

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA TÉCNICA DE ACCESO EN LAS REDES DE ÁREA CORPORAL



**Martha Isabel Mosquera Uribe
Camilo José Solarte Paz**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Enero de 2013**

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA TÉCNICA DE ACCESO EN LAS REDES DE ÁREA CORPORAL



Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

**Martha Isabel Mosquera Uribe
Camilo José Solarte Paz**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Enero de 2013**

CONTENIDO

1. CAPÍTULO I. RED DE ÁREA CORPORAL	3
1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.2. COMPONENTES Y OPERACIÓN GENERAL DE LA RED.....	4
1.2.1. Componentes.....	4
1.2.2. Operación	5
1.3. UBICACIÓN DE LOS NODOS EN LA RED BAN	7
1.4. APLICACIONES	8
1.5. COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO EN LA RED BAN	9
1.6. BANDAS DE FRECUENCIA	10
1.7. REQUERIMIENTOS Y DESAFÍOS DE LA RED BAN	11
2. CAPÍTULO II. ESTÁNDAR IEEE 802.15.6.....	13
2.1. INTRODUCCIÓN.....	13
2.2. MODELO DE REFERENCIA	14
2.3. ESTRUCTURA GENERAL DE LA SUB-CAPA MAC	15
2.4. PRELIMINARES DE LA TRAMA MAC.....	17
2.5. MODOS DE OPERACIÓN.....	20
2.5.1. Modo <i>Beacon</i> con Supertrama Limitada por Tramas <i>Beacon</i>	21
2.5.2. Modo No <i>Beacon</i> con Supertrama.....	24
2.5.3. Modo No <i>Beacon</i> sin Supertrama.....	25
3. CAPÍTULO III. MÉTODOS DE ACCESO Y PARÁMETROS DE LA RED.....	27
3.1. INTRODUCCIÓN.....	27
3.2. MÉTODOS DE ACCESO EN LA RED BAN.....	27
3.2.1. Métodos de Acceso Disponibles en Modo <i>Beacon</i> con Supertrama Limitada por Tramas <i>Beacon</i>	28
3.2.1.1. Acceso Aleatorio.....	28
3.2.1.1.1. CSMA/CA.....	29
3.2.1.1.2. Aloha Ranurado (Slotted Aloha).....	32
3.2.1.2. Acceso Programado y Acceso Polling Programado.....	33
3.2.1.2.1. Acceso Programado.....	35
3.2.1.2.2. Acceso Polling Programado.....	36
3.2.1.3. Acceso Improvisado	38
3.2.2. Métodos de Acceso Disponibles en Modo No <i>Beacon</i> con Supertrama Limitada.....	38
3.2.2.1. Acceso No Programado.....	39

3.2.2.2.	<i>Acceso Improvisado</i>	41
3.2.3.	Método de Acceso Disponible en Modo No <i>Beacon</i> sin Supertrama.....	41
3.3.	PARÁMETROS QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE LA RED BAN	41
4.	CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	47
4.1.	SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	47
4.1.1.	NS2 (Network Simulator)	47
4.1.2.	MiXiM	48
4.1.3.	Castalia	49
4.2.	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	51
4.2.1.	Definición de los Escenarios y Casos de Simulación	51
4.2.1.1.	<i>Escenario de Simulación No.1</i>	52
4.2.1.2.	<i>Escenario de Simulación No.2</i>	53
4.2.1.3.	<i>Escenario de Simulación No. 3</i>	54
4.2.2.	Definición de las Características Técnicas de los Escenarios de Simulación... ..	54
4.2.3.	Ejecución de las Pruebas de Simulación	56
4.2.4.	Análisis de Resultados	57
4.2.4.1.	<i>Escenario de Simulación No. 1</i>	57
4.2.4.1.1.	<i>Caso 1a: Canal Sin Variación Temporal</i>	57
4.2.4.1.2.	<i>Caso 1b: Canal Con Variación Temporal</i>	61
4.2.4.2.	<i>Escenario de Simulación No. 2</i>	66
4.2.4.2.1.	<i>Caso 2a: Canal Sin Variación Temporal</i>	66
4.2.4.2.2.	<i>Caso 2b: Canal Con Variación Temporal</i>	69
4.2.4.2.3.	<i>Caso 2c: Canal con Variación Temporal, con buffer adecuado y variando el RAP</i>	72
4.2.4.3.	<i>Escenario de Simulación No. 3</i>	79
5.	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	88
5.1.	CONCLUSIONES	88
5.1.1.	Respecto al Método de Acceso	88
5.1.2.	Respecto al Desarrollo de la Simulación.....	89
5.1.3.	Respecto a los Resultados de la Simulación	89
5.2.	RECOMENDACIONES.....	90
5.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	91
	REFERENCIAS.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de conexión entre un <i>hub</i> y un nodo.	5
Figura 1.2. Estructura general de una red BAN.....	6
Figura 1.3. Clasificación de las aplicaciones BAN.....	9
Figura 2.1. Modelo de referencia..	14
Figura 2.2. Formato General Trama MAC IEEE 802.15.6.	15
Figura 2.3. Estructura de la cabecera MAC.....	16
Figura 2.4. Estructura del Cuerpo de Trama MAC..	16
Figura 2.5. Reconocimiento de Trama en la red BAN..	19
Figura 2.6. Organización de las supertramas en el tiempo.....	20
Figura 2.7. Modo <i>Beacon</i> con Supertrama Limitada por Tramas <i>Beacon</i>	21
Figura 2.8. Intervalos de Asignación Programados en el MAP en Modo <i>Beacon</i> con Supertrama limitada por tramas <i>Beacon</i>	22
Figura 2.9. Procedimiento de la <i>Asignación polled</i>	23
Figura 2.10. Procedimiento de <i>Asignación Posted</i>	24
Figura 2.11. Intervalos de Asignación en el MAP en Modo No <i>Beacon</i> con Supertrama..	25
Figura 2.12. Intervalos de Asignación en el MAP en Modo No <i>Beacon</i> sin Supertrama..	25
Figura 3.1. Métodos de Acceso empleados en la red BAN..	27
Figura 3.2. Métodos de acceso disponibles en Modo <i>Beacon</i> con Supertrama Limitada por Tramas <i>Beacon</i>	28
Figura 3.3. Procedimiento de acceso CSMA/CA en la red BAN..	31
Figura 3.4. Procedimiento de acceso <i>Aloha</i> Ranurado en la red BAN.....	33
Figura 3.5. Disponibilidad del método de Acceso Programado y Acceso <i>Polling</i> Programado en la supertrama.	34
Figura 3.6. Periodicidad del intervalo de Asignación Programado.....	34
Figura 3.7. Procedimiento para obtener un intervalo de asignación en el método de Acceso Programado.	35
Figura 3.8. Procedimiento para obtener un intervalo de asignación en el método de Acceso <i>Polling</i> Programado.....	37
Figura 3.9. Acceso No Programado en modo No <i>Beacon</i> con Supertrama Limitada.....	38
Figura 3.10. Asignación <i>Round Robin</i> para Acceso No Programado.	39
Figura 3.11. Procedimiento para obtener un intervalo de asignación en el método de Acceso No Programado.....	40
Figura 3.12. Parámetros de la técnica de acceso y su efecto en el desempeño de la red BAN.....	42
Figura 4.0 Descripción General de los Escenarios.....	52

Figura 4.1. Topología de la red del Escenario 1.....	52
Figura 4.2. Topología de la red del escenario 2.	53
Figura 4.3. Caso 1a. Análisis del promedio de tramas totales para diferentes tamaños de <i>buffer</i>	57
Figura 4.4. Caso 1a. Análisis de tramas por nodo para diferentes tamaños de <i>buffer</i>	58
Figura 4.5. Caso 1a. Latencia del total de tramas.	60
Figura 4.6. Caso 1b. Análisis del promedio de tramas totales, para diferentes tamaños del <i>buffer</i> , con variación temporal del canal.....	62
Figura 4.7. Caso 1b. Análisis de tramas por nodo para diferentes tamaños del <i>buffer</i> , con variación temporal de canal.	62
Figura 4.8. Caso 1b. Latencia del total de tramas.	65
Figura 4.9. Caso 2a. Análisis del promedio de tramas totales para diferentes tamaños del <i>buffer</i>	66
Figura 4.10. Caso 2a. Análisis de tramas por nodo, para diferentes tamaños del <i>buffer</i> . .	67
Figura 4.11. Caso 2a. Latencia del total de tramas.	68
Figura 4.12. Caso 2b. Análisis del promedio de tramas totales para diferentes tamaños del <i>buffer</i> , con variación temporal de canal.....	69
Figura 4.13. Caso 2b. Análisis de tramas por nodo para diferentes tamaños de <i>buffer</i> , con variación temporal de canal.	70
Figura 4.14. Caso 2b. Latencia del total de tramas.	71
Figura 4.15. Caso 2c. Análisis de tramas por nodo para diferentes duraciones del RAP. 74	
Figura 4.16. Caso 2c. Análisis del promedio de tramas totales para diferentes duraciones del RAP.	75
Figura 4.17. Caso 2c. Latencia del total de tramas.	77
Figura 4.18. Caso 2c. Energía consumida por nodo.	79
Figura 4.19. Escenario No. 3. Análisis de tramas por nodo, variando la duración del RAP y del intervalo de asignación programado.....	80
Figura 4.20. Escenario No. 3. Análisis del promedio de tramas totales, variando la duración del RAP y del intervalo de asignación programado.	81
Figura 4.21. Escenario No 3. Latencia del total de tramas, variando la duración del RAP y del intervalo de asignación programado.....	82
Figura 4.22. Escenario No 3. Energía consumida por nodo, Empleando CSMA/CA y Acceso Programado	83
Figura 4.23. Escenario No 3. Energía promedio consumida por los nodos, Empleando CSMA/CA y Acceso Programado.....	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Bandas de frecuencia utilizadas en la red BAN.....	10
Tabla 2.1. Prioridad de los datos en la red BAN.....	19
Tabla 2.2. Síntesis de los modos de operación de una red BAN.....	26
Tabla 3.1. Ventana de Contención para CSMA/CA.....	29
Tabla 3.2. Probabilidad de Contención para <i>Aloha</i> Ranurado.....	32
Tabla 4.1. Tabla comparativa con las características de las herramientas de simulación.....	50
Tabla 4.2. Pérdidas de trayecto entre los nodos y el <i>hub</i> para el escenario de simulación No.1. Valores en [dB].....	53
Tabla 4.3. Pérdidas de trayecto entre los nodos y el <i>hub</i> para el escenario de simulación No. 2. Valores en [dB].....	54
Tabla 4.4. Aplicaciones y características definidas para cada nodo.....	55
Tabla 4.5. Parámetros de red a nivel MAC y nivel Radio.....	56
Tabla 4.6. Caso 1a. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes valores de <i>buffer</i>	59
Tabla 4.7. Caso 1a. Análisis de tramas y FER por nodo para un tamaño de <i>buffer</i> fijo.....	59
Tabla 4.8. Caso 1b. Análisis de tramas por nodo para diferentes tamaños de <i>buffer</i>	63
Tabla 4.9. Caso 1b. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes valores de <i>buffer</i>	64
Tabla 4.10. Caso 1b. Análisis de tramas MAC y FER por nodo.....	64
Tabla 4.11. Caso 2a. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes valores de <i>buffer</i>	67
Tabla 4.12. Caso 2a. Análisis de tramas MAC y FER por nodo.....	68
Tabla 4.13. Caso 2b. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes valores de <i>buffer</i>	70
Tabla 4.14. Caso 2b. Análisis de tramas y FER por nodo.....	71
Tabla 4.15. Caso 2c. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes duraciones del RAP.....	76
Tabla 4.16. Escenario No 3. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes duraciones del RAP y del intervalo de asignación programado.....	82
Tabla 4.17. Resultados de los parámetros de desempeño presentados en los escenarios.....	85

LISTA DE ACRÓNIMOS

BAN	<i>Body Area Network</i> , Red de Área Corporal.
CAP	<i>Contention Access Phase</i> , Fase de Acceso de Contención.
CP	<i>Contention Probability</i> , Probabilidad de Contención.
CQ	<i>Custom Queueing</i> , Encolamiento Personalizado.
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones.
CW	<i>Contention Window</i> , Ventana de Contención.
EAP	<i>Exclusive Access Phase</i> , Fase de Acceso Exclusivo.
FCS	<i>Frame Check Sequence</i> , Secuencia de Chequeo de Trama.
FER	<i>Frame Error Rate</i> , Tasa de Error de Trama.
FIFO	<i>First In, First Out</i> , Primero en entrar, Primero en salir.
GT	<i>Guard Time</i> , Tiempo de Guarda.
HiD	<i>Hub Identifier</i> , Identificador de Hub.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
ISM	<i>Industrial Scientific Medical</i> , Médica Científica e Industrial.
MAC	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
MAP	<i>Managed Access Phase</i> , Fase de Acceso de Gestión.
MICS	<i>Medical Implant Communication Service</i> , Servicio de Comunicaciones Médicas Implantadas.
NICTA	<i>National Information and Communications Technology Australia</i> , Ministerio de Tecnologías Comunicaciones e Información Nacional de Australia.
NiD	<i>Node Identifier</i> , Identificador de Nodo.
OSI	<i>Open System Interconnection model</i> , Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos.

PER	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquete.
PQ	<i>Priority Queueing</i> , Encolamiento de Prioridad.
SIFS	<i>Short Inter-Frame Space</i> , Espacio Corto Inter Trama.
RAP	<i>Random Access Phase</i> , Fase de Acceso Aleatorio.
RX	<i>Reception or Receive</i> , Recepción o Recibido.
SAP	<i>Service Access Point</i> , Punto de Acceso al Servicio.
SAR	<i>Specific Absorption Rate</i> , Tasa de Absorción Específica.
TX	<i>Transmission or Transmit</i> , Transmisión o Transmitido.
UP	<i>User Priority</i> , Prioridad de Usuario.
UWB	<i>Ultra Wide Band</i> , Banda Ultra Ancha.
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> , Red de Sensores Inalámbricos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de las redes inalámbricas se ha incrementado de forma exponencial a nivel mundial [1], brindando a los usuarios diferentes opciones de accesibilidad y movilidad en numerosos campos de aplicación. En particular, en el campo de la telemedicina, muchos investigadores se han enfocado en desarrollar sistemas de bajo consumo de energía, que monitoreen de forma continua y simultánea los signos vitales del cuerpo humano.

El concepto de una tecnología inalámbrica novedosa de corto alcance orientada al monitoreo de la salud y el comportamiento del ser humano, se denomina red de área corporal (BAN, *Body Area Network*) y su desarrollo ha sido impulsado por la creciente necesidad de mejorar la atención en salud, derivada del incremento en el número de adultos mayores en la población mundial; de la escases de tiempo de las personas para asistir oportuna y regularmente al médico y de la carencia de sistemas de comunicación efectivos que estén centrados en el cuerpo humano [2].

Rápidamente la red BAN se convirtió en una solución prometedora para lograr una utilización eficiente de los recursos médicos y para reducir considerablemente los elevados costos del cuidado de la salud.

La red de área corporal es relativamente similar a la red de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Networks*) y es una extensión de la red de área personal (PAN, *Personal Area Networks*) [3], sin embargo, en el caso de la red BAN, el entorno de aplicación es más reducido, dado que su cobertura no sobrepasa los cinco metros alrededor del cuerpo humano [4-6].

Por otro lado, la red BAN aborda requerimientos diferentes a los que enfrenta una red de sensores, en aspectos como latencia, *throughput*, fiabilidad y utilización de ancho de banda [7]. Básicamente la red BAN debe proveer comunicaciones altamente fiables, de baja latencia y con escaso consumo de energía; que soporten diversas aplicaciones con diferentes tasas de datos. El incumplimiento de los anteriores factores conlleva a la prestación ineficaz de los servicios y por tanto requieren una atención especial.

Con el fin de cumplir con los requerimientos señalados, los métodos de acceso de la capa de control de acceso al medio (MAC, *Medium Access Control*) en una red BAN, desempeñan un papel muy importante ya que deben lograr un “*trade-off*”¹ adecuado entre los factores claves que determinan el rendimiento global de la red.

Acorde a lo anterior, este trabajo de grado realiza mediante simulación un análisis del desempeño de la red BAN, con el fin de determinar cuales son los principales parámetros que afectan el rendimiento de la misma.

Este documento se divide en cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

¹ *Trade-off*, hace referencia a la búsqueda del equilibrio o balance adecuado que se debe tener entre dos parámetros a considerar.

Capítulo I. Introduce los conceptos fundamentales relacionados con la red de área corporal.

Capítulo II. Presenta los aspectos más relevantes de la capa MAC y su funcionamiento en el marco del estándar IEEE 802.15.6.

Capítulo III. Describe el funcionamiento de los tres métodos de acceso con los que cuenta la red de área corporal, haciendo énfasis en el método de acceso aleatorio escogido para el desarrollo de este proyecto. Además se describen los principales parámetros que pueden afectar el desempeño de la red.

Capítulo IV. Describe la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, incluyendo la herramienta software seleccionada, el escenario de red y sus características. Además se especifican y describen las pruebas, los resultados obtenidos y su análisis.

Capítulo V. Se exponen las conclusiones del desarrollo del proyecto y se presentan recomendaciones para el desarrollo de futuros trabajos e investigaciones en este campo.

1. CAPÍTULO I. RED DE ÁREA CORPORAL

1.1. INTRODUCCIÓN

El interés en la red de área corporal ha aumentado considerablemente en los últimos años debido al impacto potencial que esta tecnología puede tener en la sociedad de hoy en día. Con el uso de la red BAN, los usuarios se benefician de innovadoras aplicaciones que optimizan los servicios médicos y que brindan ventajas relacionadas principalmente con movilidad, seguridad, prevención y comodidad.

La constante miniaturización de dispositivos electrónicos y específicamente de sensores de monitoreo y diagnóstico, junto con los avances en sistemas inalámbricos, impulsaron el diseño, desarrollo e implementación de la red BAN. El concepto de red de área corporal fue introducido por K. Van Dam en 2001 para explotar plenamente los beneficios de las tecnologías inalámbricas en telemedicina y cuidado de la salud [8].

Una red de área corporal se define como un conjunto de sensores interconectados inalámbricamente, que pueden estar ubicados dentro, sobre o en la proximidad del cuerpo humano, esta ubicación dependerá del tipo de variable que se quiera monitorear [2] [6] [9].

Los sensores de la red BAN son dispositivos electrónicos con capacidad de muestrear señales analógicas provenientes del cuerpo humano, que posteriormente se digitalizan para ser transmitidas a través de la red.

Al ser los sensores el componente clave de la red BAN, estos deben ser capaces de establecer un enlace de comunicación inalámbrico, para proveer monitoreo continuo y “*feed-back*”² en tiempo real a los usuarios.

Desde el punto de vista aplicativo, se espera que una BAN aborde tanto los aspectos médicos y de monitoreo del cuerpo humano como los aspectos de entretenimiento y deporte [10].

Sin duda alguna las principales aplicaciones de la red BAN se encuentran en los dominios médicos, ya que permiten optimizar la forma en que se previenen y se diagnostican las enfermedades, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de los usuarios [5].

En este capítulo se presenta una descripción general de la red BAN orientada a aplicaciones médicas, ya que son este tipo de aplicaciones las que presentan los requerimientos más estrictos respecto a la optimización de recursos y calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*).

² *Feed-back (Retroalimentación)*, es el proceso mediante el cual un receptor manifiesta reacciones o respuestas respecto a la actuación de un transmisor cuando se realiza un intercambio de datos e información.

1.2. COMPONENTES Y OPERACIÓN GENERAL DE LA RED

1.2.1. Componentes

Una red BAN está compuesta por dispositivos que poseen diferentes características que definen su funcionalidad e interacción en la red. En términos generales, una red BAN está conformada por dos tipos de dispositivos:

- **Nodo (Sensor):** es un dispositivo que recolecta datos específicos del cuerpo humano, para procesarlos y transmitirlos inalámbricamente. Un nodo consiste de diferentes módulos *hardware* y *software*, tales como [11, 12]:
 - Módulo de sensado: se compone de un sensor, un filtro y un conversor análogo digital (ADC, *Analog to Digital Converter*). Los datos sensados se convierten en una señal digital y se envían al módulo de procesamiento.
 - Módulo de procesamiento: analiza los datos y aloja el software embebido. Es responsable de la operación autónoma, el almacenamiento de datos y la comunicación del nodo con otros nodos en la red.
 - Módulo de radiofrecuencia: contiene el transceptor que permite conectar inalámbricamente el nodo con la red.
 - Módulo de Potencia: se encarga de gestionar el consumo de energía requerido por el resto de módulos, está alimentado por una batería.

Típicamente una red BAN está conformada por seis nodos [6], cada uno de ellos tiene como función monitorear periódicamente un parámetro específico del cuerpo y enviar las mediciones correspondientes al coordinador de la red.

- **Hub (Coordinador):** es una entidad encargada de coordinar el acceso al medio y de gestionar el consumo de energía de los nodos de una red BAN [13].

El *hub* actúa como una pasarela para servir de punto de acceso a los nodos de la BAN y permitir la interconexión de esta con las redes externas.

En una red BAN debe haber un único *hub* y este puede controlar hasta 64 nodos [13].

El *hub* permite la interacción con el usuario, por lo cual generalmente es un dispositivo de mayores funcionalidades, tal como un teléfono celular; aunque basándose en las necesidades de la aplicación, este también podría ser un reloj de pulso inteligente, unos auriculares, un computador portátil e incluso un robot [14, 15].

Si bien el *hub* y los nodos son igualmente importantes para el funcionamiento de la red BAN, estos dispositivos se clasifican en dos categorías principales de acuerdo a su funcionalidad [9] [15]:

- Dispositivos de Función Completa (FFD, *Full Function Device*): inicializan, mantienen y modifican la configuración de la red. Dada su naturaleza consumen una gran cantidad de energía y por esta razón deben estar integrados en otro dispositivo. Generalmente un *hub* es un dispositivo de función completa.
- Dispositivos de Función Reducida (RFD, *Reduce Function Device*): estos dispositivos solo monitorean alguna variable fisiológica y envían los datos hacia el *hub*. La mayoría de los nodos implantados son dispositivos de función reducida debido a la capacidad limitada de procesamiento y energía.

1.2.2. Operación

La operación de la red BAN se basa en el modo de comunicación maestro-esclavo, en el cual el *hub* actúa como maestro estableciendo la sincronización y controlando de manera unidireccional las comunicaciones con los nodos (esclavos) [6] [13] [16].

Por esta razón el *hub* es el encargado de iniciar la comunicación dentro de la red, enviando información de control a todos los nodos para que estos puedan solicitar una comunicación de datos si lo requieren e iniciar el proceso de conexión. El proceso de conexión de un nodo con el *hub* se describe en la figura 1.1.

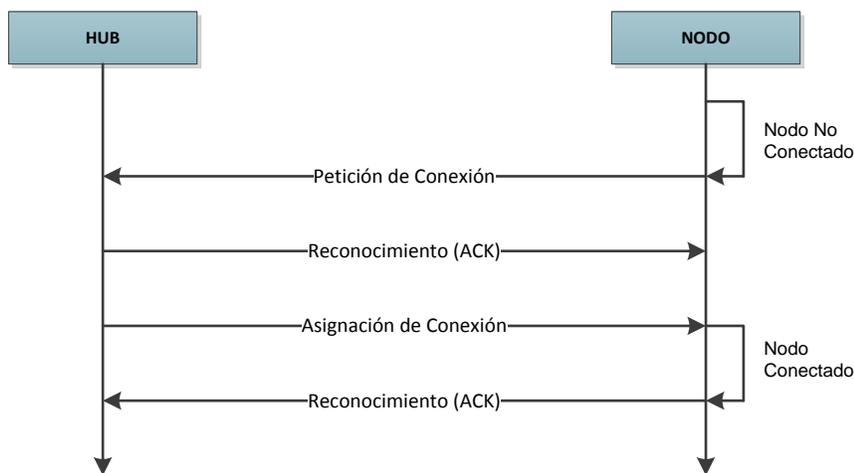


Figura 1.1. Proceso de conexión entre un *hub* y un nodo. Tomado de [13].

Una vez asignada la conexión, el *hub* y un nodo pueden empezar a interactuar entre ellos, de tal forma que el *hub* garantice al nodo que puede iniciar una o más transacciones de datos.

Durante la operación habitual de la red, los datos entre los nodos y el *hub* fluyen de manera periódica, excepto cuando un nodo detecta una medición anormal en el cuerpo humano que comprometa la salud del paciente. Bajo esta condición, aunque el nodo sigue siendo esclavo y no tiene funciones de control, puede transmitir peticiones de comunicación sin tener que esperar un permiso explícito del *hub*, con el fin de que éste envíe la información crítica hacia una ubicación remota tan pronto como sea posible.

El *hub* enviará la información generada en la BAN hacia Internet a través de una red de Área Local Inalámbrica (WLAN, *Wireless Local Area Network*) o de una red celular, con el fin de que esta sea accesible desde el consultorio del doctor o desde una sala de emergencias, lo cual permite al servicio médico procesar y analizar la información para diagnosticar el estado del paciente de forma inmediata. La figura 1.2 muestra la estructura general de una red de área corporal.

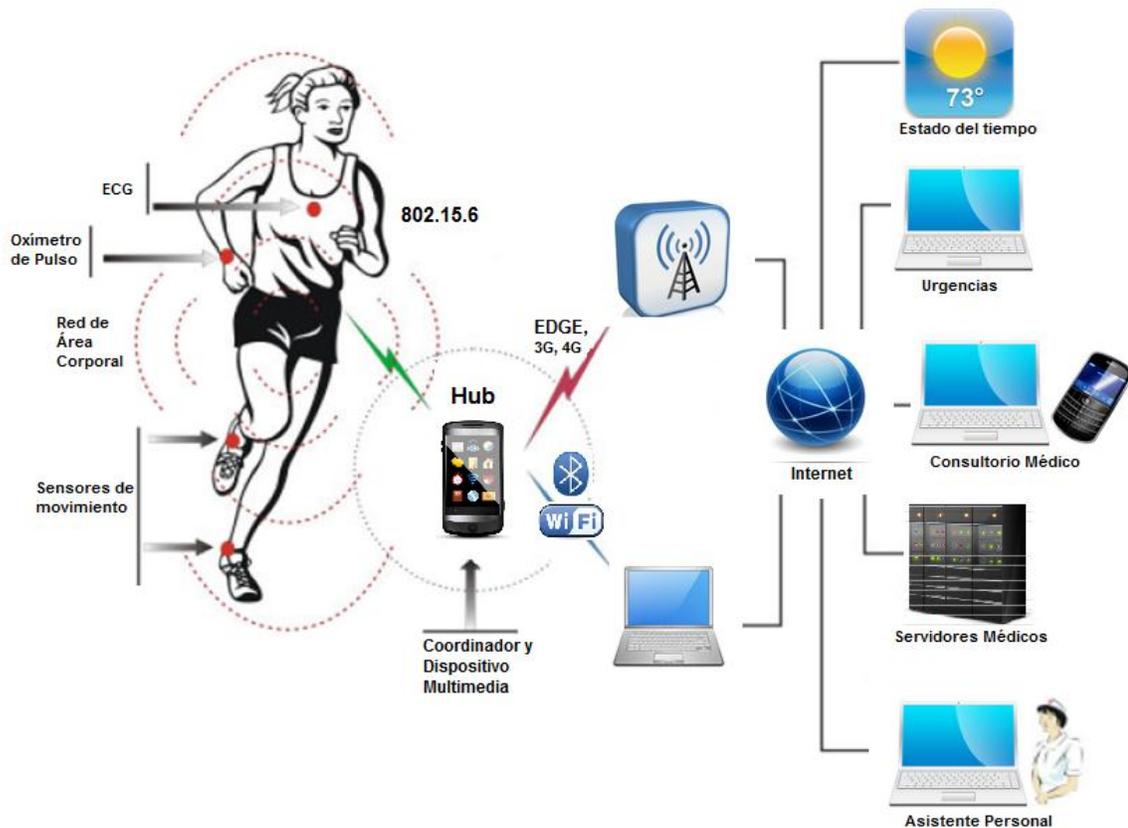


Figura 1.2. Estructura general de una red BAN. Adaptado de [17].

Con respecto a la configuración espacial de los dispositivos de la red BAN, cabe resaltar que funcionan en una topología física en estrella con operación centralizada, en la cual los nodos se encuentran distribuidos alrededor de un punto central, en este caso del *hub* [3] [6] [10] [13].

En una red BAN, la topología en estrella se puede configurar de dos formas [13]:

- Estrella a un salto: el intercambio de datos ocurre directamente entre los nodos y el *hub* de la red.
- Estrella extendida a dos saltos: el *hub* y un nodo pueden intercambiar datos a través de un nodo que cuente con la capacidad de actuar como un repetidor.

A pesar de que una BAN se puede configurar en cualquiera de las dos topologías anteriores, la más utilizada es la topología en estrella a un salto.

1.3. UBICACIÓN DE LOS NODOS EN LA RED BAN

Una red BAN está conformada por un conjunto de nodos que tienen la posibilidad de ser ubicados en el cuerpo humano a través de 3 formas, los cuales se describen a continuación [9] [15] [18].

- **Implantados (*In-body*):** estos nodos se localizan justo debajo del tejido humano y requieren de procedimientos invasivos para su implantación. La función de los nodos implantados es sensor diferentes parámetros fisiológicos del cuerpo, como por ejemplo los niveles de glucosa en sangre.

Los nodos implantados presentan estrictos requerimientos con respecto al consumo de energía, para lo cual es crucial implementar técnicas eficientes y flexibles que reduzcan el ciclo útil de los dispositivos, con el fin de aumentar la duración de las baterías hasta por varios años.

El que los nodos se encuentren en contacto con el tejido humano implica un riesgo para la salud del paciente a causa de los niveles de radiación, por lo cual se deben minimizar los valores de la tasa de absorción específica (SAR^3 , *Specific Absorption Rate*) en el cuerpo. Adicionalmente los enlaces entre el coordinador y estos nodos presentan altas pérdidas de trayecto producidas por desvanecimientos en la señal.

- **Sobre el Cuerpo (*On-Body*):** estos nodos se ubican sobre la piel o a una distancia máxima de dos centímetros del cuerpo y no requieren de procedimientos invasivos para ser utilizados por el ser humano. De esta forma, brindan una mayor comodidad al usuario y presentan menores requerimientos de ahorro de energía que los nodos implantados, puesto que el reemplazo de las baterías es más sencillo.

Se emplean generalmente para sensor información de carácter médico como los signos vitales; este tipo de información corresponde a un tráfico con bajas tasas de datos del orden de 1 kbps hasta 300 kbps [14].

- **Fuera del cuerpo (*Out-Body*):** en este caso los dispositivos no tienen contacto con el cuerpo humano y regularmente están a una distancia máxima de 5 metros. A diferencia de los nodos implantados y ubicados sobre el cuerpo, estos nodos se utilizan para aplicaciones de entretenimiento y reproducción de contenidos multimedia, las cuales presentan tasas de datos superiores a 300 Kbps, lo que implica un alto consumo de energía por parte del nodo [19].

En una red BAN los nodos pueden estar ubicados en cualquiera de las posiciones mencionadas anteriormente, sin embargo hoy por hoy la mayoría de las redes implementadas utilizan sensores sobre el cuerpo.

³ SAR: es un valor que corresponde a la cantidad relativa de energía de radio frecuencia absorbida por el cuerpo.

1.4. APLICACIONES

Los principales dominios de aplicación de la red BAN se relacionan con procesos de monitoreo de las actividades diarias del ser humano, en consecuencia, estas aplicaciones pueden estar divididas en dos categorías fundamentales: aplicaciones de carácter médico y aplicaciones de carácter no-médico [3] [15] [20].

- **Aplicaciones de carácter médico:** tienen como función monitorear y recolectar continuamente información de los parámetros fisiológicos de un paciente y transmitirlos hasta una estación remota para un análisis más extenso, con el fin de diagnosticar y prevenir la aparición de enfermedades tales como infecciones del tracto gastrointestinal, cáncer, diabetes, trastornos neurológicos, entre otras [20].

Este tipo de aplicaciones también puede ser útil para ayudar a personas discapacitadas, ubicando un nodo en el órgano del cuerpo afectado como por ejemplo, un sensor de retina que ayude a lograr un nivel de visión adecuado o sensores de detección de caídas que constituyen mecanismos de protección para personas en terapia de rehabilitación.

Las aplicaciones de carácter médico ofrecen un gran beneficio para los profesionales de la salud y en especial para los pacientes, puesto que estos perciben una notable sensación de libertad y movilidad al no estar obligados a permanecer en un hospital. Además, las mediciones obtenidas durante largos intervalos de tiempo en el ambiente habitual del paciente, ofrecen una visión más clara al doctor, que las mediciones obtenidas durante estadías cortas en el hospital, mejorando con esto, el diagnóstico y la calidad de los datos recolectados.

- **Aplicaciones de carácter no-médico:** incluyen aplicaciones relacionadas con deporte y entretenimiento como *audio streaming* (mp3), *video streaming* (mp4), transferencia de archivos, aplicaciones de redes sociales, monitores de ruta y videojuegos. En el caso de los videojuegos, los nodos de la red BAN pueden recolectar los movimientos de las diferentes partes del cuerpo para posteriormente reproducirlos en un personaje virtual. De manera similar, el uso de la red BAN en las redes sociales permite a los usuarios intercambiar perfiles o tarjetas de negocio con tan solo un movimiento de manos [15] [20].

