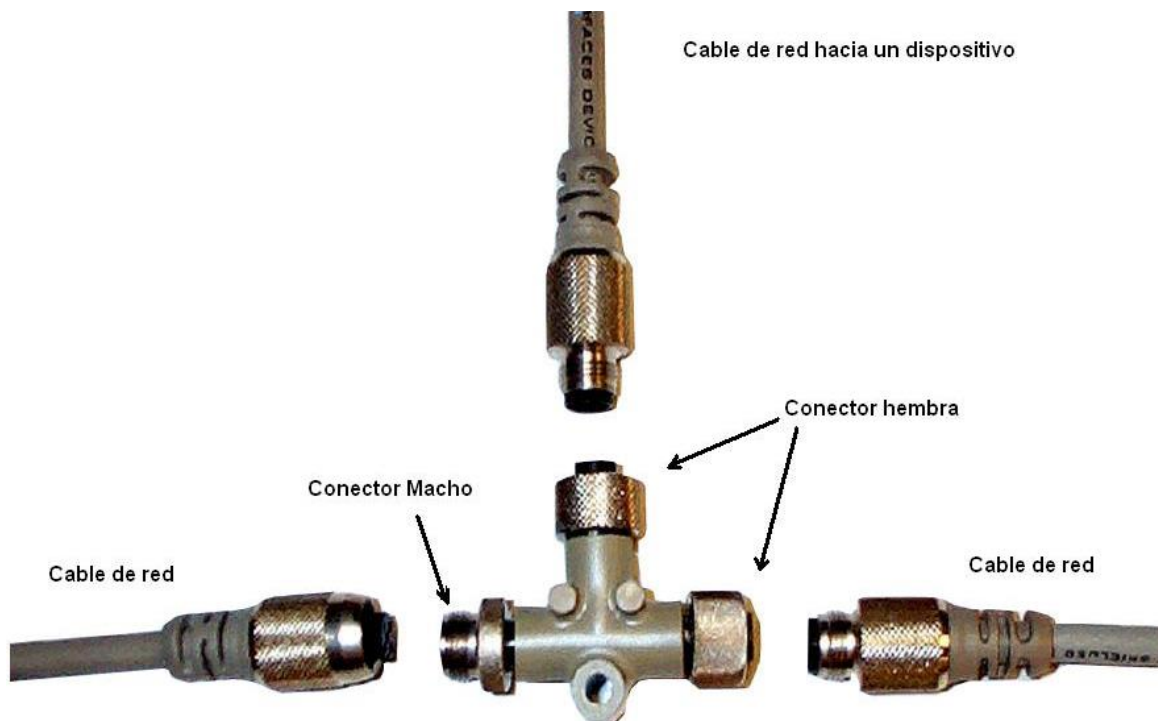


Figura 2. Componentes de un cableado de red

2.2 El Estándar IEEE 802.15.4

El grupo de trabajo IEEE 802.15 es el responsable de los estándares enfocados a redes inalámbricas, de donde se derivó el nacimiento del estándar 802.15.4 enfocado a redes inalámbricas de área personal de corto alcance (por sus siglas en inglés – LR-WPAN), con el propósito de definir los niveles de red básicos.

Este estándar intenta a su vez trabajar en coexistencia con otros dispositivos inalámbricos en conjunto con el Grupo de Tareas de Coexistencia (Por sus siglas en Inglés – CTG) como el 802.15.2™ y el 802.11™/ETSI-BRAN/MMAC 5GSG por citar algunos [10].

Los tres estándares más destacados del grupo de trabajo IEEE 802.15 son: el 802.15.1 conocido como Bluetooth, el 802.15.3 conocido como Ultra Wide Band (UWB) [11] y el 802.15.4 conocido como ZigBee. Las características de cada uno de estos estándares son resumidas en la tabla siguiente.

Características	Bluetooth 802.15.1 ^a	802.15.3 ^a UWB/HDRC ^c	802.15.4 ZigBee ^d
Estado actual	IEEE aprobado v. 1.1 (Baja tasa)	Bajo aprobación	IEEE aprobado
Frecuencia de operación	2.4-2.4835 GHz Banda ISB	3.1-10.6 GHz	868-868.6 MHz (EU) 2.4-2.4835 GHz (ISM)
Tasa máxima de transmisión	1 Mb/s	110 Mb/s (<10m) 200 Mb/s (4m) 480Mb/s (2m)	250kb/s, 40kb/s y 20kb/s
Máximo alcance	10m (opcional 100m)	10m	30m
Modulación	GFSK	BPSK, QPSK	BPSK, OPSK
Dispersión	DS-FH	Multibanda OFDM o secuencia directa	DS-SS
Máxima potencia de transmisión	0 dBm (opcional 20 dBm para 100m)	100mW EIRP para EU (ETS 300-328)	20mW (canal 2MHz @ 10 mW/MHz)
Costo	\$5	Inicialmente > \$20	\$2.50

Tabla 2. Tabla comparativa estándar IEEE 802.15

El estándar 802.15.4 define la capa física y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con el propósito de definir la arquitectura básica de interconexión que permita dar servicio a un tipo específico de red inalámbrica centrada en la habilitación de comunicación entre dispositivos ubicuos con requerimientos de consumo de potencia muy bajos y con una área de cobertura personal.

Otras características importantes en este estándar son su flexibilidad de red, transmisión de datos confiable, bajos costos y protocolo simple y flexible. Este estándar está orientado a aplicaciones donde la velocidad de transferencia no es muy alta, y permite que los nodos de la red puedan ser alimentados mediante baterías, funcionando sin ser recargados durante años (dependiendo de la aplicación). En la actualidad es uno de los estándares que mejor se adapta a los requisitos impuestos para el desarrollo de redes de sensores inalámbricas. A continuación se presenta algunas de sus propiedades en la siguiente tabla.

Propiedad	Características
Cobertura	10-30m
Velocidad de transmisión	868 MHz: 20kbps; 915 MHz: 40kbps; 2.4 GHz: 250 kbps.
Latencia	Relativamente baja
Perfil de potencia	Años
Modulación	BPSK, O-QPSK
Frecuencia de operación	868/915 MHz y 2.4 GHz.
Canales	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
Numero de dispositivos en la topología de red	65000 nodos de red
Topología de Red	Estrella y puerto a puerto
Canal de acceso	CSMA-CA y CSMA-CA ranurado

Tabla 3. Propiedades y características

Un sistema que cumple con el estándar IEEE802.15.4 consiste de varios componentes, estos componentes pueden ser dispositivos de funcionalidad reducida (RFD por sus siglas en inglés) y dispositivos de funcionalidad total (FFD por sus siglas en inglés). Dos o más dispositivos dentro de un espacio de operación personal comunicándose en un mismo canal físico constituyen una WPAN [4].

El FFD puede operar en tres modos de servicio: como coordinador de red de área personal (PAN – por sus siglas en inglés), simple coordinador o como simple dispositivo. Un FFD puede interactuar con RFDs y con otros FFDs, mientras que un RFD solo puede interactuar

con un FFD. Un RFD es implementado para aplicaciones extremadamente sencillas, por lo que los recursos y memoria utilizados son mínimos.

2.2.1 Topologías de Red

El estándar IEEE 802.15.4 soporta dos tipos topologías para su conexión en red, la topología tipo estrella (star), y la topología de puerto a puerto (Peer to peer), ambas se muestran Fig 3.

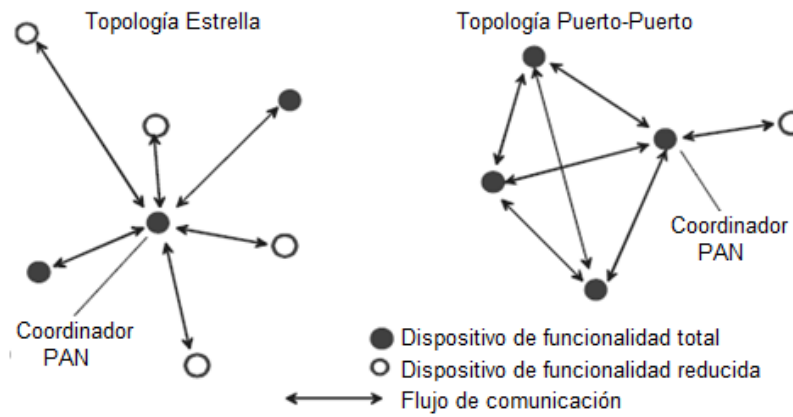


Figura 3. Topologías estrella y puerto a puerto

En la topología en estrella los nodos sólo pueden intercambiar información con el PAN coordinador (FFD). Cuando dos nodos (RFD o FFD) desean comunicarse deben enviar su información al coordinador, que la reenvía al nodo destinatario [10].

En cada trama beacon el coordinador informa cuáles son los nodos para los que tiene información pendiente. Si un nodo después de recibir el beacon detecta que el coordinador no tiene ninguna transmisión pendiente para él, puede volver al estado de inactividad [12]. Es claro que cuanto mayor es el periodo entre beacons mayor es el ahorro de potencia, pero al aumentar este periodo también aumenta la latencia en las transmisiones dentro de la estrella, ya que los nodos no podrán extraer o enviar información del coordinador hasta el próximo beacon.

En la topología de puerto a puerto todos los nodos (RFD o FFD) pueden alcanzar los demás nodos de la red, esto permite la implementación de redes más complejas, como topologías de red tipo malla. Esta última y otras opciones pueden ser agregadas a la capa de red pero no son parte del estándar.

Aunque existe también un coordinador en esta topología, éste no emite beacons y la información se transmite directamente desde un nodo origen hasta un nodo destino. En este caso

el coordinador sólo realiza tareas de control sobre los nodos que se permite que se suscriban a la red y para distinguir una red de otras vecinas. Como no existe ningún método de sincronización ni de asignación del canal de comunicación, el acceso al medio establecido es CSMA/CA que contempla la posibilidad del envío simultáneo de varios nodos.

Cada PAN independiente selecciona un identificador único, que permite la comunicación entre dispositivos dentro de una red. Utiliza direcciones cortas lo que permite habilitar o no la comunicación entre dispositivos a través de redes independientes.

2.2.2 Arquitectura

La arquitectura de las WPANs están divididas en capas, y cada capa es responsable de una parte del estándar que ofrece diferentes servicios a las capas superiores. La estructura de capas está basado el modelo de siete capas del sistema de interconexión abierto (OSI –por sus siglas en inglés).

El estándar IEEE 802 divide a la capa de enlace de datos (Data Link Layer, DLL) en dos sub capas, la sub capa de enlace de acceso a medios (MAC) y la de control de enlaces lógicos (Logical link control, LLC). El LLC es común a todos estándares 802, mientras que la sub capa MAC depende del hardware y varía respecto a la implementación física de esta capa.

En un dispositivo de WPAN la capa física, contiene el transceptor de radio frecuencia (RF) junto con mecanismo de control de bajo nivel, y la subcapa MAC que provee el acceso al canal físico para todos los tipos de transferencia. En la figura 4 se muestra a bloques una representación grafica de de estas capas.

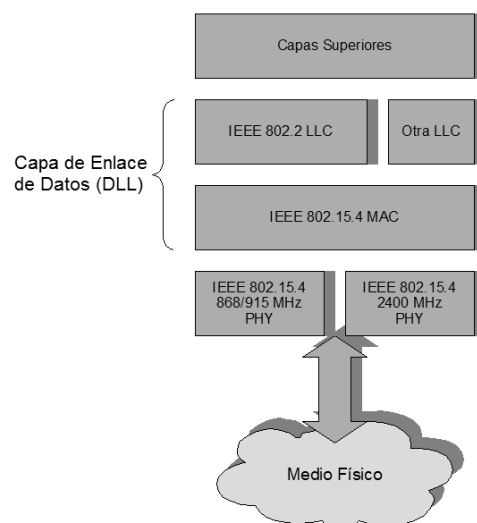


Figura 4. Representación grafica de las capas

La subcapa MAC del protocolo IEEE 802.15.4 presenta las siguientes características:

- Asociación/disociación
- Acuse de recibo (ACK– por sus siglas en inglés)
- Mecanismos de acceso al canal
- Validación de trama
- Control de garantía de ranuras de tiempo (Slot Time)
- Tramas de guías (Beacon)
- Sondeo del canal (Scan)

La MAC proporciona dos tipos de servicios hacia las capas superiores, a través de dos Puntos de Acceso a Servicios (Service Access Points, SAPs), los cuales son: servicios de datos y manejo de servicios. Estos servicios se accesan de forma diferente según se indica en los siguientes párrafos:

- A los servicios de datos MAC se acceden por medio de la parte común de la subcapa MCPS-SAP (MAC Common Part Sublayer-Service Access Point).
- Al manejo de servicios MAC se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades MLME-SAP (MAC Layer Management Entity-Service AccessPoint).

La capa MAC 802.15.4 se caracteriza por una baja complejidad; el administrador de servicios MAC tiene 26 primitivas, que comparadas con 802.15.1 (Bluetooth), que tiene alrededor de 131 primitivas para 32 tipos de eventos, hace una MAC muy simple, haciéndolo versátil para las aplicaciones hacia las que fue orientado, aunque se pague el costo de tener un instrumento con características menores a las de 802.15.1.

2.2.3 La estructura de las super-tramas

Algunas aplicaciones requieren anchos de banda dedicados para lograr baja latencia para un consumo de potencia bajo. Para lograr esta baja latencia el estándar IEEE 802.15.4 permite un modo de operación opcional llamado super-tramas (superframes). En una super-trama, un coordinador de red PAN, transmite super-tramas de beacon en intervalos definidos. Estos intervalos pueden ser:

- Desde 15 ms hasta 245 s en 2.4 GHz
- Desde 96 ms hasta 1573 s en 915 MHz

- Desde 192 ms hasta 3146 s en 868 MHz

El tiempo entre cada uno de ellos se divide en 16 ranuras de tiempo independientes a la duración de cada super-trama.

Un dispositivo puede transmitir en una ranura de tiempo. Pero debe de terminar su transmisión antes de la siguiente super-trama beacon. El canal de acceso en las ranuras de tiempo es en base a contención; sin embargo el coordinador de PAN puede asignar intervalos o ranuras de tiempo a un solo dispositivo que requiera un determinado ancho de banda permanentemente o que requiera transmisiones de baja latencia. Estas ranuras de tiempo asignadas son llamadas ranuras de garantía (GTS- por sus siglas en inglés-Guaranteed Time Slot) y juntas forman un periodo libre de contención localizado antes de la próxima señal de guía (ver Figura 5). El tamaño del periodo libre de contención puede variar dependiendo de la demanda de los demás dispositivos asociados a la red; cuando el GTS se utiliza, todos los dispositivos deben de completar todas sus transacciones en base a contención antes de que el periodo libre de contención comience [13].

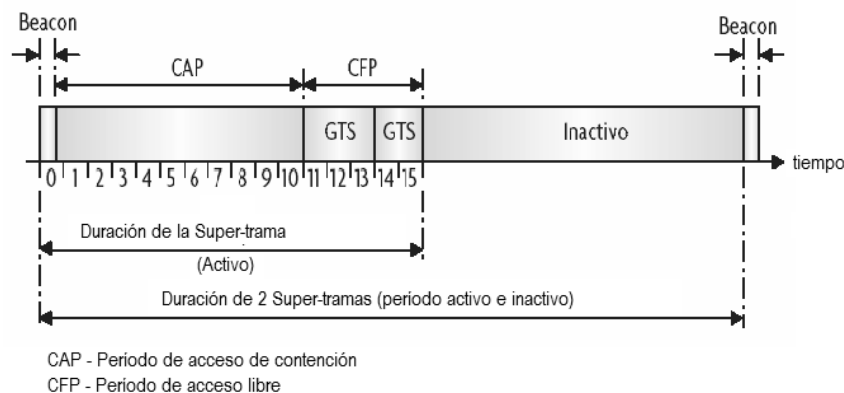


Figura 5. Estructura de las super-tramas.

2.2.4 Formato general de las tramas MAC

El formato general de las tramas MAC se diseñó para ser flexible y para que se ajustara a las necesidades de las diferentes aplicaciones con diversas topologías de red al mismo tiempo que se mantenía un protocolo simple. El formato general de una trama MAC se muestra en la figura 3. A la trama del MAC se le denomina unidad de datos de protocolos MAC (MPDU) y se compone del encabezado MAC (MHR), la unidad de servicio de datos MAC (MSDU), y la terminación de MAC (MFR). El primer campo del encabezado es el campo de control. Este indica el tipo de trama MAC que se pretende transmitir, especifica el formato y la dirección de campo y controla los mensajes de enterado. En otras palabras, el control de trama especifica como es el resto de la

trama de datos y que es lo que contiene. El tamaño de las direcciones puede variar entre 0 y 20 bytes. Por ejemplo, una trama de datos puede contener información de la fuente y del destinatario, mientras que la trama de enterado no contiene ninguna información de ninguna dirección. Por otro lado un beacon solo tiene información de la dirección de la fuente. Esta flexibilidad en la estructura ayuda a incrementar la eficiencia del protocolo al mantener los paquetes lo más compacto que se puede [10].

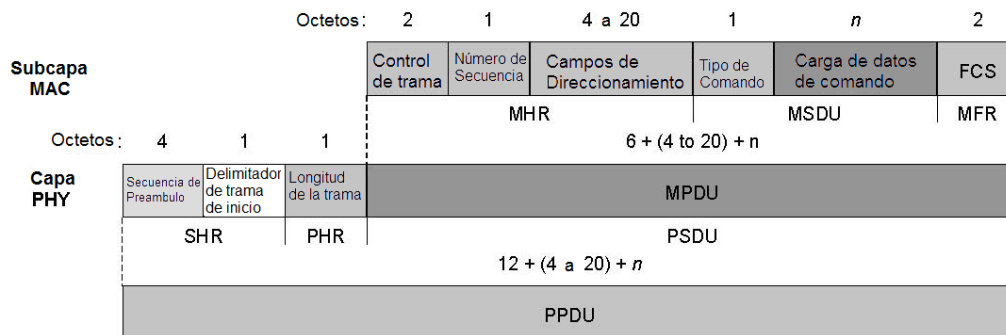


Figura 6. Forma general de la trama MAC.

El campo llamado carga de datos (Data payload) es variable en longitud; sin embargo, la trama completa de MAC no debe de exceder los 127 bytes de información. Los datos que lleva la carga dependen del tipo de trama. El estándar IEEE 802.15.4 tiene cuatro diferentes tipos de tramas. Esas son la trama de guía, trama de datos, tramas de confirmación y tramas de comandos MAC. Solo las tramas de datos y de guía contienen información proveniente de capas superiores; las tramas de mensajes de confirmación y la de comandos MAC originados en la MAC son utilizadas para comunicaciones MAC puerto a puerto. Otros campos en la trama MAC son el número de secuencia y el campo de verificación (FCS - frame check sequence). El número de secuencia en los encabezados enlazan a las tramas de confirmación con transmisiones de tramas anteriores. La transmisión se considera exitosa, solo cuando la trama de confirmación contiene el mismo número de secuencia que la secuencia anterior transmitida. Por su parte el FCS ayuda a verificar la integridad de las tramas, con el fin de detectar errores en la transmisión.