Con la red BAN, se abre un camino para los dispositivos usados en aplicaciones de entretenimiento y deporte, pues cada vez son más apropiados para mejorar la experiencia de los usuarios en entretenimiento.

Una clasificación detallada de las principales aplicaciones en donde la red de área corporal es útil se observa en la figura 1.3.



Figura 1.3. Clasificación de las aplicaciones BAN. Por los Autores.

Una red BAN debe estar en capacidad de soportar y gestionar simultáneamente la información generada por los diferentes tipos de aplicaciones, para lo cual el *hub* debe definir el orden en que atenderá dicha información.

1.5. COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO EN LA RED BAN

La información que se transmite entre los nodos y el coordinador es lo que se conoce como tráfico. A pesar de que la red BAN debe soportar distintos tipos de aplicaciones con diferentes tasas de datos, el tráfico generado por una aplicación es el mismo, sin embargo el trato que se le da en la red depende de la situación bajo la cual se genere.

Luego de analizar lo planteado por los autores [2] [6] [15] [18] [21, 22], se propone caracterizar el comportamiento del tráfico de la siguiente manera.

- **Normal:** este comportamiento corresponde a todo el tráfico de rutina generado por los diferentes nodos bajo condiciones normales de operación y se caracteriza por que no requiere de un tratamiento especial en términos de prioridad y latencia.
- **De respuesta:** este comportamiento corresponde al tráfico generado tras una petición del *hub* para acceder a información específica de forma inmediata. Dada su naturaleza este tipo de comportamiento no es habitual en una red BAN.
- **Emergencia:** es el comportamiento del tráfico generado de manera impredecible por un nodo cuando éste registra una medición anormal de algún parámetro que comprometa gravemente la salud del paciente. Este tipo de comportamiento se caracteriza por presentar estrictos requerimientos de latencia, fiabilidad y calidad de servicio, lo que implica que la red debe tratar estos datos con la mayor prioridad.

La red BAN presenta patrones impredecibles en el comportamiento del tráfico ya que los eventos en este tipo de red no son periódicos, por lo tanto el tráfico generado por alguna aplicación puede tomar cualquiera de los comportamientos descritos anteriormente.

1.6. BANDAS DE FRECUENCIA

Los organismos de regulación a nivel mundial tomaron diferentes porciones del espectro radioeléctrico para definir diferentes bandas de frecuencia a ser usadas por la red BAN, las cuales se han distribuido dependiendo del país donde se apliquen. De este modo la denominación de las bandas de frecuencia habilitadas para la BAN son [23-26]:

- **Servicio de Comunicaciones Médicas Implantadas (MICS, *Medical Implant Communication Service*):** es una banda con bajas tasas de datos de información que se emplea en las comunicaciones entre cualquier nodo implantado y el dispositivo coordinador para monitorear los signos vitales [23] [27].
- **Servicios de Telemetría Médica Inalámbrica (WMTS, *Wireless Medical Telemetry Services*):** es una banda para comunicaciones de baja potencia y bajas tasas de datos que utilizan los nodos no implantados para enviar información de carácter médico hacia el coordinador [24] [27].
- **Médica Científica e Industrial (ISM, *Industrial Scientific and Medical*):** es una banda libre que se emplea para servicios de radio comunicaciones con fines científicos, industriales y médicos a nivel mundial y que requiere en su implementación de mecanismos que reduzcan la interferencia, ya que es altamente vulnerable a ésta [23] [26].
- **Ultra Banda Ancha (UWB, *Ultra Wide Band*):** la banda UWB se emplea para comunicaciones de corto alcance, bajo consumo de energía y en aplicaciones con altas tasas de datos [20].

La tabla 1.1 muestra aspectos de las bandas usadas en la red BAN.

BANDA	RANGO DE FRECUENCIAS (MHz)	PAÍS
MICS	402-405	Europa Japón Corea USA
WMTS	420-429 440-449	Japón
	608-614 1395-1400 1427-1429.5	USA
ISM	2400 5800	Mundial
UWB	3100 10600	Europa Japón Corea USA

Tabla 1.1. Bandas de frecuencia utilizadas en la red BAN. Tomado de [23, 24].

Todas las bandas anteriores se encuentran habilitadas para una red BAN, sin embargo la más empleada en los trabajos desarrollados ha sido la banda ISM por tratarse de una banda libre y estar reservada a nivel mundial.

1.7. REQUERIMIENTOS Y DESAFÍOS DE LA RED BAN

Las características que debe cumplir una red BAN para operar de manera eficiente en términos de rendimiento, fiabilidad y disponibilidad es lo que se conoce como requerimiento. Los requerimientos deben capturar las exigencias del usuario y a su vez servir como criterios de éxito de la red.

Muchos requerimientos y desafíos se han tenido en cuenta para el desarrollo de la red BAN debido a la variedad de aplicaciones soportadas; por una parte, la mayoría de las aplicaciones de carácter médico son elásticas⁴ y de baja tasa de datos, mientras que las aplicaciones de carácter no-médico son no-elásticas⁵ y de altas tasas de datos. En tal sentido, una red BAN debe ser flexible a la hora de satisfacer los diversos requerimientos de las distintas aplicaciones, incluso si estas están siendo usadas al mismo tiempo.

Una síntesis de los principales requerimientos técnicos de una red BAN se presenta a continuación [4] [6] [9] [17] [28].

➤ Requerimientos

- Escenario libre de interferencias: con el fin de que las aplicaciones no se deterioren, debe existir coexistencia entre redes BAN y entre éstas y otras tecnologías inalámbricas.
- Enlace inalámbrico estable: el enlace debe ser robusto y sin fluctuaciones en el tiempo para soportar baja latencia y minimizar pérdida de datos.
- Tolerancia a fallas y capacidad de recuperación: dado que este tipo de red no cuenta con redundancia de dispositivos, la red BAN debe ser capaz de recuperarse de fallas en los nodos y en el enlace.
- Alta eficiencia energética y bajo consumo de potencia: los nodos deben operar con baterías que tengan una larga vida útil sin que sea necesario algún tipo de intervención, particularmente en aplicaciones implantadas.
- Minimización de los riesgos para la salud debido a la radiación: la tasa de absorción específica debe cumplir los requerimientos regulatorios pertinentes.
- Soporte para aspectos estrictos de calidad de servicio.
- Escalabilidad en la configuración de la red: la BAN debe permitir la adición de nuevos dispositivos cuando sea necesario sin afectar el desempeño de la misma.

⁴ Una aplicación elástica es aquella cuyo ancho de banda es adaptable y se ajusta a las variaciones de retardo.

⁵ Una aplicación no-elástica o *streaming* es aquella que requiere un ancho de banda constante, libre de fluctuaciones de retardo.

- Estructura de prioridad definida: la red BAN debe tener la capacidad de soportar datos con diferentes prioridades, que le permita diferenciar la importancia de las señales de signos vitales de otras señales, sin incrementar la complejidad de la red.
- Mecanismos de seguridad de los datos: dada la importancia de la información de carácter médico que se obtiene en una BAN, debe existir soporte para autenticación, integridad y confidencialidad de los datos cuando éstos se transmitan hacia la red externa.
- Robustez frente a posibles cambios en la topología de la red debidos a la movilidad de los nodos.
- Aplicaciones con tasas de datos desde los 10 kbps hasta los 10 Mbps.
- Latencia inferior a 125 ms para aplicaciones de carácter médico y menor a 250 ms para aplicaciones de carácter no-médico.
- La tasa de error de Tramas (FER, *Frame Error Rate*) debe ser menor a 10%.

A diferencia de los requerimientos que se deben cumplir de manera obligatoria en la implementación de una red BAN, los desafíos representan exigencias opcionales difíciles de alcanzar que se deben considerar una vez la red entre en operación.

El desafío principal en la red BAN es lograr un balance adecuado entre la conservación de energía, utilización del ancho de banda, latencia, *throughput* y complejidad de la red.

A continuación se resumen los desafíos presentes en una red BAN [3] [6] [9].

➤ **Desafíos**

- Baja complejidad de los dispositivos: los nodos deben ser de tamaño reducido, de peso liviano y de bajo costo, para facilitar su rápida adopción en el sector médico.
- Soporte para múltiples bandas de frecuencia: los dispositivos deben tener la posibilidad de operar en cualquier rango de frecuencia disponible para la red BAN.
- Mecanismos de seguridad eficientes en energía: los mecanismos a ser usados en una BAN para propósitos de seguridad demandan una cantidad significativa de recursos de procesamiento y de red, por lo tanto se debe optimizar su consumo y concebir mecanismos de ahorro de energía.

Los requerimientos y desafíos mencionados anteriormente, han constituido un aspecto muy importante en el desarrollo de la red BAN, ya que han establecido las pautas para definir un estándar de comunicación internacional, que sea altamente fiable y que optimice las comunicaciones inalámbricas dentro de este tipo de redes. Dicho estándar se aborda en el siguiente capítulo.

2. CAPÍTULO II. ESTÁNDAR IEEE 802.15.6

2.1. INTRODUCCIÓN

El modelo de referencia para la Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open Systems Interconnection*) es un marco de trabajo estructurado en siete capas, utilizado para coordinar y desarrollar estándares para la comunicación entre sistemas [29]. Acorde con este modelo de referencia, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), orientó su trabajo a las dos primeras capas: la capa física y la capa de enlace de datos.

La capa física proporciona los medios mecánicos, eléctricos, funcionales y de procedimiento (codificación y modulación), necesarios para activar, mantener y desactivar conexiones físicas durante la transmisión de bits entre nodos. También es la encargada de definir la topología física de la red [29, 30].

Por su parte, la capa de enlace de datos se encarga de la transferencia fiable de información sobre un enlace, para lo cual organiza los datos en unidades de intercambio de información llamadas tramas. El objetivo de la capa de enlace es entregar datos libres de errores entre dos nodos comunicantes, de gestionar el control de acceso al medio y de manejar el control de flujo, adicionando identificadores para que el receptor controle el orden de las tramas que le llegan [29, 30].

Con el ánimo de hacer esta capa independiente del *hardware* y compatible con cualquier aplicación que se desarrolle, la IEEE genéricamente para cualquiera de sus estándares, dividió la capa de enlace de datos en dos sub-capas: la sub-capas de Control de Enlace Lógico (LLC, *Logical Link Control*) y la sub-capas de Control de Acceso al Medio (MAC, *Media/Medium Access Control*).

Durante la implementación de la red BAN, no existía un estándar de comunicación que cubriera de manera óptima la diversidad de aplicaciones previstas para esta red, motivo por el cual muchos autores en diferentes propuestas [6] [31] [21] [32] [10] [2] [16] [33] [22] [34], plantearon adaptar el estándar IEEE 802.15.4 utilizado en la red PAN como alternativa para caracterizar la BAN. Sin embargo, las tecnologías disponibles actualmente para la red PAN tales como *bluetooth*⁶ o *ZigBee*⁷, no son apropiadas para satisfacer completamente los requerimientos de la red BAN, ya que no cumplen con las regulaciones pertinentes para la comunicación en la proximidad del tejido humano. Además esta tecnología no soporta la combinación de alta fiabilidad, baja potencia, latencia, costo e interferencia, requerida para abordar ampliamente las aplicaciones de carácter médico con la calidad deseada [9].

Como se expuso en el capítulo I, la IEEE después de consolidar los requerimientos técnicos de la red BAN, generó en el año 2007 el grupo de trabajo denominado TG6 (*Task Group 6*), el cual tenía como objetivo definir un estándar internacional para

⁶ *Bluetooth* es una tecnología de corto alcance que permite conectar dispositivos electrónicos entre sí de forma inalámbrica, con bajo consumo de energía y bajo costo.

⁷ *ZigBee* es un protocolo de alto nivel para comunicaciones inalámbricas, se utiliza principalmente en aplicaciones domóticas de baja tasa de datos, bajo costo y en las cuales el consumo de energía juegan un papel fundamental.

comunicaciones inalámbricas de corto alcance, que operara dentro, sobre y en las proximidades del cuerpo humano [13]. El grupo presentó a finales del año 2011 el estándar IEEE 802.15.6 para la red BAN.

El estándar generado reúne los lineamientos de una capa Física y una sub-capa MAC altamente eficientes, que definen y describen completamente el proceso de comunicación entre los nodos y el *hub* de una BAN. Sin embargo, este capítulo aborda solo los aspectos más importantes respecto a la conformación, descripción y funcionamiento de la sub-capa MAC, con el fin de obtener un sustento teórico que facilite el estudio posterior de las técnicas de acceso en la red BAN.

2.2. MODELO DE REFERENCIA

Los modelos de referencia son abstracciones que se utilizan para facilitar la comprensión de los protocolos de comunicación, las arquitecturas de los sistemas o los estándares asociados a la comunicación de datos [35]. Los modelos están formados por capas o niveles que constituyen pilas de protocolos o de normas, donde cada nivel se comunica con el nivel superior e inferior de la misma pila y/o con niveles análogos de otras pilas a través de diferentes interfaces, para llevar a cabo la transmisión de datos de un nodo a otro en la red [29]. En este sentido, el estándar 802.15.6 ha definido un modelo de referencia para el *hub* y los nodos de la red BAN, como se muestra en la figura 2.1.

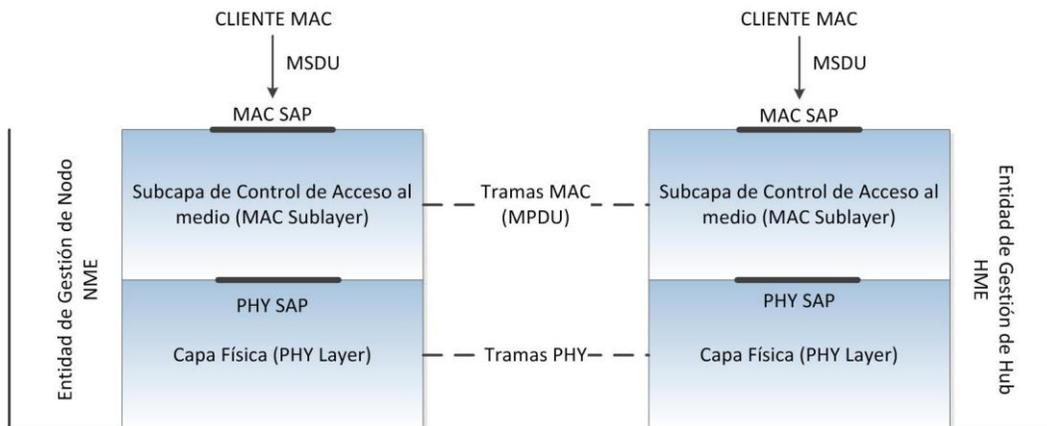


Figura 2.1. Modelo de referencia. Tomado de [13].

Dentro de un nodo o un *hub*, la sub-capa MAC provee servicio al cliente MAC (las capas superiores) a través de su Punto de Acceso al Servicio (SAP, *Service Access Point*), localizado inmediatamente encima de la sub-capa MAC. De manera similar, la capa física provee su servicio a la MAC a través del Punto de Acceso al Servicio del Nivel Físico (PHY SAP, *Physical layer Service Access Point*) localizado justo entre ellas.

También puede haber una Entidad de Gestión de Nodo (NME, *Node Management Entity*) y una Entidad de Gestión de *Hub* (HME, *Hub Management Entity*) que se encargan básicamente de intercambiar información de gestión de la red con la capa física y la sub-capa MAC, así como con otras capas.

Durante la transmisión, se realiza una transferencia transparente de las unidades de información desde el nivel superior hasta el nivel inferior, de tal forma que el cliente MAC envía una Unidad de Datos del Servicio de Control de Acceso al Medio (MSDU, *Media Access Control Service Data Unit*) a la sub-capa MAC a través del MAC SAP y a su vez, la sub-capa MAC envía una trama o una Unidad de Datos de Protocolo MAC (MPDU, *MAC Protocol Data Unit*) a la capa física a través de su PHY SAP.

En el proceso de recepción, el intercambio de las correspondientes unidades de información se realiza desde el nivel inferior hacia el nivel superior.

2.3. ESTRUCTURA GENERAL DE LA SUB-CAPA MAC

En esta sub-capa se cuenta con una unidad básica de intercambio de información denominada trama MAC, definida como una secuencia ordenada de campos entregados desde o hacia el PHY SAP [13].

La trama MAC está compuesta por una cabecera MAC de longitud fija, un cuerpo MAC de longitud variable y un campo de longitud fija para Secuencia de Verificación de Trama (FCS, *Frame Check Sequence*), como se muestra en la figura 2.2.

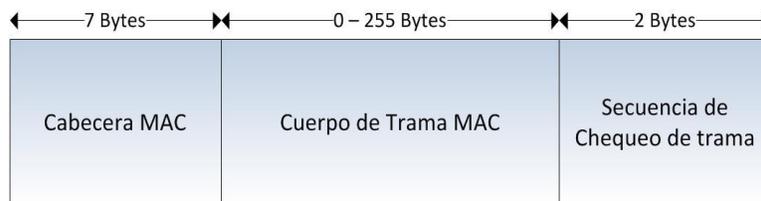


Figura 2.2. Formato General Trama MAC IEEE 802.15.6. Tomado de [13].

Para que la trama MAC se pueda enviar de forma correcta hasta el destinatario de la misma, hay que otorgarle un formato adecuado para su transmisión, que consiste de mecanismos de control, de identificación y de seguridad para que la información de la trama que se transfiere quede perfectamente caracterizada. Esto se consigue mediante la configuración de los distintos campos que hacen parte de los tres componentes principales de la trama, los cuales se describen a continuación.

- **Cabecera MAC:** contiene campos encargados del control y de la identificación de la trama. La cabecera MAC está conformada por los campos que se observan en la figura 2.3.

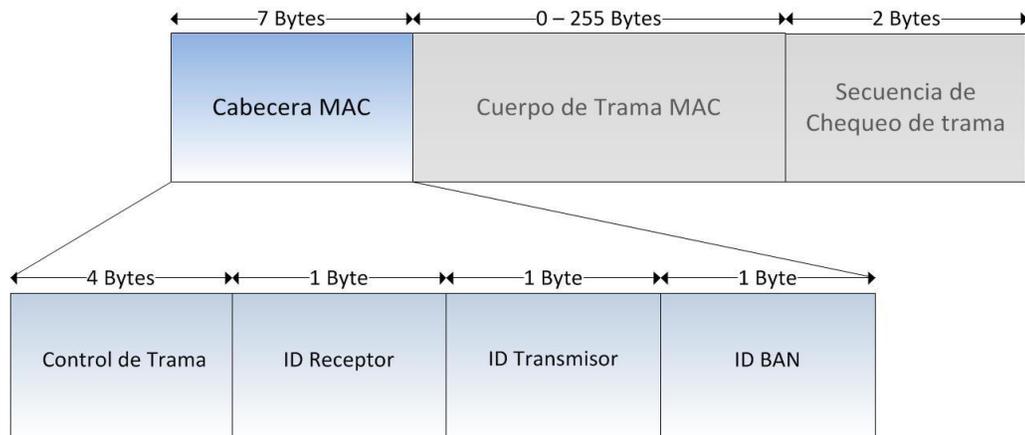


Figura 2.3. Estructura de la cabecera MAC. Adaptado de [13].

- **Control de trama:** especifica los campos que controlan el funcionamiento de la trama para la correcta entrega de datos entre los nodos y el *hub*. El campo de control de trama se encuentra conformado por varios sub-campos, entre los cuales se encuentran la versión del protocolo que contiene la versión del estándar IEEE 802.15.6, el campo de las políticas de reconocimiento que indica el requerimiento de ACK de la trama, el campo que especifica el nivel de seguridad, el campo del tipo y subtipo de trama, y otros campos relacionados con el número de secuencia, de fragmento y de conteo de tramas.
 - **Identificador (ID, *Identifier*):** es un número que se utiliza para nombrar a los dispositivos de la red, lo que permite referirse a ellos de forma unívoca. En una red BAN se asigna un identificador de 8 bits conocido como dirección abreviada al campo ID del transmisor, del receptor y de la red misma, para identificar los dispositivos que realizan el intercambio de tramas.
- **Cuerpo de la Trama MAC:** contiene información específica del tipo de trama, por lo que su contenido y longitud es variable. El cuerpo de la trama está formado por los campos mostrados en la figura 2.4.

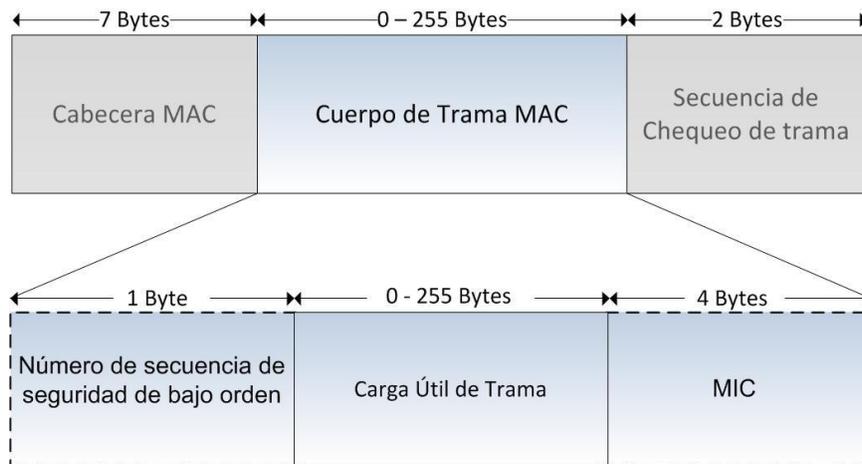


Figura 2.4. Estructura del Cuerpo de Trama MAC. Adaptado de [13].

- El campo de número de secuencia de seguridad de bajo orden y el de Código de Integridad del Mensaje (MIC, *Message Integrity Code*) están presentes en tramas que cuentan con algún nivel de seguridad definido en la cabecera MAC, con el fin de preservar la autenticidad e integridad de la trama.
- Carga útil de la trama: contiene la carga útil de los tres tipos de trama existentes: Gestión, Control y Datos.
 - Tramas de tipo Gestión: las tramas de gestión 802.15.6 se encargan del soporte de los servicios y del manejo de la red. Estas tramas permiten inicializar, mantener y finalizar las comunicaciones en la BAN. Entre los subtipos de tramas de gestión más importantes se encuentran la trama *beacon*, la trama de petición de conexión, la trama de asignación de conexión y la trama de desconexión.
 - Tramas de tipo Control: como su nombre lo indica, controlan el medio y se utilizan para el intercambio de tramas de datos entre los nodos y el *hub*. Entre los subtipos de tramas de control más importantes se encuentran las tramas de confirmación de recepción de datos, la trama *Poll* y la trama *beacon 2* (B2).
 - Tramas de tipo Datos: son las encargadas de transportar la información desde o hacia las capas superiores. Este tipo de tramas puede contener una MSDU completa o fragmentada [13].
- **Secuencia de Verificación de Trama (FCS, *Frame Check Sequence*)**: todas las tramas son susceptibles a diferentes tipos de errores, razón por la cual la capa de enlace de datos utiliza un método para determinar si han ocurrido errores durante la transmisión, denominado Chequeo de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*), el cual se basa en polinomios construidos a partir de los bits de la trama [11].

El campo FCS almacena un valor calculado por el *hub* o nodo transmisor basado en los datos de la trama, cuando la trama llega al destino, el FCS es recalculado y comparado con el valor recibido. Si los dos valores son diferentes, se asume un error durante la transmisión, la trama se descarta y el nodo destino debe solicitar la retransmisión.

2.4. PRELIMINARES DE LA TRAMA MAC

Este apartado contiene las reglas fundamentales a tener en cuenta para la preparación de las tramas MAC en la transmisión y el procesamiento de las mismas en la recepción [13]. Algunas de las reglas más importantes, se describen a continuación:

- **Direccionamiento Abreviado**: es el proceso mediante el cual, los dispositivos de la red BAN seleccionan sus identificadores para ser reconocidos durante el intercambio de tramas. Esto se lleva a cabo en el siguiente orden:
 1. El *hub* debe seleccionar un identificador para la red de área corporal denominado BAN ID, el cual no debe estar en uso por una BAN cercana.

2. El *hub* también debe seleccionar su propio identificador (HID, *Hub Identifier*), el cual estará incluido en la cabecera de todas las tramas enviadas desde o hacia él. El ID seleccionado no debe estar en uso por un nodo conectado al *hub* o por un *hub* vecino.
 3. Por último, se debe seleccionar un Identificador de Nodo (NID, *Node Identifier*) que sirva como dirección abreviada para él mismo. El NID estará contenido en la cabecera de todas las tramas enviadas de manera *unicast*⁸ desde o hacia el nodo.
- **Recepción de Tramas:** para que un nodo o un *hub* reciba una trama correctamente se deben cumplir las siguientes condiciones, a no ser que se especifique lo contrario [13].

Un nodo debe recibir una trama sí:

- En el campo del identificador de receptor en la cabecera MAC se encuentra su propio NID.
- En el campo del identificador de transmisor en la cabecera MAC, está el HID del *hub* con el cual el nodo intercambia tramas.

Un *hub* debe recibir una trama sí:

- En el campo del identificador de receptor en la cabecera MAC se encuentra su propio HID.
- En el campo del identificador de transmisor en la cabecera MAC, está configurado el NID del nodo transmisor esperado.

Adicionalmente tanto el nodo como el *hub* deben recibir una trama sí:

- En el campo del BAN ID en la cabecera MAC se encuentra el valor esperado, de tal forma que los dispositivos se aseguren que es la red a la que pertenecen.
- La versión del protocolo en la cabecera MAC, está configurado con un valor soportado por la red.
- El campo de FCS es válido.

El *hub* o un nodo deben ignorar una trama recibida, si ésta se detecta como duplicado o si el transmisor y receptor no corresponden con los esperados.

- **Reconocimiento de Trama:** si los criterios de recepción de tramas se cumplen, un receptor (*hub* o nodo) debe hacer el acuse de recibo de la trama, por medio del envío de una trama de Reconocimiento Inmediato (I-ACK, *Immediate Acknowledgment*) [13].

La trama I-ACK se transmite después de un intervalo de tiempo empleado para separar tramas, durante el cual no se realiza ninguna transmisión por parte del *hub*

⁸ *Unicast* es el envío de información desde un único emisor hacia un único receptor.

o del nodo. Este intervalo se ubica justo al final de la trama recibida y se denomina Espacio Corto Inter Trama (SIFS, *Short Inter-Frame Space*).

La figura 2.5 muestra la forma en que se realiza el reconocimiento de trama inmediato (I-ACK), después de que el *hub* y el nodo han intercambiado una trama de datos.

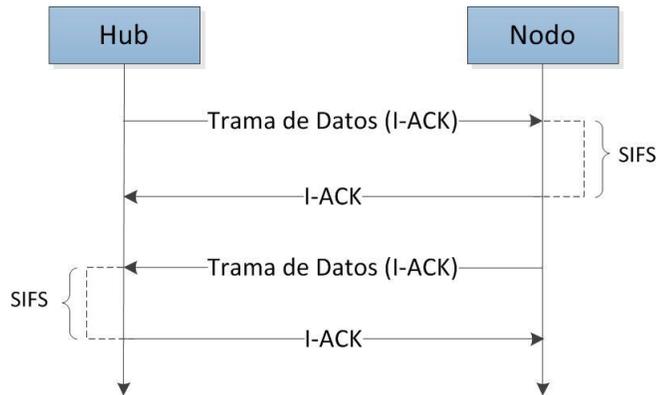


Figura 2.5. Reconocimiento de Trama en la red BAN. Tomado de [13].

Para enviar una trama I-ACK, el nodo o el *hub* deben utilizar la menor tasa de datos de operación.

- **Asignación de Prioridad:** corresponde al procedimiento de asignar valores de prioridad a las tramas de tipo gestión y de tipo datos, con base a los datos contenidos en su campo de carga útil, como se muestra en la tabla 2.1. La asignación de prioridad se utiliza para prevalecer el acceso al medio de los nodos en la red.

PRIORIDAD	PRIORIDAD DE DATOS	CARGA ÚTIL	TIPO DE TRAMA
<p style="text-align: center;">BAJA</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">ALTA</p>	0	Background	Datos
	1	Mejor Esfuerzo (Best Effort)	Datos
	2	Esfuerzo Excelente (Excellent Effort)	Datos
	3	Video (Video VI)	Datos
	4	Voz (Voice VO)	Datos
	5	Datos médicos o control de red	Datos o Gestión
	6	Datos Médicos de Alta Prioridad o control de red	Datos o Gestión
	7	Reporte de evento de Emergencia	Datos

Tabla 2.1. Prioridad de los datos en la red BAN. Tomado de [13] [3].

Los nodos con prioridad de datos igual a 7 son menos predecibles ya que corresponden a un comportamiento de tráfico de emergencia.

Los nodos con los datos de más alta prioridad tienen mayores opciones de acceder al medio para transmitir que los nodos con los datos de más baja prioridad.

2.5. MODOS DE OPERACIÓN

Los modos de operación de la red BAN corresponden a la forma en que el *hub* asigna los recursos para intercambiar información con los nodos. Para ello el *hub* divide el eje del tiempo en intervalos repetitivos y de igual duración, cada uno de estos intervalos se denomina supertrama. A su vez, una supertrama está conformada por un número entero de ranuras de tiempo que se utilizan como unidades básicas de asignación en la red.

En la red BAN, el *hub* puede definir dos tipos de supertrama:

- *Supertrama Activa*: en esta supertrama el *hub* define intervalos de tiempo específicos, en los cuales los nodos pueden acceder al medio para realizar una transmisión [1].
- *Supertrama Inactiva*: en esta supertrama no se provee acceso al medio a los nodos de la red y se utiliza para que estos ahorren energía [13].

Dentro de la supertrama activa, el *hub* puede asignar recursos haciendo uso de una *ranura de asignación*, que corresponde al tiempo mínimo concedido a un nodo para que transmita sus tramas [13].

Además el *hub* puede definir un intervalo de tiempo continuo que comprende una o más ranuras de asignación consecutivas, conocido como *intervalo de asignación*.

La figura 2.6 presenta la organización de las supertramas y las asignaciones en el eje del tiempo.

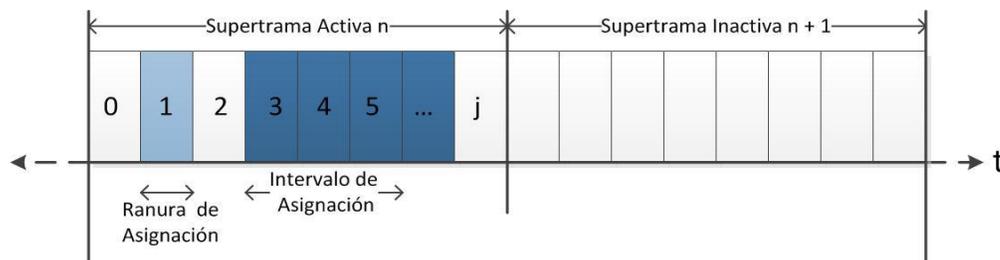


Figura 2.6. Organización de las supertramas en el tiempo. Adaptado de [13].

El *hub* también puede asignar recursos a los nodos sin utilizar una supertrama, lo cual indica que no existen divisiones en el eje del tiempo.

La estructura, el funcionamiento y la existencia de las supertramas, dependen del modo de operación de la red. De manera general una red BAN puede funcionar en cualquiera de los siguientes modos de operación.

- Modo *Beacon* con Supertrama Limitada por Tramas *Beacon*
- Modo No *Beacon* con Supertrama
- Modo No *Beacon* sin Supertrama

En el siguiente apartado se describen los aspectos más relevantes de los modos de operación de la red BAN.

2.5.1. Modo *Beacon* con Supertrama Limitada por Tramas *Beacon*

En este modo de operación el *hub* puede definir supertramas activas e inactivas; solo en el caso de una supertrama activa debe enviar una trama *beacon* (B) que indique el inicio y el final de la misma.

La supertrama de este modo de operación está conformada por tramas de tipo gestión, de tipo control y por diferentes fases de acceso, que corresponden a lapsos de tiempo constituidos por un conjunto de ranuras de asignación.

La figura 2.7 muestra la estructura de la supertrama activa en este modo de operación [20] [13] [28] [7].

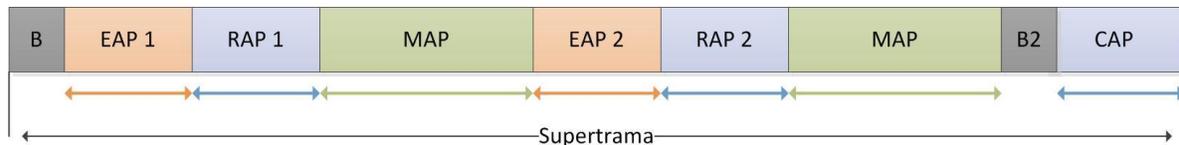


Figura 2.7. Modo *Beacon* con Supertrama Limitada por Tramas *Beacon*. Tomado de [13].

- **Beacon (B):** es una trama de tipo gestión transmitida dentro de la primera ranura de asignación de la supertrama. Se utiliza para sincronizar los dispositivos y facilitar la gestión de los recursos de la red en términos del control de acceso y consumo de energía. Adicionalmente, la trama *beacon* permite que los nodos reconozcan al coordinador de la red y contiene la información que define la duración de las fases de acceso de la supertrama.
- **Fase de Acceso Exclusivo (EAP, *Exclusive Access Phase*):** corresponde a un lapso de tiempo constituido por un conjunto de ranuras de asignación, reservadas para proveer recursos de manera inmediata a los nodos que generen información con un comportamiento de emergencia. Por lo tanto, dentro de esta fase se envía el tráfico que presente la más alta prioridad en la red y que exija estrictos requerimientos de fiabilidad y latencia. La duración de esta fase puede ser nula si el *hub* lo desea.
- **Fase de Acceso aleatorio (RAP, *Random Access Phase*):** es un intervalo de tiempo conformado por un conjunto de ranuras de asignación, que se utilizan para que los nodos transmitan información de rutina; como por ejemplo la información generada por el monitoreo constante de las diferentes variables del cuerpo.

En esta fase, el *hub* define un *Intervalo de asignación de contención* para que los nodos compitan por acceder al medio y puedan iniciar la transmisión de sus tramas. Es decir, que los nodos deben mantenerse sensando el canal y esperar hasta que éste se encuentre libre para poder transmitir. Esta fase de acceso no puede tener una duración nula.

- **Fase de Acceso de Contención (CAP, Contention Access Phase):** al igual que en el RAP, las ranuras que conforman esta fase permiten a los nodos transmitir sus tramas empleando un *Intervalo de asignación de contención*. Sin embargo, esta fase si puede tener una duración nula.
- **Beacon 2 (B2):** es una trama de tipo gestión enviada por el *hub* para definir el inicio y el final del CAP. Por lo tanto, el *hub* la enviará solo si desea que el CAP tenga una duración no nula.
- **Fase de Acceso Gestionado (MAP, Managed Access Phase):** corresponde a un lapso de tiempo en el cual el *hub* puede definir diferentes *intervalos de asignación programados*, donde se garantiza a los nodos y al *hub* de manera anticipada una porción de tiempo para que transmita sus tramas. La duración del MAP en la supertrama puede ser nula, si no hay transmisiones programadas para alguno de los nodos.

Dentro de esta fase se definen los *intervalos de asignación programados* mostrados en la figura 2.8 [13] [7].

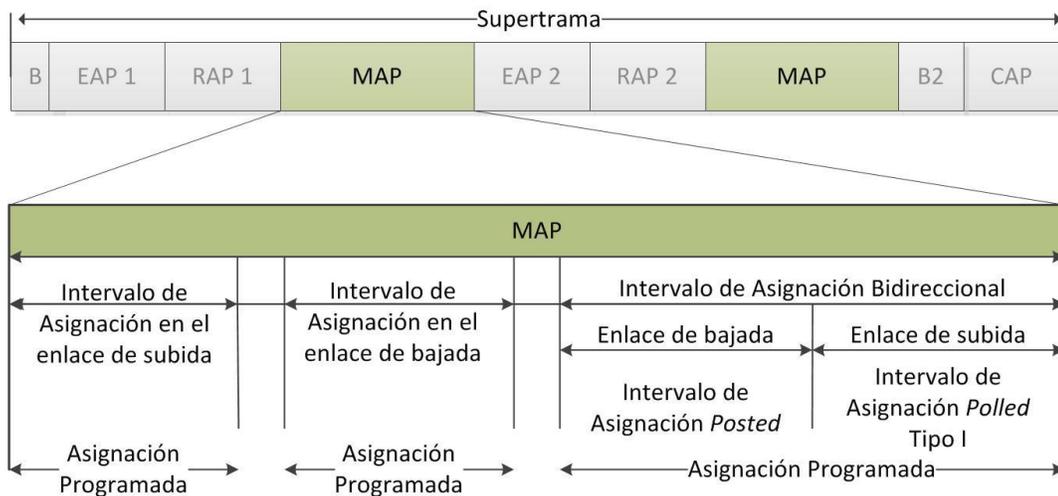


Figura 2.8. Intervalos de Asignación Programados en el MAP en Modo *Beacon* con Supertrama limitada por tramas *Beacon*. Adaptado de [13].

- *Intervalo de Asignación en el Enlace de Subida (Uplink Allocation Interval):* corresponde a un intervalo de tiempo, donde la información siempre fluye desde el nodo hacia al *hub*. Esta asignación se emplea para enviar tramas de tipo gestión o de tipo datos.
- *Intervalo de Asignación en el Enlace de Bajada (Downlink Allocation Interval):* corresponde a un intervalo de tiempo donde la información siempre fluye desde el *hub* hacia los nodos. Esta asignación se utiliza para enviar tramas de tipo gestión o de tipo datos.

- *Intervalo de Asignación Bidireccional (Bilink Allocation Interval)*: es un intervalo de tiempo conformado por una asignación en el enlace de subida y una asignación en el enlace de bajada, donde un nodo y el *hub* pueden enviar tramas de tipo gestión o de tipo datos.

En un *intervalo de asignación bidireccional* se realizan las siguientes asignaciones: *Asignación Polled (Polled Allocation)* y *Asignación Anunciada (Posted Allocation)*. Para definir el inicio de estas asignaciones se utilizan las siguientes tramas respectivamente [13]:

- *Trama Poll*: Es una trama de tipo control enviada desde el *hub* hacia un nodo, para garantizar una *asignación polled* inmediata o para informar de una futura trama *poll*.
- *Trama Post*: Es una trama de tipo gestión o de tipo datos enviada por un *hub* hacia un nodo, para anunciarle una futura transmisión. Una trama *post* inicia una *asignación anunciada*.

Las asignaciones *polled* y *posted* permiten que los nodos y el *hub* dispongan respectivamente de sus propios intervalos de tiempo para realizar una transmisión. Una descripción más detallada de estas asignaciones se da a continuación.

- *Asignación Polled*: corresponde a un intervalo de tiempo no repetitivo en el enlace de subida, el cual inicia tras la recepción de una trama *poll*.

Esta asignación es adecuada para que el nodo envíe información extra que se pudiese generar a causa de la variación de la tasa de datos o de fallas en el canal de comunicación. El procedimiento de la *asignación polled* se muestra en la figura 2.9.

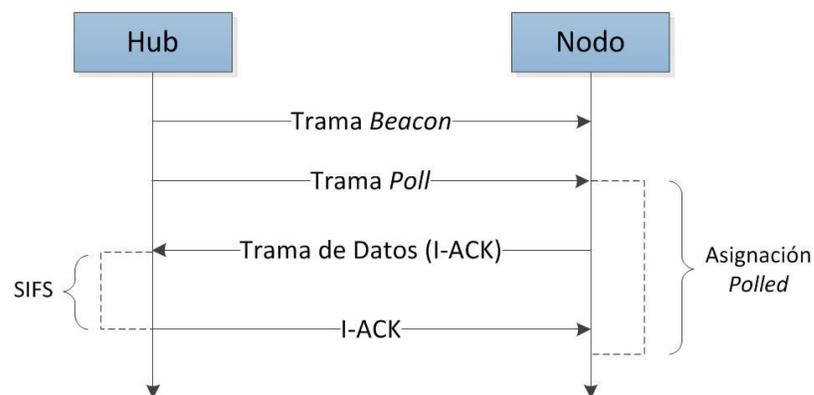


Figura 2.9. Procedimiento de la *Asignación polled*. Adaptado de [13].

La *asignación polled* puede ser de dos tipos [13] [28]:

- *Tipo I*: si la duración de la asignación se define en términos del tiempo en que se garantiza al nodo que puede transmitir su información.
- *Tipo II*: si la duración de la asignación se define en términos del número de tramas garantizadas a un nodo para que transmita su información.

En el modo *beacon* con supertrama limitada por tramas *beacon*, el *hub* realiza *asignaciones polled* tipo I.

- *Asignación Posted*: es un intervalo de tiempo no repetitivo en el enlace de bajada, que el *hub* se otorga a sí mismo, por medio de una trama *post*. Esta asignación es adecuada para transmitir tramas inesperadas de gestión o de datos. El procedimiento de la *asignación posted* se muestra en la figura 2.10.

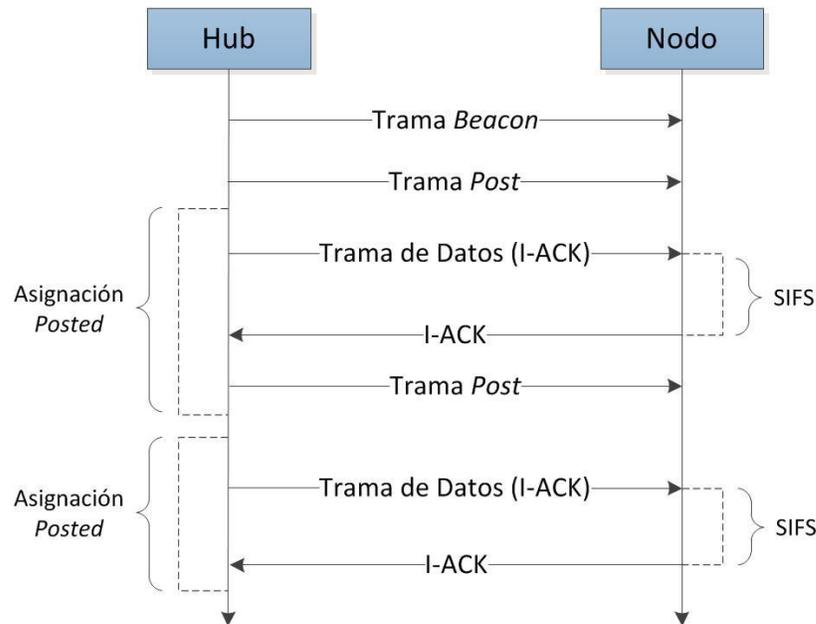


Figura 2.10. Procedimiento de *Asignación Posted*. Adaptado de [13].

2.5.2. Modo No Beacon con Supertrama

En este modo de operación se utiliza una supertrama activa, en la cual no se transmiten tramas *beacon*, sin embargo, se requiere que el *hub* defina una base de tiempo que permita conocer los límites de la supertrama. Para ello, el *hub* transmite tramas de Temporización *Poll* (*T-Poll*) que contienen el tiempo de inicio de la supertrama y provee sincronización a los nodos [13].

La supertrama en este modo de operación se compone únicamente de una fase MAP, en la cual se proveen intervalos de asignación de manera no programada y de manera improvisada, que comprenden *asignaciones posted* y *asignaciones polled* tipo I [13].

El *hub* envía una trama *Poll* a un nodo para reservar un intervalo de asignación bidireccional no programado, con el fin de que estos realicen un intercambio de tramas. Sin embargo, el *hub* no podrá garantizar la disponibilidad de dicho intervalo, la cual dependerá de las condiciones del ancho de banda del canal presentes al comienzo de la asignación [13] [36].

Adicionalmente, el *hub* por medio de una trama *poll* o una trama *post* respectivamente puede otorgar en cualquier instante de tiempo una asignación en el enlace de subida o en enlace de bajada de manera improvisada [13].

Los intervalos de asignación disponibles dentro del MAP en este modo de operación se muestran en la figura 2.11.



Figura 2.11. Intervalos de Asignación en el MAP en Modo No *Beacon* con Supertrama. Adaptado de [13].

2.5.3. Modo No *Beacon* sin Supertrama

En este modo de operación el *hub* no define una supertrama, por lo tanto no envía tramas de tipo gestión (*beacon*) o de tipo control (*T-Poll*), que sirvan para la sincronización de los nodos en la red [13].

Al igual que en el modo de operación anterior, el *hub* provee en cualquier instante de tiempo *asignaciones bidireccionales* no programadas, que comprenden *asignaciones posted* y *asignaciones polled*. Sin embargo, en este modo las *asignaciones polled* son tipo II [28].

La organización de las asignaciones en este modo se encuentra en la figura 2.12.

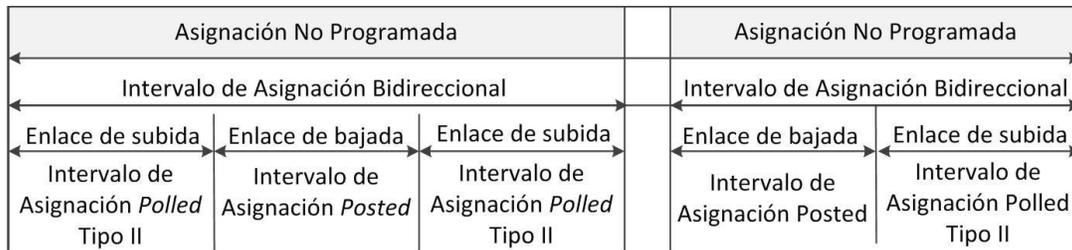


Figura 2.12. Intervalos de Asignación en el MAP en Modo No *Beacon* sin Supertrama. Adaptado de [13].

En la tabla 2.2 se resumen los modos de operación disponibles en una red BAN, con sus respectivas fases de acceso e intervalos de asignación.

	FASES DE ACCESO	INTERVALOS DE ASIGNACIÓN
MODOS DE OPERACIÓN		
Modo <i>Beacon</i> con Supertrama Limitada por Tramas <i>Beacon</i>	EAP 1	Asignación de contención
	EAP 2	
	RAP 1	
	RAP 2	
	CAP	
	MAP	Asignación <i>Polled</i> Tipo I
Modo No <i>Beacon</i> con Supertrama	MAP	Asignación <i>Posted</i>
		Asignación Bidireccional Programada
		Asignación <i>Polled</i> Tipo I
		Asignación <i>Posted</i>
Modo No <i>Beacon</i> sin Supertrama	MAP	Asignación Bidireccional No Programada
		Asignación <i>Polled</i> Tipo II
		Asignación <i>Posted</i>
		Asignación Bidireccional No Programada

Tabla 2.2. Síntesis de los modos de operación de una red BAN. Por los Autores.

Un *hub* puede configurar cualquiera de los tres modos de operación presentados, para asignar recursos a los nodos de la red. Sin embargo, el modo más empleado en la red BAN es el modo *beacon* con supertrama limitada por tramas *beacon*, ya que en éste, el *hub* define una mayor cantidad de fases de acceso e intervalos de asignación, para que los nodos puedan transmitir sus datos acorde con su prioridad.

Dentro de cada modo de operación y dependiendo del intervalo de asignación, el *hub* y los nodos pueden acceder a los recursos empleando diferentes métodos/técnicas⁹ de acceso, los cuales se presentan y se describen en el siguiente capítulo.

⁹ A partir del estándar IEEE 802.15.6 se establece que las palabras método y técnica presentan un significado semejante en el contexto.

3. CAPÍTULO III. MÉTODOS DE ACCESO Y PARÁMETROS DE LA RED

3.1. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos de la red BAN se centran principalmente en optimizar el rendimiento de los parámetros que afectan el desempeño de la misma, los cuales se relacionan con garantizar la calidad de servicio, minimizar la latencia y reducir el consumo de energía.

Una forma para cumplir con estos requerimientos, es la implementación de un método de acceso eficiente que permita a los nodos acceder de manera ordenada al canal, evitando que se presenten colisiones entre tramas. Las colisiones representan una de las principales fuentes de consumo de energía en la red BAN, debido a que obligan a los nodos a retransmitir sus tramas generando un gasto de energía extra, un incremento de tramas erradas y un aumento en el retardo total de la red [37].

Con el fin de tener claridad del funcionamiento de los métodos de acceso en la red BAN, este capítulo describe las técnicas disponibles bajo el estándar IEEE 802.15.6 e identifica los principales parámetros que afectan el desempeño de la red.

3.2. MÉTODOS DE ACCESO EN LA RED BAN

Dependiendo del modo de operación de la red BAN, el estándar IEEE 802.15.6 define diferentes métodos de acceso, los cuales reúnen las reglas y procedimientos que deben seguir los nodos para obtener un intervalo de asignación donde puedan transmitir sus tramas. Estos métodos se muestran en la figura 3.1.

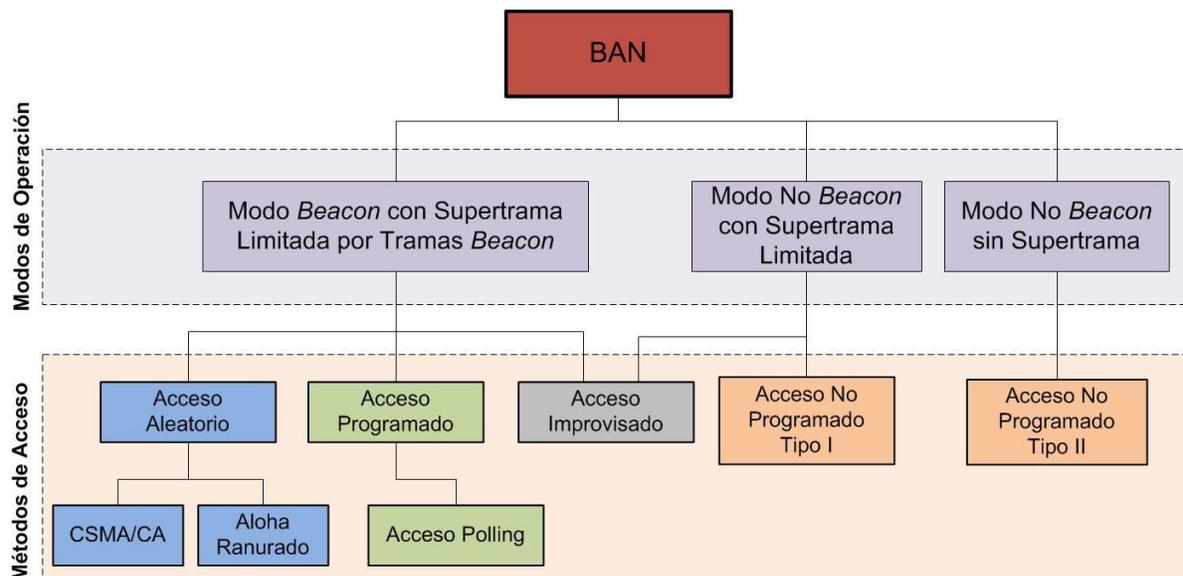


Figura 3.1. Métodos de Acceso empleados en la red BAN. Por los Autores.

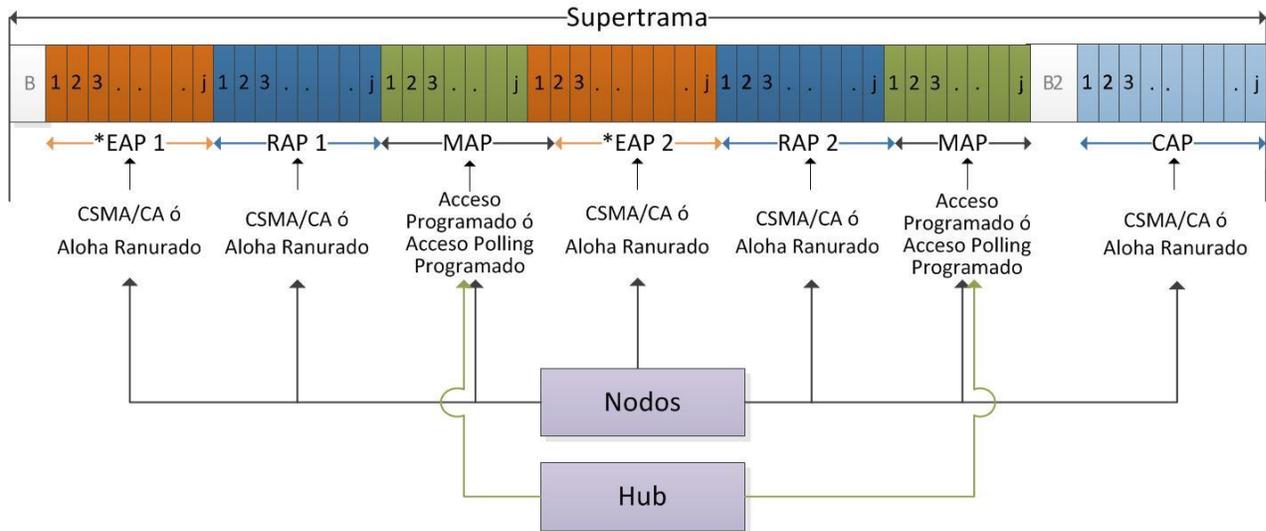
A continuación se describen las características y el funcionamiento de los métodos de acceso, en los distintos modos de operación de la red BAN.

3.2.1. Métodos de Acceso Disponibles en Modo *Beacon* con Supertrama Limitada por Tramas *Beacon*

En este modo de operación, los nodos y el *hub* acceden al medio empleando cualquiera de los siguientes métodos de acceso [13]:

- Acceso aleatorio: comprende las técnicas de Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evitación de Colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) y Aloha Ranurado (*Slotted Aloha*). Esta técnica se emplea para que los nodos obtengan un intervalo de asignación de contención en las fases EAP1, EAP2, RAP1, RAP2 o CAP.
- Acceso Programado (*Scheduled Access*) y Acceso *Polling* Programado (*Scheduled-Polling Access*): estos métodos de acceso se emplean por el *hub* y por los nodos en la fase MAP, para reservar de manera anticipada un intervalo de asignación.
- Acceso Improvisado (*Improvised Access*): es un método de acceso empleado exclusivamente por el *hub*, en el cual éste otorga asignaciones *polled* y *posted*.

La figura 3.2 muestra los métodos de acceso disponibles en este modo de operación.



*EAP1, *EAP2: estas fases de acceso se reservan para nodos que necesiten enviar tramas que contengan información de emergencia.

Figura 3.2. Métodos de acceso disponibles en Modo *Beacon* con Supertrama Limitada por Tramas *Beacon*. Por los Autores.

En el siguiente apartado se describe de manera detallada los métodos de acceso descritos anteriormente.

3.2.1.1. Acceso Aleatorio

El acceso aleatorio se basa en un método de contención, en el cual siempre que los nodos deseen transmitir, deben competir entre ellos para acceder al canal y obtener un intervalo de asignación de contención dentro de una fase de la supertrama.

Un nodo debe emplear acceso aleatorio para intentar obtener un intervalo de asignación de contención, únicamente en las fases RAP 1, RAP 2 o CAP. Si la carga útil de la trama corresponde a información de emergencia, el nodo podrá obtener un intervalo de asignación de contención en las fases EAP 1 o EAP 2 [13].

Los métodos basados en acceso aleatorio empleados en la BAN, se describen a continuación.

3.2.1.1.1. CSMA/CA

CSMA/CA es una técnica de acceso múltiple que opera en la capa de enlace de datos del modelo OSI, cuyo funcionamiento se basa en el sensado del canal para evitar que se presenten transmisiones simultáneas que generen colisiones [37].

El mecanismo empleado por CSMA/CA para evitar colisiones se conoce como el algoritmo de *backoff*, el cual consiste en un contador que indica el número de ranuras de asignación libres que un nodo debe sensar antes de iniciar una transmisión [13].

El valor del contador de *backoff* se escoge de manera aleatoria desde un intervalo conocido como Ventana de Contención (CW, *Contention Window*), en la cual el valor mínimo y máximo del intervalo, dependen de la prioridad de los datos que el nodo tiene por transmitir. Los valores de la ventana se muestran en la tabla 3.1.

CSMA/CA		
	<i>CW_{min}</i>	<i>CW_{max}</i>
Prioridad de los datos		
0	16	64
1	16	32
2	8	32
3	8	16
4	4	16
5	4	8
6	2	8
7	1	4

Tabla 3.1. Ventana de Contención para CSMA/CA. Tomado de [28].

Es de resaltar que el valor 7 presenta la prioridad más alta en la red BAN, mientras que el valor 0 corresponda a la más baja.

El procedimiento de CSMA/CA empleado por los nodos para obtener una asignación de contención es el siguiente [13]:

- a. Un nodo debe recibir una trama *beacon* para conocer el inicio y el final de la fases en las cuales puede acceder al medio empleando CSMA/CA.

- b. El nodo debe establecer su valor inicial del contador de *backoff* de manera aleatoria del intervalo $[1, CW]$, donde el CW debe ser establecido al valor CW_{min} , para obtener una asignación por primera vez.
- c. Posterior a ello, el nodo debe disminuir en una unidad su contador de *backoff* por cada ranura de asignación consecutiva que encuentre libre en la red.
- d. Cuando el valor del contador de *backoff* es igual a cero, el nodo obtiene una asignación de contención, que inicia y finaliza dentro de la fase de acceso.
- e. Si el nodo realiza una transmisión exitosa y recibe un ACK desde el *hub*, éste podrá transmitir una nueva trama con prioridad igual o mayor a las transmitidas anteriormente.
- f. Si el nodo no realiza una transmisión exitosa debido a que encuentra el canal ocupado o no recibe un ACK desde el *hub* tras enviar una trama, éste debe:
 - 1. Bloquear su valor actual del contador de *backoff*, si la transmisión falla consecutivamente en un número impar de veces.
 - 2. Doblar su valor actual del contador de *backoff*, si la transmisión falla consecutivamente en un número par de veces, sin que en ningún caso se exceda el valor CW_{max} definido en la ventana.
- g. Si el nodo finaliza exitosamente el envío de todas sus tramas dentro de la asignación de contención, éste debe reiniciar su ventana de contención al valor mínimo (CW_{min}).

La figura 3.3 muestra el procedimiento CSMA/CA, para un nodo cuya prioridad de datos es igual a 2.

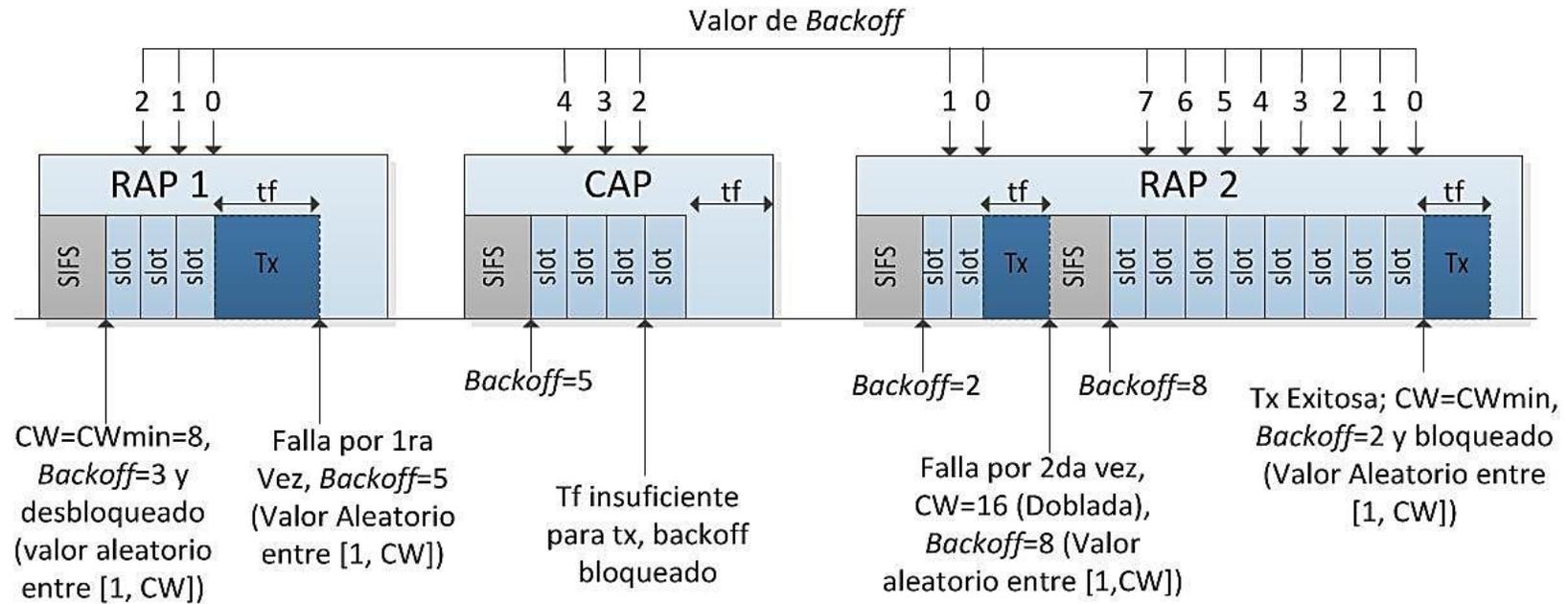


Figura 3.3. Procedimiento de acceso CSMA/CA en la red BAN. Tomado de [13].

CSMA/CA presenta buena escalabilidad y no requiere de sincronización en el tiempo, sin embargo exige que los nodos se encuentren constantemente sensando el canal, lo cual produce un consumo de energía innecesario [37].

3.2.1.1.2. Aloha Ranurado (Slotted Aloha)

Aloha Ranurado es una técnica de acceso múltiple que opera en la capa de enlace de datos del modelo OSI y cuyo funcionamiento consiste en dividir el eje del tiempo dentro de ranuras de asignación de igual longitud [38]. Empleando *Aloha* Ranurado, los nodos pueden obtener una asignación de contención en las fases disponibles para acceso aleatorio [13].

De manera similar a CSMA/CA, la técnica de *Aloha* Ranurado utiliza un intervalo conformado por diferentes valores de Probabilidad de Contención (CP, *Contention Probability*), los cuales dependen de la prioridad de los datos e indican la probabilidad que tiene un nodo de acceder exitosamente al canal [13]. Los valores de la CP se muestran en la tabla 3.2.

ALOHA RANURADO		
	CPmax	CPmin
Prioridad de los datos		
0	1/8	1/16
1	1/8	3/32
2	1/4	3/32
3	1/4	1/8
4	3/8	1/8
5	3/8	3/16
6	1/2	3/16
7	1	1/4

Tabla 3.2. Probabilidad de Contención para *Aloha* Ranurado. Tomado de [28].

El procedimiento de *Aloha* Ranurado para que un nodo obtenga una asignación de contención es el siguiente [13]:

- a. Si el nodo previamente no ha obtenido ninguna asignación de contención, éste deberá fijar su valor de probabilidad a CPmax.
- b. Si el nodo no obtiene una asignación de contención, éste debe mantener el valor de su CP fijo.
- c. Si el nodo obtiene una asignación de contención pero falla la transmisión; es decir que no recibe un ACK de su última trama transmitida, éste deberá:
 1. Mantener su CP fijo si la transmisión ha fallado consecutivamente un número impar de veces.

2. Dividir su CP si la transmisión falla consecutivamente un número par de veces, sin que en ningún caso el valor obtenido como resultado de dividir el CP sea menor que el CPmin.
- d. Si el nodo obtiene una asignación de contención y transmite una trama de manera exitosa dentro de la ranura asignada, éste deberá volver a fijar su probabilidad de contención a su valor máximo (CPmax).

La figura 3.4 muestra el procedimiento de *Aloha* Ranurado para un nodo con prioridad de datos igual 6.

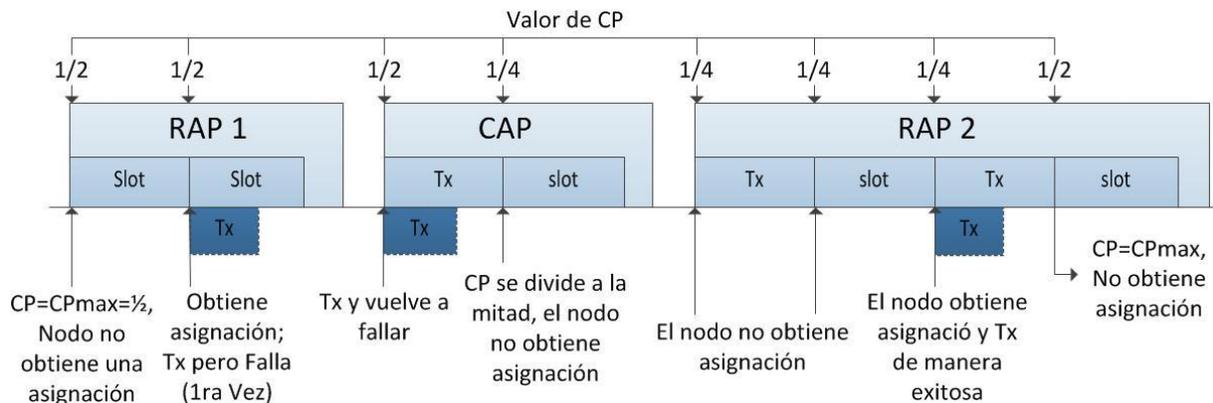


Figura 3.4. Procedimiento de acceso *Aloha* Ranurado en la red BAN. Tomado de [13].

La técnica de acceso de *Aloha* Ranurado presenta buena escalabilidad y reduce la probabilidad de colisiones en la red, sin embargo, requiere de una estricta sincronización y solo permite iniciar transmisiones al comienzo de cada ranura, lo que obliga a los nodos en caso de colisión, a esperar un lapso de tiempo antes de poder retransmitir [38].

3.2.1.2. Acceso Programado y Acceso Polling Programado

En la fase MAP de la supertrama, los nodos y el *hub* para acceder al medio, pueden emplear cualquiera de los siguientes métodos:

- Acceso programado: es un método de acceso basado en reservación anticipada, que permite a los nodos y al *hub* obtener un intervalo de asignación en el enlace de subida o en el enlace de bajada [13].
- Acceso *Polling* Programado: es una variación del método de acceso programado, que permite a los nodos y al *hub* obtener un intervalo de asignación bidireccional.

La disponibilidad de los métodos descritos anteriormente, se muestran en la figura 3.5.