2.2.5 Estructura de Confirmación

Para mantener una interfaz común y simple con la MAC, las capas físicas (868/915 MHz y 2.4 GHz) comparten la estructura simple del paquete (figura 5). Cada paquete, o unidad de datos del protocolo de capa física llamado PHY protocol data unit (por sus siglas en inglés PPDU), contiene un encabezado de sincronización (preámbulo de secuencia), un delimitador de

inicio de secuencia (SFD - start-of frame delimiter) que permite delimitar la longitud del paquete, y la carga de información. A su vez este preámbulo de 32 bits está diseñado para la sincronización de símbolos y para mantener una base de tiempo requerida por el transceptor. No se requiere una ecualización en el canal de la capa física debido a la combinación de áreas de cobertura pequeñas con tasas bajas de transmisión.

Dentro del encabezado en el PHR, se utilizan 7 bits para especificar la longitud de la carga de datos (en bytes); La longitud de paquetes esta en el intervalo de 0 a 127 bytes; sin embargo debido al encabezado, de la capa MAC, paquetes con longitud cero no ocurren en la práctica. El tamaño típico de los paquetes para la mayoría de las aplicaciones marítimas tales como el monitoreo y control de dispositivos son de 10 a 30 bytes, aun que debe de considerarse los 127 bytes para aplicaciones futuras donde demande una alta tasa de transmisión. La duración máxima del paquete es de 4.25 ms para la banda de los 2.4 GHz, y de 26.6 ms para la banda de los 915 MHz, y de 53.2 ms para la banda de 868 MHz. Este tiempo resulta de longitud máxima de la trama (133bytes x 8 bits) divididos entre la velocidad de transmisión de cada caso.

La estructura de reconocimiento está formada por el encabezado de la MAC y la terminación de la MAC (MFR-MAC footer) y ambos forman la unidad de datos de secuencia de la capa física (PSDU- PHY service data unit) El MHR contiene la trama de control y los campos con los números de secuencia de datos. El MFR está compuesto de 16 bits de FCS [10].

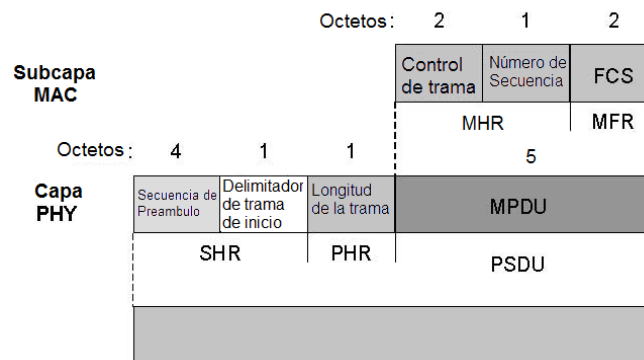


Figura 7. Trama de reconocimiento

2.2.6 Detalles de la MAC

Dependiendo de la configuración de red, una WPAN puede utilizar uno de los dos mecanismos de acceso a canales. En una red becon con súper-trama, el canal de comunicación se fragmenta en varios intervalos de tiempo, permitiendo accesos múltiples con un mecanismo que evita las colisiones (CSMA-CA ranurado).

En redes sin beacon, se utiliza el acceso múltiple por detección de portadora con anulación de colisiones (CSMA-CA) como acceso al canal. Estas redes trabajan de la siguiente forma: Cuando algún dispositivo desea transmitir en una red que no permite señales de guía, el dispositivo revisa si otro dispositivo se encuentra transmitiendo sobre el mismo canal. Si es el caso, el intento del acceso al canal se tendrá que postergar, si se excede un número determinado de intentos se indicará una falla de conexión.

En una red con beacon, cualquier dispositivo, que desee transmitir durante el periodo de acceso de contención, espera a que inicie la siguiente ranura de tiempo en la cual detecta si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en la misma ranura de tiempo. Si este es el caso el dispositivo se repliega a un número aleatorio de ranuras de tiempo o indica un fallo en la conexión después de varios intentos. Además en una red con beacon, las tramas de confirmación no utilizan CSMA.

Una función importante del MAC es la confirmación de recepciones exitosa de paquetes. Las recepciones exitosas y las validaciones de datos o comandos MAC se realizan por medio de la confirmación (acknowledgment). Si el dispositivo de recepción no es capaz de recibir la información en un momento determinado, el receptor no enviara confirmación. El campo de control en el trama indicará si se espera o no una confirmación. El paquete de confirmación se manda de regreso inmediatamente después de que se hace la validación exitosa del paquete de entrada. Los tramas beacon enviadas por el coordinador PAN y las tramas de confirmación nunca obtienen respuesta de confirmación.

El estándar IEEE 802.15.4 proporciona tres niveles de seguridad: sin seguridad (por ejemplo, aplicaciones de publicidad); control de acceso a listas (sin seguridad criptográfica); y seguridad con clave simétrica. Para minimizar costos para dispositivos que no lo requieran, el método de distribución de clave no se especifica en el estándar pero se debe de incluir en capas superiores de las aplicaciones apropiadas [14].

2.2.7 Capa Física

El IEEE 802.15.4 ofrece dos tipos de transceptores que combinan con el MAC para permitir una amplia gama de aplicaciones en red. Ambas opciones se basan en métodos de espectro expandido de secuencia directa (DSSS por sus siglas en inglés) que resultan en bajos

costos de implementación digital en circuitos integrados, al igual que comparten la misma estructura básica de paquetes con ciclos de baja duración reflejándose en operaciones de bajo consumo de energía. La principal diferencia entre ambas transceptores radica en la banda de frecuencias. La capa física de los 2.4 GHz, especifica operación en la banda industrial, médica y científica (ISM- por sus siglas en inglés), que prácticamente está disponible a nivel mundial, mientras que la capa física para los 868/915 MHz especifica operaciones en la banda de 865 MHz en Europa y 915 MHz en Estados Unidos, enfocada a la banda ISM.

Cabe destacar que la disponibilidad internacional de la banda de los 2.4 GHz ofrece ventajas en términos de mercados más amplios y costos de manufactura más bajos. Por otro lado, las bandas de 868 MHz y 915 MHz ofrecen una alternativa a la cogestión creciente e interferencias provenientes de otros dispositivos (ej. hornos de microondas) asociadas a la banda de 2.4 GHz y además permiten mayor alcance por enlace debido a que a esta frecuencia existen menores pérdidas de propagación. [15].

Otra característica que hace diferentes a las dos tipos de transceptores es su velocidad de transmisión. El transceptor de 2.4 GHz permite un tasa de transmisión de 250 kb/s, mientras que el de 868/915 MHz ofrece tasas de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s respectivamente. Este tasa de transmisión superior en la capa física de los 2.4 GHz es principalmente a un mayor orden en la modulación, en la cual cada símbolo representa múltiples bits. Las diferentes tasas de transmisión pueden ser aplicadas pensando en obtener ventaja de sus características, por ejemplo la baja densidad de datos en la transceptor de los 868/915 MHz se puede ocupar para lograr mayor sensibilidad y obtener mayores áreas de cobertura, resultando en una reducción del número de nodos requeridos para cubrir un área geográfica, por otro lado la tasa de transmisión en el transceptor de los 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir velocidades superiores y de poca latencia.

La capa física es responsable de las siguientes tareas:

- Activación y desactivación de transceptor
- Detección de energía de canal en uso.
- LQI (Link Quality Indicator) para paquetes recibidos.
- Asignación de canal libre para CSMA-CA.
- Selección de frecuencia del canal
- Transmisión y recepción de datos

Estas tareas permiten asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Se utilizan por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar canales en respuesta a una pausa muy prolongada.

Canales de transmisión

En el IEEE 802.15.4 se definen 27 canales de frecuencia entre las tres bandas (ver figura 5 y tabla 2). El transceptor de los 868/915 MHz soporta un solo canal para el intervalo los 868 a los 868.6 MHz, y diez canales en el intervalos de 902 a 928 MHz. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia por lo que se puede utilizar el mismo hardware para ambos y así reducir costos de manufactura en el caso de presentarse esta necesidad. El transceptor de los 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un margen amplio entre canales de 5 MHz, esto disminuye los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción [16].

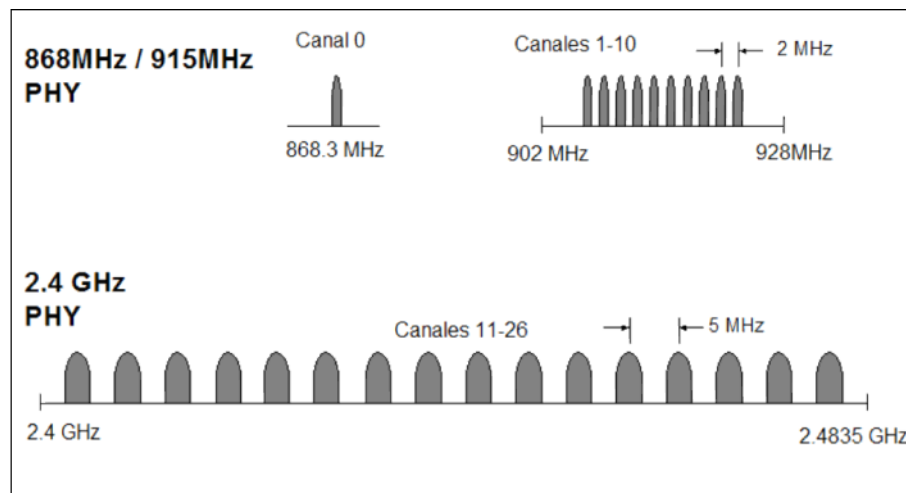


Figura 8. Estructura de canales del IEEE 802.15.4.

Numero de Canal	Frecuencia central del canal (MHz)
$k = 0$	868.3
$k = 1, 2, \dots, 10$	$906 + 2(k-1)$
$k = 11, 12, \dots, 26$	$2405 + 5(k-11)$

Tabla 4. Frecuencia de los canales IEEE 802.15.4.

La capacidad de relocalización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de las redes inalámbricas dentro de ambientes congestionados, debido a que en diferentes

ambientes de aplicación hay factibilidad de tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencia, además presentarse interferencia inherente al medio. El estándar fue diseñado para poder implementar una selección dinámica de canales, esto través de una selección específica de algoritmos la cual es responsabilidad de la capa de red.

Modulación

La capa física de los 2.4 GHz emplea una técnica de modulación semi-ortogonal. Durante cada período de datos 4 bits son utilizados para seleccionar una de las 16 secuencias de transmisión semi-ortogonales de pseudo-ruido aleatorio (PN por sus siglas en inglés). Las secuencias de datos sucesivos PN son concadenadas para que sean datos de símbolos exitosos, y la secuencia agregada al transceptor es modulada en la portadora utilizando la técnica corrimiento de fase de cuadratura (O-QPSK). El uso de símbolos “semi ortogonales” simplifica la implementación a cambio de un desempeño ligeramente menor (< 0.5 dB).

La capa física de los 868/915 MHz basada en métodos DSSS con corrimientos de fase binarios (BPSK por sus siglas en inglés), las cuales son utilizadas en los transceptores para modulación y codificación diferencial de los datos. En términos de eficiencia (energía requerida por bit), la señalización ortogonal mejora su desempeño en 2 dB en comparación la modulación BPSK diferencial. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, la capa física 868/915 tiene una ventaja de 6-8 dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas. Por supuesto, que en ambos casos las pérdidas de implementación debido a la sincronización, forma del pulso, simplificaciones en el detector, y demás resultan en desviaciones en sus curvas óptimas de detección.

Sensibilidad y Potencia

Las especificaciones de acuerdo al estándar del IEEE 802.15.4 mencionan que cualquier dispositivo que cumpla con este, deberá de ser capaz de tener una sensibilidad de -85 dBm en el caso de capa física de los 2.4 GHz y de -92 dBm para el caso de la capa física de los 868-915 MHz. Estos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias de ± 40 ppm.

Naturalmente la cobertura deseada estará en función de la sensibilidad del receptor así como de la potencia del transmisor. El estándar especifica que cada dispositivo debe de ser capaz de transmitir al menos 1 mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación y la potencia de transmisión esta puede ser mayor o menor (dentro de los límites de regulación establecidos)

[17]. Los dispositivos típicos (1mW) se espera que tengan un alcance de 10-20 m; sin embargo, con una buena sensibilidad y un incremento moderado en la potencia de transmisión [15] esta distancia puede incrementarse hasta los 30 m o más.

A continuación se presentan una tabla donde se muestra las definiciones utilizadas en la sensibilidad de los receptores [18].

Termino	Definición del termino	Condiciones
Tasa de error de paquete (PER)	Relación de paquetes transmitidos que no son recibidos correctamente.	Relación medida sobre un paquete secuencial de información determinado.
Sensibilidad del Receptor	Umbral de la potencia de entrada para determinar la eficiencia de un PER específico.	• Longitud PSDU = 20 Octetos • PER < 1% • Potencia medida en las terminales de la antena. • Interferencia no presente

Tabla 5. Definiciones de sensibilidad del receptor

En la siguiente tabla se muestra un comparativo de algunos de los protocolos inalámbricos del grupo de trabajo IEEE 802 con respecto a sensibilidad, transmisión de potencia y ancho de banda del receptor [19].

Estándar	Sensibilidad del receptor	Potencia del transmisor	Ancho de Banda Receptor
IEEE 802.11b	-76 dBm 11 Mb/s CCK	14 dBm	22 MHz
IEEE 802.15.1	-70 dBm	0 dBm	1 MHz
IEEE P802.15.3	-75 dBm 22 Mb/s DQPSK	8 dBm	15 MHz
IEEE 802.15.4	-85 dBm	0 dBm	5 MHz

Tabla 6. Comparativo de protocolos inalámbricos IEEE 802

Seguridad

Debido a las diversas aplicaciones a las cuales está enfocado el estándar, impone significativas restricciones en la necesidad de la implementación de seguridad en la capa MAC, pero a su vez algunas funcionalidades de seguridad son necesarias para proveer servicios de seguridad básicos y de interoperatividad para todos los dispositivos implementados en este estándar. Estas funciones protegen la confidencialidad, integridad, y autenticidad de las tramas MAC

La capa MAC realiza la seguridad, pero las capas superiores son las que prepararan las claves y determinaran los niveles de seguridad.

Cuando la capa de MAC recibe una trama con seguridad, mira la fuente de la trama, recupera la clave asociada con esta fuente, y entonces usa esta clave para procesar la trama según el tipo de seguridad asignada. Al transmitir una trama, y su integridad es requerida, los datos del encabezado MAC y la carga de datos MAC son usados para crear un MIC (Message Integrity Code), el cual puede ser de 4, 8, o 16 octetos y es añadido al carga de datos MAC. Cuando la capa MAC recibe una trama, y el MIC está presente, se procede a desenscriptar el la carga de datos [20].

3 Desarrollo del Sistema

Gracias a los avances y reducción de costos en dispositivos electrónicos y de comunicación inalámbrica, es posible construir nodos de medición multifuncionales y multipropósito de bajo costo, que operan con poca energía, de un tamaño pequeño y con capacidad de comunicación a corta distancia. Estos sensores constan de una unidad de procesamiento con un poder de cómputo mínimo, una memoria de capacidad pequeña, una unidad de comunicación inalámbrica (transceptor) y uno o varios dispositivos de medición que capturan parámetros tales como temperatura, aceleración, humedad, etc. [21]

En la actualidad un ejemplo palpable de las redes inalámbricas personales es el Bluetooth. Se pueden expandir a un número considerable de elementos para conformar así las redes y sub-redes. [3]. Las aplicaciones de Bluetooth son muy variadas y debido a sus características permiten cambiar radicalmente la forma en la que los usuarios interactúan con los dispositivos (computadoras portátiles, PDAs (Personal Digital Assistants), teléfonos celulares y otros dispositivos portátiles). Dentro del campo de la tecnología, su aplicación es inmediata ya que permite una comunicación fácil, instantánea, en cualquier lugar y su costo es relativamente bajo; sin olvidar su impacto en la forma de realizar las conexiones, al sustituir los medios convencionales, lo que permite abrir campo a nuevas aplicaciones.

Uno de los atractivos más grandes de la implementación de esta tecnología es la posibilidad de transferir una fotografía de una cámara a una computadora para enviarla por correo electrónico o transferirla a la impresora para imprimirla en ausencia de cables hasta la implementación de una red inalámbrica.

Un hecho de la fuerte demanda de la utilización de comunicación inalámbrica son productos para usuarios finales basados en esta condición para los diferentes mercados; donde los fabricantes de equipo original (OEM) están vendiendo activamente productos con esta condición. Una tendencia de alto crecimiento en la implementación de características inalámbricas en productos se contempla hasta el 2010 [22].

En la actualidad, las redes inalámbricas no tienen clientes ni servidores, sino una serie de nodos que se comportan simultáneamente como clientes y como servidores de los demás nodos de la red, mostrando recursos compartidos para un servicio o aplicación. Estos comúnmente se utilizan para compartir e intercambiar información entre diferentes fuentes para múltiples aplicaciones, donde la necesidad de prescindir de la utilización cables de propósito específico

para interconectar algunos equipos y /o dispositivos se satisface con la implementación de funciones de una red inalámbrica.

Para el caso de equipo y/o dispositivos marítimos existe actualmente algunas soluciones inalámbricas, un que estas todavía no satisfacen la interconexión de diferentes equipos comerciales ya que se necesitan entornos más sencillos y prácticos en el intercambio de información; se empieza a notar el surgimiento de este tipo de aplicaciones dentro de este entorno.

Dentro de los beneficios que arrojan directamente las soluciones inalámbricas en general y específicamente dentro del ámbito marítimo podemos enlistar los siguientes:

- Flexibilidad en la movilidad de equipos.
- Integración de dispositivos portátiles a la red de comunicación.
- Eliminación de cableado.
- Rapidez y facilidad en la instalación de dispositivos.

3.1 Conceptos clave

A continuación se definen algunos términos y conceptos clave que serán utilizados en este trabajo:

- *Medición*: Acción de convertir un fenómeno físico tal como calor, luz, sonido o movimiento en señales eléctricas u otras que pueden ser manipuladas por otros dispositivos.
- *Nodo de medición*: Una unidad básica en una red de sensores, con sensores embebidos o intercambiables, procesador, memoria, comunicación inalámbrica, y fuente de poder. Es a menudo abreviado como *nodo* (21).
- *Nodo gateway*: Un nodo interprete conectado hacia el exterior que funge como puente entre el funcionamiento interno de la red NMEA2000® y el enlace de comunicación inalámbrica. Más comúnmente conocido como *puerto de entrada*.
- *Ducto del NMEA2000®*: Ducto de información que cumple con el estándar NMEA2000® por el cual se intercomunican los diferentes dispositivos de una red en una embarcación.

3.2 Descripción del sistema

El trabajo presentado en esta tesis está bien definido por: el diseño *e implementación de un enlace inalámbrico para equipo marino, que permita compartir datos entre dispositivos de embarcaciones marítimas de recreo y deportivas que cuenten con una interfaz NMEA2000®.*

La Figura 12 se muestra las partes de un sistema de comunicación inalámbrico punto a punto como el propuesto. Este sistema consta básicamente de dos módulos independientes los cuales se comunican entre sí. Uno de ellos funciona como puerto de entrada a la red NMEA2000® (Gateway) y el otro como nodo origen dispuesto a compartir información con la red alambrada.