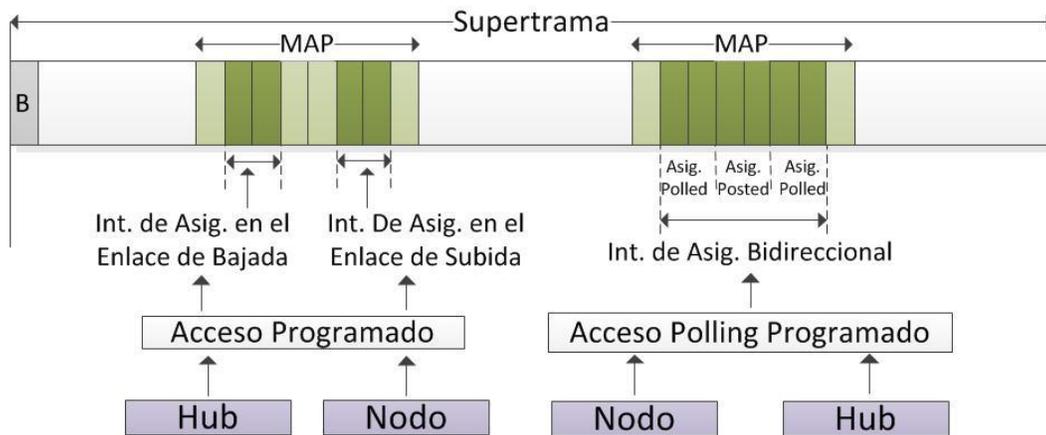


Figura 3.5. Disponibilidad del método de Acceso Programado y Acceso *Polling* Programado en la supertrama. Por los autores

De acuerdo a la periodicidad en el tiempo, un intervalo de asignación programado y un bidireccional programado, puede ser [13]:

- 1-Periódico: en el cual el *hub* reserva a un nodo, el mismo intervalo de asignación programado en cada supertrama de la red.
- m-periódico: en el cual el *hub* reserva a un nodo, el mismo intervalo de asignación programado cada m supertramas en la red.

La figura 3.6 muestra estas dos formas de asignación programada.

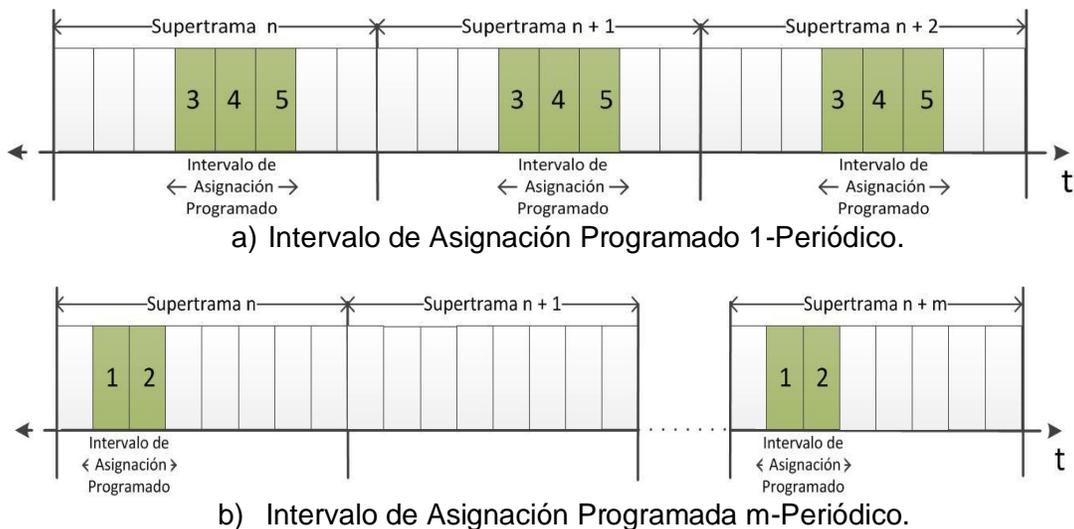


Figura 3.6. Periodicidad del intervalo de Asignación Programado. Tomado de [13].

En el método de acceso programado y en el de acceso *Polling* programado, los nodos pueden operar en los siguientes estados de funcionamiento [13]:

- Estado Despierto (*Wakeup State*): es un estado en el que los nodos se encuentran activos y están en capacidad de transmitir tramas de datos. Un nodo entrará en estado despierto, tras recibir una trama *beacon* en la supertrama en donde tiene un intervalo de asignación programado.
- Estado de Reposo (*Sleep State*): es un estado en el que los nodos se encuentran inactivos y no reciben ni transmiten tramas. Un nodo estará en estado de reposo durante todas las supertramas donde no tenga un intervalo de asignación programado.

A continuación, se describe el procedimiento de acceso programado y acceso *Polling* programado.

3.2.1.2.1. Acceso Programado

El procedimiento de acceso programado para un nodo se muestra en la figura 3.7.

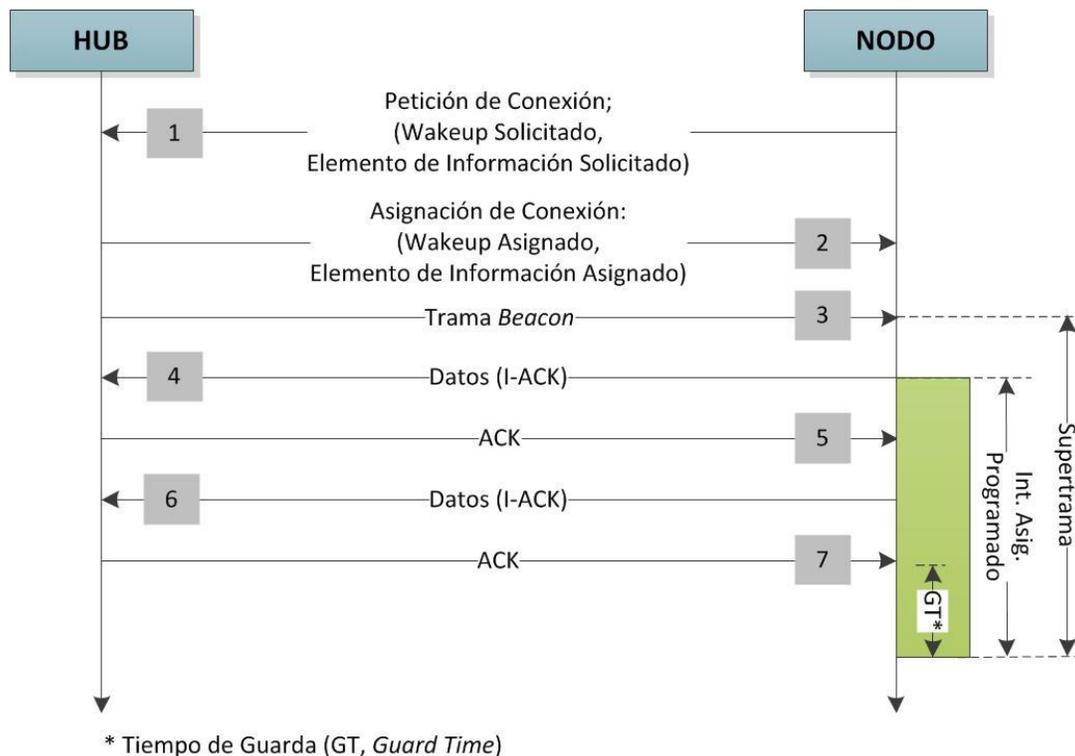


Figura 3.7. Procedimiento para obtener un intervalo de asignación en el método de Acceso Programado. Adaptado de [13].

1. El nodo envía una trama de petición de conexión al *hub*, dentro de la cual fija los siguientes campos:
 - Periodo *Wakeup* Solicitado: es un campo de información, utilizado para solicitar al *hub* la periodicidad en el tiempo, con la que el nodo planea despertar para recepción y transmisión de tramas [13].

- Elemento de Información solicitado: por medio de este campo, el nodo solicita al *hub* un intervalo de asignación en el enlace de subida, en el enlace de bajada o en un enlace bidireccional [13].
2. El *hub* envía al nodo una trama de asignación de conexión, fijando los siguientes campos [13]:
 - Periodo *Wakeup* Asignado: es un campo de información, en el que el *hub* indica al nodo la periodicidad en el tiempo concedida, con la que éste debe despertar.
 - Elemento de información asignado: es un campo que se utiliza para notificar al nodo del intervalo de asignación programado concedido. De esta forma, el *hub* le indicará si la asignación es en el enlace de subida, de bajada o en el bidireccional.
 3. El *hub* envía una trama *beacon* indicando al nodo el inicio de la supertrama y las ranuras de tiempo concedidas para su intervalo de asignación.
 - 4, 5, 6 y 7. Se refieren al procedimiento del envío de tramas, en el enlace de subida y el respectivo reconocimiento del *hub*.

De manera similar, el *hub* puede otorgarse a sí mismo, un intervalo de asignación programado para transmitir tramas de datos a un nodo. Para ello, el *hub* reserva las ranuras que desee para su propio intervalo de asignación en el enlace de bajada [13].

El método de acceso programado en la red BAN, es adecuado para información que se envía de manera periódica en el tiempo, la cual generalmente corresponde a tráfico con comportamiento normal.

En este método, a diferencia de las técnicas de acceso basadas en contención, los nodos solo permanecen activos durante el tiempo de transmisión asignado, lo cual reduce el consumo de energía en la red BAN [37].

3.2.1.2.2. Acceso *Polling* Programado

Es un método de acceso empleado por los nodos y el *hub*, para obtener un intervalo de asignación bidireccional programado, dentro del cual, el *hub* puede enviar tramas *poll* a los nodos para realizar asignaciones *polled* [13].

El procedimiento de acceso *Polling* programado se describe en la figura 3.8.

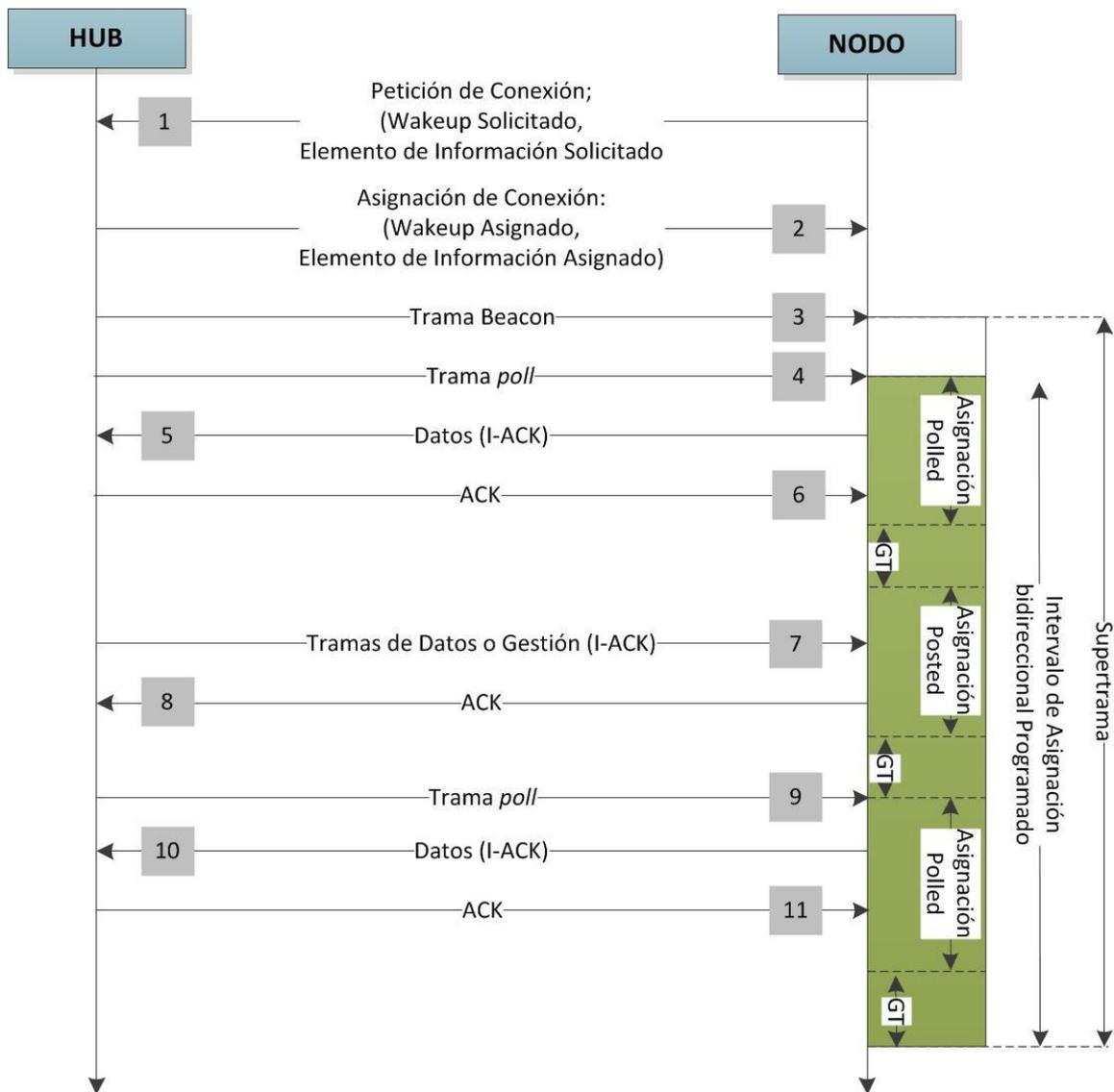


Figura 3.8. Procedimiento para obtener un intervalo de asignación en el método de Acceso *Polling* Programado. Adaptado de [13].

Este procedimiento es similar al descrito en el de acceso programado, sin embargo, las siguientes señalizaciones varían para este método [13].

1. Petición de conexión: en este caso, por medio del elemento de información requerido, el nodo solicita un intervalo de asignación bidireccional programado.
2. Asignación de conexión: por medio del elemento de información asignado, el *hub* concede al nodo el intervalo de asignación bidireccional programado [13].
- 4, 9. Trama *Poll*: permite indicar a un nodo el inicio de una asignación *polled*, en la cual, el nodo transmitirá sus tramas hacia al *hub*.

- 5, 10. Corresponden a las tramas de datos enviadas por el nodo, dentro del intervalo de asignación *polled*.
7. Corresponde a las tramas de tipo gestión o control enviadas por el *hub*, dentro de un intervalo de asignación *posted*.
8. Se refiere al reconocimiento enviado por el nodo, tras recibir de manera exitosa tramas de tipo gestión o control desde el *hub*.

El método de acceso programado, permite a los nodos y al *hub* obtener un intervalo de asignación en un solo sentido (enlace de subida o enlace de bajada), mientras que el método de acceso *Polling* programado, les concede un intervalo de asignación bidireccional.

3.2.1.3. Acceso Improvisado

Es un método de acceso independiente basado en el mecanismo de mejor esfuerzo, que le permite al *hub* enviar tramas *poll* y *post*, sin necesidad de intercambiar tramas de petición y de asignación de conexión. Dichas tramas se pueden enviar ya sea por fuera de un intervalo de asignación programado o por dentro de un intervalo de asignación bidireccional programado [13].

El acceso improvisado es un método complementario al método de acceso programado y al de acceso *Polling* programado [13].

3.2.2. Métodos de Acceso Disponibles en Modo No *Beacon* con Supertrama

En este modo de operación, el *hub* y los nodos obtienen un intervalo de asignación bidireccional en la fase MAP, empleando el método de *acceso no programado*, tal como se muestra en la figura 3.9.

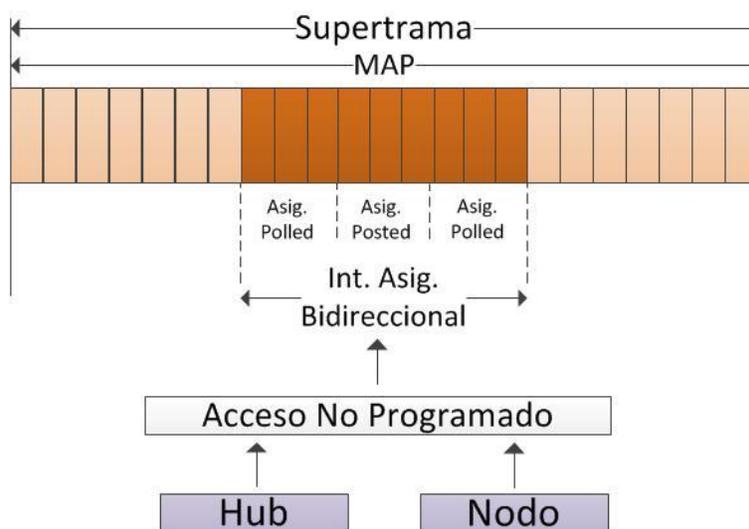


Figura 3.9. Acceso No Programado en modo No *Beacon* con Supertrama Limitada. Por los Autores.

3.2.2.1. Acceso No Programado

El acceso no programado combina el método de acceso programado con el mecanismo del mejor esfuerzo y permite al *hub* reservar de manera tentativa, un intervalo de asignación bidireccional tipo I [13].

Al ser un método basado en el mejor esfuerzo, el intervalo de asignación otorgado a un nodo o a un *hub*, no puede ser garantizado. Por el contrario, este dependerá de la disponibilidad de las ranuras de asignación al inicio del mismo [13].

La periodicidad de un intervalo de asignación no programado puede ser 1-Periódico, m-periódico o *Round Robin*. En *Round Robin*, el *hub* puede conceder uno o más intervalos de asignación a un único nodo, dentro de la misma supertrama [13]. La figura 3.10 muestra este tipo de asignación.

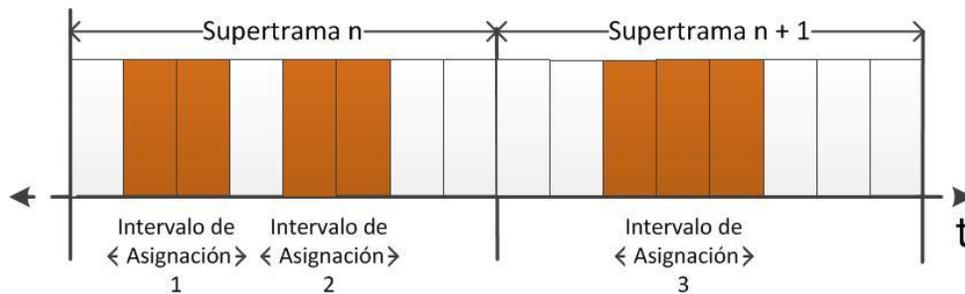


Figura 3.10. Asignación *Round Robin* para Acceso No Programado. Tomado de [13].

Similar al acceso programado, en este método los nodos estarán activos únicamente durante las supertramas en las que el *hub* haya definido de manera tentativa un intervalo de asignación no programado.

El procedimiento de acceso no programado, que permite el intercambio de tramas en una asignación bidireccional, se muestra en la figura 3.11.

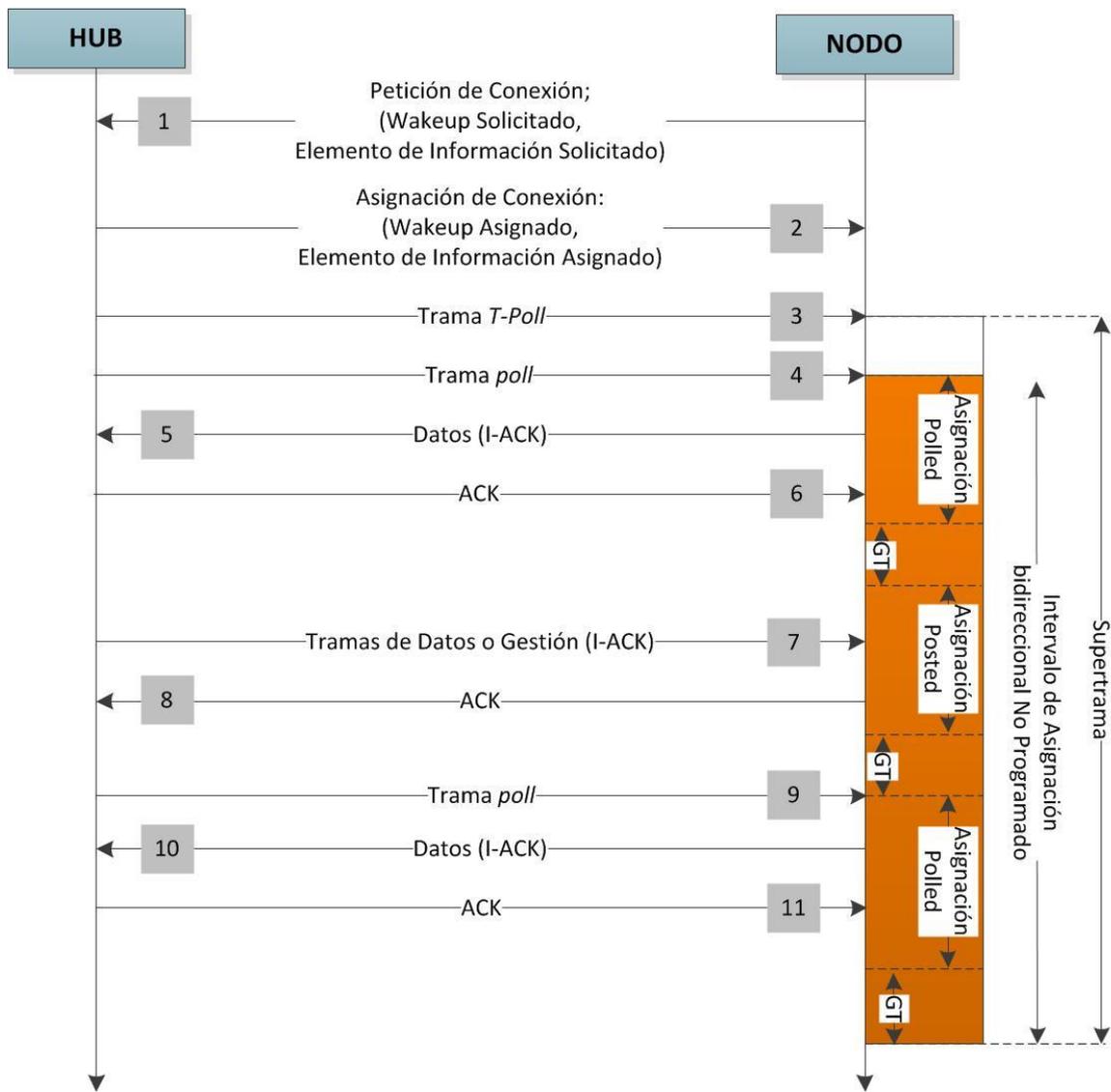


Figura 3.11. Procedimiento para obtener un intervalo de asignación en el método de Acceso No Programado. Por Los Autores.

Este procedimiento es similar al descrito en el método de acceso *Polling* programado, sin embargo las siguientes señalizaciones varían o se emplean únicamente en este método [13].

1. Petición de conexión: en este caso, por medio del elemento de información requerido, el nodo solicita un intervalo de asignación bidireccional No programado.
2. Asignación de Conexión: el *hub* debe conceder el intervalo de asignación solicitado de manera tentativa, adjuntando información adicional que defina el inicio y final del mismo. Incluso debe indicar la longitud mínima y máxima del intervalo, ya que si la red no cuenta con suficientes recursos en el canal, se debe variar la duración de la asignación [13].

3. Trama *T-Poll*: se utiliza para indicar al nodo el tiempo de inicio de la supertrama.

4, 9. Trama *Poll*: indica al nodo el inicio de la asignación *polled* en el enlace de subida.

3.2.2.2. Acceso Improvisado

Adicionalmente en el modo No *beacon* con Supertrama Limitada, el *hub* puede emplear el método de acceso improvisado para enviar tramas *poll* y *post* en cualquier instante de la supertrama.

3.2.3. Método de Acceso Disponible en Modo No Beacon sin Supertrama

En este modo de operación, los nodos únicamente pueden emplear acceso no programado, llevando a cabo un procedimiento igual al presentado en el modo de operación anterior, sin embargo en este caso, el *hub* por medio del campo de Elemento de Información requerido, debe indicar a los nodos que la asignación es tipo II [13].

3.3. PARÁMETROS QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE LA RED BAN

Uno de los temas más importantes e incluso desafiantes en la red BAN, es proporcionar métodos de acceso que cumplan con los diversos requerimientos y consideraciones de QoS en términos de latencia, utilización del ancho de banda, *throughput* y fiabilidad, entre otros, presentes en este tipo de redes.

Los requerimientos que se tienen en cuenta para lograr un buen desempeño cuando los nodos acceden al medio en una red BAN se vuelven más o menos críticos dependiendo del ámbito de aplicación. Entre los más relevantes se encuentran, la necesidad de establecer una estructura de prioridad definida, tasas de datos entre 10 Kbps y 10 Mbps, latencia inferior a 125 ms en las aplicaciones de carácter médico y menor a 250 ms en las de carácter no-médico, tasa de error de tramas inferior al 10%, alta capacidad de tolerancia a fallas que minimice la pérdida de datos y bajo consumo de energía que maximice el tiempo de vida de los nodos.

Con el fin de examinar los aspectos de calidad a ser considerados en el acceso al medio de una red BAN, es necesario conocer los parámetros claves que en algún momento podrían afectar el desempeño normal de la misma, produciendo fallas y errores e incluso pérdidas de datos.

Producto del análisis realizado en el presente proyecto, se puede evidenciar que hay un gran conjunto de parámetros que pueden afectar el desempeño de la red BAN, de los cuales se resaltan los más relevantes en la Figura 3.12.

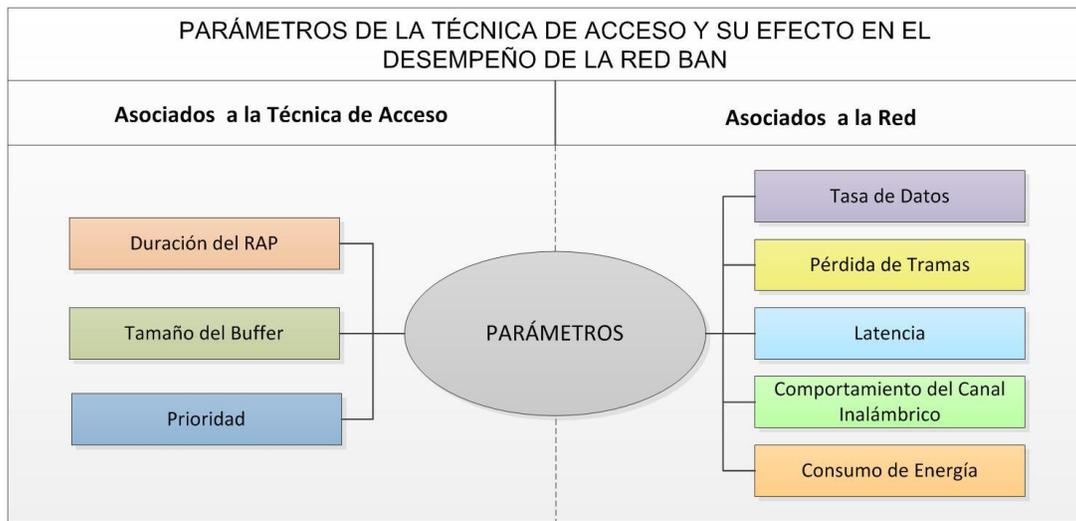


Figura 3.12. Parámetros de la técnica de acceso y su efecto en el desempeño de la red BAN. Por los Autores.

A continuación se describen los parámetros que encierran los problemas más críticos que pueden afectar el desempeño de cualquier BAN. Generalmente estos, se encuentran a nivel físico y sub-nivel MAC.

➤ ASOCIADOS A LA TÉCNICA DE ACCESO

▪ Duración del RAP

El RAP es una fase de acceso compuesta por un conjunto de ranuras de asignación, en la que el *hub* define un *Intervalo de asignación de contención*, que permite a los nodos competir para acceder al medio y transmitir sus tramas, razón por la cual, esta fase se asocia con un método de acceso aleatorio. Sin embargo, dado que el RAP no puede tener una duración nula en la supertrama, también está presente en los demás métodos de acceso [13].

El *hub* define el inicio y fin de la duración del RAP haciendo uso de la trama *beacon*, de tal forma que entre mayor duración se establezca, mayor será el tiempo que los nodos tendrán para contender por el canal y acceder al medio. Por el contrario, si la duración del RAP disminuye, se reduce también la posibilidad de que todos los nodos puedan acceder a esta fase, lo que conlleva a que haya una mayor probabilidad de colisiones entre los mismos, de pérdida de tramas y de retardo total en la red.

▪ Tamaño del *Buffer*

El *buffer* es un espacio físico de memoria, reservado para el almacenamiento temporal de información, cuyo tamaño se encuentra dado en número de tramas [39]. Todas las tramas de la red se almacenan dentro de un *buffer*, mientras están a la espera de procesamiento en el lado del receptor o justo antes de enviarlas hacia su destino.

Generalmente, para el procesamiento de las tramas, el *buffer* utiliza métodos de encolamiento que permiten manejar la congestión, controlando la inyección de tráfico en

la red, para que ciertos flujos tengan prioridad sobre otros. Entre los métodos de colas que pueden ser utilizados en la red BAN, se encuentran principalmente, el denominado Primero en entrar, Primero en salir (FIFO, *First In, First Out*), el Encolamiento de Prioridad (PQ, *Priority Queueing*), el Encolamiento Personalizado (CQ, *Custom Queueing*), entre otros [6].

En FIFO, la primera trama en entrar al *buffer* es la primera en salir, por lo tanto, este método no cuenta con mecanismos de diferenciación de tramas. Mientras que en PQ, existe una clasificación de colas desde alta a baja prioridad, donde cada trama dentro de la cola se procesa en estricto orden de importancia. En el caso de CQ, el administrador puede especificar el número de tramas que deben ser atendidas en la cola, asegurando una porción fija del ancho de banda para las mismas. CQ ofrece un mecanismo más refinado de encolamiento, pero no asegura la prioridad necesaria en la BAN como lo hace PQ.

Cuando existe interferencia en el medio, disminuye la entrega exitosa de tramas, causando retransmisiones y por ende más tramas almacenadas en el *buffer*, lo que se traduce en una mayor probabilidad de desbordamiento del mismo, provocando pérdida de tramas y alta latencia en el receptor.

- **Prioridad**

Fijar una estructura de prioridad dentro de la sub-capa MAC, es el procedimiento mediante el cual se realiza una clasificación de los datos en ocho categorías, acorde con su tipo de servicio, tal como se observó en la tabla 2.1.

Si los nodos acceden al canal utilizando un método de acceso aleatorio, los valores de prioridad se mapean dentro de una ventana de contención, de tal forma, que el acceso al medio estará dado principalmente en función de la prioridad. Por otra parte, si los nodos utilizan los métodos de acceso programado y no programado, la prioridad no se tiene en cuenta para acceder al medio [40].

Los nodos que tengan asignada las prioridades de datos más altas, tienen mayor opción de acceder al medio que los de prioridad baja y viceversa. Sin embargo, esto no asegura que la entrega de tramas sea completamente exitosa y que el desempeño de la red sea adecuado, es decir, que una prioridad alta no garantiza la fiabilidad necesaria, ni la latencia específica que exigen los estrictos requerimientos de QoS de la red BAN.

➤ **ASOCIADOS A LA RED**

- **Tasa de Datos**

La tasa de datos en la red BAN, se puede describir como la velocidad con la que viaja una determinada cantidad de tramas tipo datos, desde un dispositivo transmisor hasta un dispositivo receptor, durante un espacio de tiempo dado. Usualmente la tasa de datos se mide en bits por segundo [40].

En una BAN, las altas tasas de datos traen consigo algunos inconvenientes que pueden afectar el desempeño de la red, ya que si un nodo transmite a una tasa elevada, se hace

necesario ajustar la duración del RAP para evitar tramas erradas por congestión en el medio, e incrementar el tamaño del *buffer* para prevenir pérdida de tramas por desbordamiento.

▪ Pérdida de Tramas

La pérdida de tramas ocurre cuando una o más tramas de datos que viajan a través de la red, no llegan a su destino. Estas pérdidas pueden originarse debido a que el canal inalámbrico se ve afectado por muchos factores impredecibles, que degradan la señal cuando ésta atraviesa el medio, los cuales incluyen [40, 41].

- Desvanecimiento.
- Pérdidas de trayecto excesivas.
- Interferencia con otros sistemas inalámbricos.
- Congestión en el canal.
- Desbordamiento del *buffer*.
- Colisiones.
- Tramas defectuosas rechazadas en tránsito.

Además es importante considerar que en la red BAN, el cuerpo humano actúa como el canal de comunicación y como éste se compone principalmente de agua, la señal se atenúa considerablemente antes de llegar al receptor. Por tal motivo, en la BAN también se presentan pérdidas debidas a la absorción de potencia en el cuerpo, la cual se disipa en forma de calor [14].

De manera general, la pérdida de tramas en una red BAN, se asocia principalmente a una baja calidad del canal, a la congestión en el medio, al desbordamiento del *buffer* y a la falta de ACK.

Debido a que la pérdida de tramas puede tener un impacto considerablemente negativo en muchas de las aplicaciones de la red BAN, se deben implementar mecanismos complementarios de control de errores para recuperar los datos correctamente, en función de las características del canal y con el nivel de QoS deseado. Es por esto, que cuando se detecta pérdida de tramas, el *hub* solicita una retransmisión o el nodo automáticamente reenvía cualquier trama que no haya sido reconocida.

Sin embargo, también es importante señalar que la pérdida de tramas no siempre indica un problema, ya que sí el retardo total y el número de tramas perdidas presentan un nivel aceptable en el receptor, el *hub* puede omitir este aspecto. La cantidad aceptable de tramas perdidas depende del tipo de datos que se envíen.

▪ Latencia

Se denomina latencia o retardo total, a la sumatoria de todos los retardos temporales presentes dentro de la red. La latencia corresponde al tiempo que una trama tipo datos tarda en hacer el recorrido desde el dispositivo transmisor hasta el dispositivo receptor, el cual se mide ya sea en un solo sentido (el retardo total desde la fuente hasta el destino) o en doble sentido (el retardo total desde la fuente al destino, más el retardo total desde el destino de vuelta a la fuente). Sin embargo, en la red BAN la latencia solo puede ser

medida en un sentido, dado que únicamente los nodos son los que transmiten tramas tipo datos al *hub*.

La latencia puede caracterizarse por cuatro retardos [42]:

- *Retardo de Propagación*: se refiere al tiempo en que la señal de datos atraviesa el enlace desde el transmisor hasta el receptor. Este tiempo corresponde a la relación entre la longitud y la velocidad de propagación del enlace.
- *Retardo de Transmisión*: es el tiempo que transcurre entre la transmisión del primer bit y del último bit de una trama. Este tiempo depende del tamaño de la trama y de la tasa de datos del enlace.
- *Retardo de Procesamiento*: corresponde al tiempo transcurrido desde que se realiza el procesamiento de la cabecera MAC de una trama, hasta que ésta se asigna a una cola en el enlace de salida, para su correcta entrega al receptor.
- *Retardo de Encolamiento*: corresponde al tiempo en que una trama permanece en una cola antes de que sea entregada a su destino. Este tiempo depende de la cantidad de tramas almacenadas en el *buffer* y de la velocidad con la que éstas se procesan en la cola.

Es importante determinar con exactitud la latencia que existe en la ruta entre el origen y el destino para la red BAN, ya que ésta debe ser la más baja posible, especialmente si se trata de aplicaciones críticas que requieren comunicaciones en tiempo real. Sin embargo, algunas de las aplicaciones disponibles para este tipo de redes, pueden ser más tolerantes al retardo, al permitir valores más elevados del mismo.

Por otra parte, se debe tener cuidado con el nivel de latencia presente cuando existen muchas retransmisiones de tramas en la red BAN, debido a que el retardo asociado con este suceso, puede no ser capaz de mantener los límites de latencia impuestos en los requerimientos de la red BAN.

Un nivel de latencia aceptable puede ayudar a mejorar la fiabilidad y el consumo de energía en la red BAN [43].

▪ **Comportamiento del Canal Inalámbrico**

Una de las características del canal inalámbrico de la red BAN es su variabilidad, debida a aspectos relacionados con las propiedades físicas del cuerpo humano tales como la forma, la orientación y los cambios de postura, además de aspectos como el tipo de dispositivo y su respectiva ubicación [40] [9].

Estas variaciones en las características del canal son las que provocan que el comportamiento del mismo presente variaciones temporales, es decir, que se introducen varios efectos adversos de desvanecimiento al canal. Los cuales pueden degradar el desempeño de la red BAN, al incrementar la latencia con la que las tramas llegan al receptor.

Cuando el comportamiento del canal inalámbrico no presenta variaciones temporales, se dice que éste se encuentra en condiciones ideales.

- **Consumo de Energía**

La sub-capa MAC además de coordinar el acceso al medio de los nodos para asegurar la fiabilidad requerida, también es responsable de minimizar el consumo de energía de la red. Razón por la cual, el método de acceso al medio de una red BAN debe ser altamente eficiente en energía.

El consumo de energía en la red BAN se puede dividir en tres dominios principales: sensado, comunicación inalámbrica y procesamiento de datos, de éstos, la comunicación inalámbrica es la que más consume energía dentro de la red. Por lo tanto, se hace necesario reducir al mínimo las operaciones de transmisión y recepción, para maximizar la vida útil de los dispositivos [21].

Prolongar el tiempo de vida de los dispositivos es un tema crítico para la red BAN, ya que los nodos portables e implantados son alimentados por baterías que tienen una capacidad restringida. El tamaño de la batería usada para almacenar la energía, es en la mayoría de los casos, el factor que más contribuye en el peso y la dimensión de los dispositivos. Como consecuencia de esto, las baterías deben mantenerse de tamaño reducido y el consumo de energía debe ser optimizado [14].

A diferencia de otras redes inalámbricas, en la red BAN generalmente es muy tedioso y poco práctico cargar o sustituir las baterías agotadas. Por ejemplo, la batería que alimenta un dispositivo implantado utilizado en una aplicación de carácter médico, debe tener idealmente una vida útil de aproximadamente 10 años. Es por esta razón, que el tiempo de vida de las baterías define la vida útil de los nodos [21].

La eficiencia energética requerida en la red BAN se puede alcanzar por dos vías diferentes: diseñando un hardware de baja potencia y utilizando un método eficiente de acceso al medio.

Los parámetros descritos anteriormente indican que éstos de forma individual o conjunta pueden afectar el desempeño de la red BAN en mayor o menor grado. Por lo tanto, es importante darles prioridad en el análisis que se realice del funcionamiento de la red, con el fin de determinar los valores adecuados de cada factor, que permitan lograr un desempeño aceptable.

En el siguiente capítulo se definirán los escenarios de trabajo y el plan de pruebas a seguir, dándole inicio a la simulación con el fin de evaluar los principales parámetros de la técnica de acceso que afectan el desempeño de la red BAN.

4. CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se describe la metodología de simulación, se definen los escenarios y casos que permitirán evaluar el desempeño de la red y se elige la herramienta software para el desarrollo del proyecto en cuestión. Inicialmente, se toman dos escenarios, en los cuales se utiliza la técnica de acceso aleatorio CSMA/CA descrita en el capítulo anterior y se presentan los resultados con su correspondiente evaluación en términos de análisis de tramas en el sub-nivel MAC, Tasa de Error de Trama (FER, *Frame Error Rate*), latencia a nivel de aplicación y consumo de energía.

Posteriormente, se presenta un tercer escenario de simulación en el que se emplea acceso programado y se analizan los resultados en los mismos términos de los escenarios anteriores. Esto con el fin de tener dos visiones distintas que permitan hacer una comparación de cómo estas técnicas de acceso afectan el desempeño de una red BAN.

4.1. SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Las herramientas de simulación candidatas deben ser adecuadas para modelar redes de sensores de baja potencia, como es el caso de la red BAN y deben cumplir con los siguientes requerimientos mínimos:

- Soporte para comunicaciones inalámbricas.
- Soporte de protocolos MAC, especialmente el del estándar IEEE 802.15.6.
- Soporte de métodos de acceso de la red BAN.
- Generación de resultados que permitan obtener información para estadísticas.

Se realizó una evaluación de 3 herramientas de simulación que cumplen con los anteriores requisitos: NS2, MiXiM y Castalia. Éstas serán descritas brevemente a continuación.

4.1.1. NS2 (Network Simulator) [44, 45]

Es una herramienta de simulación orientada a objetos, de código libre, utilizada principalmente en ambientes académicos y cuenta con abundante documentación en línea. Permite realizar pruebas para la validación de protocolos y aplicaciones de red, simulación para TCP/UDP, enrutamiento y *multicast* sobre redes cableadas o inalámbricas.

NS2 también permite simular diferentes protocolos inalámbricos y arquitecturas de red entre las que incluye redes WLAN, redes WSN, Redes Ad-Hoc Móviles (MANET, *Mobile Ad-Hoc Networks*) y redes satelitales. Para las redes de sensores inalámbricas, NS2 incluye, canales de sensores, modelos de baterías, pila liviana de protocolos, soporte para simulaciones híbridas y herramientas de generación de escenarios.

NS2 está implementado en lenguaje C++ y usa otro lenguaje interpretado llamado OTcl. La mayoría de los scripts utilizados en simulaciones están desarrollados en lenguaje Tcl y sirven para definir la topología de red, los elementos que la componen, su configuración y funcionamiento.

El análisis de resultados que entrega el simulador es limitado, la mayor parte debe realizarse de forma manual o con herramientas de terceros, ya que este simulador solo entrega archivos de texto que contienen los eventos que ocurren durante la simulación.

Esta herramienta cuenta con extensiones que permiten agregarle funciones, protocolos y mecanismos en un tiempo razonable. Una de esas extensiones añade el soporte para el protocolo IEEE 802.15.4 (*ZigBee*), sin embargo actualmente no está implementado el estándar IEEE 802.15.6 propio de la red BAN.

4.1.2. MiXiM [46]

Es un simulador mixto de código libre que combina los enfoques de varias herramientas de simulación existentes, desarrolladas para las redes WSN, redes BAN, Redes Ad-Hoc Vehiculares (VANET, *Vehicular Ad-Hoc Network*), entre otras, en OMNeT++. MiXiM provee modelos detallados para el canal inalámbrico, la conectividad inalámbrica, la movilidad de los nodos, la estimación de interferencia, el consumo de potencia y muchos protocolos de comunicación especialmente a sub-nivel MAC.

Esta herramienta introduce extensiones únicas como:

- Soporte completo para gráficas en 3D.
- Modelos de paredes y obstáculos que influyen en la movilidad y la atenuación de las señales radio.
- Diferentes frecuencias y medios de transmisión (ondas radio, ultrasonido).
- Soporte para múltiples canales en espacio y frecuencia, lo que permite simulaciones de sistemas con Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y sistemas de Múltiples Entradas, Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*).
- Soporte para una gran variedad de protocolos MAC, que incluye el IEEE 802.15.4.

MiXiM está previsto para soportar simulaciones de redes de sensores con más de 1000 nodos, con un bajo consumo de memoria y con una estructura modular. Además, provee una interfaz gráfica de configuración amigable al usuario, que le ayuda a elegir los módulos adecuados, los apila en capas y permite asignar valores a sus parámetros, de tal forma que una misma simulación puede llevarse a cabo con un simple modelo de pérdidas de trayecto o con modelos complejos de desvanecimiento, sólo mediante la adición o eliminación de los módulos apropiados en el archivo de configuración.

En cuanto a la capa MAC, provee 2 implementaciones de ésta: *CSMAMacLayer*, para las redes PAN (IEEE 802.15.4); y *MAC80211*, para las redes de área local inalámbrica (IEEE 802.11b/g *family*). Sin embargo, MiXiM aún no soporta el protocolo MAC del estándar 802.15.6 característico de la red BAN.

La estructura modular de MiXiM permite un alto grado de reutilización y una combinación casi arbitraria de modelos que también hace que sea fácil implementar nuevos protocolos MAC. No obstante, la documentación en línea de este simulador es escasa.

4.1.3. Castalia [39]

Castalia es un simulador desarrollado para redes de sensores inalámbricas, redes de área corporal y en general para redes de dispositivos embebidos de baja potencia. Está basado en la plataforma OMNeT++ y cuenta con una comunidad activa de usuarios y desarrolladores, ya que permite probar protocolos o algoritmos distribuidos en un modelo real de canal inalámbrico y con un comportamiento real de los nodos en el módulo radio.

Castalia ha sido desarrollado desde el año 2006 por el ministerio de Tecnologías de Información y Comunicación Nacional de Australia (NICTA, *National Information and Communications Technology Australia*). Desde el 2007 se hizo público como un proyecto de código libre bajo una licencia académica gratuita.

Las principales características de castalia son:

- Modelo de Canal Avanzado: basado en datos medidos empíricamente, en el cual se definen:
 - Un mapa de pérdidas de trayecto en lugar de conexiones simples entre los nodos.
 - Un modelo complejo para variación temporal del canal.
 - Soporte completo para la movilidad de los nodos.
 - La interferencia se trata como la intensidad de la señal recibida y no como una función independiente.
- Modelo de Radio Avanzado: basado en radiotransceptores reales para comunicaciones de baja potencia, que incluye las siguientes características:
 - La probabilidad de recepción se basa en la relación señal a ruido más interferencia (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*), en el tamaño de los paquetes y en el tipo de modulación.
 - Múltiples estados, tales como transmitir, recibir/escuchar y dormir.
 - Retardo de transmisión de un estado a otro.
 - Múltiples niveles de potencia de transmisión, que a su vez son configurables.
 - Diferente consumo de potencia para cada estado y nivel de potencia de transmisión usado.
 - Modelo realista del Indicador de Intensidad de la Señal Recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) y de la detección de portadora.
- Mecanismo de sincronización para los nodos.
- Protocolos MAC disponibles.
- Diseño que permite adaptación y expansión.

Una ventaja de este simulador es que NICTA tiene un proyecto a gran escala con la red BAN, en el que participa conjuntamente con el TG6 o grupo de trabajo del estándar IEEE 802.15.6. Con lo cual se busca que en relación con el canal inalámbrico, Castalia sea el simulador más realista para la red BAN, al modelar las pérdidas de trayecto promedio entre los nodos y las variaciones temporales del canal basadas en mediciones reales en el cuerpo humano.

Castalia proporciona una arquitectura basada en módulos que cuentan con relaciones jerárquicas establecidas, es decir, que los módulos contienen submódulos y estos a su vez, contienen aplicaciones. Los submódulos básicos son programados en C++ para luego ensamblarse en otros componentes más grandes (módulos), usando un lenguaje de alto nivel (*NED – Network Descriptor*). La jerarquía completa de archivos .NED define la estructura general del simulador Castalia.

El protocolo de control de acceso al medio es una parte importante de Castalia, por lo tanto existen 4 módulos separados que definen los protocolos MAC implementados, cada uno con parámetros diferentes:

- Tunable MAC.
- TMAC.
- IEEE 802.15.4 MAC.
- IEEE 802.15.6 *Draft Proposal for BAN*.

Este simulador cuenta con un excelente conjunto de herramientas para el análisis de resultados, que incluye una amplia variedad de gráficas, estadísticas, diagramas de tiempo, múltiples filtros, entre otros.

La Tabla 4.1, resume las características de las herramientas de simulación descritas, éstas serán usadas como base para la elección del simulador.

	NS2	MiXiM	Castalia
Soporta IEEE 802.15.6 MAC	No	No	Si
Soporta Técnicas de acceso de la red BAN	No	No	Si
Dificultad para implementar IEEE 802.15.6	Desconocido	Fácil	-
Extensible mediante módulos	Si	Si	Si
Creación de escenarios gráficamente	Funcionalidad básica mediante la herramienta externa <i>Network Animator</i> , NAM	Si	No
Licencia	Código libre	Código libre	Código libre
Análisis de resultados	No	Si	Si

Tabla 4.1 . Tabla comparativa con las características de las herramientas de simulación. Por los Autores.

Aunque las 3 herramientas de simulación analizadas tienen licencia gratuita y son extensibles mediante módulos, NS2 ni MiXiM fueron tenidas en cuenta en la elección, principalmente porque no soportan el protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.6, ni las técnicas de acceso disponibles para la red BAN.

Particularmente hubo interés en Castalia por las siguientes razones:

- Es una herramienta creada recientemente, con pocos años en el campo de la investigación académica, pero es la más completa para lograr una simulación realista de la red BAN.
- Cuenta con soporte para IEEE 802.15.6 MAC, por lo que no hay necesidad de implementar nuevos módulos.
- A diferencia de NS2 y MiXiM, soporta algunas de las técnicas de acceso de la red BAN.
- Las herramientas con las que cuenta Castalia para el análisis de resultados son potentes, lo que permite evaluar diferentes parámetros a profundidad.
- A pesar de que no permite la creación de escenarios gráficamente, la configuración de los mismos por medio de código se realiza con facilidad.

Con base en lo anterior, se seleccionó como herramienta de trabajo al simulador Castalia porque es el más adecuado para realizar el análisis de la técnica de acceso y poder determinar su desempeño en el contexto de las BAN.

4.2. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La metodología de simulación adoptada para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, se basa en [47, 48] y consta de los pasos descritos a continuación:

- a. Definición de los escenarios y casos de simulación: se definen los escenarios implementados con sus casos de simulación y sus respectivos parámetros, a partir de los cuales se ejecutarán las pruebas de simulación.
- b. Definición de las características de los escenarios de simulación: se presentan los parámetros a nivel MAC y a nivel Físico definidos en los escenarios para la ejecución de las pruebas.
- c. Ejecución de las pruebas de simulación: con los escenarios, los casos y los parámetros completamente definidos, se ejecutarán las pruebas de simulación.
- d. Análisis de resultados: teniendo en cuenta los parámetros de desempeño a evaluar y finalizada la ejecución de las pruebas de simulación, se presentan los resultados arrojados por el simulador con su análisis correspondiente.

4.2.1. Definición de los Escenarios y Casos de Simulación

Para analizar los principales parámetros que afectan el desempeño de una red BAN, se proponen 3 escenarios de simulación; el primero consta de 2 casos (o condiciones) de simulación, el segundo consiste de 3 casos y el último solo de 1. En el escenario No. 1 y No. 2, los nodos acceden al medio empleando la técnica de acceso aleatorio CSMA/CA, mientras que en el escenario No. 3 éstos utilizan Acceso Programado.

El escenario No.1 se caracteriza por que los nodos se distribuyen espacialmente alrededor del *hub* de manera equidistante, mientras que en el escenario No. 2 y No. 3 los nodos se ubican en partes específicas del cuerpo, distribuidos alrededor del *hub*. Esto con el fin de observar el efecto que produce la distancia en el desempeño de la red BAN y de evaluar el comportamiento de los diferentes parámetros bajo esta condición.

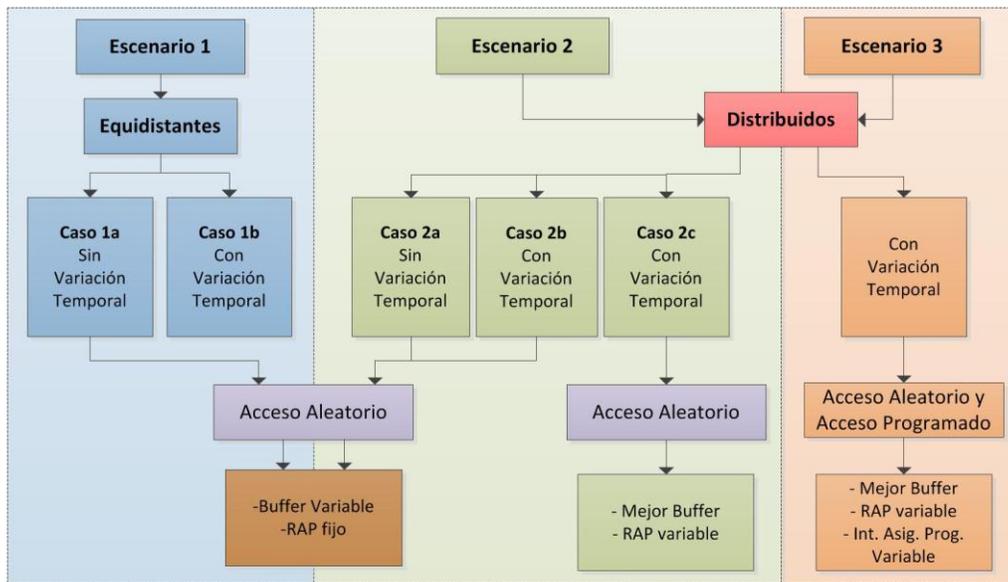


Figura 4.0. Descripción General de los Escenarios. Por los Autores.

Para establecer el protocolo MAC a usar en todos los casos de simulación, se emplea el archivo de configuración denominado *BANtest*, que permite simular una variedad de escenarios que evalúan la sub capa MAC de una red BAN. Este archivo contiene un sub módulo llamado *BaselineBANMac*, en el cual se definen los parámetros del protocolo de comunicación IEEE 802.15.6.

4.2.1.1. Escenario de Simulación No.1

En este escenario se definió una red BAN conformada por un *hub* y cinco nodos *on-body*, los cuales se ubicaron de manera equidistante configurando una topología física en estrella, con iguales pérdidas de trayecto entre los enlaces. Adicionalmente, se asignó una tasa de datos y una prioridad específica para cada nodo, con el ánimo de caracterizar el ambiente real de una BAN médica y evaluar el efecto que estos parámetros generan en la red.

La figura 4.1 muestra la topología física de este escenario de simulación.

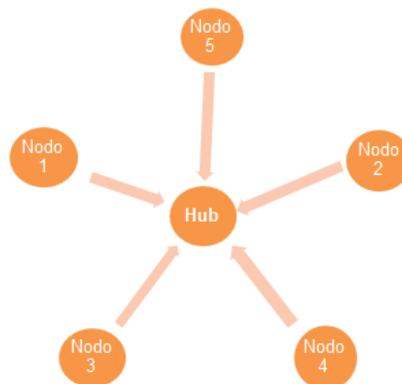


Figura 4.1. Topología de la red del Escenario 1. Por los autores.

Para definir iguales pérdidas de trayecto entre los enlaces de este escenario, se promediaron los valores del mapa de pérdidas contenido en el archivo de configuración “*pathlossmap.txt*” del simulador, el cual es resultado de las mediciones experimentales realizadas por NICTA, empleando sensores reales en el cuerpo humano.

Las pérdidas de trayecto en los enlaces del escenario No. 1, se muestran en la tabla 4.2.

	Hub	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5
Hub	n/a	53	53	53	53	53
Nodo 1	53	n/a	53	53	53	53
Nodo 2	53	53	n/a	53	53	53
Nodo 3	53	53	53	n/a	53	53
Nodo 4	53	53	53	53	n/a	53
Nodo 5	53	53	53	53	53	n/a

Tabla 4.2. Pérdidas de trayecto entre los nodos y el *hub* para el escenario de simulación No.1. Valores en [dB].

4.2.1.2. Escenario de Simulación No.2

Este consta de un *hub* y 5 nodos *on-body* ubicados de manera distribuida sobre el cuerpo humano en una topología física en estrella, en la cual el *hub* se encuentra situado en el lado derecho de la cadera, el nodo 1 en la muñeca izquierda, el nodo 2 en la muñeca derecha, el nodo 3 en el tobillo izquierdo, el nodo 4 en el tobillo derecho y el nodo 5 en el pecho, como se observa en la figura 4.2.

Cabe destacar que la ubicación de los nodos descrita anteriormente, es la misma que utilizó NICTA para llevar a cabo las pruebas experimentales que permitieron definir el mapa de pérdidas de trayecto y el modelo de variación temporal del canal.

En este escenario se definen diferentes distancias entre los nodos y el *hub*, para tratar de determinar si el efecto de la misma mejora o degrada los parámetros de desempeño. De manera similar al escenario No. 1, se define la estructura de prioridad y las tasas de datos para cada nodo.

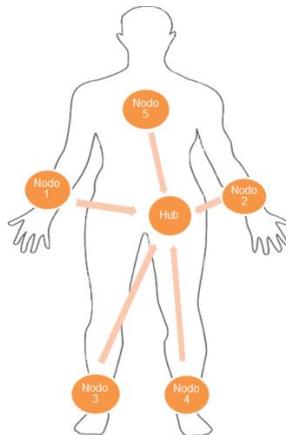


Figura 4.2. Topología de la red del escenario 2. Por los autores.

A continuación se muestra la tabla 4.3, la cual fue tomada del archivo de configuración de Castalia “*pathLossMap.txt*”.

	Hub (Cadera)	Nodo 1 (Muñeca Izquierda)	Nodo 2 (Muñeca Derecha)	Nodo 3 (Tobillo izquierdo)	Nodo 4 (Tobillo derecho)	Nodo 5 (Pecho)
Hub (Cadera)	n/a	56	40	59	54	58
Nodo 1 (Muñeca Izq.)	56	n/a	52	52	58	61
Nodo 2 (Muñeca Der)	40	52	n/a	58	54	61
Nodo 3 (Tobillo izq.)	59	52	58	n/a	50	63
Nodo 4 (Tobillo der.)	54	58	54	50	n/a	63
Nodo 5 (Pecho)	58	61	61	63	63	n/a

Tabla 4.3. Pérdidas de trayecto entre los nodos y el *hub* para el escenario de simulación No. 2. Valores en [dB].

4.2.1.3. Escenario de Simulación No. 3

En el escenario No. 3, la ubicación de los nodos en el cuerpo, las pérdidas de trayecto entre los enlaces, las prioridades y tasas de datos son iguales a las definidas en el escenario No. 2. Sin embargo, en este escenario coexisten dos técnicas de acceso, ya que se emplea acceso programado en conjunto con CSMA/CA.

4.2.2. Definición de las Características Técnicas de los Escenarios de Simulación

Teniendo en cuenta la ubicación de los nodos en el cuerpo y los parámetros fisiológicos más relevantes que deben ser evaluados para diagnosticar la salud de un paciente, se definieron diferentes aplicaciones para cada nodo, con sus respectivos valores de tasa de datos y prioridad. La tasa de datos se obtiene a partir del número de tramas transmitidas por segundo, las cuales tienen un tamaño de 1000 bits, de este modo, 1 trama por segundo corresponde a 1000 bps y así sucesivamente.

Para el nodo 1 se seleccionó un óxímetro de pulso que permite de manera no invasiva registrar alteraciones en los niveles de oxigenación de la sangre en pacientes con enfermedades respiratorias crónicas.

Para el nodo 2 se escogió un monitor de presión sanguínea, ya que este monitorea uno de los principales signos vitales y permite diagnosticar enfermedades usuales en la población mundial como la hipertensión (presión sanguínea elevada) y la hipotensión (presión sanguínea baja).

En el nodo 3, se definió un monitor de tensión muscular que registra la contracción de los músculos. Cuando los músculos se contraen, surge un producto de desecho del metabolismo muscular llamado ácido láctico que puede alcanzar niveles elevados y ser tóxico en el organismo, deteriorando la salud y vitalidad del paciente.

Para el nodo 4 se seleccionó un monitor de glucosa, el cual permite diagnosticar enfermedades como la hipoglucemia y la diabetes, presente en un alto número de pacientes.

Finalmente, para el nodo 5 se escogió un ECG, encargado de monitorear la actividad eléctrica del corazón, para el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares, alteraciones metabólicas y la prevención de una muerte súbita cardíaca.

Una vez definidas las aplicaciones de la BAN, se asignaron las tasas de datos para cada una de ellas, con el fin de inyectar tráfico en la red y evaluar el efecto de este parámetro en los escenarios. La tasa de datos del oxímetro de pulso y del monitor de tensión muscular, se estableció con base en [49], la del monitor de presión sanguínea se definió con respecto a [50], la del monitor de glucosa se seleccionó de [14] y la del ECG fue tomada de [19].

Adicionalmente, se asignaron diferentes prioridades para el tráfico generado por los nodos, acorde a la importancia de las aplicaciones definidas, esto con el fin de caracterizar la estructura de prioridad de la BAN y analizar el efecto de este parámetro en el acceso al medio de los nodos. Los valores de prioridad se establecieron según la tabla 2.1 y con base en una entrevista personal realizada al Doctor Marcos Ocampo y a la estudiante de Medicina de noveno semestre Alejandra Merchan.

Las aplicaciones y sus características se presentan en la tabla 4.4.

	Tipo de Aplicación	Tasa de Trama	Prioridad
Nodo 0	<i>Hub</i>	n/a	n/a
Nodo 1	Oxímetro de Pulso	0.5 Tramas/s	5
Nodo 2	Monitor de Presión Sanguínea	3 Tramas/s	6
Nodo 3	Monitor de Tensión Muscular	5 Tramas/s	2
Nodo 4	Monitor de Glucosa	2 Tramas/s	3
Nodo 5	ECG	36 Tramas/s	7

Tabla 4.4. Aplicaciones y características definidas para cada nodo. Por los autores.

Los parámetros técnicos de los escenarios y de los casos de simulación se encuentran descritos en la tabla 4.5.

	ESCENARIO NO. 1		ESCENARIO NO. 2			ESCENARIO NO. 3
CASOS	Caso 1a	Caso 1b	Caso 2a	Caso 2b	Caso 2c	
	Sin Variación Temporal	Con Variación Temporal	Sin Variación Temporal	Con Variación Temporal	Con Variación Temporal, Mejor <i>Buffer</i> , Variación del RAP	Con Variación Temporal, Mejor <i>Buffer</i> , Variación del RAP y del Int. Asig. Programado
PARÁMETROS						
Distancia entre nodos	Equidistantes		Distribuidos			
Tamaño del <i>Buffer</i>	Variable: 16,32,64,128 [Tramas]				64 Tramas	
Duración de Ranura de Asignación	10 ms					
Duración del RAP	8 Ranuras				Variable [4,8,12,...,32] Ranuras	Variable [2,7,12,17,22] Ranuras
Duración del Int. de Asig. Programado	No Aplica					Variable [2,3,4,5,6] Ranuras
Prioridad	Definida en la tabla 4.4					
Tasa de Datos	Definida en la tabla 4.4					
Método de Acceso	CSMA/CA					CSMA/CA y Acceso Programado
Protocolo	IEEE 802.15.6					
Modo de Acceso	Modo <i>Beacon</i> con Supertrama Limitada por Tramas <i>Beacon</i>					
Long. de la ranura de asignación	10 ms					
Duración de la supertrama	320 ms					
Cabecera	7 bytes					
SIFS	0.03 ms					
Frecuencia de Portadora	2400 MHz (Banda ISM)					
Ancho de Banda	20 MHz					
Modulación	QPSK Diferencial					
Potencia de Tx.	- 15 dBm					
Bits por símbolo	2 Bits					
Sensitividad de los nodos	- 87 dBm					
Ruido de piso	- 104 dBm					

Tabla 4.5. Parámetros de red a nivel MAC y nivel Radio. Por los autores.

4.2.3. Ejecución de las Pruebas de Simulación

La ejecución de las pruebas de simulación se realizó utilizando la aplicación de Castalia denominada *Throughput Test*, en la cual, todos los nodos transmiten sus tramas a una tasa constante hacia al *hub*, durante un tiempo de simulación por defecto de 50 segundos. Con el fin de aumentar el nivel de confianza de los datos obtenidos, se ejecutó cada simulación con 300 iteraciones.

4.2.4. Análisis de Resultados

4.2.4.1. Escenario de Simulación No. 1

4.2.4.1.1. Caso 1a: Canal Sin Variación Temporal

En el caso 1a se simuló el escenario No.1 sin variaciones temporales del canal, es decir, sin presencia de desvanecimientos aleatorios producidos por las condiciones cambiantes del mismo. Sin embargo, sí se presentan las pérdidas de trayecto definidas en la tabla 4.2. Adicionalmente se varió el tamaño del *buffer* en recepción, como lo indica la tabla 4.5.

▪ Análisis de Tramas MAC

En la figura 4.3 se presenta un análisis porcentual del promedio de las tramas totales recibidas exitosamente y de las tramas totales erradas en el *hub*, utilizando diferentes tamaños del *buffer*. Para las tramas exitosas, se presenta el porcentaje de las recibidas en un primer intento y en dos o más intentos, mientras que para las tramas erradas, se muestra el porcentaje de tramas fallidas debido a canal ocupado o a la falta de ACK desde el *hub*. Igualmente, se observa que al variar el tamaño del *buffer* en recepción, el promedio de las tramas totales recibidas exitosamente y de las tramas totales erradas, no presenta ninguna variación. Además, no se observan tramas erradas por desbordamiento del *buffer*.

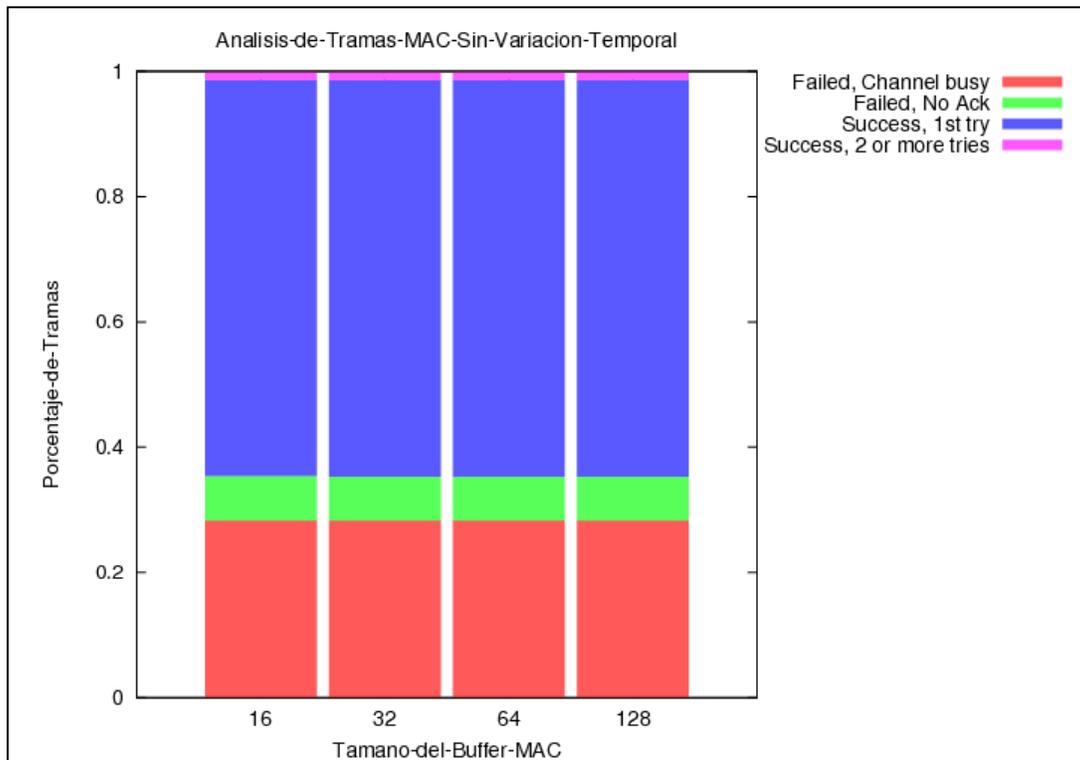


Figura 4.3. Caso 1a. Análisis del promedio de tramas totales para diferentes tamaños de *buffer*.