Figura 9. Diagrama de un sistema comunicación inalámbrico punto a punto

Debido a que el escenario de instalación de la red NMEA2000® está dentro de embarcaciones, realizar un enlace utilizando el cableado convencional resulta, en algunos casos, complicado, requiriéndose que grandes tramos de cable crucen por diferentes partes de la embarcación, lo cual tiene dos inconvenientes implícitos: la atenuación de la señal en el cable y la estética, que se traduce en el costo que en muchos casos se provoca al tratar de ocultar dicho cable. Por lo que, un enlace híbrido de RF y cableado de NMEA2000® resultaría muy útil, ya que por principio se elimina el cableado en situaciones donde esto sea una opción y a su vez, provee una opción de portabilidad y movilidad en dispositivos donde por su naturaleza sea requerido; caso concreto, dispositivos portátiles, como GPS donde potencialmente se tiene información de dispositivos de medición que capturan diferentes parámetros.

La información recabada es enviada al nodo de entrada conectado a la red donde el enlace de comunicación permite que la información se introducida al ducto cableado. Al mismo tiempo la información dentro del ducto puede ser tomada y visualizada en una unidad de despliegue o por cualquier otro dispositivo que tenga la capacidad de utilizar esta información.

3.3 Plataformas de hardware

El principal componente de *hardware* de un enlace de comunicación es conocido como *nodo o mote* (mota en español, en referencia a una partícula de polvo), y los principales elementos que forman un nodo inalámbrico son: un microprocesador, sensores y un dispositivo de comunicación inalámbrica. Por su parte el puerto de entrada consta del un microprocesador, y dos dispositivos de comunicación; que en este caso son el inalámbrico y el de protocolo CAN. A continuación se da una descripción más detallada de cada uno de los elementos que se ven involucrados:

- Microprocesador. Es el encargado de ejecutar el programa del nodo, procesar la información, controlar los demás dispositivos que componen al nodo, y a su vez cuenta con una memoria de almacenamiento temporal, donde se almacenan los datos recabados para después ser compartidos o ser procesados.
- Sensores. Son los responsables del contacto con el medio a medir, obteniendo datos del mundo real para auxiliar en la conversión de la lectura a señales eléctricas.
- Unidad de comunicación. Generalmente conocida como transceptor, este permite la comunicación en ambos sentidos (transmisión y recepción) con el fin de establecer una ruta que permita intercambiar información entre los nodos que componen la red.

En la siguiente figura (Fig. 10) se muestra el modelo genérico de un nodo de comunicación indicándose los elementos principales (21).

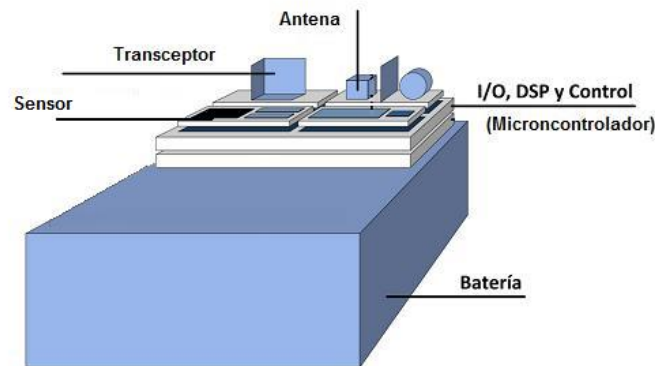


Figura 10. Modelo de un nodo de comunicación

3.3.1 Módulo LR-WPAN PAN802154

En el caso específico de este trabajo se optó por utilizar los módulos LR-WPAN PAN802154 desarrollados por la compañía Panasonic con microcontroladores Freescale®. Estos tienen la característica de integrar un microprocesador, el transceptor y la antena de transmisión en una sola tarjeta, lo que permite ahorrar tiempo en la construcción de aplicaciones inalámbricas sin tener que invertir mucho tiempo en el desarrollo del hardware para el transmisor/receptor.

Además estos módulos cuentan con algunas otras características físicas que permiten hacer interconexiones con otras aplicaciones y/o utilizar algunas de estas para mostrar y recibir información de aplicaciones sencillas, estas características físicas son: un interruptor tipo push button de propósito general conectado al canal PTA2, un LED conectado al canal PTD0 del microcontrolador, un conector (J2) que cuenta con una interfaz RS232, el conector (J1) permite la conexión con el programador a través de una interfaz BDM (Background Debug Mode), el conector (J4) para alimentar el módulo y el conector de propósito general (J3) que cuenta con 2 entradas analógicas seleccionables para utilizarse a través del convertidor A/D de 10 bits, además de 8 líneas de datos de propósito general del microcontrolador [23].

Las características de estos módulos son las siguientes:

- Soporte completo a aplicaciones ZigBee™, 802.15.4 y MAC Simple
- Opera en la banda ISM a 2.4 GHz
- Acceso a 16 canales con espacio de 5 MHz entre ellos
- Velocidad de transmisión de hasta 250 Kbps.
- Potencia de salida típica de 0 dBm

- Sensibilidad de recepción típica de -92 dBm a 1% de tasa de error
- Protección metálica en la sección de RF para incrementar el desempeño
- 3-3.4 VDC para utilizar la interfaz RS-232 (2.2-3.4 VDC sin utilizar RS-232)
- Corriente DC en Rx/Tx típica a 35 mA (5µA en estado ocioso)

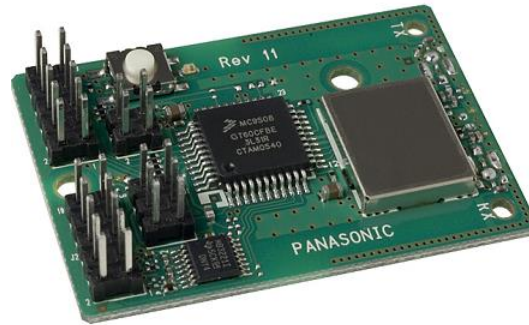


Figura 11. Fotografía del módulo LR-WPAN PAN802154

3.3.1.1 Transceptor MC13192

Una parte elemental en las aplicaciones inalámbricas es el transceptor en cada nodo que permite el enlace inalámbrico entre dos más de ellos. El circuito de RF que utilizan los módulos LR-WPAN PAN802154 es el MC13192 y se caracteriza por ser un transceptor de corto alcance, bajo consumo de potencia y que opera en la banda ISM en la frecuencia de los 2.4 GHz diseñado para utilizar el estándar IEEE® 802.15.4. En la siguiente figura se puede apreciar la configuración de las terminales [24].

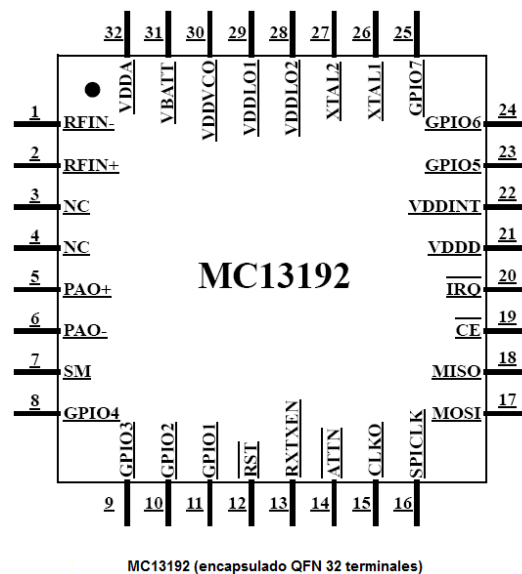


Figura 12. Configuración MC13192 (encapsulado QFN de 32 terminales)

Cuando se combina con un microprocesador apropiado como los es en el caso de módulo PAN802154 que utiliza un microcontrolador de la familia HCS08, el MC13192 provee redes de enlace de datos de corto alcance a bajo costo. La interface con el microcontrolador se logra por medio de cuatro conexiones de la interface periférica serie (SPI) y una salida de interrupción, lo que permite utilizar una gama muy amplia de procesadores.

Entre algunas de sus áreas de aplicación se encuentran el control remoto de sistemas industriales, control de motores y automatización en fabricas, manipulación de energía (luces) y otras en potencialmente en desarrollo como control y automatización en el hogar (domótica), control remoto para dispositivos de entretenimiento, dispositivos de interfaz humana y juguetes inalámbricos.

El transceptor opera en uno de los 16 canales disponibles de la banda de los 2.4GHz, utilizando el corrimiento por fase en cuadratura (O-QPSK) en canales de datos de 2.0 MHz con 5.0 MHz de espacio de acuerdo al estándar 802.15.4 (Tabla 8 - Frecuencia de los canales IEEE 802.15.4), y soportando hasta 250 kbps de información.

El MC13192 tiene dos modos de transferencia de datos:

1. Modo de paquete – los datos son almacenados en dispositivo RAM.
2. Modo de ráfaga – Datos son procesados palabra por palabra.

La programación de la MAC del 802.15.4 solo soporta el modo de ráfaga para la transferencia de datos, pero para aplicaciones propias donde se desee prescindir de la MAC del 802.15.4 puede utilizarse el modo de paquete y optimizar los recursos de microcontrolador.

3.3.2 Microcontroladores

Para la elaboración del Gateway se utilizan dos microcontroladores los cuales forman parte de la familia HCS08 de Freescale®, el MC9S08GT60CFB incluido dentro del módulo PAN802154 y el MC9S08DZ60 que maneja el resto de la aplicación concerniente al enlace NMEA2000®. Ambos dispositivos son de 8 bits, de bajo costo y una de las ventajas que los hacen atractivos es que la herramienta de desarrollo para programación utiliza un compilador de lenguaje C llamado “Metroworks CodeWarrior Studio for HC(S)08” que en conjunto con la herramienta de programación flash (Software y hardware) “BDM MULTILINK” permiten acceder a una herramienta de desarrollo de bajo costo, permitiendo que la inversión en infraestructura sea relativamente baja sin comprometer el desempeño del sistema y sus

características. En la Figura se puede apreciar la configuración de las terminales de ambos microcontroladores, sus similitudes y diferencias en la asignación de terminales.

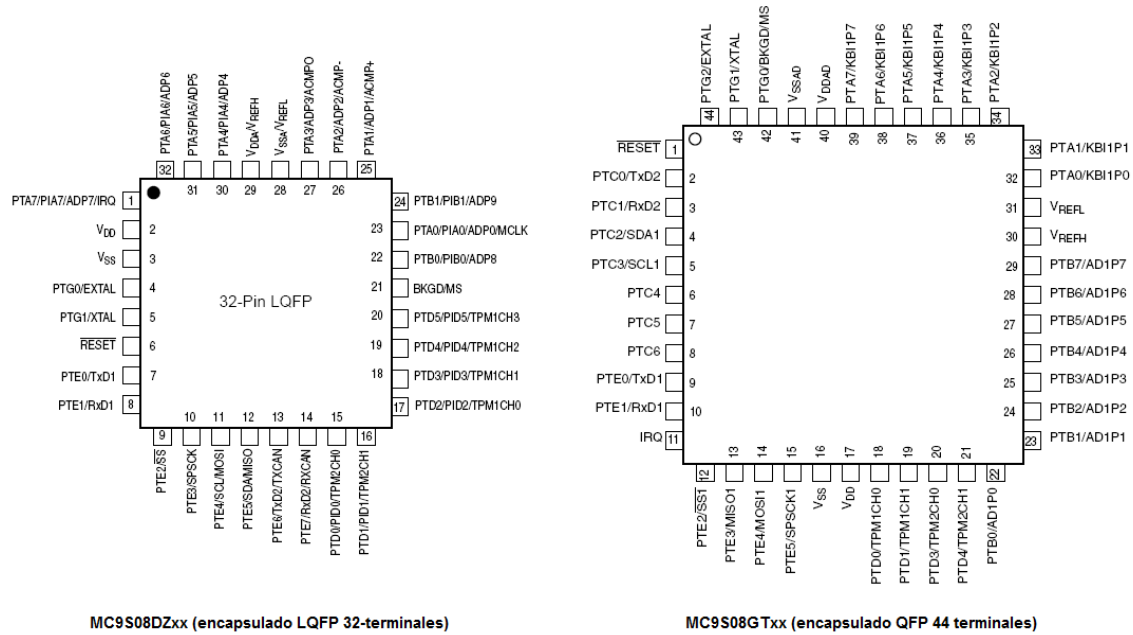


Figura 13. Configuración de terminales de los microcontroladores

Algunas de las características y periféricos comunes con los que cuentan estos dispositivos son las siguientes:

- Hasta 40 MHz de velocidad
- 60 K de Flash
- 4K de RAM
- Canales de digitales I/O
- Entradas analógicas
- ADC de 10 bits (GT60) / ADC de 12 bits (DZ60)
- Fuentes de Interrupción/reset
- Módulos de comunicación serial (SCI)
- Módulos de interfaz periférica serial (SPI)
- Comunicación entre circuitos (Inter-Integrated Circuit - IIC)

Dentro de las características particulares más relevantes para cada uno podemos citar las siguientes [25] [26]:

- MC9S08DZ60
 - Controller Area Network (CAN)

- EEPROM empotrada
- Comparadores analógicos
- MC9S08GT60CFB
 - Modo de reserva de energía
 - Detección de bajo voltaje

3.4 SMAC

Para el desarrollo de la interfaz de comunicación inalámbrica se decidió utilizar el protocolo S-MAC (Simple Medium Access Control), el cual es un protocolo propietario de Freescale similar al 802.15.4. Salvo algunas diferencias notables en sus mecanismos. S-MAC a diferencia de la MAC del 802.15.4, no cuenta con una subcapa LLC (ver figura 6), lo que lo vuelve un protocolo sencillo, implementado para trabajar con los transceptores manejados por microcontroladores de 8 bits de la compañía Freescale. Es una solución de menor costo ya que utiliza pocos recursos del microprocesador, por lo mismo su funcionalidad es muy limitada en comparación a la MAC ya que no implementa de manera completa la capa completa 802.15.4 o la pila de ZigBee, sin embargo, es ideal para desarrollo de productos y prototipos, ejemplos de esto son en la utilización de aplicaciones de bajo costo que requieran primitivas básicas como transmisión, recepción y selección de la potencia de canal [27]. Otra limitante que se tiene al tratar de implementar aplicaciones con el estándar 802.15.4 o ZigBee es la cantidad de memoria requerida por las pilas de estos protocolos, que si bien son soportadas por la capacidad de memoria del microcontrolador, requieren que el sistema de desarrollo Codewarrior cuente con licencia, lo que eleva el costo de desarrollo y en este caso no se cuenta con la licencia correspondiente.

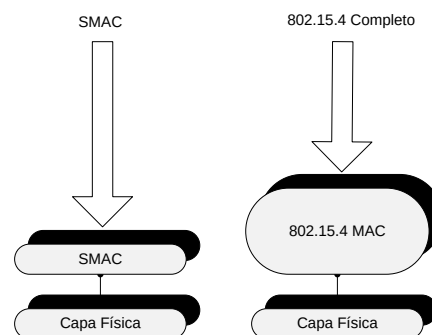


Figura 14. Diagrama a bloques comparativo de los protocolos SMAC y 802.15.4

Soporta redes estrellas o puerto a puerto (peer to peer), pero se puede aprovechar para desarrollar capas de redes propias o agregar nodos repetidores. El código está escrito en ANSI C para la familia de microcontroladores HCS08. El código de la SMAC es tan pequeño que requiere de 4 a 8 KB de memoria. El tamaño de la SMAC depende de los elementos extras que sean agregados. La estructura de paquete se muestra en la figura 15. Y en la tabla 4 se muestra los requerimientos de memoria para los diferentes módulos que se pueden utilizar por una SMAC así como el número de terminales requeridos para el manejo del transceptor [28].

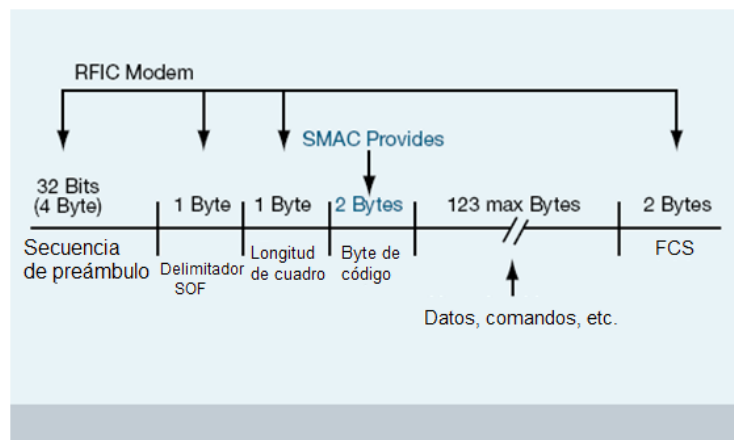


Figura 15. Estructura de los paquetes SMAC

Memoria (Flash, RAM)		
	Mínimo	Máximo
Solo SMAC	2.52 KB, 6B	4.36 KB, 12B
Módulo de seguridad	0.1 KB, 3B	0.15 KB, 3B
Modulo OTAP	2.3 KB, 318B	2.57 KB, 461B
Hardware (Terminales MCU)		
	Mínimo	Máximo
Conexión del transceptor	5	7
Soporte RF	0	4

Tabla 7. SMAC en números

En la siguiente figura se puede observar el diagrama a bloques de la SMAC utilizando el transceptor MC13192, esta configuración es la que se utilizó en el desarrollo de este tema de

tesis, ya que utiliza las ventajas de la capa física del 802.15.4, sin embargo, esta no requiere de licenciamiento para su uso, lo que resulta muy conveniente en aplicaciones propietarias en las cuales no se requiere compatibilidad con otros fabricantes.

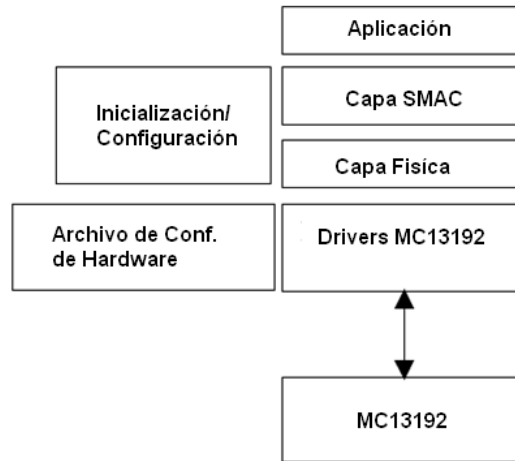


Figura 16. Diagrama a bloques de la SMAC

3.4.1 Trama SMAC

Esencialmente, SMAC puede ser definido como un manejador entre el transceptor y el microcontrolador. La SMAC también incluye funciones para inicializar el MCU (MCUInit) y los periféricos; como la interface de comunicación serial (SCI), el despliegue en pantalla de cristal líquido (LCD), la interfaz de depuración del kernel (KDI) y los diodos emisores de luz (LED's), más los módulos de seguridad y la programación en el aire (OTAP). La capa SMAC es la conexión entre la aplicación y el centro de la SMAC, la cual mantiene su simplicidad en la estructura del paquete que transmiten y recibe el transceptor [29].

Tomando como referencia la figura x, la trama está dividida en cinco partes principales, que son:

- **Secuencia de preámbulo.** Formado por los cuatro primeros bytes, es utilizado por el transceptor para la sincronización del mensaje y para mantener una base de tiempo requerida para la comunicación. Cuando éste campo es detectado por el receptor, se inicia una medición de energía recibida durante un periodo de 64 μ s, denominada indicador de calidad de enlace (LQI). Básicamente es el mismo preámbulo que se utiliza en el protocolo 802.15.2 presentando de la misma longitud.