La figura 4.4, muestra el análisis de las tramas para cada nodo en el caso 1a, donde pese a que la distribución de los nodos en el escenario es equidistante y presentan iguales pérdidas de trayecto, el número de tramas recibidas exitosamente y el número de tramas erradas es distinto para cada nodo. Esto se debe a que los nodos poseen diferentes tasas de datos y prioridades. Sin embargo, se observa que el desempeño de las tramas por nodo se mantiene constante al variar el tamaño del *buffer*.

Similarmente la figura 4.4 muestra que los nodos con las mayores tasas de datos (superiores a 5 tramas/segundo), presentan tramas erradas por canal ocupado, como es el caso de los nodos 3 y 5. Mientras que para los otros nodos solo se observan tramas erradas por falta de ACK, las cuales pueden deberse a interferencias en el canal inalámbrico, a baja sensibilidad en el receptor o a que el *hub* no se encontraba listo para recibir tramas desde un determinado nodo en ese instante.

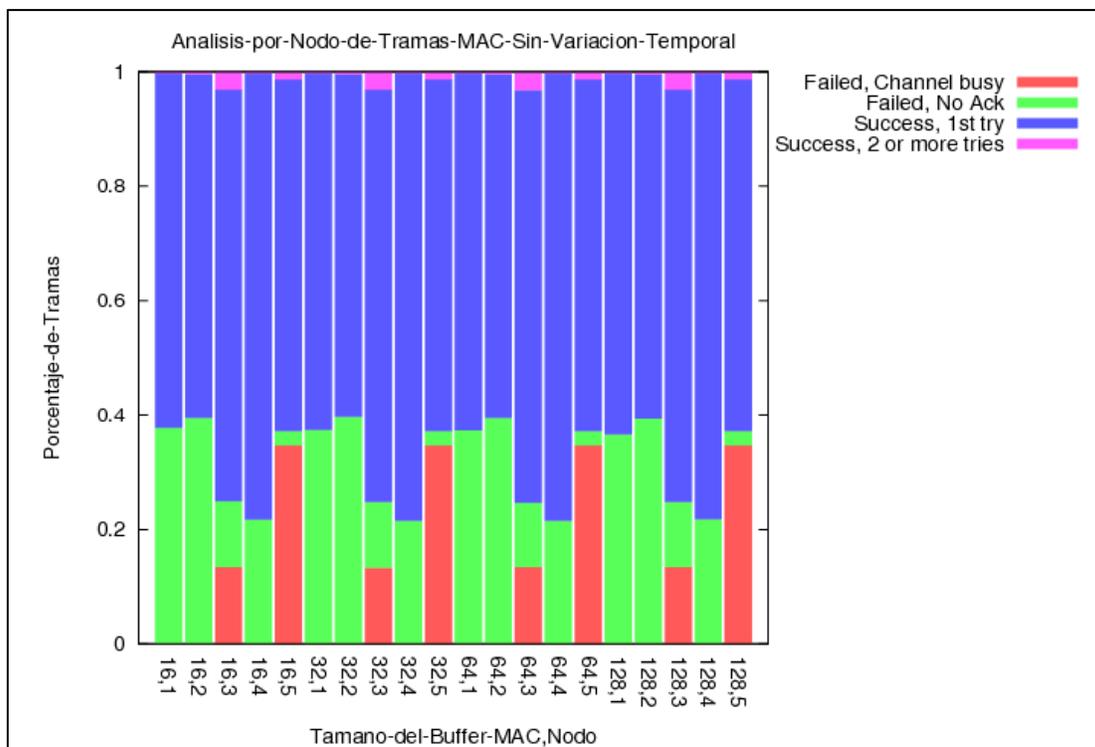


Figura 4.4. Caso 1a. Análisis de tramas por nodo para diferentes tamaños de *buffer*.

Después de realizar el análisis anterior, se presentan las tablas 4.6 y 4.7, las cuales muestran los resultados numéricos del análisis de tramas visible en las figuras 4.3 y 4.4 respectivamente. En las tablas se incluye la suma total de tramas recibidas exitosamente en el *hub* en cualquier intento y la suma total de tramas erradas por las posibles fallas. De manera similar, se presenta el cálculo de la tasa de error de trama, el cual se realizó con base en la siguiente fórmula [51]:

$$FER_{[\%]} = \frac{\text{Total Tramas Erradas}}{(\text{Total Tramas Erradas} + \text{Total Tramas Recibidas})} \times 100\%$$

En la tabla 4.6 se observa un comportamiento constante de la FER al variar el tamaño del *buffer*, lo que indica que el desempeño de la red en términos de este parámetro no se ve afectado.

Tamaño del Buffer [No de Tramas]	Tramas Erradas				Tramas Recibidas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
Buffer=16	0	131	33	164	293	6	299	35,42
Buffer=32	0	131	33	164	293	6	299	35,42
Buffer=64	0	131	33	164	294	6	300	35,34
Buffer=128	0	131	33	164	293	6	299	35,42

Tabla 4.6. Caso 1a. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes valores de *buffer*. Por los Autores.

Debido a que las tramas no presentan cambios al variar el *buffer*, se escogió un tamaño intermedio (64 tramas) para éste, con el fin de analizar la FER en los diferentes nodos con un tamaño de *buffer* fijo.

En la tabla 4.7 se observa que los valores de la FER son mayores a los que se esperan en una red BAN, ya que según los requerimientos éstos deberían ser inferiores al 10%. Los altos valores de la FER se deben a las pérdidas de trayecto definidas para este escenario.

Buffer, Nodo, Prioridad	Tramas Erradas				Tramas Recibidas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
Buffer=64, Nodo 1, Prioridad 5	0	0	9	9	15	0	15	37,50
Buffer=64, Nodo 2, Prioridad 6	0	0	59	59	90	1	91	39,33
Buffer=64, Nodo 3, Prioridad 2	0	33	28	61	180	8	188	24,50
Buffer=64, Nodo 4, Prioridad 3	0	0	21	21	77	0	77	21,43
Buffer=64, Nodo 5, Prioridad 7	0	624	45	669	1106	22	1128	37,23

Tabla 4.7. Caso 1a. Análisis de tramas y FER por nodo para un tamaño de *buffer* fijo. Por los Autores.

Con estos datos, se aprecia que una prioridad alta o baja no garantiza que la entrega de tramas sea completamente exitosa, es decir, que la prioridad de los datos no genera un valor bajo de la FER. De manera similar, se puede inferir que ocurre lo mismo con la tasa de datos, puesto que no se encuentra relación de un porcentaje de FER bajo para valores de tasa de datos específicos.

De la tabla 4.7 también se puede advertir que los nodos con las prioridades más altas de la red (nodo 2 y 5), presentan mayores tramas erradas por falta de ACK. Esto es debido a que por su condición cuentan con los intervalos más cortos de la ventana de contención (ver tabla 3.1) y que para este caso se tiene un tamaño de RAP muy pequeño (8 ranuras) para transmitir sus tramas y esperar un acuse de recibo.

Similarmente, se corrobora que los nodos con las tasas de datos más altas de la red (nodo 3 y 5), son los únicos que presentan tramas erradas por canal ocupado. Este comportamiento es debido a que en este caso se tiene un RAP de tamaño reducido y a que estos nodos transmiten de una manera más seguida en el tiempo, generando congestión en el medio.

- **Latencia**

La figura 4.5 es un histograma que indica el número de tramas recibidas desde todos los nodos (eje Y), en diferentes intervalos de tiempo que corresponden a la latencia en ms (eje X). En ésta se observa que para los tamaños de *buffer* empleados, la latencia de las tramas no varía.

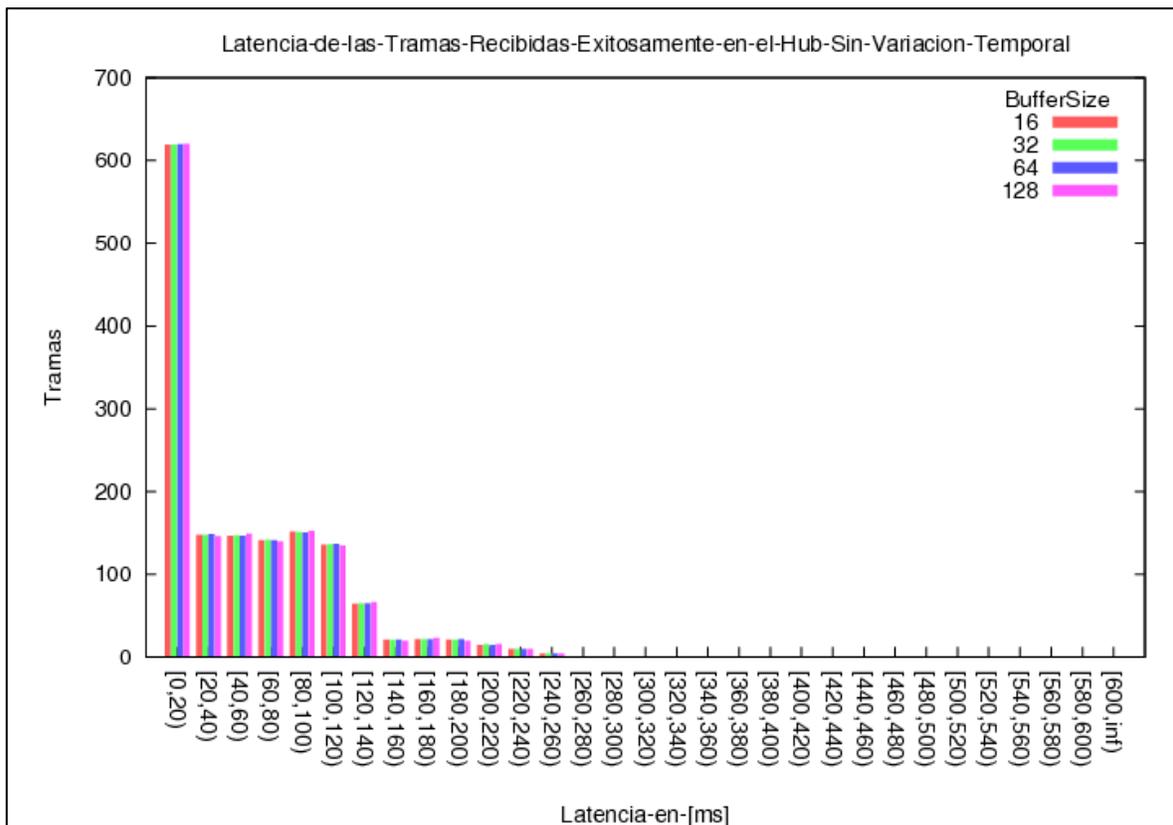


Figura 4.5. Caso 1a. Latencia del total de tramas.

La figura 4.5 muestra que aproximadamente 600 tramas se reciben exitosamente con una latencia entre 0 y 20 ms, alrededor de 150 se reciben con una latencia entre 20 y 40 ms y así sucesivamente.

Los requerimientos técnicos de la red BAN, expresan que para asegurar las condiciones óptimas de QoS, la latencia debe ser inferior a 125 ms en aplicaciones de carácter médico [5]. Con base a ello, se considera que la red simulada en el caso 1a, cumple con los requerimientos de latencia de una BAN médica, puesto el número de tramas que

presentan un retardo total superior al valor indicado, es tan bajo que no alcanza a impactar el desempeño de la red.

4.2.4.1.2. Caso 1b: Canal Con Variación Temporal

En este caso se simuló el escenario No.1 con variaciones temporales en el canal inalámbrico, las cuales introducen desvanecimientos pronunciados en ambientes que cambian rápidamente como los experimentados en la red BAN. Las variaciones temporales pueden ser descritas por medio de numerosos modelos teóricos que toman sus nombres de una determinada función compleja, entre los que se encuentran *Rayleigh*, *Weibull*, *Nakagami*, *Gamma* y *lognormal*, sin embargo, NICTA encontró que no hay un único modelo que describa de manera clara las variaciones temporales alrededor del cuerpo humano, por lo que implementó su propio modelo [39].

- **Análisis de Tramas MAC**

La figura 4.6 muestra el análisis porcentual del promedio de las tramas totales en el *hub* y la figura 4.7 presenta en porcentaje, el análisis de las tramas MAC por nodo. Es de notar que en la leyenda de estas figuras aparece una nueva clasificación para tramas erradas, la cual se refiere a las tramas que fallan debido al desbordamiento del *buffer* (línea roja).

Debido a que en este caso las tramas erradas por desbordamiento del *buffer* son inapreciables en las gráficas, de la figura 4.7 se abstraer el número de tramas exitosas y el número de tramas erradas incluyendo las fallidas por desbordamiento. Estos valores se pueden apreciar en la tabla 4.8.

En la figura 4.6 se observa que al igual que en el caso 1a, el porcentaje de tramas exitosas y de tramas erradas no presenta ninguna variación a medida que se incrementa el tamaño del *buffer*.

El análisis de la figura 4.7 concuerda con lo expresado para el caso 1a, ya que pese a que el canal inalámbrico tiene variaciones temporales, solo los nodos con las mayores tasas de datos presentan tramas erradas por canal ocupado, mientras que los nodos con menores tasas de datos, presentan fallas por falta de ACK.

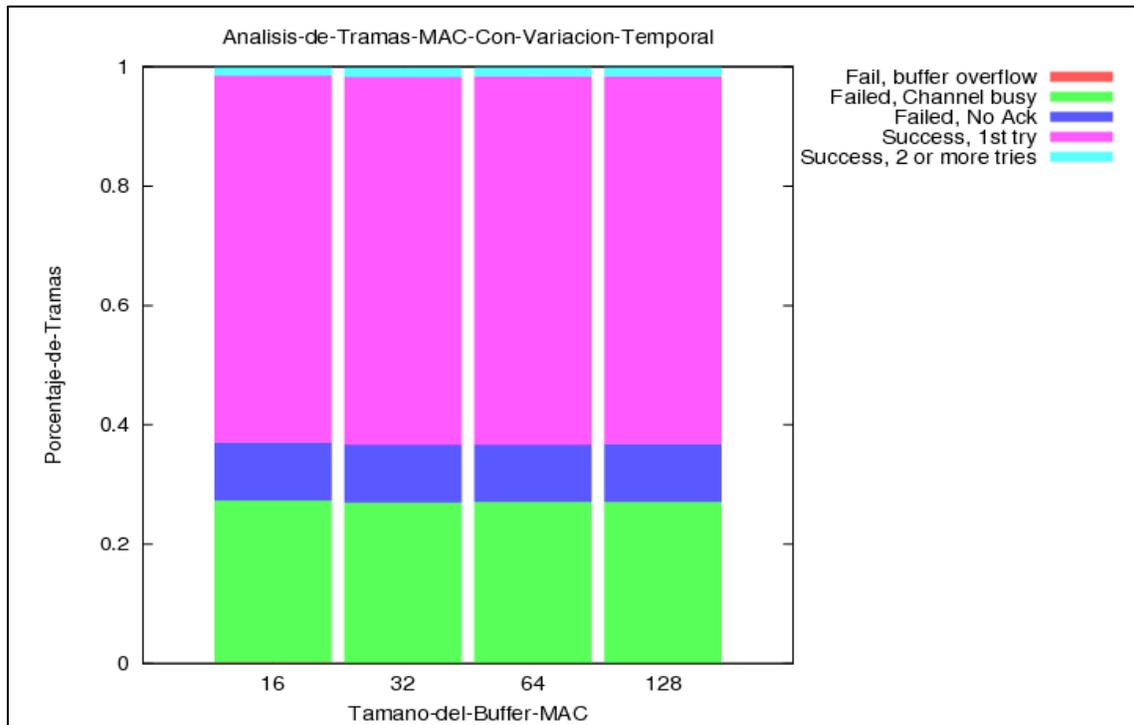


Figura 4.6. Caso 1b. Análisis del promedio de tramas totales, para diferentes tamaños del *buffer*, con variación temporal del canal.

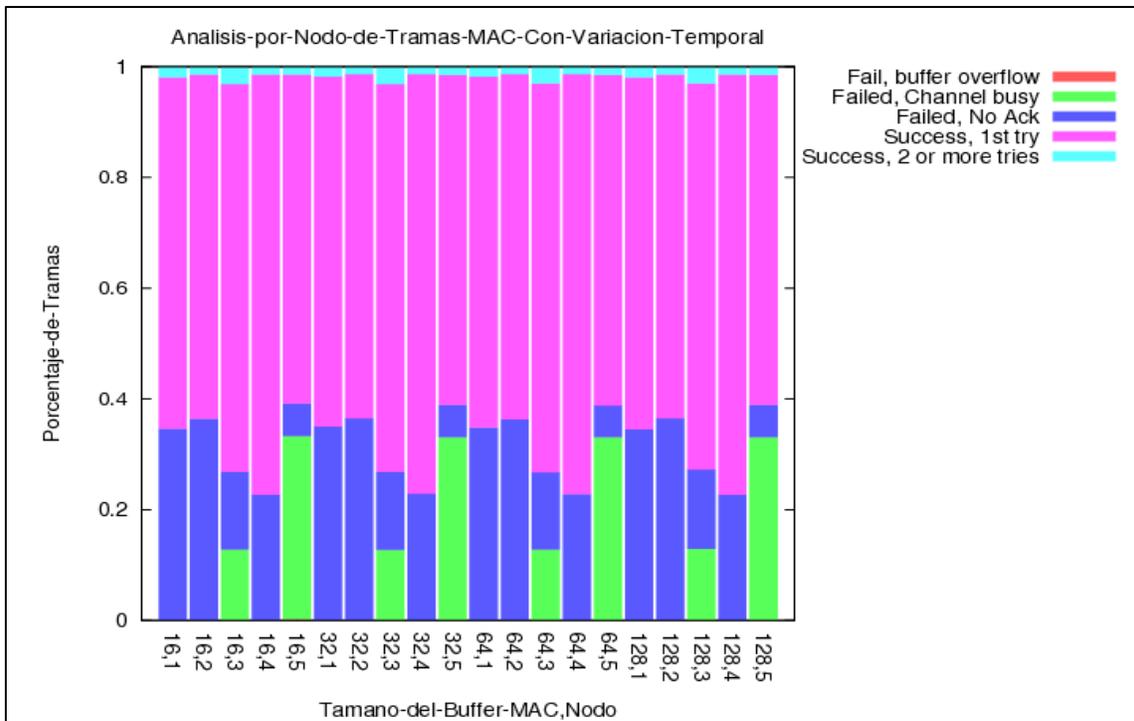


Figura 4.7. Caso 1b. Análisis de tramas por nodo para diferentes tamaños del *buffer*, con variación temporal de canal.

La tabla 4.8 muestra una mínima cantidad de tramas erradas por desbordamiento del *buffer* para el nodo 5, la cual decrece hasta ser cero cuando el tamaño del *buffer* es de 64 tramas o más. Dado que el nodo 5 transmite con la mayor tasa de datos en la red, se infiere que a medida que ésta incrementa, se requiere de un tamaño de *buffer* más grande, que pueda almacenar temporalmente las tramas en recepción.

Similarmente de la tabla 4.8 se puede concluir que con los parámetros configurados en el escenario de simulación No.1, un tamaño de *buffer* de 64 tramas será suficiente para evitar tramas erradas por desbordamiento del mismo.

Buffer, Nodo, Prioridad	Tramas Erradas			Tramas Recibidas	
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	1er Intento	2 o más intentos
Buffer=16, Nodo 1, Prioridad 5	0	0	8	15	0
Buffer=16, Nodo 2, Prioridad 6	0	0	54	93	2
Buffer=16, Nodo 3, Prioridad 2	0	32	35	175	7
Buffer=16, Nodo 4, Prioridad 3	0	0	22	75	1
Buffer=16, Nodo 5, Prioridad 7	4	596	105	1067	26
Buffer=32, Nodo 1, Prioridad 5	0	0	8	15	0
Buffer=32, Nodo 2, Prioridad 6	0	0	54	93	2
Buffer=32, Nodo 3, Prioridad 2	0	32	35	175	8
Buffer=32, Nodo 4, Prioridad 3	0	0	23	75	1
Buffer=32, Nodo 5, Prioridad 7	1	595	105	1071	27
Buffer=64, Nodo 1, Prioridad 5	0	0	8	15	0
Buffer=64, Nodo 2, Prioridad 6	0	0	54	93	2
Buffer=64, Nodo 3, Prioridad 2	0	32	35	175	7
Buffer=64, Nodo 4, Prioridad 3	0	0	23	75	1
Buffer=64, Nodo 5, Prioridad 7	0	596	103	1073	26
Buffer=128, Nodo 1, Prioridad 5	0	0	8	15	0
Buffer=128, Nodo 2, Prioridad 6	0	0	54	93	2
Buffer=128, Nodo 3, Prioridad 2	0	32	36	174	8
Buffer=128, Nodo 4, Prioridad 3	0	0	22	75	1
Buffer=128, Nodo 5, Prioridad 7	0	596	104	1072	26

Tabla 4.8. Caso 1b. Análisis de tramas por nodo para diferentes tamaños de *buffer*. Por los Autores.

En la tabla 4.9 y 4.10 se presenta el análisis de las tramas MAC para el caso 1b, de todos los nodos y para cada nodo respectivamente. Adicionalmente, se calcula el valor de la FER, del cual se concluye que es ligeramente superior al del caso 1a, debido a la presencia de variaciones temporales en el canal.

Tamaño del Buffer [No de Tramas]	Tramas Erradas				Tramas Exitosas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
Buffer=16	1	125	45	171	285	8	293	36,85
Buffer=32	0	125	45	170	286	8	294	36,64
Buffer=64	0	126	45	171	286	7	293	36,85
Buffer=128	0	126	45	171	286	8	294	36,77

Tabla 4.9. Caso 1b. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes valores de *buffer*. Por los Autores.

Buffer, Nodo, Prioridad	Tramas Erradas				Tramas Exitosas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
Buffer=64, Nodo 1, Prioridad 5	0	0	8	8	15	0	15	34,78
Buffer=64, Nodo 2, Prioridad 6	0	0	54	54	93	2	95	36,24
Buffer=64, Nodo 3, Prioridad 2	0	32	35	67	175	7	182	26,91
Buffer=64, Nodo 4, Prioridad 3	0	0	23	23	75	1	76	23,23
Buffer=64, Nodo 5, Prioridad 7	0	596	105	701	1073	26	1099	38,94

Tabla 4.10. Caso 1b. Análisis de tramas MAC y FER por nodo. Por los Autores.

La tabla 4.10 muestra una ligera disminución de la FER para las tramas de prioridad 5 y prioridad 6, comparadas con los valores obtenidos en el caso 1a. Sin embargo, no se presenta una tendencia definida entre la FER y la prioridad, que permita llegar a una conclusión.

- **Latencia**

La figura 4.8 presenta el histograma de latencia de las tramas totales recibidas en el *hub* para el caso 1b.

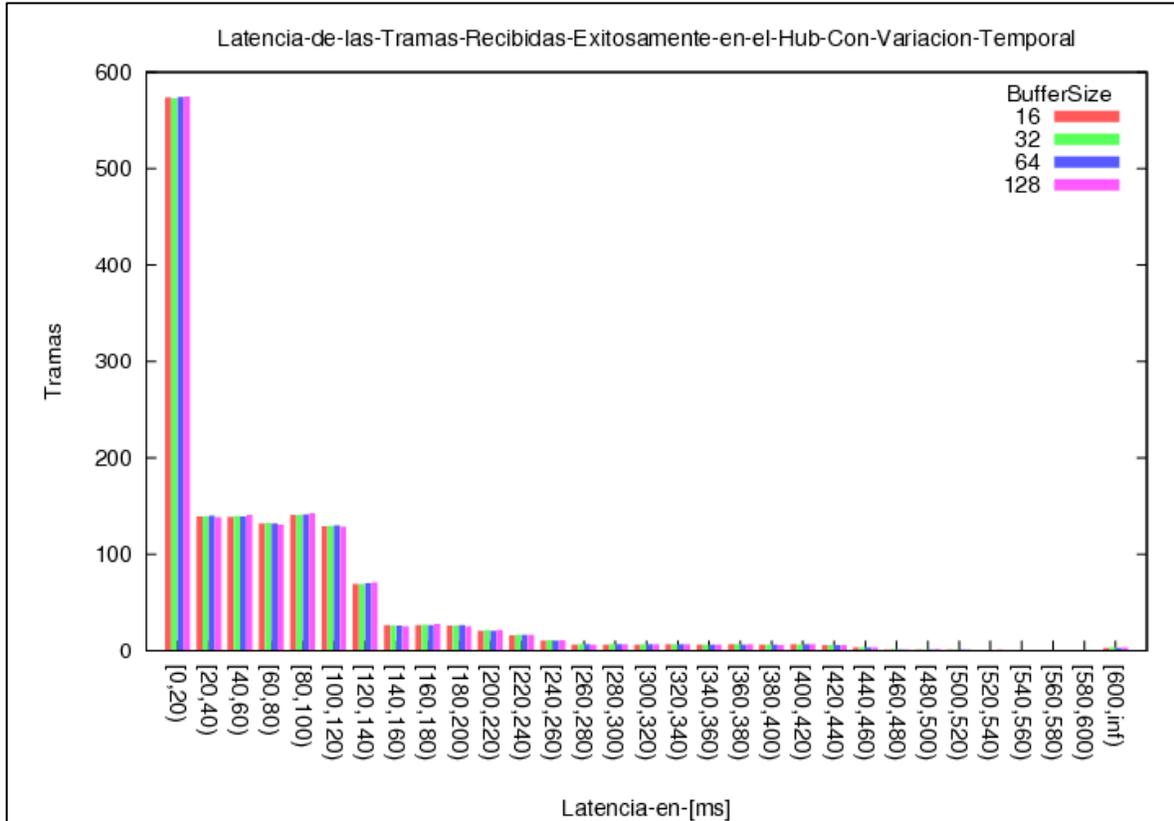


Figura 4.8. Caso 1b. Latencia del total de tramas.

Se observa que en comparación con el caso 1a, hay una cantidad mayor de tramas que se reciben de manera exitosa con valores de latencia superiores a 125 ms (tramas con hasta 440 ms). Esta situación evidencia que cuando el canal inalámbrico presenta variaciones temporales, las tramas llegan al receptor con mayor retardo total. Aunque en este caso, el número de tramas que exceden los valores de latencia establecidos en los requerimientos de la red, es tan mínimo que no alcanza a afectar de manera importante el desempeño de la BAN.

4.2.4.2. Escenario de Simulación No. 2

4.2.4.2.1. Caso 2a: Canal Sin Variación Temporal

El caso en mención, simula el escenario No. 2, en el cual los nodos y el *hub* se encuentran ubicados en el cuerpo de manera distribuida y no se presentan variaciones temporales en el canal inalámbrico.

- **Análisis de Tramas MAC**

La figura 4.9 muestra el promedio de tramas recibidas y erradas desde todos los nodos en el *hub*, en ésta se observa que al variar el tamaño del *buffer*, el comportamiento de las tramas no presenta ningún cambio.

De acuerdo con la ubicación de los nodos en el cuerpo y el mapa de pérdidas de trayecto (Tabla 4.3) definidos para este escenario, se caracterizan las condiciones del enlace inalámbrico para cada nodo. De esta forma, el orden descendente de la mejor a la peor condición del canal en términos de pérdidas de trayecto para los nodos es: nodo 2, nodo 4, nodo 1, nodo 5 y nodo 3, lo cual se corrobora con los resultados obtenidos en la figura 4.10. Además, como ya se ha mencionado en los casos anteriormente analizados, una alta tasa de datos (nodo 3 y nodo 5) produce tramas erradas por canal ocupado.

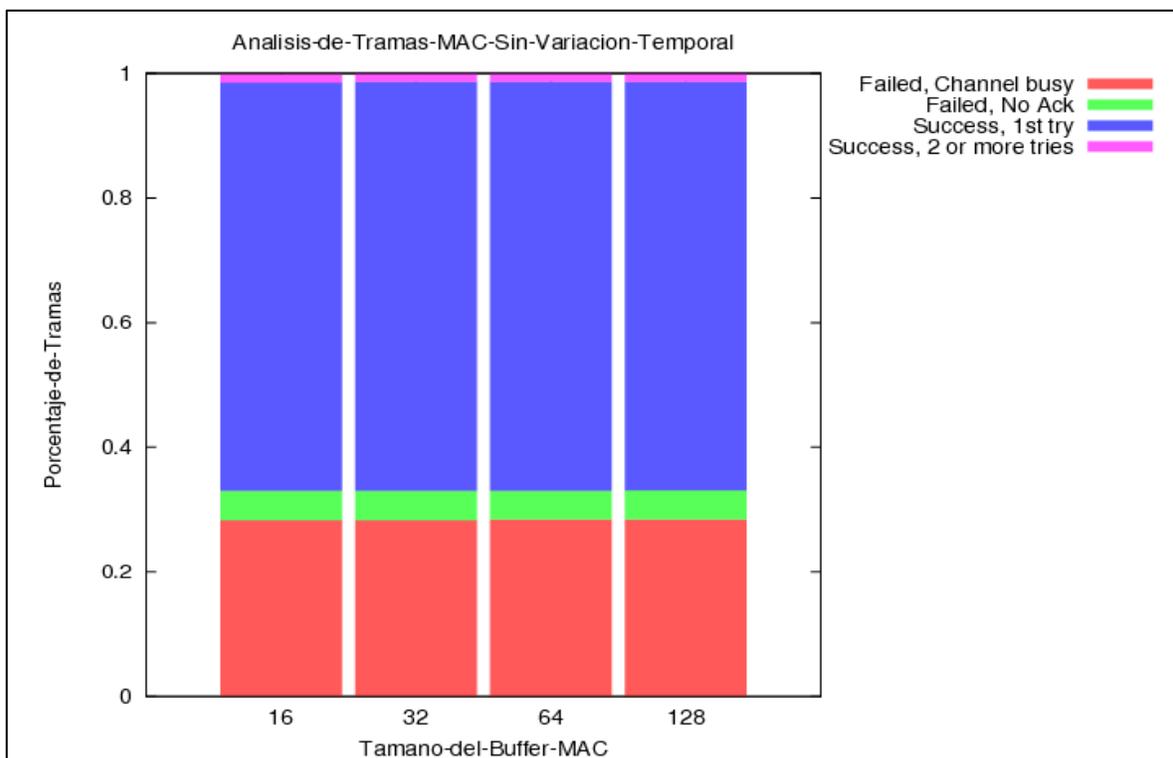


Figura 4.9. Caso 2a. Análisis del promedio de tramas totales para diferentes tamaños del *buffer*.

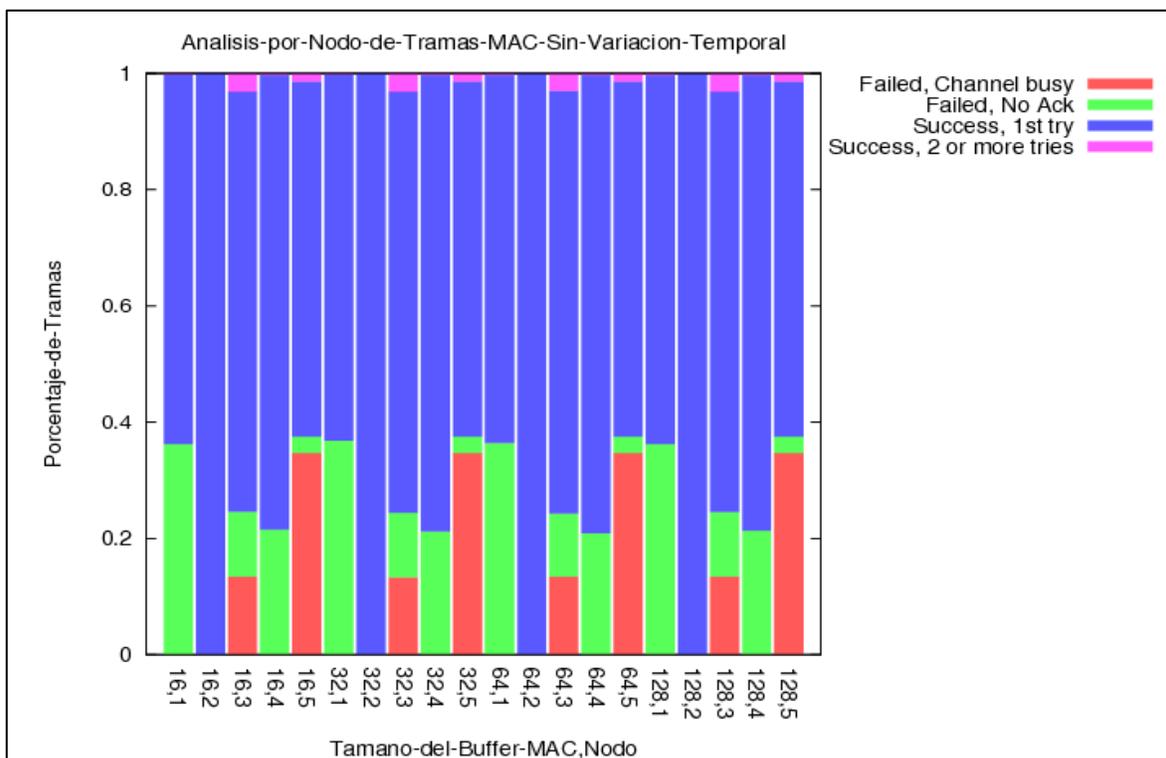


Figura 4.10. Caso 2a. Análisis de tramas por nodo, para diferentes tamaños del *buffer*.

En la figura 4.10 se observa el efecto que producen las pérdidas de trayecto definidas en el escenario No. 2 sobre las tramas en la red BAN. Es de notar que en este caso las tramas erradas por falta de reconocimiento son menores en comparación a las obtenidas en el caso 1a, lo que genera a su vez, mayor número de tramas recibidas exitosamente en el primer intento.

Las tablas 4.11 y 4.12 presentan los valores del análisis de tramas MAC y el cálculo de la FER. En la primera tabla se observa que los valores son ligeramente inferiores a los obtenidos en el caso 1a.

Tamaño del Buffer [No de Tramas]	Tramas Erradas				Tramas Exitosas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
Buffer=16	1	131	22	154	304	7	311	33,12
Buffer=32	0	131	22	153	304	7	311	32,97
Buffer=64	0	131	21	152	304	7	311	32,83
Buffer=128	0	131	22	153	304	7	311	32,97

Tabla 4.11. Caso 2a. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes valores de *buffer*. Por los Autores.

Buffer, Nodo, Prioridad	Tramas Erradas				Tramas Exitosas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
Buffer=64, Nodo 1, Prioridad 5	0	0	9	9	15	0	15	37,50
Buffer=64, Nodo 2, Prioridad 6	0	0	0	0	149	0	149	0,00
Buffer=64, Nodo 3, Prioridad 2	0	33	27	60	181	8	189	24,10
Buffer=64, Nodo 4, Prioridad 3	0	0	21	21	78	0	78	21,21
Buffer=64, Nodo 5, Prioridad 7	0	624	51	675	1098	25	1123	37,54

Tabla 4.12. Caso 2a. Análisis de tramas MAC y FER por nodo. Por los Autores.

En la tabla 4.12 se observa que el nodo más próximo al *hub* (nodo 2), el cual presenta la menor pérdida en el enlace, obtiene una FER del 0%. El resto de los nodos muestran un valor de FER mayor a medida que las pérdidas de trayecto se incrementan.

También se observa que cuando los nodos se encuentran distribuidos en el cuerpo humano, se presentan tramas erradas por canal ocupado, únicamente para los nodos con tasas de datos superiores a 5 tramas/segundo. Sin embargo, no se aprecia un alto número de tramas erradas por falta de ACK para los nodos de mayor prioridad como ocurría en el escenario No. 1.

- **Latencia**

La figura 4.11 presenta los valores de latencia para el número total de tramas recibidas en el *hub*, empleando el escenario No. 2 sin variación temporal.

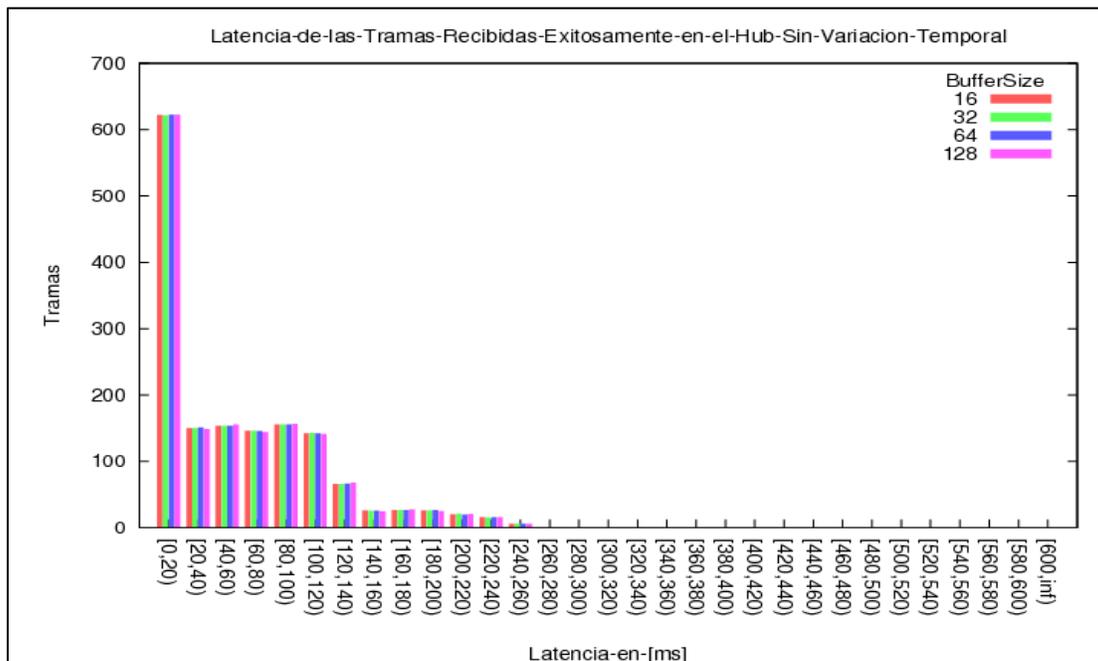


Figura 4.11. Caso 2a. Latencia del total de tramas.

En la figura 4.11 se observa que los resultados obtenidos son iguales a los del caso 1a. De igual forma, se aprecia que al variar el tamaño del *buffer* bajo las condiciones del caso 2a, no afecta la latencia de las tramas. El análisis restante concuerda con lo expresado para el caso 1a.

4.2.4.2.2. Caso 2b: Canal Con Variación Temporal

El caso 2b simula el escenario No. 2 bajo condiciones de variación temporal en el canal inalámbrico.

- **Análisis de tramas MAC**

La figura 4.12 muestra el promedio de tramas recibidas y erradas desde todos los nodos, en ésta se observa un porcentaje mínimo de tramas que fallan por desbordamiento del *buffer* cuando el tamaño de éste es de 16.

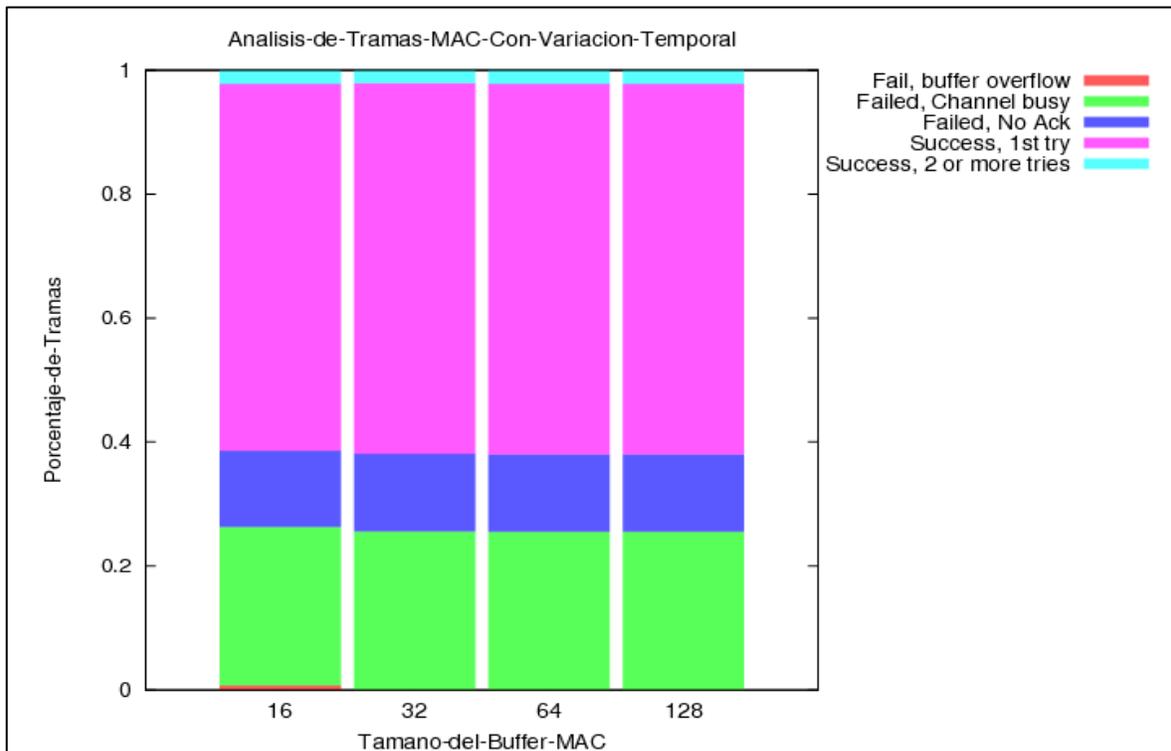


Figura 4.12. Caso 2b. Análisis del promedio de tramas totales para diferentes tamaños del *buffer*, con variación temporal de canal.

En la figura 4.13 se observa el comportamiento de las tramas para cada nodo, en ésta se aprecia que el nodo 5 presenta tramas erradas por desbordamiento del *buffer* para el tamaño más pequeño del mismo. También se advierte que el porcentaje de tramas erradas por falta de ACK y el porcentaje de tramas exitosas en el segundo o más intentos es mayor que en los casos anteriores. Lo cual indica que la variación temporal deteriora el desempeño de la red y reduce el número de tramas recibidas exitosamente.

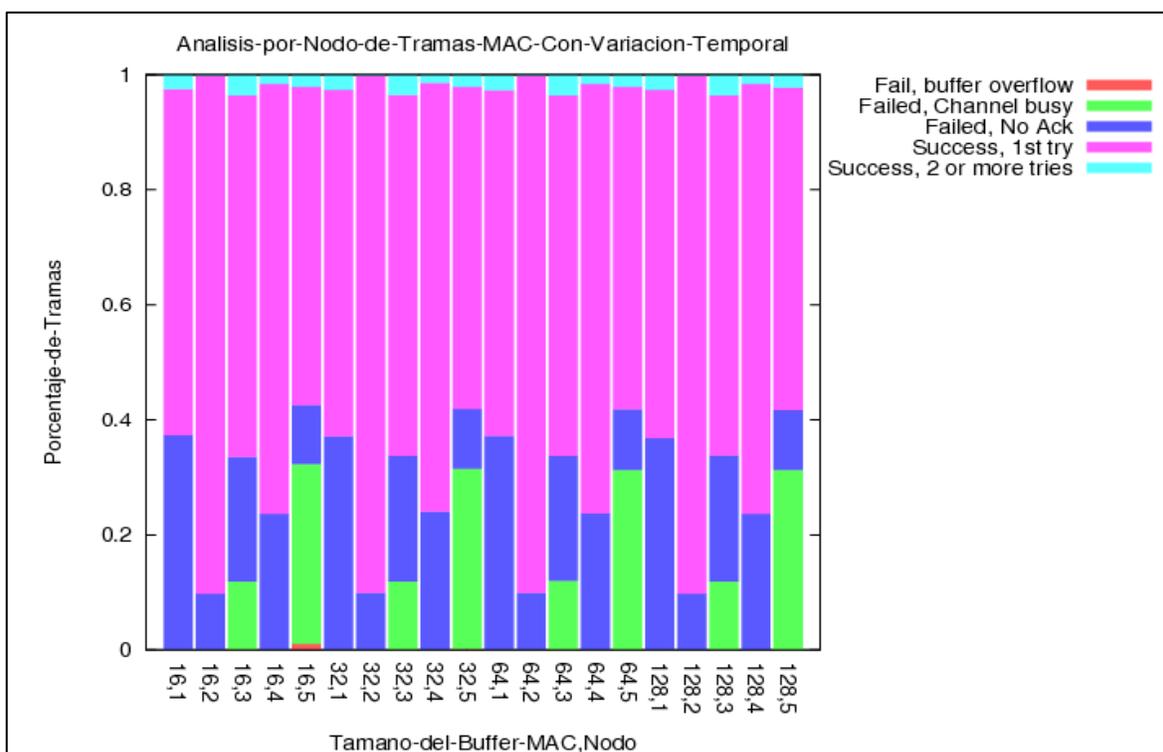


Figura 4.13. Caso 2b. Análisis de tramas por nodo para diferentes tamaños de *buffer*, con variación temporal de canal.

Para precisar en los resultados obtenidos del análisis de tramas previo, se presenta la tabla 4.13 y la tabla 4.14, con el número de tramas erradas, exitosas y el respectivo cálculo de la FER.

La tabla 4.13 muestra una FER cercana al 38% para los diferentes tamaños de *buffer*, la cual es ligeramente mayor a la obtenida en el caso 2a (37%).

Tamaño del Buffer [No de Tramas]	Tramas Erradas				Tramas Exitosas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
Buffer=16	3	119	57	179	274	10	284	38,66
Buffer=32	0	119	58	177	277	10	287	38,15
Buffer=64	0	118	58	176	277	10	287	38,01
Buffer=128	0	118	58	176	277	10	287	38,01

Tabla 4.13. Caso 2b. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes valores de *buffer*. Por los Autores.

En la tabla 4.14 se puede apreciar que la variación temporal en el canal, afecta considerablemente los enlaces de corta distancia, tal como se observa para el nodo 2 (muñeca derecha), cuya FER paso de ser nula en el caso 2a, a ser del 10.07% en este

caso. Para el resto de nodos, los cuales se encuentran a mayores distancias del *hub*, el incremento de la FER con respecto al caso 2a no es tan notable.

Buffer, Nodo, Prioridad	Tramas Erradas				Tramas Exitosas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
Buffer=64, Nodo 1, Prioridad 5	0	0	9	9	14	1	15	37,50
Buffer=64, Nodo 2, Prioridad 6	0	0	15	15	134	0	134	10,07
Buffer=64, Nodo 3, Prioridad 2	0	30	54	84	156	9	165	33,73
Buffer=64, Nodo 4, Prioridad 3	0	0	23	23	74	2	76	23,23
Buffer=64, Nodo 5, Prioridad 7	0	562	188	750	1008	39	1047	41,74

Tabla 4.14. Caso 2b. Análisis de tramas y FER por nodo. Por los Autores.

En la tabla 4.14 se evidencia un aumento de las tramas erradas por falta de ACK con respecto a las del caso 2a, lo cual se genera como consecuencia de los desvanecimientos profundos que introduce la variación temporal en el canal. Esto a su vez, causa una disminución en el total de tramas recibidas exitosamente en el *hub*. El análisis restante concuerda con el del caso 2a.

- **Latencia**

La figura 4.14 presenta el histograma de latencia para el caso 2b, en ésta se observa un incremento en el tiempo de recepción de las tramas, comparado con los retardos obtenidos cuando el canal no presenta variación temporal (caso 2a).

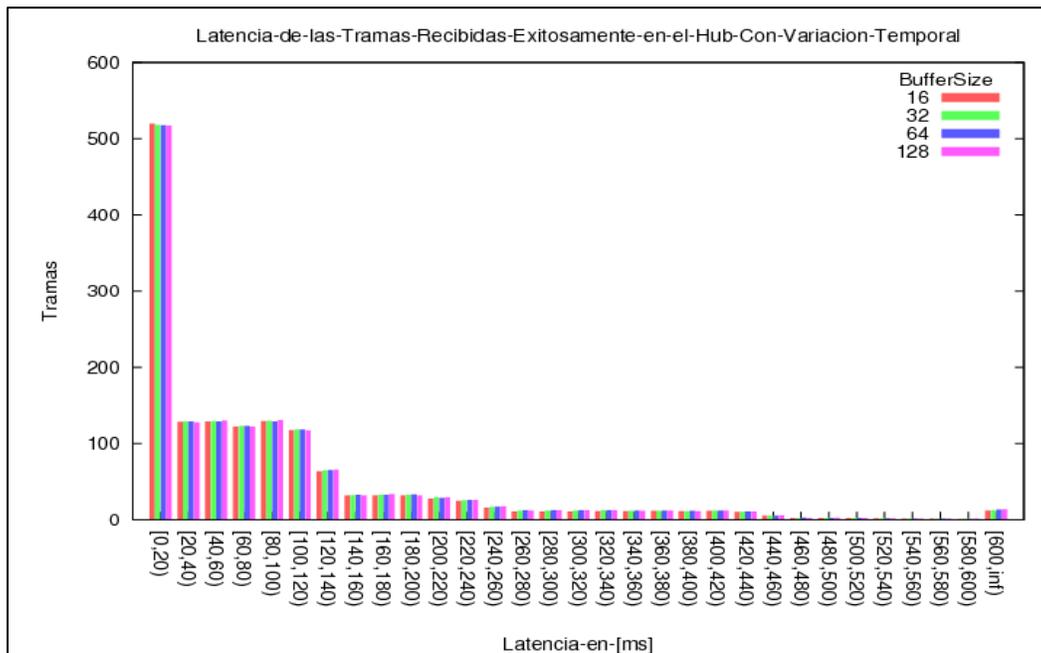


Figura 4.14. Caso 2b. Latencia del total de tramas.

La figura 4.14 muestra que la mayoría de las tramas se reciben en el *hub*, con una latencia que cumple con los requerimientos establecidos en la red BAN. Sin embargo, se observa que un número mínimo de tramas presenta un retardo superior a 600 ms, lo cual puede indicar un futura saturación del canal [39].

La variación del *buffer* bajo las condiciones del caso 2b no introduce ningún efecto en el retardo de las tramas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, tanto en el escenario No.1 como en el escenario No. 2, se aprecia que los efectos de variación temporal en el canal, incrementan levemente los valores de la FER en la red y aumentan notablemente la latencia de las tramas.

Por otra parte en los casos 2a y 2b, se observó el efecto de las pérdidas de trayecto en los enlaces, ya que los nodos más próximos al *hub* presentaron un alto número de tramas exitosas y una reducción en los valores de la FER, en comparación con los nodos ubicados a mayor distancia.

Se observan resultados similares en el análisis de tramas, latencia y FER para los diferentes tamaños del *buffer* con que se realizaron las pruebas. No obstante, para valores pequeños de *buffer* (16 y 32 tramas) y altas tasas de datos (5 y 36 tramas/segundo) se presentó desbordamiento del mismo, por lo tanto, se concluye que un tamaño de *buffer* adecuado para el escenario No. 1 y el escenario No. 2, es de 64 tramas, ya que éste es suficiente para evitar tramas erradas por desbordamiento.

Con el tamaño de *buffer* adecuado, se continuarán las pruebas empleando únicamente el escenario de simulación No 2, ya que éste se aproxima más a una BAN real.

Con el fin de observar el efecto de la duración de la fase RAP sobre el desempeño de la red, en términos del análisis de tramas, FER y latencia, se presenta el siguiente caso.

4.2.4.2.3. Caso 2c: Canal con Variación Temporal, con *buffer* adecuado y variando el RAP

En este caso los nodos se mantuvieron distribuidos en el cuerpo humano y se realizaron las pruebas con el *buffer* de 64 tramas, además se consideraron variaciones temporales en el canal inalámbrico y se varió la duración del RAP como se indica en la tabla 4.5.

El tamaño máximo que puede tener el RAP (32 ranuras) corresponde a la duración total de la supertrama, es decir, que con esta configuración los nodos tendrán todo el tiempo disponible de la supertrama para contender por el canal, empleando CSMA/CA.

Con el fin de obtener una correcta visualización de las gráficas y evitar que quedaran sobrecargadas de datos dado el amplio intervalo de variación del RAP, los resultados obtenidos en este caso se dividieron en dos figuras; la primera gráfica muestra los resultados obtenidos con la duración del RAP en 4, 8, 12 y 16 ranuras y la segunda muestra los resultados con duraciones del RAP de 20, 24, 28 y 32 ranuras.

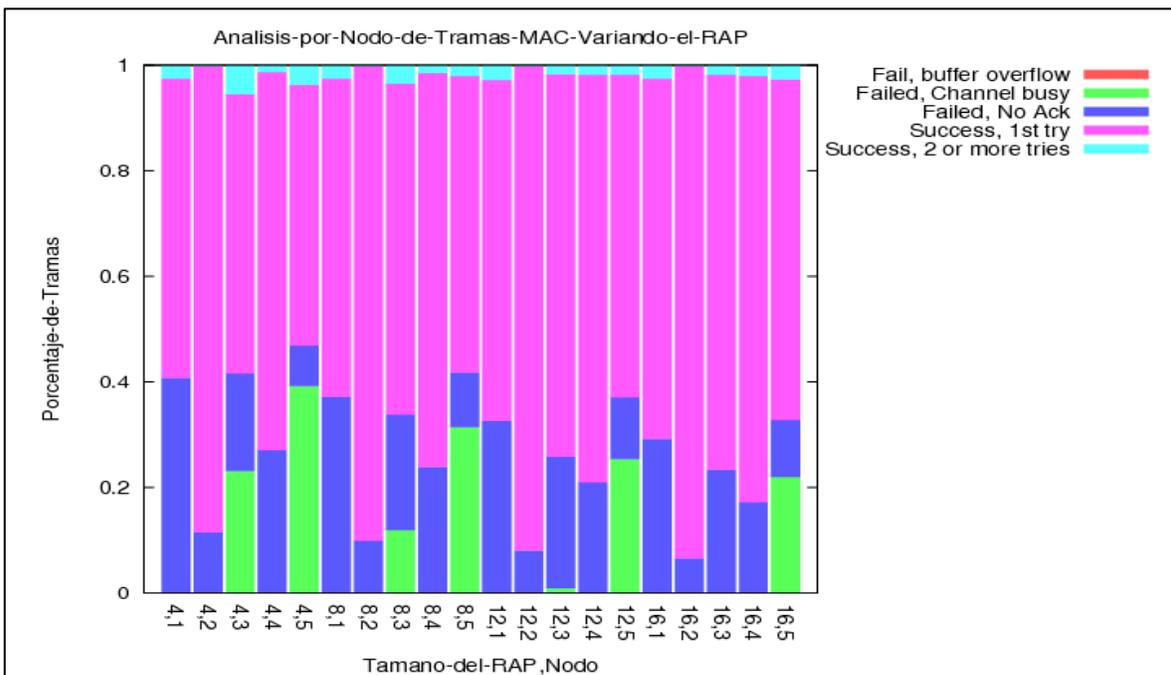
▪ **Análisis de Tramas MAC**

La figura 4.15 a) y b) muestra el porcentaje de las tramas recibidas exitosamente y de las tramas erradas para cada nodo con las diferentes duraciones del RAP, cuyos valores se encuentran definidos en el eje X.

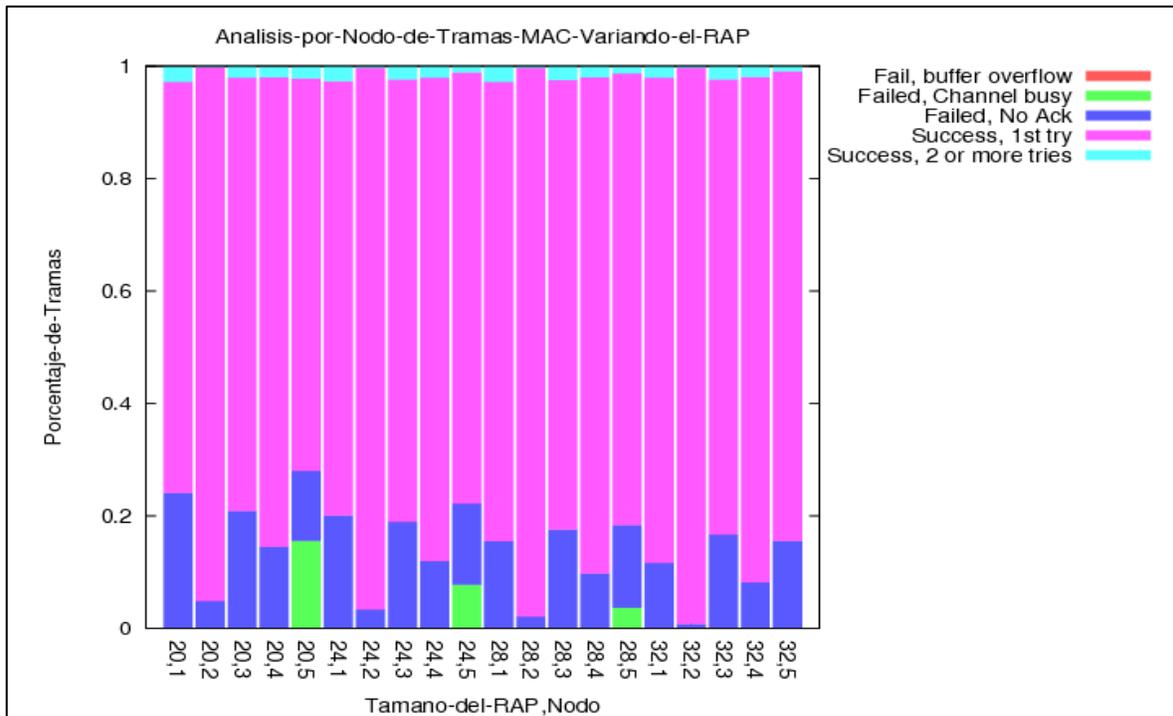
Es de apreciar el efecto que producen las pérdidas de trayecto en la recepción de las tramas en el *hub*, ya que se observa que en los nodos que cuentan con las mejores condiciones de canal, como es el caso del nodo 2, por ser el más próximo al *hub*, presenta un alto número de tramas recibidas exitosamente durante el primer intento para las diferentes duraciones del RAP.

Similarmente la figura 4.15 indica que los nodos con mayores tasas de datos, como el nodo 3 y el nodo 5, necesitan largas duraciones del RAP (28 y 32 ranuras respectivamente), para que ninguna de sus tramas fallen debido a que el canal se encuentra ocupado. Además, los resultados muestran que para estos mismos nodos, a medida que se incrementa la duración del RAP también aumentan las tramas erradas por falta de ACK, las cuales se generan a causa de desvanecimientos profundos en el canal inalámbrico, pérdida de conectividad, baja sensibilidad en el receptor, entre otros [39].

Para el resto de los nodos no se presentan pérdidas de tramas por canal ocupado y a medida que se incrementa la duración RAP, se reducen los errores por falta de ACK.



a) Duración del RAP en 4, 8, 12 y 16 Ranuras.

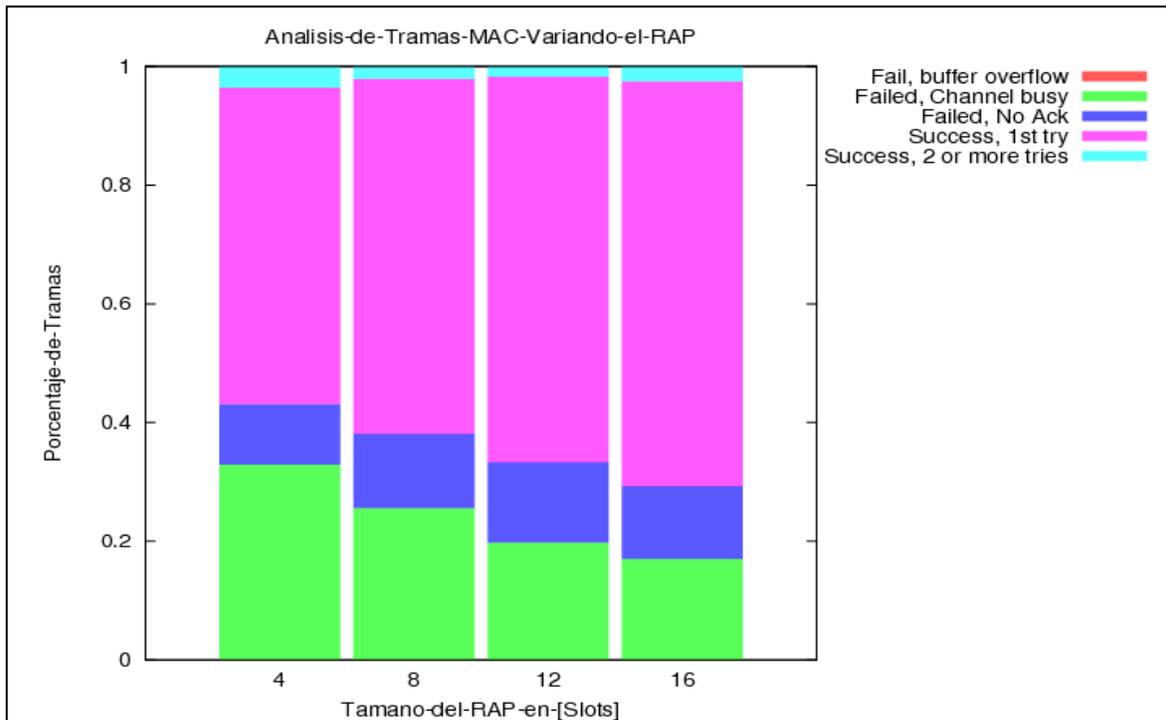


b) Duración del RAP en 20, 24 ,28 y 32 Ranuras.

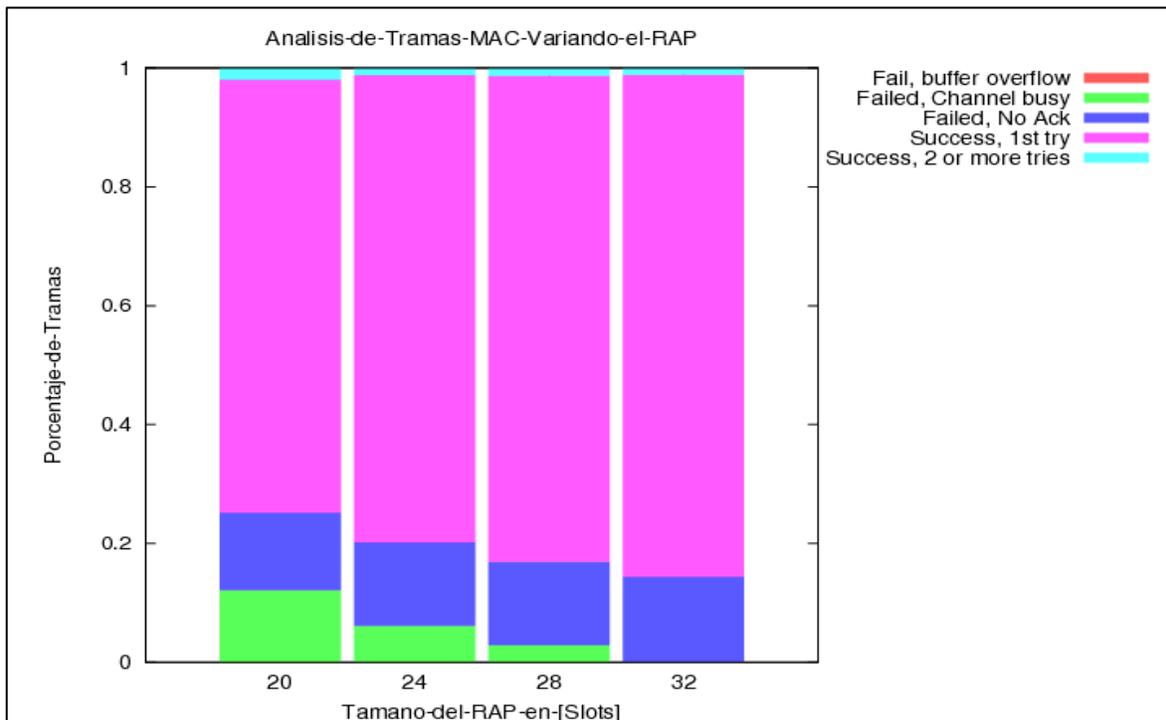
Figura 4.15. Caso 2c. Análisis de tramas por nodo para diferentes duraciones del RAP.

La figura 4.16 a) y b), muestra el promedio de tramas totales recibidas y erradas desde todos los nodos en el *hub*. Se observa que al aumentar la duración del RAP, se presenta un incremento en las tramas recibidas exitosamente durante el primer intento y una disminución en el porcentaje de tramas recibidas en dos o más intentos. Esto es debido, a que los nodos tienen más tiempo para contender en dicha fase y por lo tanto más posibilidades para transmitir sus tramas y lograr una recepción exitosa.

De manera similar, la figura 4.16 muestra que las tramas que fallan por canal ocupado disminuyen a medida que la duración del RAP se extiende en el tiempo, mientras que las tramas erradas por falta de ACK no presentan una tendencia definida.



a) Duración del RAP en 4, 8, 12 y 16 Ranuras.



b) Duración del RAP en 20, 24, 28 y 32 Ranuras.

Figura 4.16. Caso 2c. Análisis del promedio de tramas totales para diferentes duraciones del RAP.

Para precisar en el análisis de tramas presentado en la figura 4.16, se presenta la tabla 4.15, la cual reúne los valores de las tramas exitosas y erradas que arrojó la figura en cuestión. Adicionalmente se calcula la FER para las diferentes duraciones de la fase RAP.