- **Delimitador de inicio de secuencia.** El byte que delimita el inicio de secuencia (SFD) indica el fin de la cabecera de sincronización y el inicio de la trama de datos. Su longitud es de un byte al igual que protocolo 802.15.2.
- **Longitud de trama.** El indicador de longitud de trama es un campo de 7 bits de longitud que especifica en número total de bytes contenidos en carga de datos más la secuencia de comprobación de trama. Este valor debe estar entre 0 y 127 al igual que protocolo 802.15.2.
- **Carga de datos:** Este bloque de datos tiene una longitud total de 125 bytes, donde los dos primeros son asignados por la subcapa MAC y configuran a la trama en modo no promiscuo. En los 123 bytes restantes se colocan los datos, comandos o cualquier información definida por la capa de aplicación.
- **Secuencia de comprobación de trama:** Los últimos dos bytes son la secuencia de comprobación de trama (FCS). En estos se introduce un código de 16 bits generados por un algoritmo CRC. Al recibir un paquete, el receptor calcula el FCS del paquete recibido y compara el resultado con los últimos dos bytes de este. Si los resultados son iguales significa que el paquete se transmitió sin errores. Estos dos bytes también son utilizados en el protocolo 802.15.2.

3.5 Descripción del funcionamiento

En el funcionamiento del Gateway el microcontrolador DZ60 se encarga de administrar el enlace del protocolo NMEA2000®, este dispositivo cuenta con el código necesario para obtener los datos de la capa física y/o enviar datos hacia esta capa. Al mismo tiempo este microcontrolador está conectado vía la interfaz de comunicación serie con el microcontrolador del GT60. El microcontrolador GT60 se encarga de administrar el protocolo SMAC, contando con el código necesario para recibir y/o enviar datos hacia la capa física que finalmente envía o recibe datos del aire.

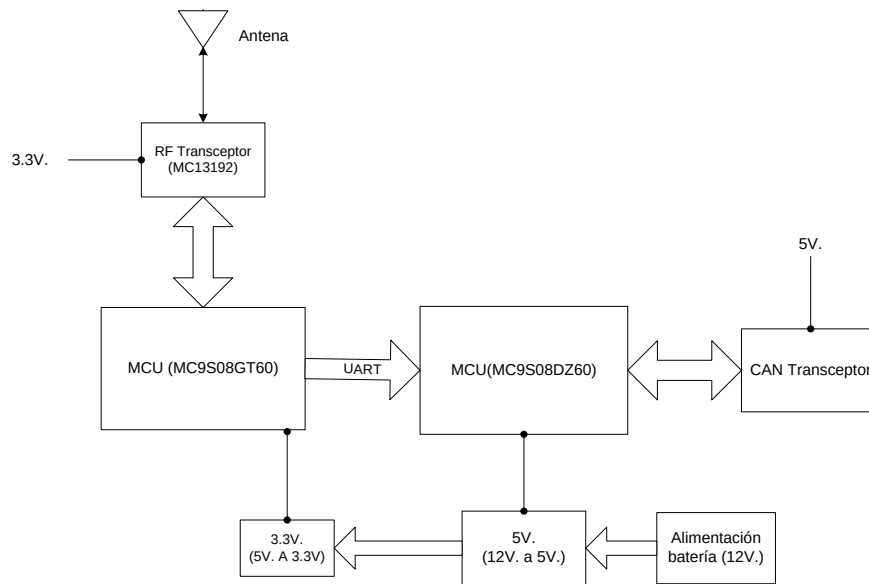


Figura 17. Interconexión de los microcontroladores (Gateway)

En particular el proyecto de tesis solo requiere que la función de comunicación del gateway solo vaya de este hacia el ducto, debido a la naturaleza del comportamiento de los sensores conectados a la red.

Por otro lado la parte que involucra el sensor de viento cuenta solo con el módulo LR-WPAN PAN802154, lo que significa que el microcontrolador GT60 incluido en este, se encarga de la administración del protocolo SMAC y de la aplicación del sensor de viento.

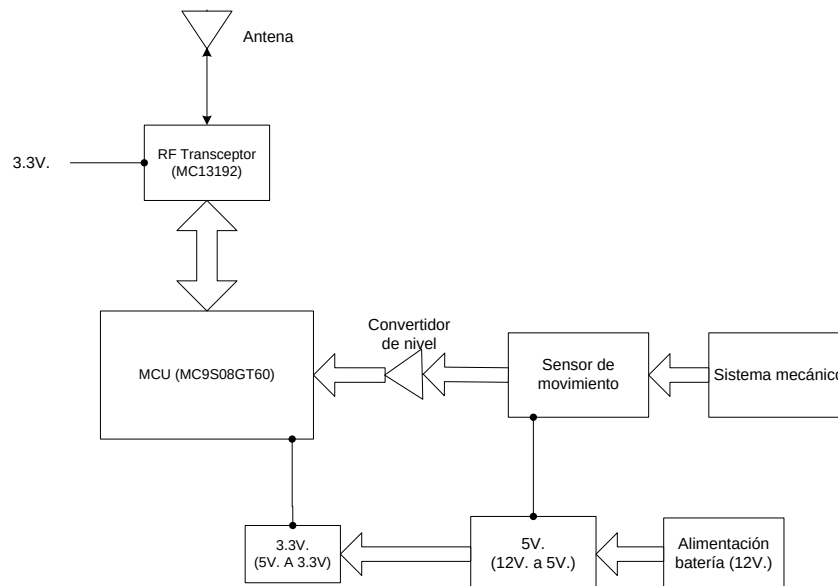


Figura 18. Interconexión del microcontrolador con el sensor de viento

3.6 Diseño de la capa de aplicación SMAC

Debido al enfoque de cada uno de las aplicaciones en el enlace de inalámbrico, el software del Gateway difiere del sensor de viento en el enfoque de algunas secciones, pero en otras es prácticamente igual y muestran la misma estructura de programación. En ambos dispositivos la capa física y la SMAC son prácticamente la misma, y la capa de aplicación de ambos dispositivos cuenta con la misma estructura de programación.

La capa de aplicación podemos dividirla en cuatro secciones: inicialización, máquina de estados, análisis de información y ejecución de decisiones.

3.6.1 Inicialización

En esta se lleva a cabo la declaración de variables y configuración de atributos esenciales del microcontrolador así como de sus periféricos (puertos I/O, módulos de comunicación, temporizadores, etc). Esto permite que el microcontrolador quede preparado para empezar a funcionar y hacer funcionar la electrónica asociada a este. Esta inicialización es muy similar para el módulo que maneja sensor de viento, la única diferencia que presenta es la elección del periférico necesario, que implica la utilización de un temporizador seleccionado para este fin.

3.6.2 Máquina de estados

Esta parte del código es esencial para el funcionamiento de la aplicación hablando del Gateway o del sensor de viento, ya que se mantiene activa durante todo el tiempo de operación del módulo, exista comunicación o no con algún otro módulo. Lo anterior debido a que la estructura de código está basado en un ciclo infinito, dentro del cual se encuentran las condiciones de decisión para que el módulo realice la tarea necesaria de acuerdo al algoritmo.

A continuación encontraremos todos los posibles estados que existen dentro de la máquina y dependiendo de si es el Gateway o el sensor de viento se estarán aplicando unos u otros estados. Esto se puede ver claramente en los diagramas de flujo donde se encuentra especificado que estados corresponden a cada parte del proyecto. Las condiciones de decisión que componen la máquina de estados son:

IDLE STATE: Estado ocioso. Cuando el microcontrolador se encuentra en este estado configura sus funciones y periféricos en modo de recepción (RECEIVER ALWAYS ON), para preparar al módulo para la siguiente ejecución del ciclo de código.

RECEIVER ALWAYS ON: Recepción siempre encendido. Verifica si se ha recibido un dato correcto en un periodo de tiempo establecido por el protocolo, de lo contrario activará el estado tiempo fuera (TIMEOUT STATE).

TRANSMIT DATA: Transmisión de datos. Si el estado de recepción está habilitado lo deshabilita, y se habilita la transmisión, enviando los datos formado por los tomados del sensor y por el fin de paquete.

TRANSMIT ACK: Transmisión de confirmación. Habilita el modo de recepción y envía un mensaje de confirmación de recepción de datos. Al recibir esta confirmación el módulo continúa con el algoritmo. Al no recibir este paquete, se asume que la información enviada por el transmisor no llegó de manera exitosa al Gateway (o viceversa), por lo que el gateway entrara al modo TIMEOUT STATE.

TIMEOUT STATE: Estado de Tiempo fuera. El nodo entra a este estado si no recibe dentro de un tiempo determinado el mensaje de confirmación de recepción de datos de parte del gateway. Ya que si no se recibe la confirmación se asume que la información transmitida por el módulo no llegó a su destino, entonces se retransmite nuevamente los datos y espera el aviso de confirmación nuevamente. El proceso de retransmisión puede ser efectuado hasta un máximo de 4 ocasiones y después de eso se asume que el gateway se encuentra deshabilitado o fuera del área de cobertura.

Como mencionábamos antes la máquina de estados se encuentra dentro del Gateway y el sensor de viento, por lo que revisando las tareas de cada estado podemos ver que la interacción entre las dos partes trabaja coordinada por el algoritmo de la máquina de estados de tal manera que, si se recibe o envía una trama con una petición, pueda realizar la tarea solicitada y enviarla de regreso, o viceversa, que pueda captar la información solicitada y realizar la tarea programada.

3.6.3 Análisis de información

El algoritmo de comunicación puede ser analizado con la recepción de una trama con paquetes de información. En ese caso se produce una interrupción generada por una de las primitivas de SMAC, la cual se ejecuta alternamente a la máquina de estados. En esta sección del

código se analizan las tramas recibidas, y de ser el caso, se valida la información para habilitar la máquina de estados.

3.6.4 Ejecución de decisiones

Una vez extraída la información de la trama, el paso siguiente es utilizar la información para tomar decisión de retransmitir la información hacia el protocolo NMEA2000®, en caso del Gateway. En el caso del sensor de viento, es un poco diferente, ya que la información adquirida del sensor es la que se utiliza para tomar la decisión de transmitirla hacia el Gateway.

3.7 Secuencia de operación

Desde el punto de vista operativo del sistema se puede dividir en tres módulos diferentes, cada uno de los cuales tiene el software necesario para su funcionamiento. Estos tres dispositivos son el sensor de viento, el receptor inalámbrico y la interfaz CAN, estos dos últimos forman el Gateway entre la red inalámbrica y la red CAN. El sensor de viento y el receptor inalámbrico utilizan un microcontrolador Freescale HCS08GT60, mientras que la interfaz CAN es implementada a través de un micro HCS08DZ60. A continuación se describe el funcionamiento de cada uno de los módulos a través de su diagrama de flujo

3.7.1 Sensor de Viento

El funcionamiento del microcontrolador encargado del sensor de viento está formado por un programa principal el cual contiene un ciclo infinito en el cual se realizan ciertas actividades a través de una máquina de estado que controla cada uno de los procesos involucrados en la transmisión de la información hacia el receptor inalámbrico, así como de validar si hay dato disponible por parte del sensor de viento (ver figura 19). A su vez existen dos interrupciones (ver figura 20) que permiten realizar la medición de la velocidad del viento, de donde se obtiene el resultado para ser utilizado posteriormente por la máquina de estado.

En la figura 19 se muestra el diagrama de flujo del programa principal del sensor del viento. Lo primero que se hace es realizar la inicialización de todas las variables utilizadas para el funcionamiento del módulo (ej. El buffer de transmisión, contadores, banderas de control, etc.), así como la configuración de las líneas de entrada o salida del microcontrolador. Posteriormente

se inicializan los periféricos requeridos para la aplicación como lo es el transceptor, esta inicialización es provista al realizar la importación de la mascarilla generada por el software Beekit hacia el programa Codewarrior donde se desarrolló la capa de aplicación para el sensor de viento. Una vez inicializado el microcontrolador y los periféricos se entra a un ciclo infinito en el cual se permanece hasta que se apague módulo. Dentro de este ciclo infinito se maneja la máquina de estados, la cual se implementa para controlar la secuencia de ejecución de las actividades requeridas para el funcionamiento del módulo y las cuales son controladas por acciones que permiten cambiar el estado de la misma. El primer estado de la máquina es el estado ocioso, en este estado la acción es encender el receptor inalámbrico con el fin de esperar algún comando de control hacia el sensor (la función de enviar comandos para la configuración del sensor no está implementada en el sistema pero se dejó la opción para trabajo futuro). La máquina pertenece en este estado hasta que se obtenga la validación de datos del sensor por el estado de la bandera “Dato del sensor”. Estos datos son obtenidos a través de la interrupción descrita en la figura 20 que corre en paralelo a la máquina de estados, en esta interrupción se cambia una bandera que permite modificar el estado de la máquina. Los datos son actualizados en una variable para que estén disponibles en el programa principal, se habilita el estado de transmisión y se borra la variable “Dato del sensor” creada en la interrupción del TPM, (esto asegura que el siguiente dato será un dato actualizado). Puesto que la máquina ahora está en estado de transmisión se realizan las actividades correspondientes a la misma, esto es transmitir la información obtenida y esperar el reconocimiento de recepción del Gateway, lo cual se hace al cambiar la máquina al modo de recepción. Si no se recibe el reconocimiento en un tiempo determinado, se habilita el estado de tiempo fuera, el cual permite la retransmisión del dato hasta por cuatro ocasiones, si no se logra una transmisión exitosa en este lapso de tiempo el dato se desecha.

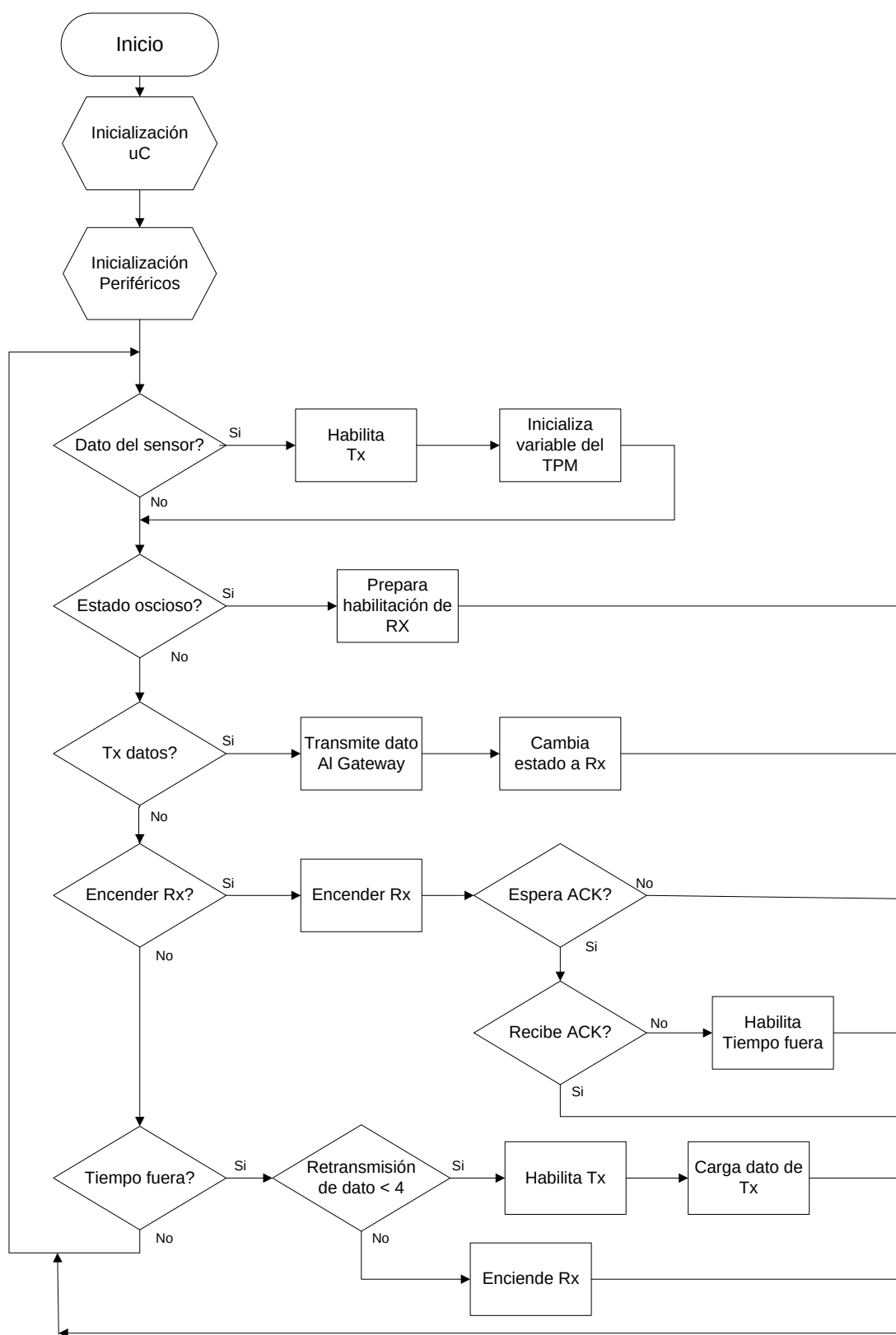


Figura 19. Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador del sensor de viento (parte 1)

Para poder obtener el dato de la velocidad de viento se utilizan 3 interrupciones interrelacionadas de la siguiente manera:

La interrupción de flanco de subida configura la siguiente interrupción como flanco de bajada para poder determinar el tiempo que en que el sensor de viento le lleva girar media vuelta (suficiente para poder calcular la velocidad y preparar la siguiente medición), una vez conmutado el flanco de de la interrupción se inicializa el contador del TPM (temporizador) a cero para poder hacer el conteo del tiempo que dura en estado alto la señal de salida del sensor de viento. Se termina la interrupción y se generará otra hasta cuando se presente el flanco de bajada de la señal del sensor de viento.

Mientras tanto, de forma interna el microcontrolador está incrementando en una unidad el registro del TPM cada 30 μ seg, de forma indefinida hasta que se presente la interrupción del flanco de bajada.

Una vez que se presenta la interrupción del flanco de bajada, esta configura la interrupción como flanco de subida preparándose para la siguiente muestra de tiempo en el siguiente semiciclo. Se toma el dato del TPM y se interpola (el dato se correlaciona positivamente) para hacer el cálculo de la velocidad, finalmente se guarda el dato en una variable global que será utilizada en el programa principal, como se describió anteriormente, por último se habilita la bandera “Dato del sensor” para poder cambiar la máquina de estados de recepción a transmisión.

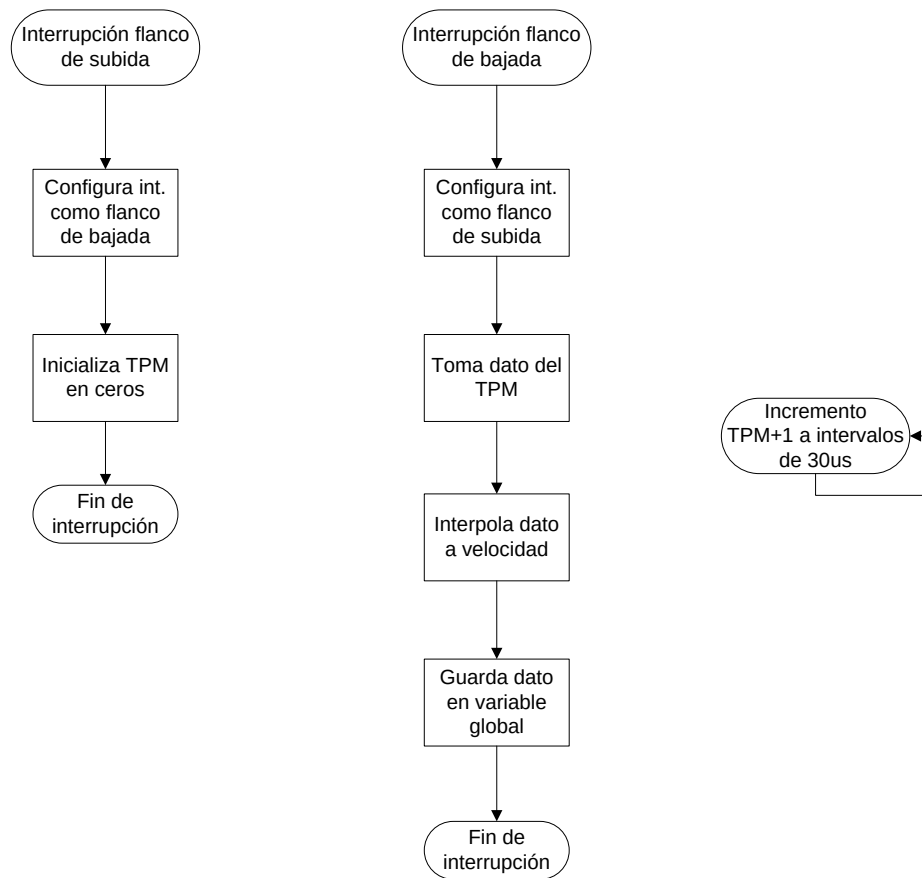


Figura 20. Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador del sensor de viento (parte 2)

3.7.2 Receptor inalámbrico

El funcionamiento del microcontrolador encargado del receptor inalámbrico está formado por un programa principal el cual contiene un ciclo infinito en el cual se realizan ciertas actividades a través de una máquina de estado que controla cada uno de los procesos involucrados en la recepción de la información enviada por el sensor de viento (ver figura 21) .

En la figura 21 se muestra el diagrama de flujo del programa principal del receptor inalámbrico. Lo primero que hace al igual que el sensor de viento, es realizar la inicialización y configuración del microcontrolador. Posteriormente también se inicializan los periféricos requeridos para la aplicación como lo es el transceptor, esta inicialización es provista al realizar la importación de la mascarilla generada por el software Beekit. Dentro del ciclo infinito principal la máquina de estados del programa es controlada por acciones que permiten cambiar el estado de la misma, el primer estado de la máquina es el estado ocioso, en este estado se enciende el receptor inalámbrico con lo que se habilita el estado de recepción, lo que lleva a esperar algún

dato proveniente del sensor de viento. La máquina permanece en este estado hasta que se reciba un dato (a través de la interfaz inalámbrica) del nodo de sensor de viento. Al recibir un dato a través de receptor se genera una interrupción que hace que el microcontrolador entre en la subrutina de recepción, la cual cambia el estado de la máquina a “transmisión de reconocimiento” con el fin de que posteriormente se envíe el reconocimiento de recepción al sensor de viento, además se envía el dato recibido a través de la interfaz serie (UART) lo que nos permite obtener la información disponible para poder compartirla o procesarla.

En el estado de “transmisión de reconocimiento” se pasa el transceptor de modo de recepción al modo ocioso con el fin de poder transmitir información, ya el transceptor no puede ser cambiado de forma directa de recepción a transmisión. Una vez que se envió el reconocimiento de recepción, la máquina de estados es puesta nuevamente en modo de recepción, a la espera de un nuevo dato del sensor de viento.

El estado de tiempo fuera, el cual permite la retransmisión hasta por cuatro ocasiones, no está implementado en el sistema, pero se dejó la opción para trabajo futuro, ya que este permitirá tener flujo de datos en ambos sentidos si llega a ser necesario.

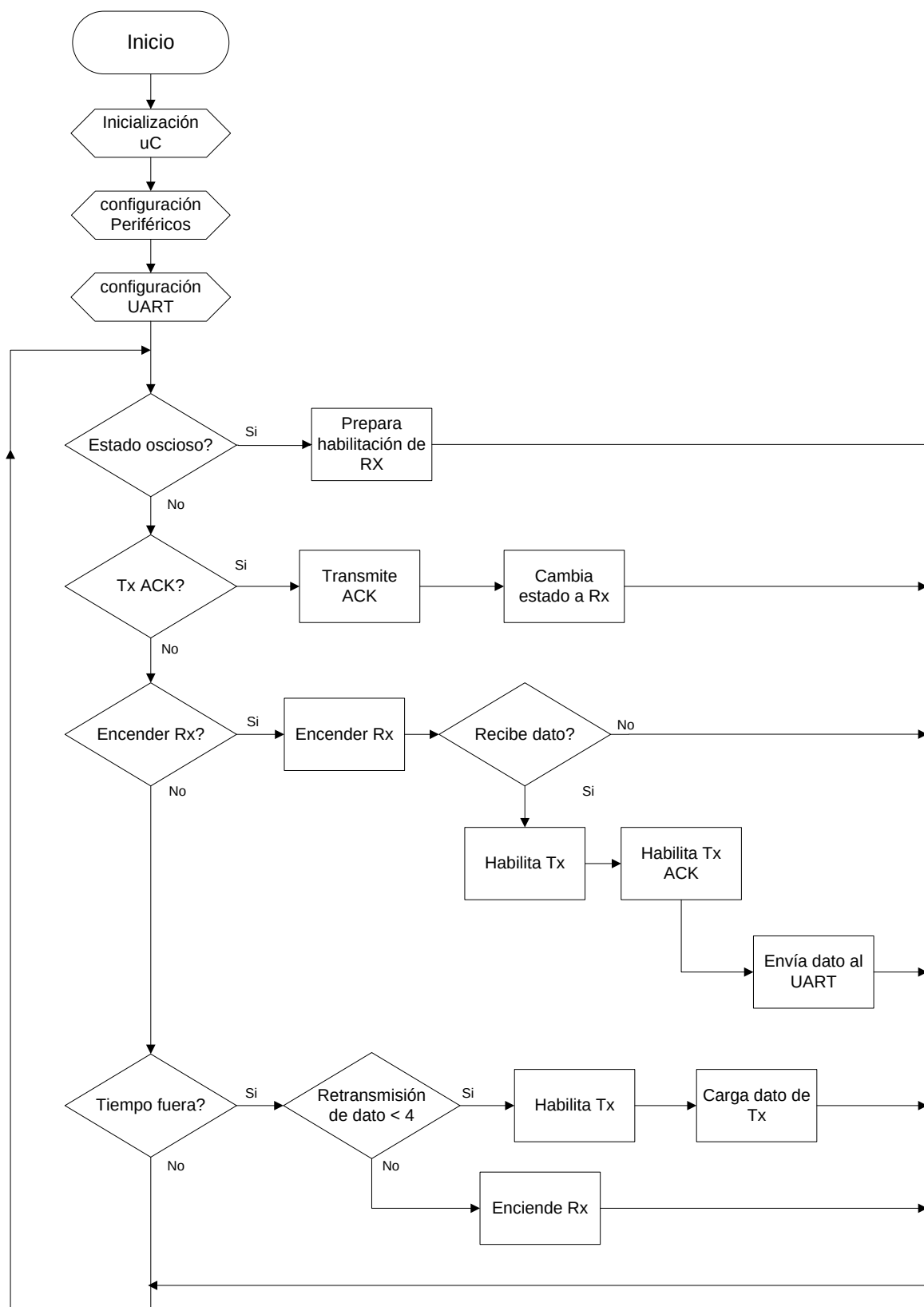


Figura 21. Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador GT60 del gateway (parte 1)

3.7.3 Interfaz CAN

El funcionamiento del microcontrolador encargado de la interfaz CAN está formado por un programa que está hecho principalmente por interrupciones las cuales ejecutan código para cumplir las diferentes tareas del protocolo NMEA2000®. También contiene un ciclo infinito lo cual se asegura que el microcontrolador estará en modo de operación indefinidamente (ver figura 22).

En la figura 22 se muestra el diagrama de flujo generalizado del programa principal de la recepción del dato para ser retransmitido hacia el CAN. Lo primero que se hace es realizar la inicialización y la configuración de las líneas de entrada o salida del microcontrolador. Posteriormente se inicializan los periféricos requeridos para la aplicación como lo es el transceptor de NMEA2000® y el UART. Finalmente se deja al microcontrolador en un ciclo infinito en espera de alguna interrupción de datos.

En la figura 23 se muestra el diagrama de flujo de la interrupción, el código de la interrupción será la encargada de recibir el dato proveniente del receptor inalámbrico vía UART, traducirlo a velocidad y hacer el puente hacia el transceptor del CAN, esto último cumpliendo antes con el protocolo del NMEA2000® para poder ser escuchado por cualquier dispositivo conectado a la red. El dato de velocidad de viento es enviado a intervalos de 100ms de acuerdo a la especificación del PGN. Así que esta interrupción se estará habilitando cada 100 ms y la primera tarea que tiene es la de verificar si existe un dato para transmitir hacia la red. Si existe dato, lo siguiente es revisar si existe algún dispositivo que pueda escuchar la información. Si lo anterior se cumple entonces se elabora la trama de acuerdo al protocolo NMEA2000® y se envía la información. Si no se recibe una confirmación de que el dato fue recibido con éxito se procede a reenviar el dato hasta que la condición de reenvío no se cumpla. La interrupción termina cuando la condición anterior se completada o cuando el dato sea recibido exitosamente.

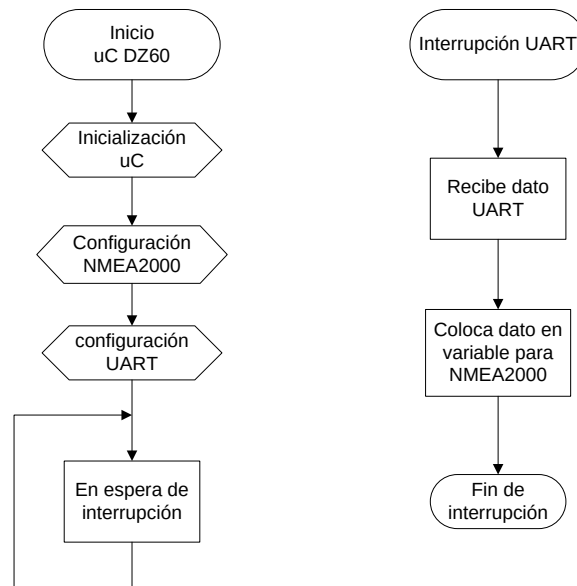


Figura 22. Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador DZ60 del gateway (parte 2)

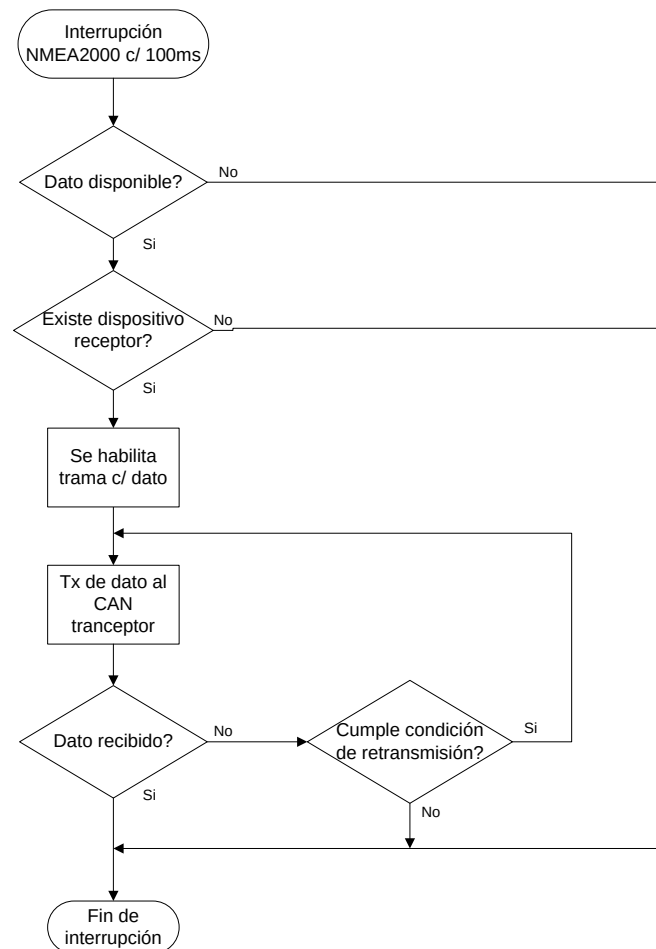


Figura 23. Diagrama de flujo implementado en el microcontrolador DZ60 del gateway (parte 3)

4 Pruebas y Resultados

A continuación se describen las pruebas realizadas, con el sensor de viento enlazado a la red NMEA2000®, así como las realizadas para identificar la calidad de la señal del enlace inalámbrico con el hardware utilizado. Además se incluyen el análisis de algunas tareas que se tuvieron que resolver durante la implementación del prototipo.

De lo anterior se puede visualizar que las pruebas básicamente se dividen en dos: el primero el de funcionamiento de enlace con la red y el segundo el de calidad de enlace dentro del campo de aplicación.

4.1 Funcionamiento del enlace con la red

Los resultados de la capacidad de enviar un paquete de información por el canal inalámbrico con el protocolo SMAC nos arroja que pueden ser hasta 2840 paquetes/seg. A continuación se presenta el método de cálculo:

10 bytes de carga del protocolo SMAC
 + 1 byte de información
 = 11 bytes de carga total= 88 bits de información

Capacidad del canal inalámbrico = 250Kbits

Capacidad de paquetes de información x segundo

$$\frac{250 \text{ Kbits}}{88 \text{ bits}} = 2840.9 \text{ paq./seg} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Ahora si llegáramos a necesitar la implementación de la red NMEA2000® con todas sus funciones de red sobre el medio inalámbrico, necesitaremos la implementación del PGN sobre la capa de transporte para redes inalámbricas. Entonces tomando los resultados anteriores podemos utilizarlos para hacer el cálculo del envío de información para el PGN de velocidad de viento como ejemplo; tenemos que necesitamos 5 bytes de información a cada 100 mseg. Donde nos arroja los siguientes resultados:

10 bytes de carga del protocolo SMAC
 + 5 byte de información

= 15 bytes de carga total= 120 bits de información

Capacidad del canal inalámbrico = 250Kbits

Capacidad de paquetes de información x segundo

$$\frac{250 \text{ Kbits}}{120 \text{ bits}} = 2083.3 \text{ paq./seg}$$

Se obtiene que existe la capacidad de atender hasta 208 PGNs con la recurrencia de 100 ms. Y tomando como base esta información podemos deducir que la capacidad de atender el mensaje más recurrente con sus respectivo PGN (el cual se presenta cada 10ms) existe la capacidad de atender hasta 20 PGNs sin ningún problema lo que significa que se es capaz de atender hasta 20 dispositivos en teoría bajo esa tasa de transmisión.

Con respecto a la velocidad de comunicación entre los dos microcontroladores, es de notar que la carga del protocolo SMAC ya no será transmitido hacia al CAN transceptor. Debido a esto, el ancho de banda efectivo de datos en el caso de más tráfico soportado por el enlace inalámbrico será de 10.4Kbps. Lo que define que cualquier enlace de comunicación entre los microcontroladores deberá de estar por arriba de esta velocidad. Este último requisito no es ningún problema para cualquier tipo de comunicación estándar, ya sea I2C, SPI o UART como es el caso de este proyecto.

Una vez hecho el análisis de comunicación e integrado todo el hardware de Gateway (ver figura 24) se iniciaron las pruebas básicas de comunicación de entre los dos microcontroladores para poder compartir datos. Inicialmente no se pudieron comunicar los dos microcontroladores a pesar de que se utilizó el mismo baud rate y que ambos son de la misma familia HCS08 de freescale.

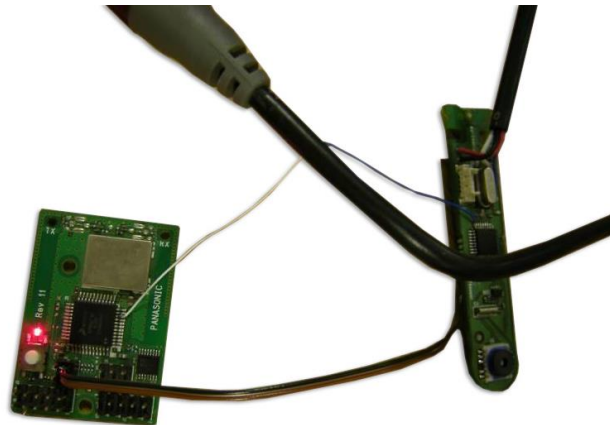


Figura 24. Gateway SMAC-CAN

La falla se debía a que la señal de transmisión se montaba en una señal de DC al conectar la línea deTx del MC9S08DZ60 (microcontrolador de la interfaz CAN) a Rx del MC9S08GT60 (microcontrolador de la interfaz inalámbrica), esto provocaba que el receptor no alcanzara a distinguir entre ceros y unos, por lo que no se recibía información en los registros internos. Para encontrar esta falla se realizaron algunas pruebas consistentes en comunicar dos microcontroladores identicos. Primero se interconectaron dos micros MC9S08DZ60, los cuales se lograron comunicar sin ningún problema. Posteriormente se interconectaron dos micros MC9S08GT60, y nuevamente no hubo problemas de comunicación. En ambos micros los puertos de comunicación serie que se utilizaron fueron el PTE0/TxD1 y el PTE1/RxD1, la única diferencia entre ambos microcontroladores es el número de pin asignado a cada puerto.

Puesto que dos microcontroladores identicos se podieron comunicar sin ningún problema se procedió a revisar la arquitectura de ambos microcontroladores.

Básicamente la arquitectura cuenta con pequeñas diferencias, ya que el microcontrolador MC9S08DZ60 en su puerto E maneja las configuraciones “Output Drive Strength” y el caso del MC9S08GT60 no presenta esta opción. Inicialmente la comunicación del DZ60 fue configurada para que quedara en bajo cuando se encontraba en estado ocioso; lo cual ocasionaba conflictos al entablar comunicación entre ambos dispositivos ya que el GT60 por naturaleza y como única opción se configura en alto cuando el estado de la comunicación se encuentra ociosa. De ahí que la opción para poder hacer compatible las configuraciones entre ambos microcontroladores fue configurar del registro “Output Drive Strength” a alto en el micro del DZ60, con lo que finalmente la comunicación se pudo establecer entre los dos micros sin ningún problema.

El hardware completo se probó con un sistema de evaluación donde se hizo la conexión del Gateway con el ducto del CAN a través del ducto implementado para la prueba, la cual constaba de los elementos básicos: un terminador de 60 ohms, la unidad de despliegue (receptor), el Gateway (transmisor) y la alimentación de voltaje (ver figura 25).



Figura 25. Conexiones de red y alimentación

Por otro lado la implementación de la veleta (Wind Vane) es el que cierra el lazo de comunicación entre el sensor de viento y la red; siendo la única conexión necesaria para este dispositivo la alimentación de voltaje, (ver figura 26 como referencia).

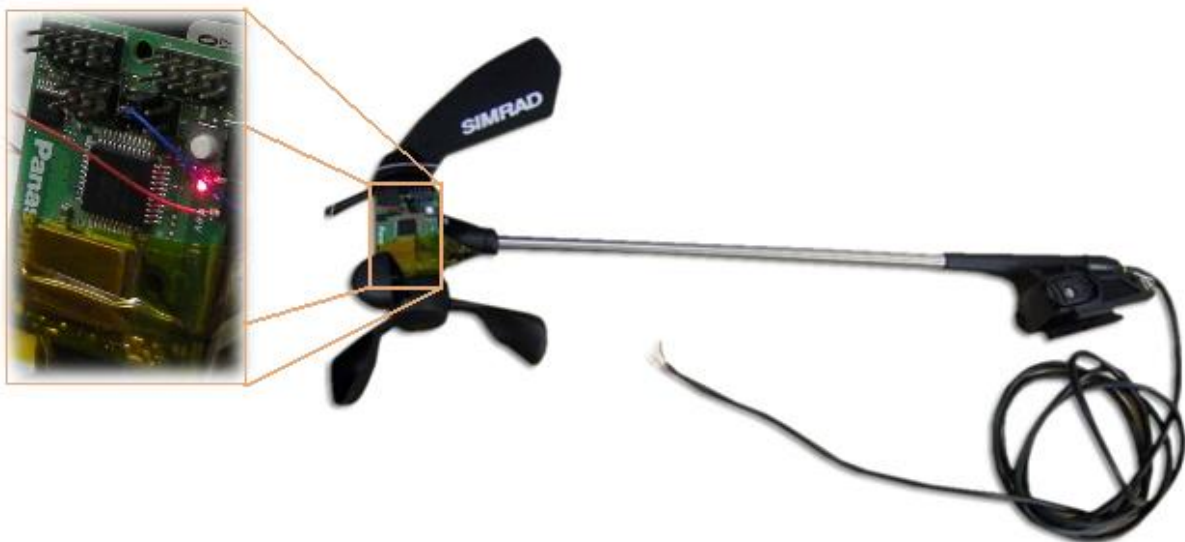


Figura 26. Dispositivo de medición de viento (Wind Vane)

Los datos transmitidos por el sensor de viento y recibidos por el Gateway son introducidos al ducto del CAN, y una vez la información dentro de este medio puede ser tomada por cualquier otro dispositivo. Para el despliegue de la información del sensor de viento se utilizó

una unidad Lowrance que mediante, mediante una pantalla auxiliar permite desplegar de los dispositivos conectados a la red. En este caso se utilizó la pantalla del producto de medición de presión barométrica (ya que el alcance de la tesis no incluye la programación necesaria para el despliegue de la información del sensor de viento). Sin embargo, esta pantalla permite desplegar la información para comprobar el funcionamiento del sistema, la pantalla contiene dos campos que muestran el mismo dato pero con diferente formato. Estos campos son utilizados para desplegar el dato de información.

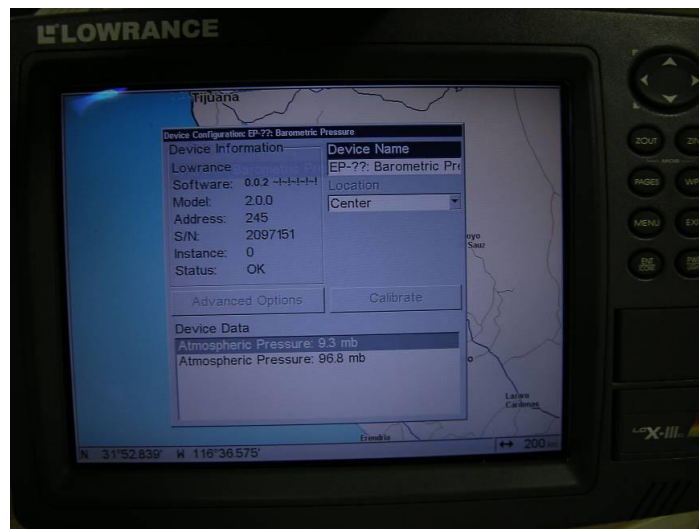


Figura 27. Pantalla de despliegue de información

4.1.1 Conversión de datos de Velocidad

Los datos finalmente se despliegan en nudos en la unidad de despliegue, la conversión se lleva a cabo dentro del microcontrolador del sensor de viento. Para obtener la función de transferencia para la velocidad se utilizó un dispositivo de referencia de donde se tomaron varias lecturas (ver figura 28) y con ayuda del programa de Excel se obtuvo la interpolación de los datos, lo que nos ayudo a obtener la ecuación de comportamiento y la predicción para datos desconocidos.

Los datos utilizados como referencia, así como los datos obtenidos del sensor de viento que permitieron obtener la ecuación de comportamiento del sensor son mostrados en la siguiente tabla:

Byte de lectura (sensor)	Velocidad en Nudos
73	8.5
65	7.8
59	7.4
30	5
0	0

Tabla 8. Equivalencia de valores a velocidad de viento

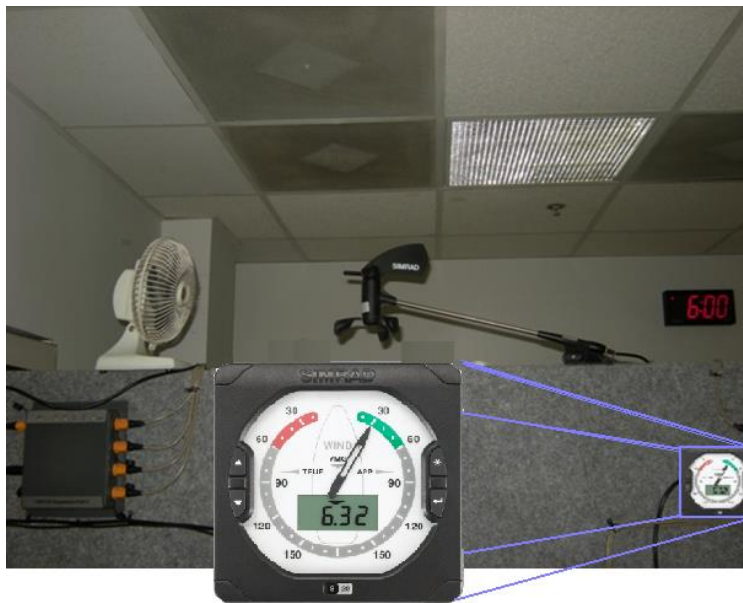


Figura 28. Instalación con dispositivo de referencia

Se utilizaron 3 diferentes tipos de aproximación para representar los datos: logarítmica, polinómica y de potencia. Cada uno de ellos se evaluó con el factor R^2 , la cual es la medida estadística de que tan buena es la línea de tendencia que se aproxima de los datos reales. Si R^2 es la unidad, significará que la aproximación corresponde exactamente a los datos reales. En la figura 30 se observa la línea de tendencia para la aproximación de potencia, se puede ver que los datos tiene una calificación muy cercana a la unidad. Cabe mencionar que los otros dos métodos también están muy cercanos a la unidad (ver figura 29), pero el que mejor desempeño muestra es el método de potencia.

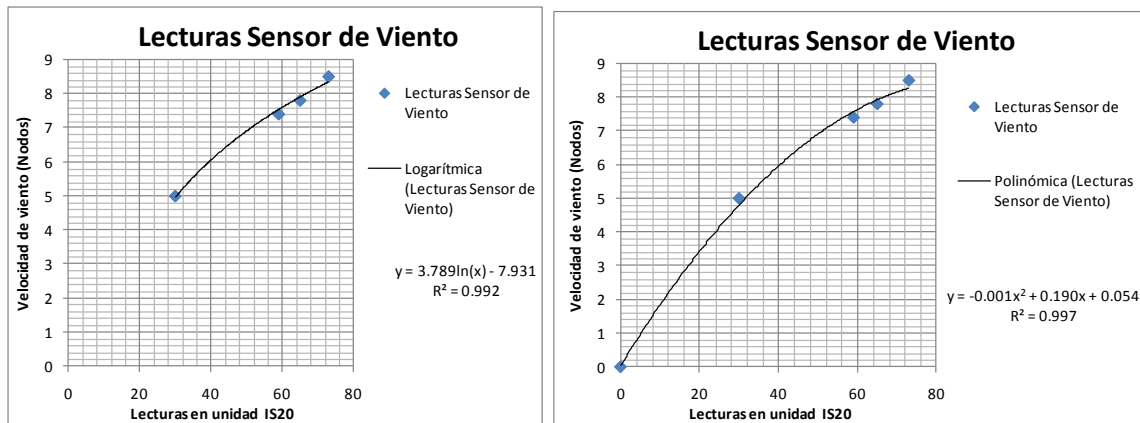


Figura 29. Representación gráfica con métodos Logarítmico y Polinómico.

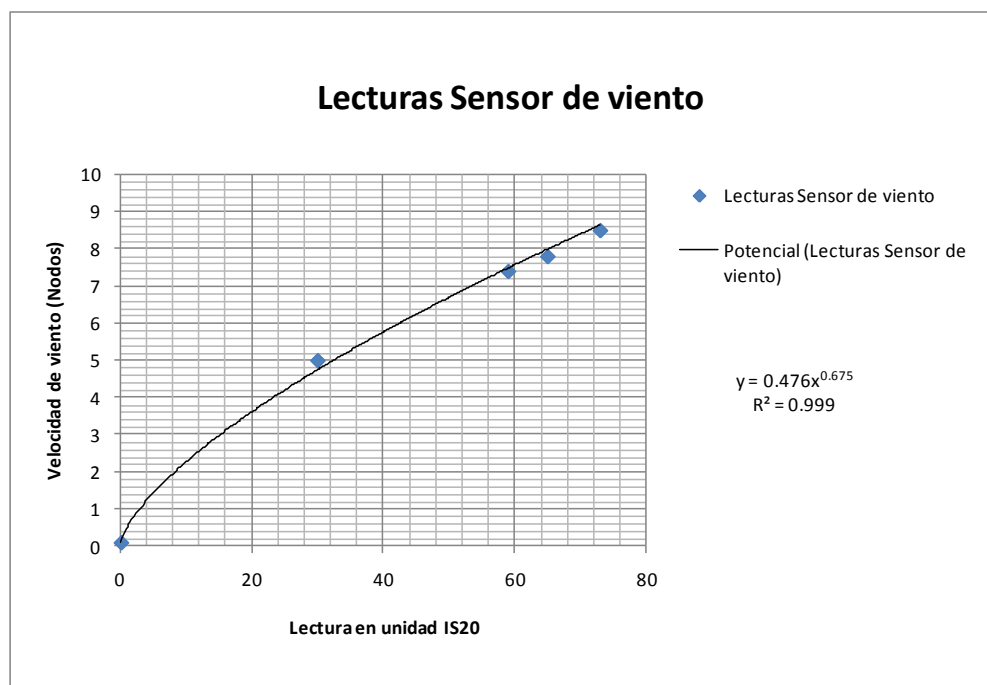


Figura 30. Representación gráfica de equivalencia de valores

4.2 Calidad de enlace

La comunicación eficiente de un enlace está basada en la calidad del canal de comunicación. Este dependerá del tipo de aplicación al que se esté enfocando el enlace inalámbrico, de acuerdo a las necesidades cuando se necesita prestar el servicio, es decir si se necesita prestar servicio en aplicaciones en tiempo real, con tolerancias a retardos, tolerancia a pérdidas e intolerancia a pérdidas.

En el caso de los dispositivos conectados a la red NMEA2000® podemos catalogarlos dentro del grupo de los que son tolerantes a retardos y pérdidas de datos. Ya que dentro de este grupo podemos encontrar que se contemplan los dispositivos con sensores conectados a redes con un bajo o moderado ancho de banda. Entonces para evaluar nuestro sistema de enlace de comunicación se consideró importante realizar pruebas de campo en el entorno real donde se ubica el proyecto de tesis con la intención de conocer el desempeño. Esto permite tener una referencia para aplicaciones marinas, que en el caso específico de este estudio se ubicaron dentro de una embarcación construida de aluminio con una longitud de 29 pies.

Se seleccionaron diferentes puntos dentro de la embarcación, los cuales presentan diferentes características de radiación de acuerdo al entorno que los rodea, además se utilizó un horno de microondas (en algunos puntos) como fuente de ruido para evaluar la interferencia que tiene con nuestro enlace. La figura 31 y 32 muestra la ubicación de los diferentes puntos de prueba dentro de la embarcación, a continuación se enlistan dichos puntos:

- Camarote (A)
- Timón (B)
- Mesa de trabajo (C)
- Lavabo(D)
- Tanque de carnada (E)
- Parte trasera (F)

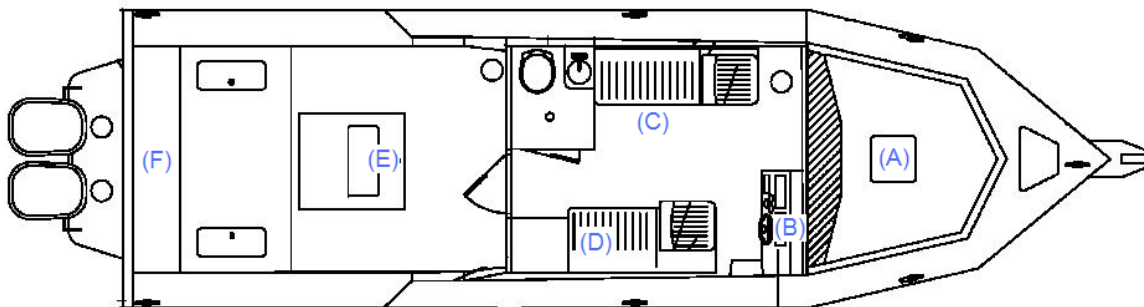


Figura 31. Ubicación de puntos de prueba (Vista superior)

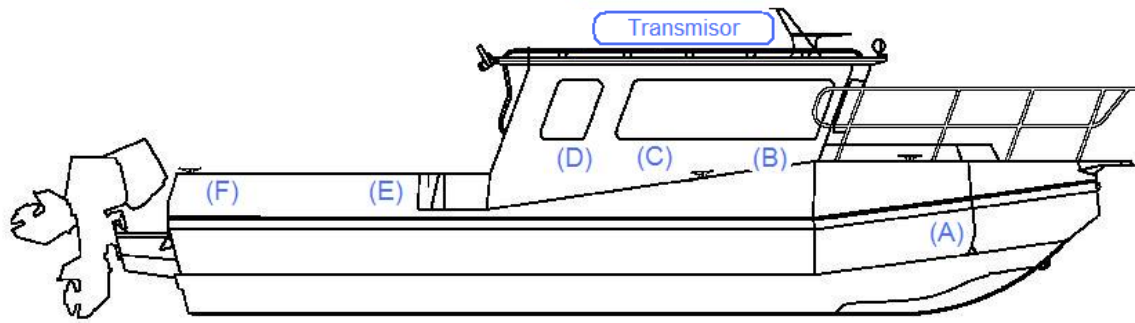


Figura 32. Ubicación de puntos de prueba (Vista lateral)

En la mayoría de las redes inalámbricas se utiliza una clasificación basados en enlaces estadísticos, algoritmos para tipos de tráfico o protocolos de transferencia. Ahora nos enfocaremos a hacer el análisis del enlace de manera estadística, así la información obtenida nos podrá dar una clara visión de la capacidad de transferencia de información en nuestro enlace. Para lo anterior utilizaremos pruebas de potencia como punto de partida y analizaremos los resultados obtenidos de las diferentes pruebas implementadas.

Para realizar las pruebas de potencia contra ubicación se utilizó el siguiente método: Se utilizó una plantilla del software Beekit de Freescale con el protocolo mínimo de enlace, el cual fue ligeramente modificado. Las pruebas consistieron en programar uno de los módulos PAN802154 para que funcionara como transmisor (Tx), con el propósito de enviar un número determinado de paquetes. Otro módulo, programado como receptor (Rx) fue colocado un punto previamente determinado para evaluar el enlace. El receptor, al captar los paquetes emitidos por el transmisor, los contabilizaba para calcular la calidad de enlace (LQI) mediante la caracterización de la medición de la intensidad de la señal y la calidad del paquete recibido [30]. El LQI se encuentra en dBm, donde

$$x\text{dBm} = 10\log\left(\frac{P}{1\text{mW}}\right)$$

donde P es la potencia de mW [29]

Como se muestra en la figura 32 el Gateway (transmisor) se colocó en la parte superior de la embarcación y el transmisor se colocó en los diferentes puntos descritos anteriormente, con el fin de conocer y evaluar la factibilidad de utilizar este tipo de enlace inalámbrica en otro tipo de aplicaciones dentro del entorno marino. Los resultados obtenidos para conocer el desempeño del

enlace se basaron en una muestra de 500 paquetes enviados y registrando el número de paquetes recibidos así como el LQI de cada uno de ellos, con esto fue posible realizar análisis de los datos y sus representaciones gráficas.

La Figura 33 muestra de manera gráfica los resultados obtenidos en la prueba del punto donde el receptor es colocado dentro del camarote, que ha juzgar por los resultados es el punto con mayor atenuación. Con los datos obtenidos es posible realizar estimaciones de la atenuación de la potencia en transmisión y notar que hay pérdidas de paquetes. En promedio se perdieron 40 paquetes en esta posición lo que nos da un eficiencia igual 91.8%. Comparando contra las siguientes figuras 34, 35, 36, 37 y 38 se observa que el promedio LQI es el más bajó (-83.54 dBm) en relación a las figuras mencionadas. Es notable el cambio en la potencia recibida al presentarse obstáculos de alta densidad en la ruta del transmisor y el receptor.

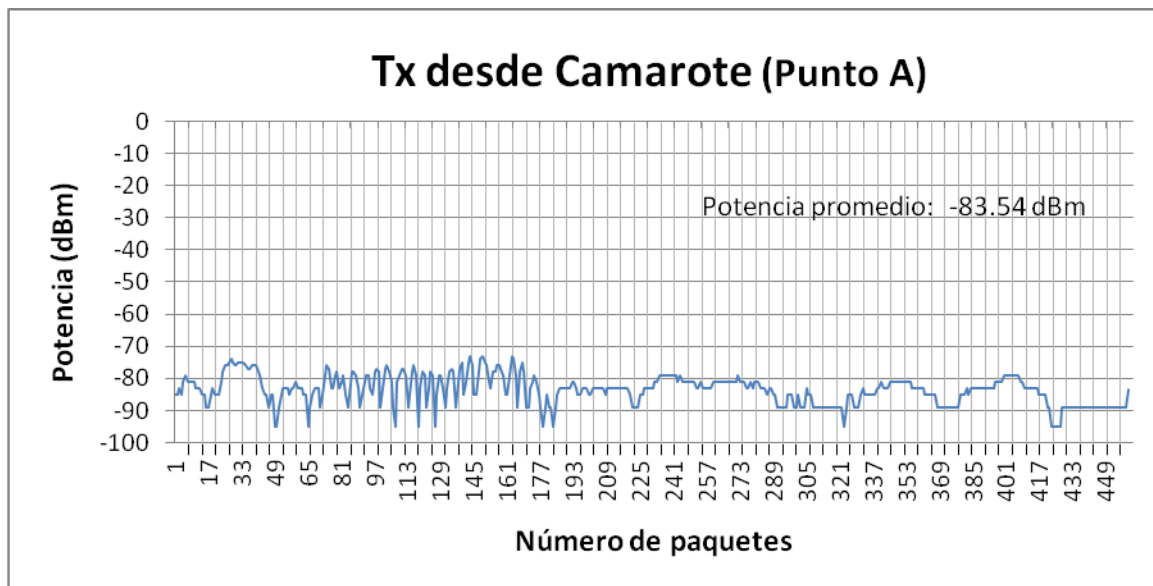


Figura 33. Gráfica de desempeño para Punto A

La Figura 34 muestra los resultados obtenidos al ubicar el receptor dentro de la cabina del bote en una mesa de trabajo, este espacio es confinado a un área de 3m x 2.5m y cuenta con ventanas como se aprecia en la figura (fig. 32 vista lateral). El receptor solo captó paquetes con un LQI de -95 dBm solo en una ocasión, la cual es la menor potencia medida a lo largo de todos los experimentos del presente trabajo. En promedio se perdieron 26 paquetes en esta posición lo que nos da un QoS igual 94.8% dando como resultado que el promedio LQI se elevara a (-76.01 dBm) en relación al punto con mayor atenuación.

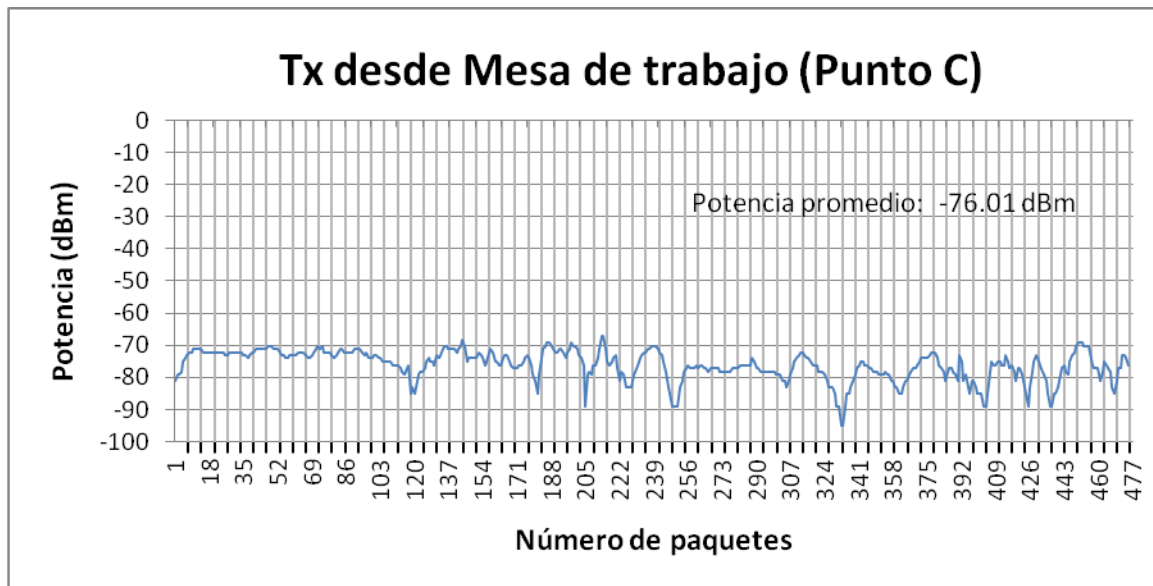


Figura 34. Gráfica de desempeño para Punto C

La Figura 35 muestra los resultados obtenidos al ubicar el receptor a la sobre el tanque de la carnada, que a pesar de que no se encuentra confinado a un lugar este no se está en línea de vista con el receptor. En este caso el receptor captó los 500 paquetes enviados, lo que nos da un QoS igual 100% y dando LQI promedio de -69.26 dBm, lo que lo convirtió en el punto con mejor desempeño.

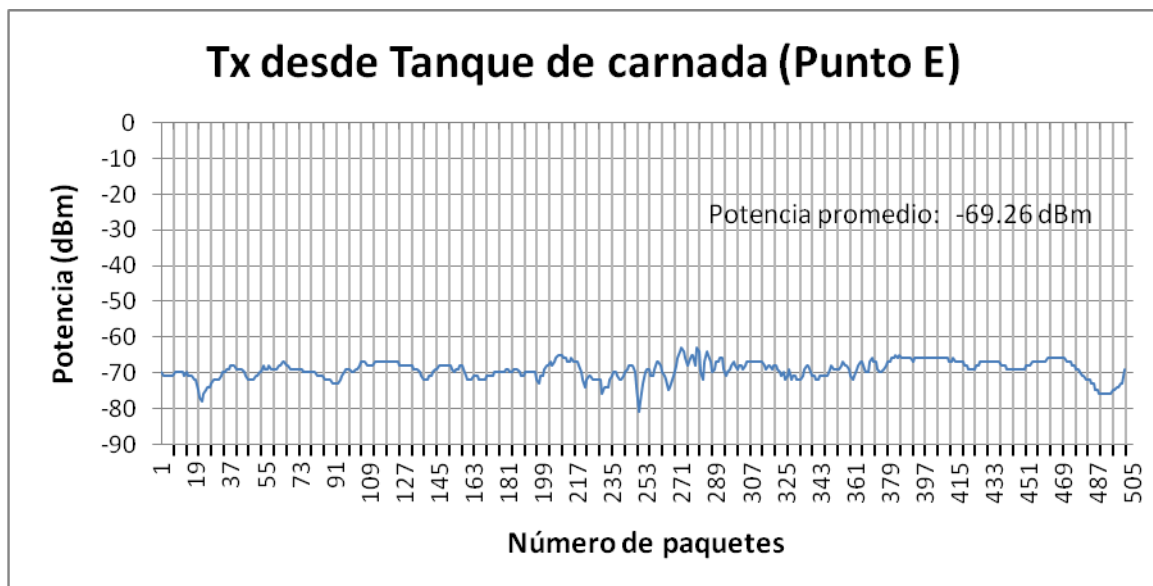


Figura 35. Gráfica de desempeño para Punto E

La Figura 36 muestra los resultados obtenidos al ubicar el receptor en la parte trasera de la embarcación, que igual que el punto anterior no se encuentra confinado a un lugar este no se encuentra en línea de vista con el transmisor. En esta ocasión el receptor también captó paquetes con un LQI de -95 dBm solo en una ocasión. En promedio se perdieron 19 paquetes en esta posición lo que nos da un QoS igual 96.2% con un promedio de LQI igual -77.67 dBm.

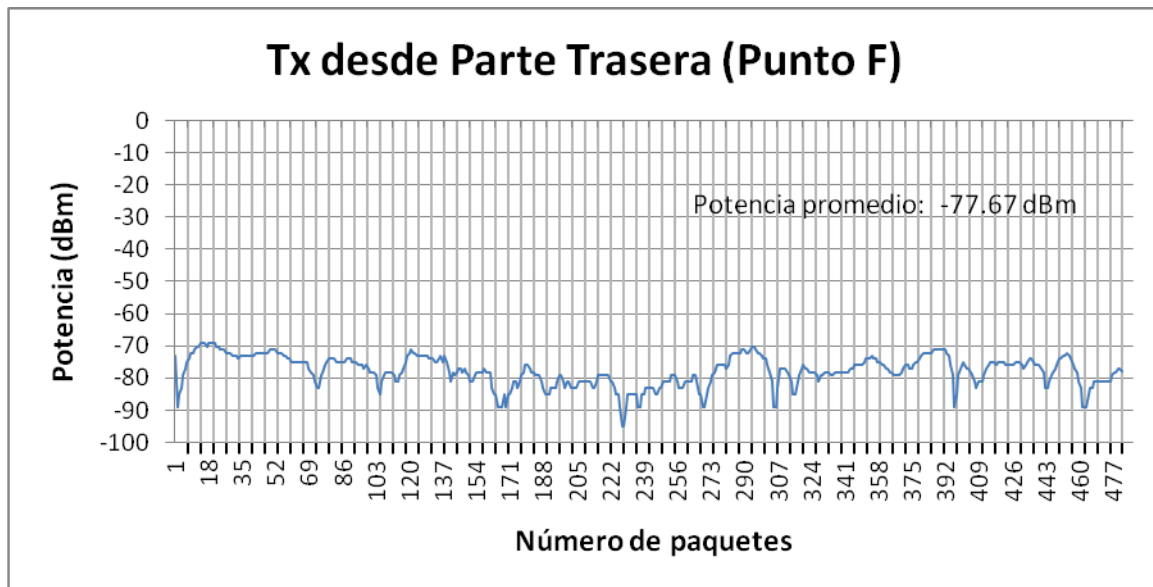


Figura 36. Gráfica de desempeño para Punto F

Para las pruebas de los siguientes puntos se agregaron pruebas adicionales con un horno típico de microondas como fuente de ruido, ya que su radiación está en la frecuencia de los 2450 MHz haciendo interferencia con la banda de transmisión del enlace inalámbrico. Y como se observa en la figura 37 se realizaron dos versiones de la misma prueba, la primera consistió en colocar el receptor en el punto B y punto D y la segunda versión de esta prueba se encendió el horno de microondas, de manera que este interfiriera en la comunicación entre el transmisor y el receptor.

Los datos obtenidos muestran en la grafica 37, que el promedio LQI de paquetes recibidos esta en los -73.49 dBm y que en promedio se perdieron 11 paquetes dándonos un QoS igual 97.8%. El segundo trazo (en rojo) de la misma gráfica muestra el resultado de la prueba con la fuente de ruido encendida donde se observa que el LQI promedio aumento a -71.71 dBm pero en promedio se perdieron 204 paquetes dándonos un QoS igual 59.2%. Es notable la pérdida de QoS al presentarse interferencia en el enlace entre el transmisor y el receptor aun que el LQI promedio se mejore.

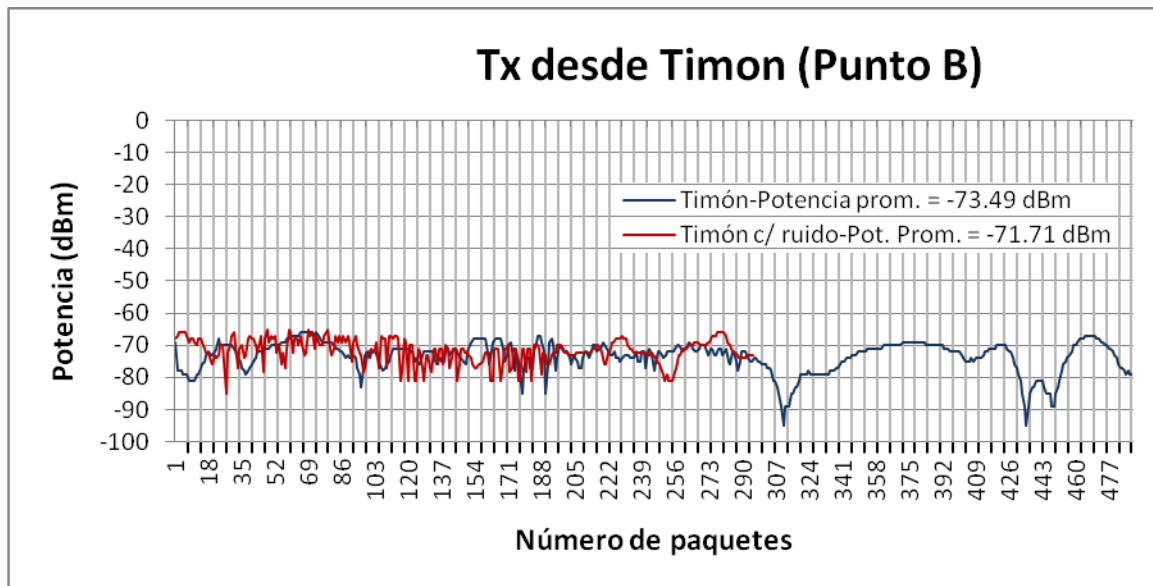


Figura 37. Gráfica comparativa de desempeño para Punto B

Los datos obtenidos muestran en la grafica 38, que el promedio LQI de paquetes recibidos esta en los -75.26 dBm y que en promedio se perdieron 4 paquetes dándonos un eficiencia igual 99.2%. El segundo trazo (en rojo) de la misma gráfica muestra el resultado de la prueba con la fuente de ruido encendida donde se observa que el LQI promedio fue muy similar rondando los -75.41 dBm pero en promedio se perdieron 278 paquetes dándonos un QoS igual 44.4%. Es notable la pérdida de QoS al presentarse interferencia en el enlace entre el transmisor y el receptor al igual que en el caso anterior, aun que el LQI promedio se mantenga.

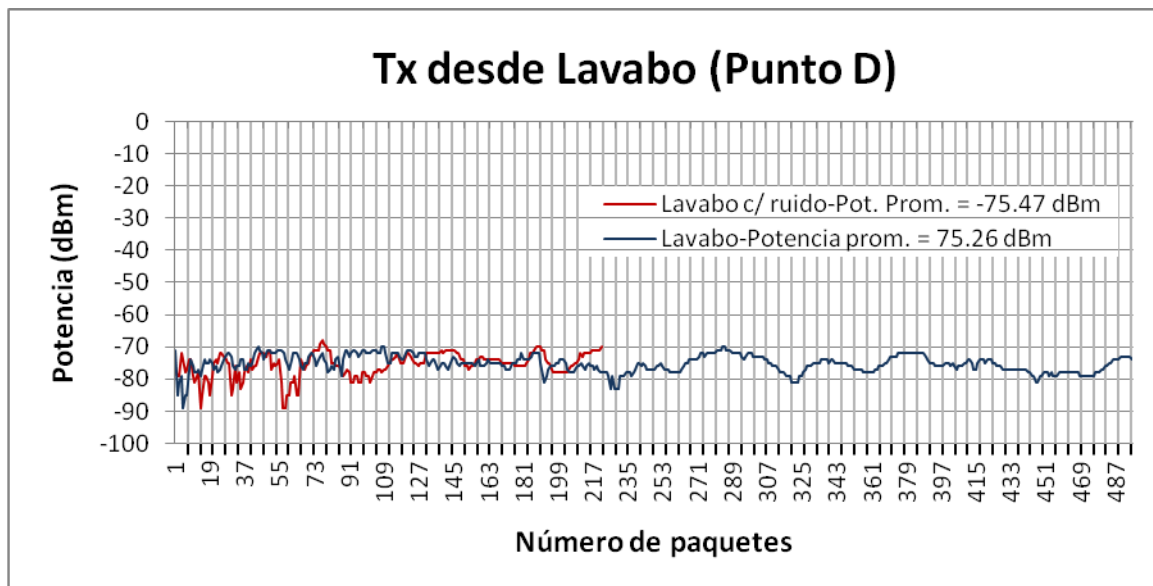


Figura 38. Gráfica comparativa de desempeño para Punto D

La siguiente gráfica de dispersión (figura 39) se muestran los resultados de porcentaje del error en los paquetes recibidos (Packet Error Rate –PER por sus siglas en ingles) de los diferentes puntos de prueba [18], donde a simple vista se puede notar que en condiciones normales la tasa de error no supera el 9% y que se nota una tendencia a aumentar el porcentaje de error conforme disminuye la intensidad promedio de la señal recibida como es de esperarse.

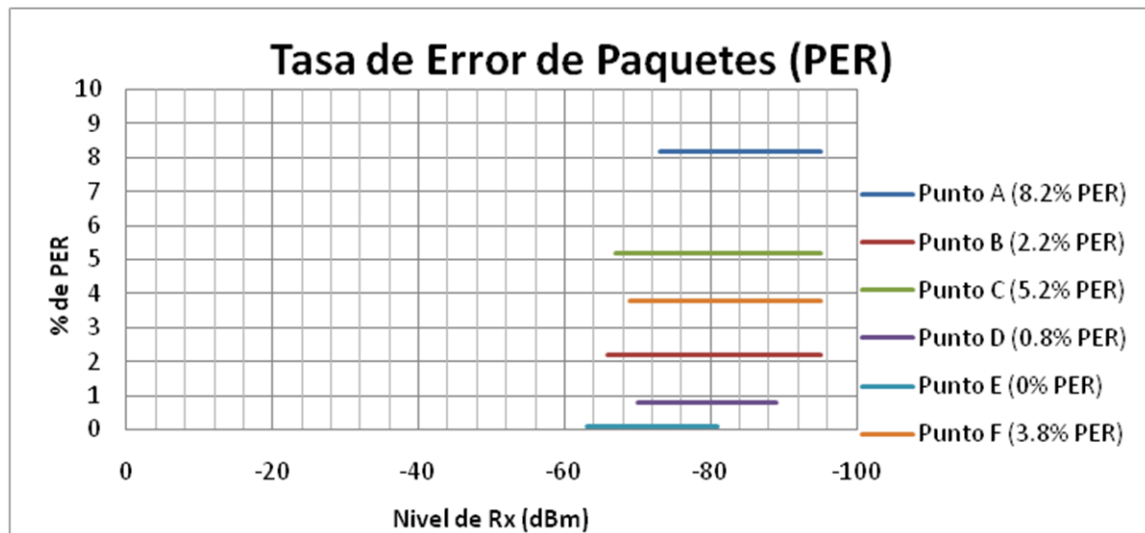


Figura 39. Gráfica comparativa de PER entre puntos de prueba

Para el caso de los puntos que se analizaron con la fuente de ruido se creó una grafica de dispersión con el fin de comparar la tasa de error en paquetes recibidos en condiciones normales y en presencia de la fuente de ruido, con ello se pudo notar que la tasa de error crece alrededor de 50% lo que hace que el ancho de banda efectivo del canal se vea severamente afectado.

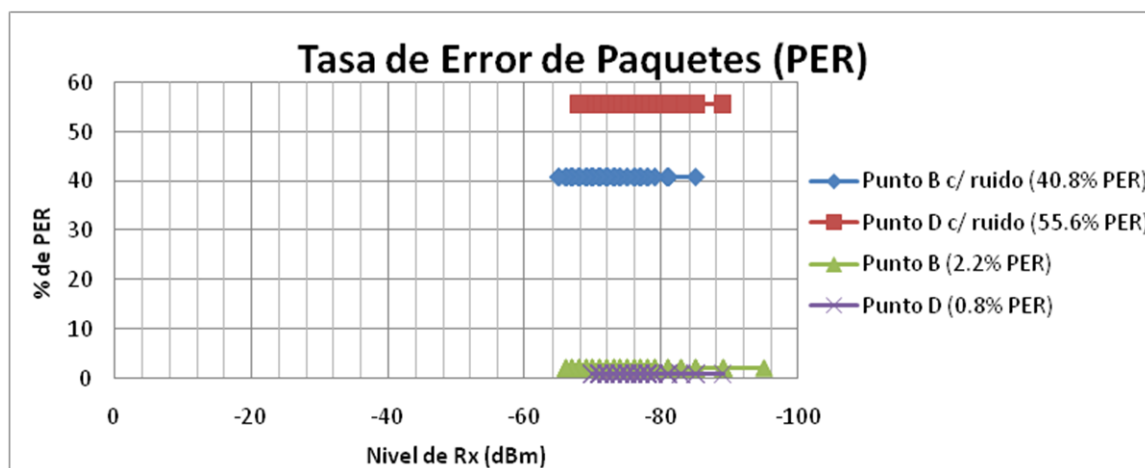


Figura 40. Gráfica comparativa de PER para puntos con fuente de ruido

Finalmente de la ecuación 1, podemos ver que en condiciones teóricas, el prototipo desarrollado tiene la capacidad de atender hasta 280 dispositivos con una recurrencia de 100 ms, y utilizando los datos anteriores podemos calcular el desempeño real del enlace dentro del entorno real en el cual estará funcionando. Para el mejor escenario obtenemos un desempeño del 100% que se traduce en poder mantener los 280 dispositivos conectados a la red y en el peor escenario en condiciones fuera de ruido serian 257 dispositivos. Trasladando este peor escenario para cuando se utilice la tasa más alta de recurrencia de un PGN (10ms) tendríamos capacidad para soportar solo 25 dispositivos a la vez sin desentender a ninguno.

Este resultado promete ser satisfactorio ya que la red inalámbrica viene a ser un complemento a la red cableada brindando flexibilidad de conexión y movilidad. Dentro de una red para una embarcación, se visualiza que difícilmente encontraremos más de 25 dispositivos conectados por aire, y de ser el caso esto puede ser resultado fácilmente incrementado el número de Gateway a la red cableada.

En el caso de presencia de ruido el desempeño se ve muy afectado, reduciendo capacidad del número de dispositivos conectados a la red, llevándolo a caer hasta 11 dispositivos en el peor de los escenarios. En esta situación hay evaluar el costo beneficio de la implementación de una red inalámbrica y de las probabilidades de estas condiciones desfavorables, ya que en muchos de los casos estas condiciones son poco probables debido al entorno donde se encuentra situado el campo de aplicación.

5 Conclusiones

En este trabajo se desarrollo una interfaz inalámbrica para hacer el puente de comunicación entre la red cableada NMEA2000® y un dispositivo inalámbrico con la finalidad de de ofrecer movilidad y brindar flexibilidad de conexión a la red. Se partió del concepto de integrar la información contenida en el protocolo IEEE802.15.4 al protocolo NMEA2000® e implementar el prototipo para finalmente realizar pruebas y conocer las capacidades de transmisión dentro del entorno marítimo, dejando como antecedente estos datos para aplicaciones de este tipo.

Al colocar el receptor y el transmisor dentro de una embarcación, permitió evaluar diferentes escenarios, lo que aportó datos de confiabilidad y desempeño para el enlace inalámbrico. Además de las pruebas anteriores también se implementó un sistema de prueba para verificar que los datos llegaran correctamente y se desplegaran en los dispositivos de red, logrando que la propuesta de enlace inalámbrico cumpliera con las expectativas del alcance de este trabajo.

5.1 Aportaciones

El enlace inalámbrico desarrollado e implementado para interactuar con la red NMEA2000® tiene principalmente las siguientes aportaciones:

- Es un complemento que brinda oportunidades de movilidad a los dispositivos que necesitan estar conectados a la red NMEA2000®.
- Documentación de la metodología para el desarrollo de un enlace de comunicación inalámbrico.
- Construcción de un prototipo de enlace inalámbrico para evaluación.
- Desarrollo de pruebas en el medio de la aplicación para evaluación de desempeño del enlace.
- Mostrar la viabilidad de desarrollo de un enlace de comunicación inalámbrico para aplicaciones marinas.

Cabe mencionar que este prototipo sentó las bases para el desarrollo de otros trabajos dentro de la misma área de aplicación, los cuales a la fecha se están desarrollando para obtener un producto que podría ser llevado a las líneas de producción.

5.2 Trabajo futuro

En el trabajo a futuro dentro del área de redes inalámbrica se pueden vislumbrar los siguientes las siguientes líneas de investigación y desarrollo:

- Implementación de redes para atacar zonas con recepción débil.
- Integración del hardware para optimización de espacio.
- Nuevos transceptores con alta integración.

Apéndice A. Primitivas

Las primitivas son funciones de código prediseñadas, con las cuales se pueden programar y controlar de manera sencilla tareas específicas dentro del protocolo SMAC. Estas tareas comprenden desde las más esenciales como las que hacen posible el control del transceptor, hasta tareas que están relacionadas con algunos periféricos como displays de cristal liquido, comunicación serial, control del LED's y módulos de seguridad. En el caso las tareas relacionadas directamente con los periféricos como el control de LED's, Displays de cristal liquido y otras, son primitivas que pueden no ser utilizadas de acuerdo a la naturaleza de diseño del nodo inalámbrico.

La SMAC comprende un paquete de 30 primitivas, que pueden ser utilizadas crear pequeñas y específicas capas de red que puedan manejar varios identificadores y tipos de mensajes. A continuación se describen las primitivas más esenciales las cuales están relacionadas directamente con el propósito de intercomunicar diferentes módulos sin tomar en cuenta funciones complementarias para aplicaciones más complejas [27]:

A.1 Transmisión

`MCPSPDataRequest`. Es una función para enviar un paquete. Los datos a enviar son cargados en un registro predeterminado. El microcontrolador es colocado en estado de espera hasta que el radio termine de transmitir el paquete, por lo que la aplicación del usuario es detenida hasta que le proceso de transmisión es finalizado. El único valor posible de retorno es `SUCCESS`, que significa exitoso.

A.2 Recepción

`MLMERXEnableRequest`. Coloca el radio en modo de recepción en el canal seleccionado por `MLMESetChannelRequest()`. La aplicación crea un registro para almacenar los datos entrantes, en el código de la aplicación es nombrado `gau8RxDataBuffer`.

`MLMERXDisableRequest`. Regresa al radio al estado ocioso cuando está en recepción. Esta función puede ser utilizada para apagar el receptor cuando está en modo siempre encendido o antes de que caduque un tiempo fuera.

MCPSTDataIndication. Esta función es llamada (localizada entre el código de aplicación del usuario y es requerida por SMAC) cuando un dato es recibido por el radio para ser procesado por la aplicación. El paquete recibido puede ser exitoso o cuando el tiempo fuera se presente. Se recomienda que esta parte del código se procese lo más rápido posible ya que esta función se ejecuta dentro de una interrupción.

MLMSEtChannelRequest. Selecciona la frecuencia del canal de transmisión y recepción. Los canales disponibles van del 0 al 15.

Administración y medición de energía

MLMSEnergyDetect. Esta función puede ser utilizada para medir la energía en decibeles (dBm) antes y después de transmitir un paquete. Puede ser utilizada para la detección de energía (ED-energy detect) o evaluación de limpieza de canal (CCA- clear channel assessment). El argumento regresado es el valor de la energía expresado de la siguiente forma:

$$\text{dBm} = (-\text{potencia}/2).$$

MLMELinkQuality. Esta función regresa un valor entero el cual representa la calidad de enlace de la siguiente forma: $\text{dBm} = (-\text{Link Quality}/2)$. El valor de la calidad de enlace de un paquete válido es preservado hasta recibir el siguiente paquete.

MLMEMC13192FEGainAdjust. Compensador de energía de detección y control automático de ganancia. Es utilizado para ajustar las dos funciones previas y obtener un resultado más exacto, lo que se puede traducir en determinar si un dispositivo esta cerca o alejado.

MLMEMC13192PAOutputAdjust. Realiza el ajuste de potencia de salida del transmisor. La Tabla X muestra la potencia de salida en la antena de acuerdo al valor binario correspondiente. Este puede ser modificado en cualquier momento, si el dispositivo se encuentra dentro de ese rango.

Valor en binario	Potencia de salida [dBm]	Valor en binario	Potencia de salida [dBm]
0000	-16.6	1000	-1.0
0001	-16	1001	-0.5
0010	-15.3	1010	0.0
0011	-14.8	1011	0.4
0100	-8.8	1100	2.1
0101	-8.1	1101	2.8
0110	-7.5	1110	3.5
0111	-6.9	1111	3.6

Tabla 9. Valores de registro U8PaValue

MLMEScanRequest. Esta función escanea los diferentes canales utilizando uno de los dos técnicas (ED o CCA) y regresa la cantidad de energía de todos los canales.

A.3 Bajo consumo de potencia

MLMEHibernateRequest. Esta función coloca al radio en modo de hibernación, alcanzando el más bajo consumo de potencia. Cuando el radio se encuentra en este modo, la salida de reloj (CLKO) es deshabilitada. Si el microcontrolador utiliza esta señal como fuente de reloj, el usuario debe primero cambiar de fuente al reloj interno del microcontrolador y después utilizar esta primitiva para poner el radio en estado de hibernación.

MLMEDozeRequest. El modo Doze permite al usuario poner el radio en modo Doze normal (sin CLKO pero con un despertar automático) o modo Acoma (con CLKO pero sin despertar automático).

Para activar el modo Acoma es necesario llamar esta función con el parámetro “0”. Para salir de este estado, el usuario debe llamar la función MLMEWakeRequest.

Para activar el modo Doze se debe utilizar esta función con el tiempo fuera deseado. Esto da solo 128 pulsos de reloj antes de desconectar el CLKO.

MLMEWakeRequest. Es utilizado para poner en funcionamiento el radio cuando este se encuentra en modo de bajo consumo o modo Doze.

A.4 Radio

MLMSEtMC13192ClockRate. Configura la frecuencia de reloj del radio. La Tabla muestra frecuencia respectiva valor seleccionado.

Valor	Frecuencia de salida	Comentarios
000	16MHz	Recomendada (preestablecida)
001	8MHz	
010	4MHz	
011	2MHz	
100	1MHz	
101	62.5kHz	
110	32.786kHz	
111	16.393kHz	

Tabla 10. Relación de salida de frecuencias

MLMEMC13192XtalAdjust. Esta función es utilizada para ajustar la señal de referencia de reloj del radio por un valor de ajuste.

MLMSEtMC13192TmrPrescale. Esta función configura la razón a la cual operan los temporizadores del radio. La Tabla muestra el indicador necesario para realizar la configuración a las diferentes frecuencias disponibles.

Valor	Frecuencia de salida	Comentarios
000	2MHz	
001	1MHz	
010	500kHz	
011	250KHz	Recomendada (preestablecida)
100	125kHz	
101	62.5kHz	
110	31.25kHz	
111	15.625kHz	

Tabla 11. Tabla de configuración de frecuencias

A.5 SMAC

MLMEMC13192SoftReset. Esta función realiza un reinicio suave al radio. Cuando esta función es llamada, una indicación de reinicio debe de ser enviada a la aplicación a través de la función MLMEMC13192ResetIndication.

MLMEMC13192ResetIndication. Esta función se localiza dentro del código de la aplicación y es utilizada por la SMAC, cuando un inicio suave se presenta.

MC13192DisableInterrupts. Deshabilita las interrupciones que son utilizadas por SMAC.

MC13192EnableInterrupts. Habilita las interrupciones que son utilizadas por SMAC.

MC13192ContReset. Esta función va directamente restablecer el transceptor, mandándolo al modo de más bajo consumo.

MC13192Restart. Es lo opuesto de la función anterior. Sirve para prender el transceptor.

SECSetKey. Establece una llave interna para ser utilizada en un mecanismo de encriptación-des-encriptación.

SECSecure. Esta función encripta-des-encripta simétricamente el buffer, utilizando la llave previamente definida. Los datos encriptados son sobrescritos en el buffer original.

Apéndice B. Acrónimos

WPAN: Wireless Personal Area Network

WiFi: Wireless Fidelity

LMDS: Local Multipoint Distribution Service

WLAN: Wireless Local Area Network

IEEE: Institute of Electrical & Electronics Engineers

MAC: Media Access Control

PHY: Physical Layer

NMEA: NATIONAL MARINE ELECTRONICS ASSOCIATION

CAN: Controller Area Network

CRC: Cyclic redundancy check

ISO/OSI: International Standards Organization Open Systems Interconnect

PGN: Parameter Group Number

LR-WPAN: Low Range Wireless Personal Area Network

CTG: Coexistence Task Group

UWB: Ultra Wide Band

RFD: Reduced Functionality Device

FFD: Full Functionality Device

PAN: Personal Area Network

CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

DLL: Data Link Layer

LLC: Logical link control

RF: Radio Frequency

ACK: Acknowledgment

SAPs: Service Access Points

MCPS-SAP: MAC Common Part Sublayer-Service Access Point

MLME-SAP: MAC Layer Management Entity-Service AccessPoint

GTS: Guaranteed Time Slot

MPDU: MAC protocol data unit

MHR: Header MAC

MSDU: MAC Service Data unit
FCS: Frame Check Sequence
PPDU: PHY protocol data unit
SFD: Start-of Frame Delimiter
PSDU: PHY Service Data Unit
DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum
ISM: Industrial, Scientific and Medical
LQI: Link Quality Indicator
OQPSK: Orthogonal Quadrature Phase-Shift Keying
BPSK: Binary Phase Shift Keying
PER: Paquet Error Rate
MIC: Message Integrity Code
PDAs: Personal Digital Assistants
OEM: Original Equipment Manufacturer
LED: Light Emitter Diode
BDM: Background Debug Mode
S-MAC: Simple Medium Access Control
SCI: Serial Communication Interface
LCD: Liquid Cristal Display
KDI: Kernel Depuration Interface
OTAP: Over the Air Programming
SFD: Start of Frame Delimiter
UART: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
I2C: Inter-Integrated Circuit
SPI: Serial Protocol Interface
EMC: Electromagnetic Compatibility
CRC: Cyclic Redundancy Check
BDM: Background Debug Mode

Bibliografía

- [1] **Gugliotta, Guy.** Tireless wireless how radio changed everything. *Discover Science, Technology and the future*. June 2005, pp. 26-29.
- [2] **García., Albert.** Que es Bluetooth.
http://www.zonablueetooth.com/que_es_bluetooth2.htm. [Online]
- [3] **Papacetzzi, Francisco Martín Archundia.** *Wireless Personal Area Network (WPAN) & Home Networking*. s.l. : Universidad de las Américas Puebla, 2003. Cholula, Puebla.
- [4] *Power-Efficient Packet scheduling Meted for IEEE 802.15.13 WPAN.* **Sung Wo Kim, Byung-seo Kim.** 2005. International Conference on Embedded Software and system (ICESS'2005).
- [5] **Móstoles.** Aplicaciones a entornos reales. *Universidad Rey Juan Carlos*. [Online]
<http://www.tsc.urjc.es/Master/asignaturas/RedesAdHoc/index.htm>.
- [6] **Rao, Vaddina Prakash.** *The simulative Investigation of Zigbee/IEEE 802.15.4*. Dresden : DRESDEN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2005.
- [7] *Building up Zigbee and 8002.15.4 chipsets and applications.* **Kissel, Chris.** Octubre 2006, Product number 1N0602966MI.
- [8] *NMEA2000 ® STANDARD FOR SERIAL-DATA NETWORKING OF MARINE ELECTRONIC DEVICES.* **NATIONAL MARINE ELECTRONICS ASSOCIATION.** 2004, Version 1.200.
- [9] *ANÁLISIS DE PLANEAMIENTO DE PROTOCOLOS CAN CON CALIDAD DE SERVICIO.* **Abel Crespo, Walter Grote H.** s.l. : Fac. Ing. - Univ. Tarapacá, 2005. vol. 13 N° 3. pp. 24-29.
- [10] *NMEA 2000 ® a digital interface for century 21st.* **Lee A. Luft, Larry Anderson, Frank Cassidy.** San Diego, California. : s.n., 2002. Institute of navigation's 2002 National technical meeting.
- [11] **Association, National Marine Electronics.** *PGN Table*. s.l. : National Marine Electronics Association Inc, 2006.
- [12] **The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc .** *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 802.15.4TM*. New York, NY : s.n., 2003.

- [13] **Munguía, Ignacio.** *Introducción a Ultra Wideband (UWB).* Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya.
- [14] **Abraham Menéndez Márquez, Juan José Pérez Solano, José Pelegrí Sebastiá.** *Red de sensores inalámbricos para monitorización de terrenos mediante tecnología IEEE 802.15.4.* Valencia : Universidad Politécnica de Valencia.
- Kumar, S Pavan.** *MAC for 802.15.4.* 2005.
- [15] *Red Del Hogar Con IEEE 802.15.4: Una Norma En Vías De Desarrollo Para Redes Inalámbricas De Área Local De Baja Tasa De Transmisión.*
- [16] **Gutierrez, Jos A.** IEEE 802.15.4 Tutorial. *IEEE Standards Association.* [Online] 2003. grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2003/.../03036r0P802-15_WG-802-15-4-TG4-Tutorial.ppt.
- [17] **Bernal, Iván.** *Escuela Politécnica Nacional Quito Ecuador.* [Online] clusterfie.epn.edu.ec/ibernal/html/CURSOS/.../Trabajo1/.../proyecto_g2.pdf.
- [18] **Freescale Semiconductor.** *MC1319x Range Performance.* Chandler, Arizona : Technical Information Center, 2005. AN2902.
- [19] *Design of hard real-time guarantee scheme for dual Ad Hoc mode IEEE 802.11 WLAN's.* **Junghoon Lee, Mikyung Kang, Gyungleen Park.** 2005.
- [20] **Cristain Barnes, Tony Vatus, Donald Lloyd.** *Hack proofing your wireless network.* s.l. : Singress Publishing Inc. , 2002.
- [21] **López, Edgardo Avilés.** *Arquitectura Orientada a Servicios para Redes Inalámbricas de Sensores.* Ensenada : CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA, 2006.
- [22] **Marcos, Carlos.** *El mercado de software en EEUU.* Los Angeles : Bajo la supervisión de la oficina económica y comercial de la embajada de España en Los Ángeles. , 2006.
- [23] **Panasonic.** *LR/WPAN PAN802154HAR Application Notes.* 2005.
- [24] **Freescale Semiconductor.** *MC13192 2.4 GHz Low Power Transceiver for the IEEE® 802.15.4 Standard.* Chandler, Arizona : Freescale Semiconductor, 2008. MC13192 Rev. 3.3.
- [25] **Freescale Semiconductor.** *MC9S08GB60 Datasheet.* Chandler, Arizona : Freescale Semiconductor, 2004. MC9S08GB60/D Rev. 2.3.
- [26] **Freescale Semiconductor.** *MC9S08DZ60 Datasheet.* Chandler, Arizona : Freescale Semiconductor, 2007. MC9S08DZ60 Rev. 3.

- [27] **Freescale Semiconductor.** *Simple media access controller (smac) users guide.* Chandler, Arizona : Freescale Semiconductor., 2008. SMACRM Rev. 1.5.
- [28] **Gonzalo Delgado Huitrón, Jaime Herrero Gallardo.** SMAC Wireless connectivity made easy. <http://www.freescale.com>. [Online]
- [29] <http://www.freescale.com/webapp/sps/site/homepage.jsp?code=LPBEYONDBITS>.
- [30] **Barredo, Daniel Ortiz.** *Sistema de telemetría de bajo costo para aplicaciones agrícolas.* Ensenada : UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, 2008.
- [31] **Freescale Semiconductor.** *MC1319x Physical Layer Lab Test Description.* Chandler, Arizona : Technical Information Center, 2005. AN2985