Duración del RAP [No de Ranuras]	Tramas Erradas				Tramas Exitosas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
4	0	152	47	199	247	17	264	42,98
8	0	119	58	177	277	10	287	38,15
12	0	92	62	154	301	8	309	33,26
16	0	79	57	136	316	11	327	29,37
20	0	56	61	117	338	9	347	25,22
24	0	28	65	93	364	6	370	20,09
28	0	13	65	78	379	6	385	16,85
32	0	0	67	67	392	5	397	14,44

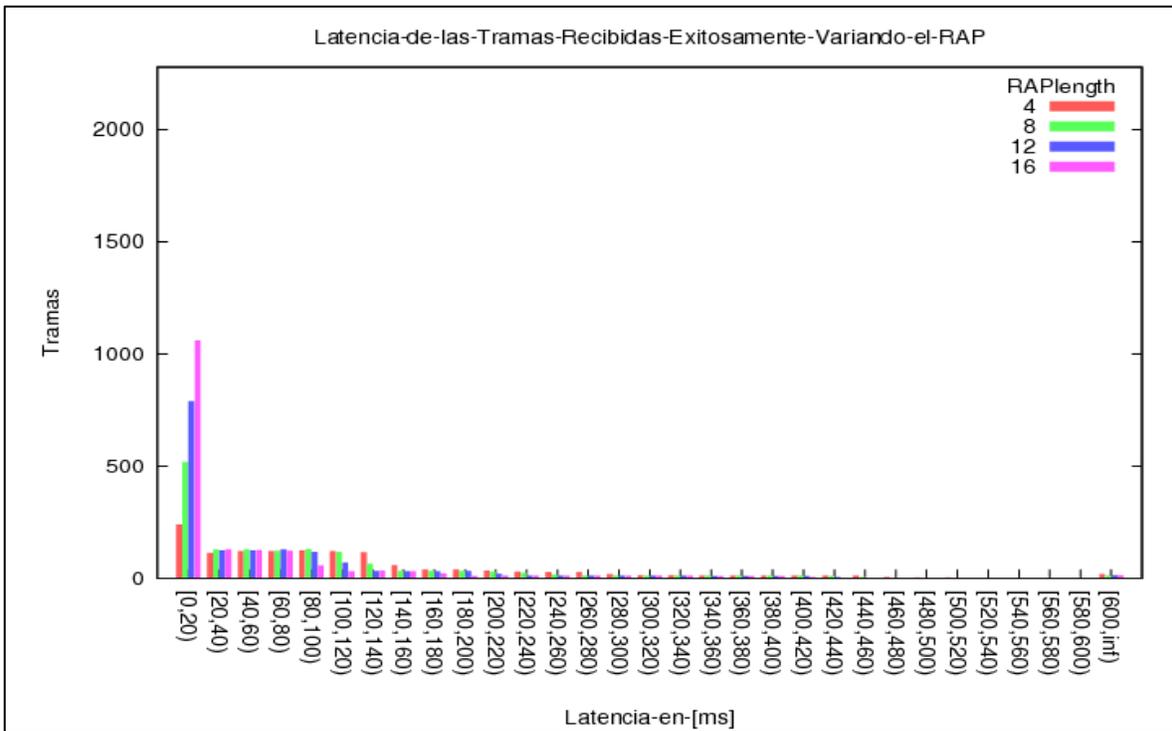
Tabla 4.15. Caso 2c. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes duraciones del RAP. Por los Autores.

De la tabla 4.15 se concluye que a medida que se aumenta la duración del RAP, mejora el porcentaje de la FER, puesto que se evidencia la reducción de dicho parámetro, hasta lograr un resultado cercano al 10%, cuando el RAP es de 32 ranuras.

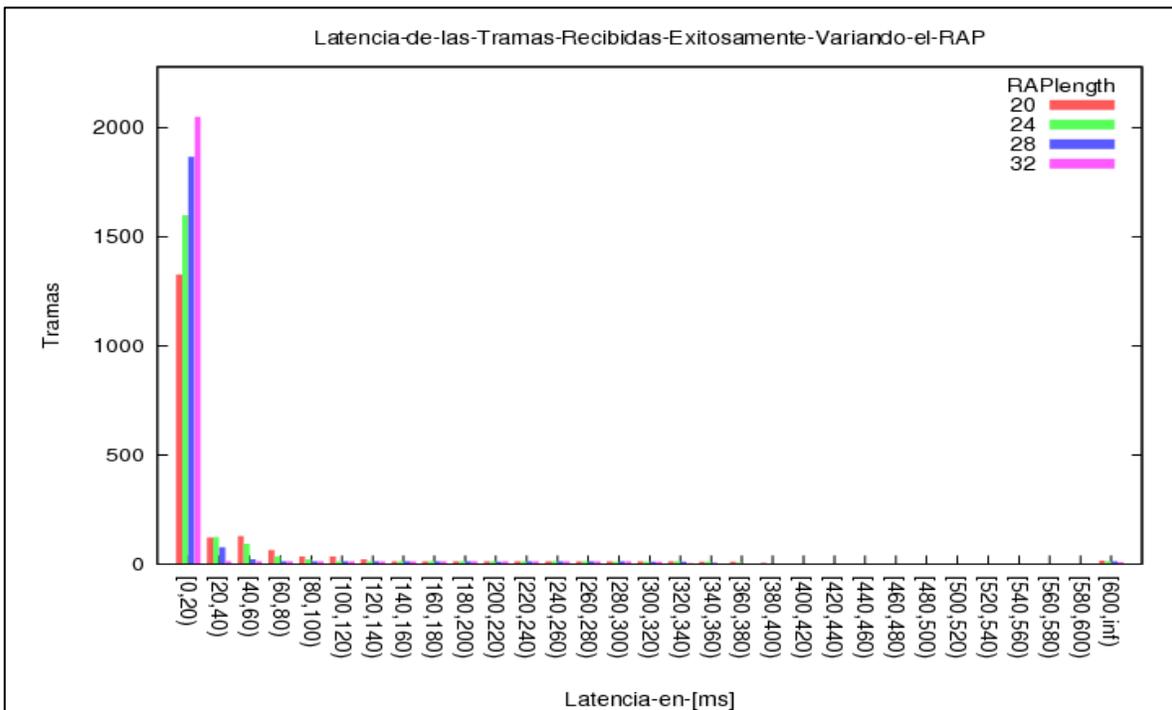
- **Latencia**

La figura 4.17 a) y b), presenta dos histogramas de latencia para este caso, en los cuales se observa que cuando se incrementa la duración del RAP, además de disminuir el porcentaje de la FER y aumentar el número de tramas recibidas exitosamente en el primer intento, también logra que éstas se reciban en el *hub* con un menor retardo total.

Similarmente, la figura 4.17 muestra cómo a medida que se incrementa el RAP, aumenta notablemente el número de tramas recibidas dentro de los primeros 20 ms. Para una duración del RAP igual o superior a 12 ranuras, la mayoría de las tramas recibidas exitosamente presentan una latencia inferior a los 125 ms, cumpliendo con el requerimiento de las aplicaciones de carácter médico.



a) Duración del RAP en 4, 8, 12 y 16 Ranuras.



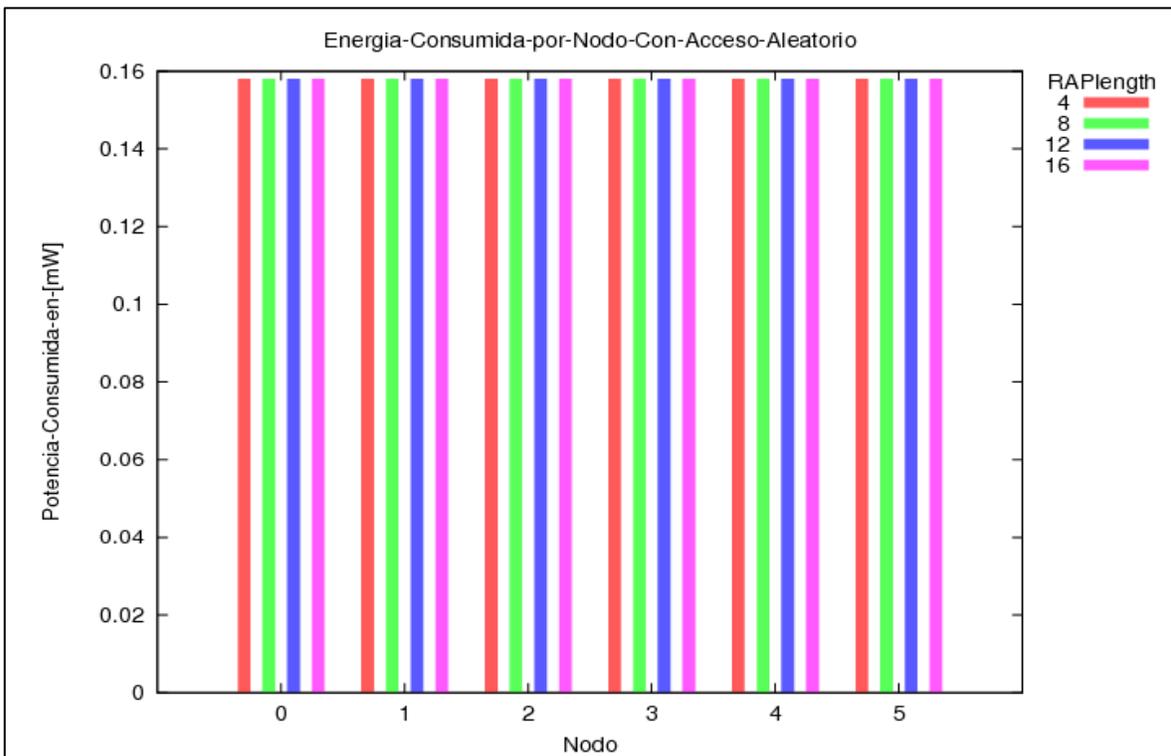
b) Duración del RAP en 20, 24, 28 y 32 Ranuras.

Figura 4.17. Caso 2c. Latencia del total de tramas.

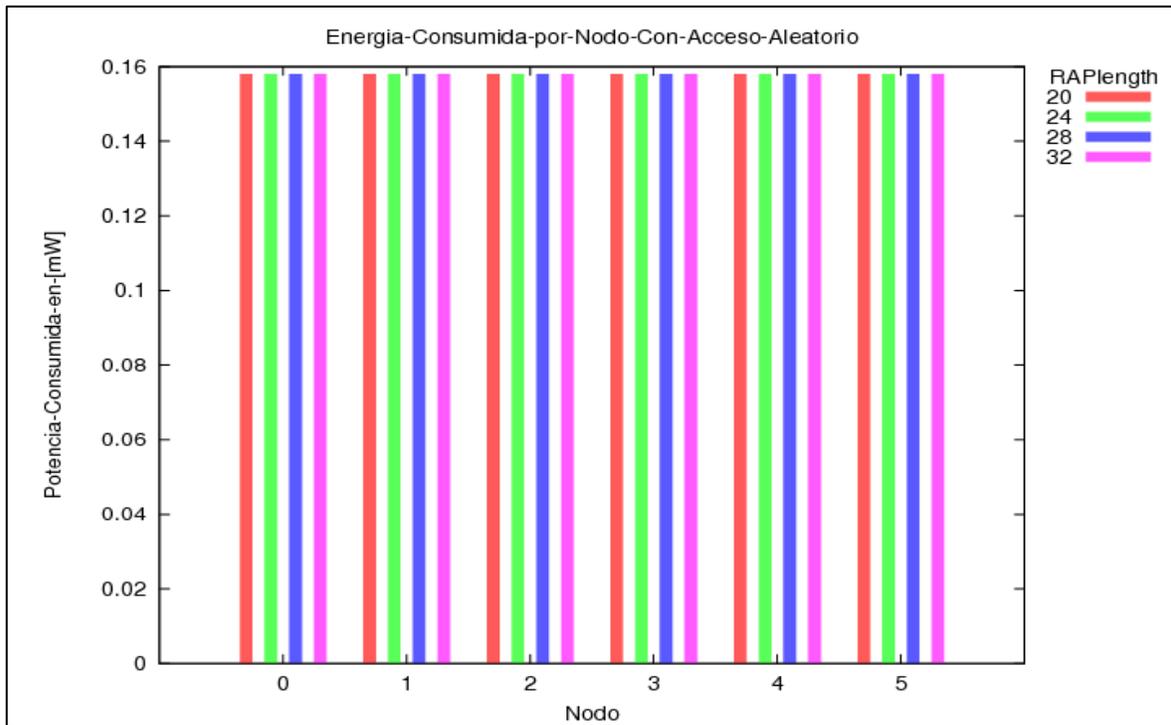
Los resultados obtenidos en este caso, señalan que el mejor desempeño en términos de número de tramas exitosas, FER y latencia, se consigue con la mayor duración del RAP. Sin embargo, esto implica que los nodos contiendan durante más tiempo por acceder al canal empleando CSMA/CA, lo cual podría suponer un mayor consumo de energía. Dado lo anterior, se utilizará la aplicación del gestor de energía provista por Castalia, con el fin de observar la cantidad consumida por los nodos para las diferentes variaciones del RAP y de este modo sugerir una duración adecuada para dicha fase.

▪ **Consumo de Energía**

La figura 4.18 a) y b), muestra la energía consumida por nodo para las diferentes duraciones del RAP. Se observa que los nodos independientemente de la duración de esta fase, consumen cerca de 0.16 mW durante el tiempo de simulación, lo cual se debe a que en la técnica CSMA/CA, los nodos no entran a un estado de reposo, por lo tanto el consumo de energía es constante.



a) Energía consumida por nodo, Duración del RAP en 4, 8, 12 y 16 Ranuras.



b) Energía consumida por nodo, Duración del RAP en 20, 24, 28 y 32 Ranuras.

Figura 4.18. Caso 2c. Energía consumida por nodo.

Con base en los resultados obtenidos en la gráfica del consumo de energía y en el cálculo de la FER (tabla 4.15), se sugiere un RAP de 32 ranuras, ya que de esta forma se consigue el mejor desempeño de la red, consumiendo la misma cantidad de energía que con las otras duraciones de la fase RAP.

Con el fin de comparar la técnica de acceso aleatoria CSMA/CA definida para los escenarios de simulación No.1 y No. 2, con otra técnica de acceso disponible en el modo *beacon* con supertrama limitada por tramas *beacon*, se plantea un nuevo escenario en el que los nodos emplearan CSMA/CA y acceso programado conjuntamente.

4.2.4.3. Escenario de Simulación No. 3

En este escenario la supertrama definida para la red BAN, se compone de una fase RAP que permite a los nodos emplear CSMA/CA y una fase MAP para utilizar acceso programado. Las asignaciones programadas concedidas a los nodos son 1-periódicas. Los parámetros técnicos del escenario No. 3 son los mismos que los presentados en el escenario No. 2.

En el escenario en cuestión se varía la duración del RAP y del intervalo de asignación programado, para analizar el efecto producido sobre las tramas recibidas, las tramas erradas, la FER, la latencia y el consumo de energía. De este modo, la duración del RAP podrá variar entre 2, 7, 12, 17 y 22 ranuras, mientras que la duración del intervalo de asignación programado para cada nodo, podrá tomar valores de 2, 3, 4, 5 y 6 ranuras dentro de la supertrama.

La variación de las fases de acceso, se realiza incrementando la duración del RAP a medida que se disminuye el tamaño del intervalo de asignación programado, con la condición de que ambas fases abarquen completamente la duración de la supertrama, es decir 32 ranuras.

▪ **Análisis de Tramas MAC**

La figura 4.19, muestra el comportamiento de las tramas por nodo, cuando se emplean diferentes duraciones del RAP y distintos tamaños del intervalo de asignación programado.

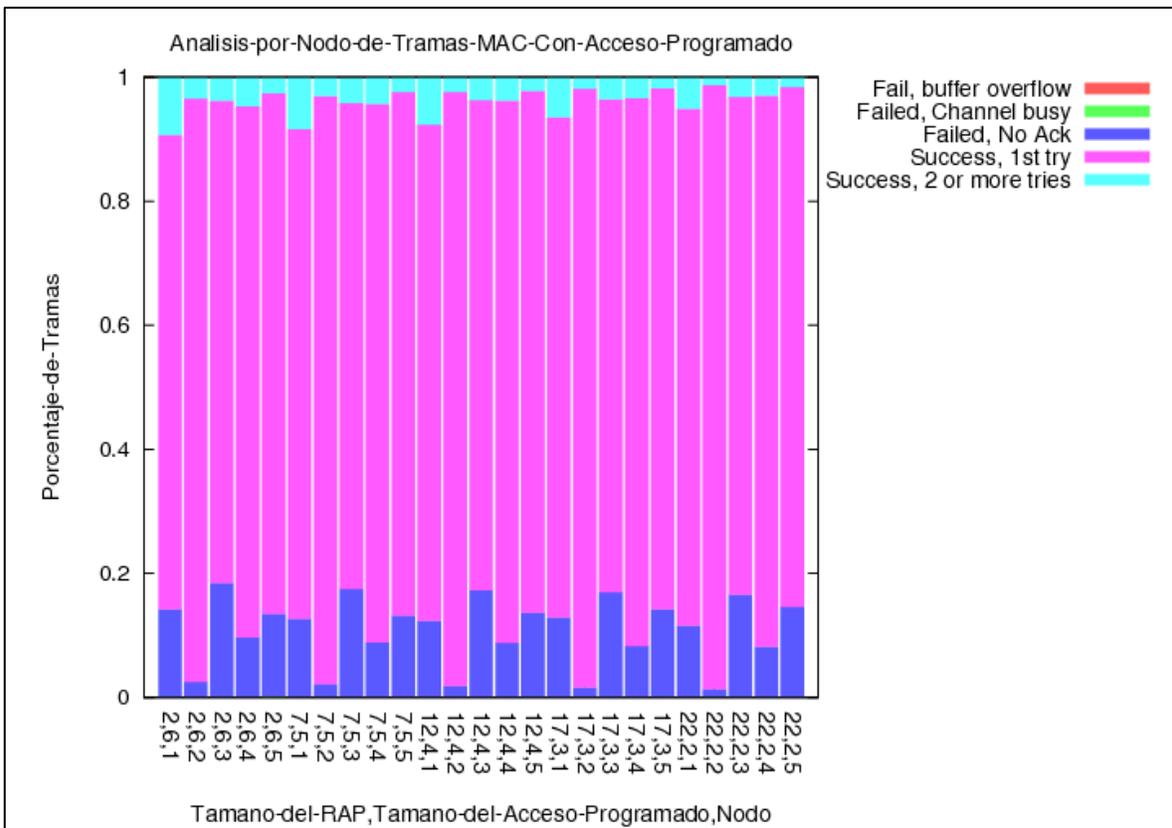


Figura 4.19. Escenario No. 3. Análisis de tramas por nodo, variando la duración del RAP y del intervalo de asignación programado.

En la figura 4.19 cabe resaltar que el número de tramas erradas por canal ocupado y desbordamiento del *buffer* es nulo.

También se aprecia el efecto de las pérdidas de trayecto presentado en el escenario No. 2 y se observa una reducción en las tramas erradas por falta de ACK.

Para analizar el promedio de tramas recibidas y tramas erradas en la red BAN, a medida que se varía la duración del RAP y del intervalo de asignación programado, se presenta la figura 4.20. En ésta, se observa un alto porcentaje de tramas recibidas exitosamente y

una leve tendencia al aumento de las mismas cuando se incrementa la duración del RAP, sin embargo no es un aumento considerable.

Por otro lado, el porcentaje de tramas erradas por falta de ACK se mantiene constante y se observa una mínima reducción de las tramas recibidas exitosamente en 2 o más intentos a medida que se incrementa el RAP.

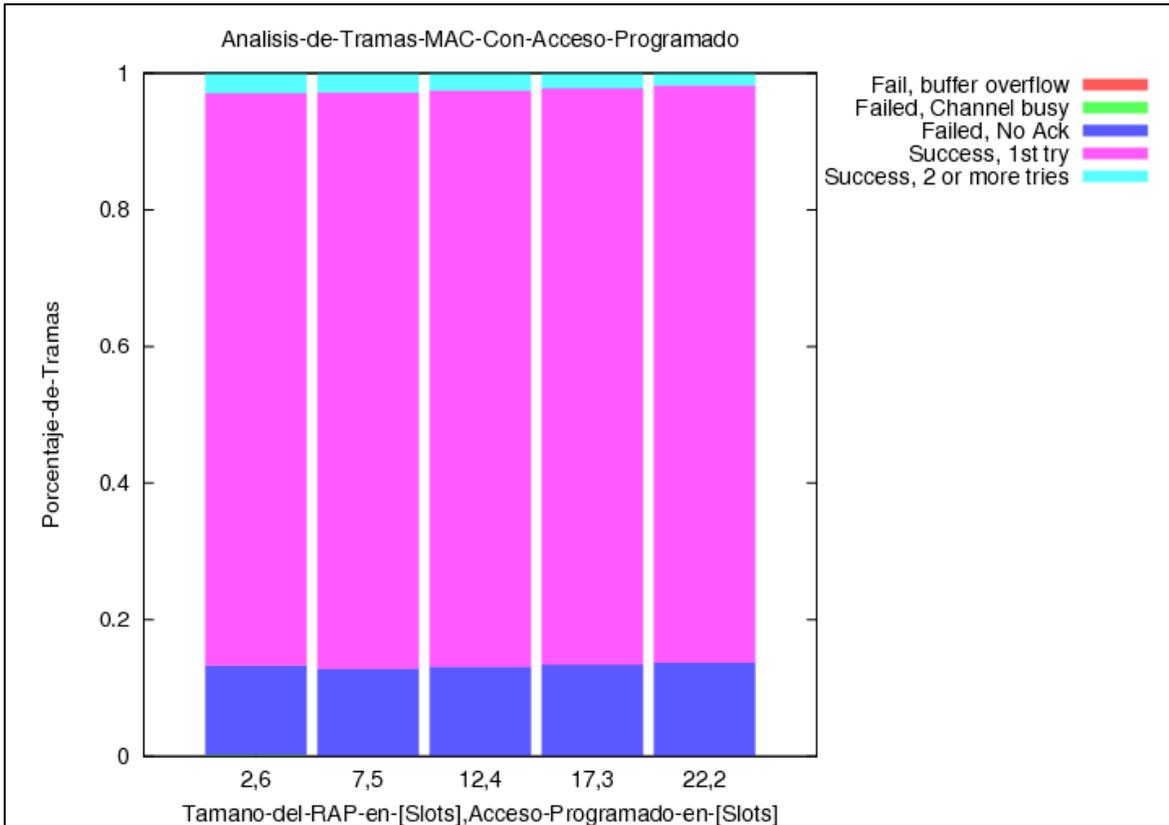


Figura 4.20. Escenario No. 3. Análisis del promedio de tramas totales, variando la duración del RAP y del intervalo de asignación programado.

Con el análisis de tramas se corrobora que en este escenario no se presentan tramas erradas por canal ocupado, ya que el *hub* asigna un intervalo de asignación programado a cada nodo, en el cual se garantiza un intervalo de tiempo para acceder al canal sin contención.

Para precisar en el análisis de tramas mostrado en la figura 4.20, se presenta la tabla 4.16, en la cual se observa que cuando se emplea un RAP y un intervalo de asignación programado de 7 y 5 ranuras respectivamente, se obtiene el valor más bajo de la FER en comparación con los casos anteriores.

Duración del RAP y del Int. De Asig. Programado [Ranuras]	Tramas Erradas				Tramas Exitosas			FER %
	Desb. del Buffer	Canal Ocupado	No ACK	Total Erradas	1er Intento	2 o más intentos	Total Exitosas	
2, 6	0	1	61	62	388	13	401	13,39
7,5	0	0	59	59	391	13	404	12,74
12,4	0	0	61	61	391	11	402	13,17
17,3	0	0	62	62	392	10	402	13,36
22,2	0	0	63	63	392	8	400	13,61

Tabla 4.16. Escenario No 3. Análisis del promedio de tramas totales y FER para diferentes duraciones del RAP y del intervalo de asignación programado. Por los Autores.

En la tabla 4.16, también se observa que el número de tramas recibidas de manera exitosa para las diferentes duraciones del RAP y del intervalo de asignación programado es aproximadamente 402, el cual es el mayor valor obtenido hasta el momento.

▪ **Latencia**

La figura 4.21 presenta el histograma de latencia para el escenario No. 3, en la que cada columna de color representa una duración del RAP y del intervalo de asignación programado, como lo indica la leyenda de la gráfica.

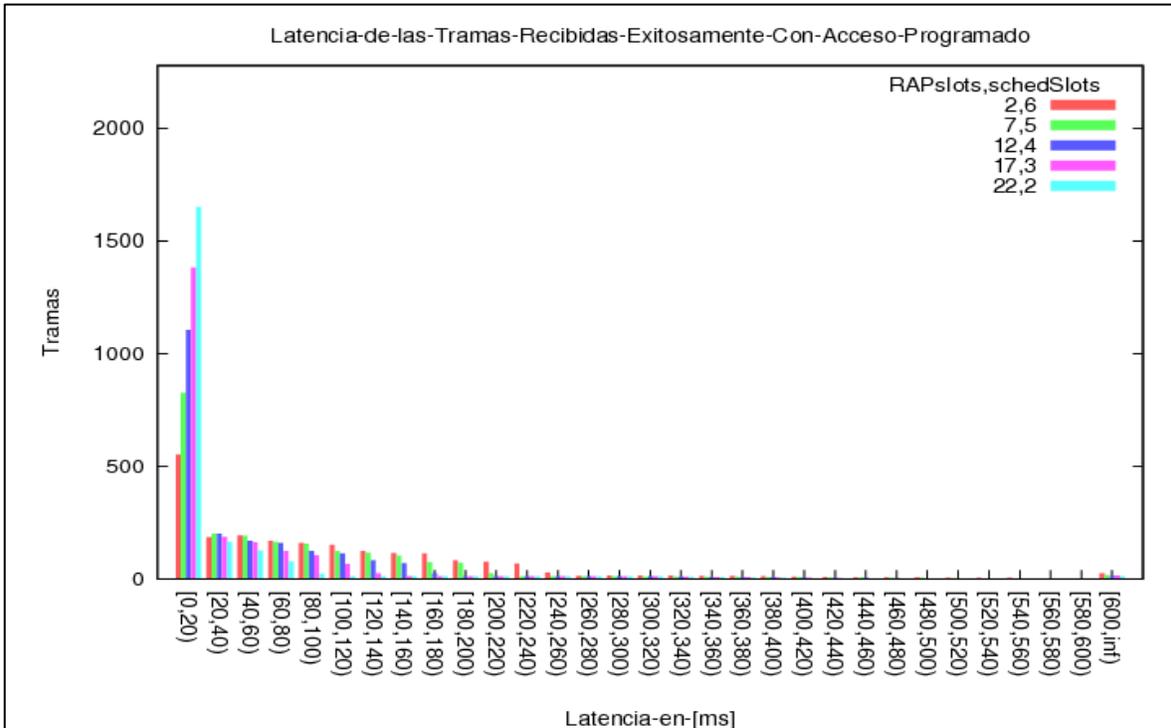


Figura 4.21. Escenario No 3. Latencia del total de tramas, variando la duración del RAP y del intervalo de asignación programado.

En la figura 4.21 se observa que a medida que la duración del RAP aumenta y el intervalo de asignación programado disminuye, las tramas recibidas presentan menor latencia. Esto es debido, a que los nodos pueden contender por el canal en cualquier momento, sin esperar hasta que tengan asignada una transmisión programada. Por lo tanto, las fases de acceso programado de larga duración, aumentan el retardo total de las tramas (línea roja y verde).

También se observa que para los intervalos de asignación programados más largos (4, 5 y 6 ranuras), se reciben tramas de manera exitosa en el *hub* con una latencia superior a 125 ms, mientras que utilizando intervalos programados más cortos (3 y 2 ranuras) y duraciones del RAP más largas, la totalidad de las tramas presentan un latencia inferior a dicho valor.

▪ Consumo de Energía

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el consumo de energía de los nodos cuando emplean simultáneamente CSMA/CA y acceso programado.

La figura 4.22, presenta la energía consumida por nodo, mientras que la figura 4.23 muestra el consumo promedio de todos los nodos de la red. De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidencia que el acceso programado favorece el ahorro de energía por parte de los nodos, ya que cuando no tienen tramas por transmitir, estos pasan a un estado de reposo en el que ahorran energía como se explicó en el apartado 3.2.1.2 del presente documento.

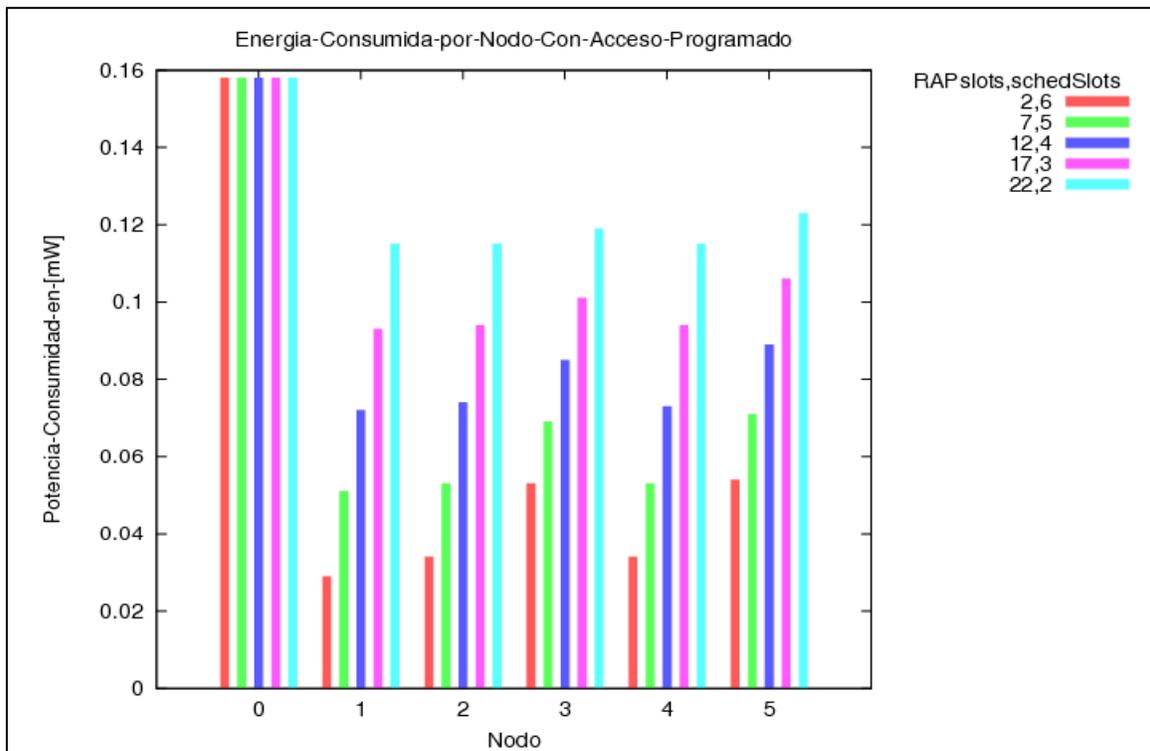


Figura 4.22. Escenario No 3. Energía consumida por nodo, Empleando CSMA/CA y Acceso Programado.

En la figura 4.22 se observa que el consumo de energía del *hub*, el cual es un dispositivo de función completa, es igual al consumido por los nodos en el caso 2c. Adicionalmente se observa que los nodos con menores tasas de datos (Nodo 1, 2 y 4) consumen ligeramente menos energía que los nodos con mayores tasas de datos (Nodo 3 y 5).

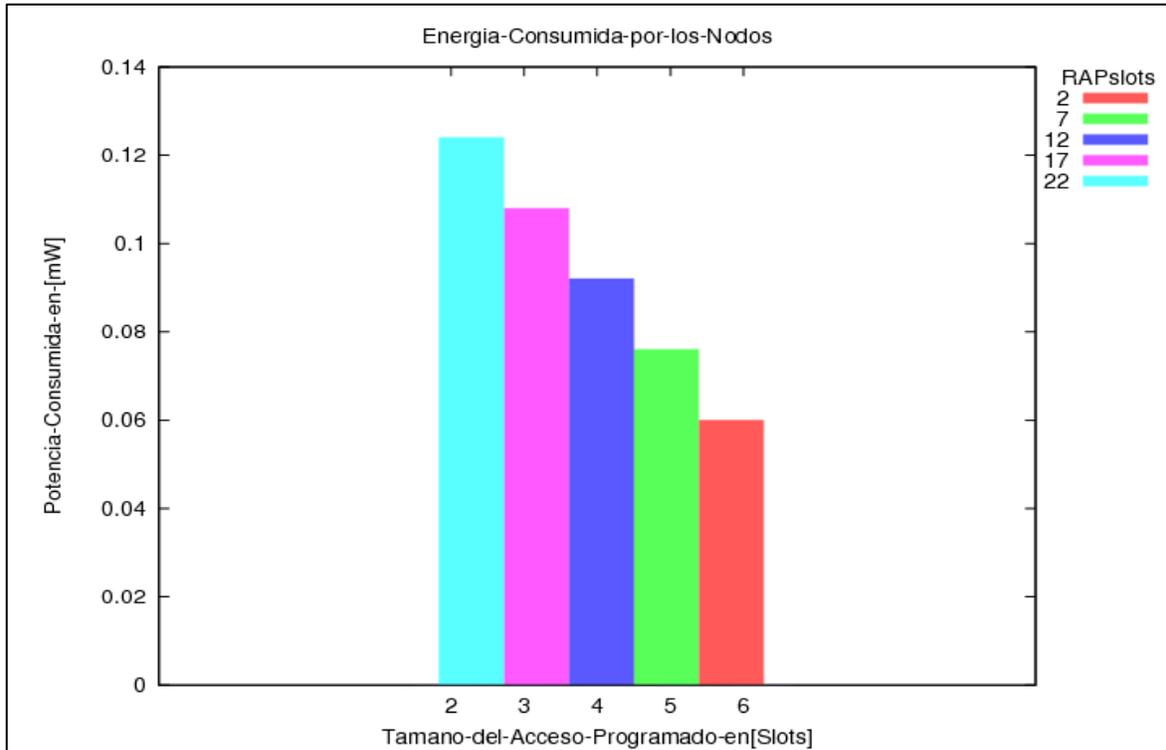


Figura 4.23. Escenario No 3. Energía promedio consumida por los nodos, Empleando CSMA/CA y Acceso Programado.

De la figura 4.23 se observa que el consumo mínimo de energía se presenta para la máxima duración del acceso programado (6 ranuras) y para la duración del RAP más corta (2 ranuras), ya que los nodos gastan menos energía cuando transmiten en un intervalo de contención pequeño. Adicionalmente, como los nodos emplean acceso programado, mientras no tengan tramas para transmitir entran en estado de reposo y ahorran energía.

Por el contrario, cuando la duración de la fase de acceso programado es corta (2 ranuras) y la duración del RAP es larga (22 ranuras), los nodos gastan una cantidad de energía considerable, como lo muestran las figuras 4.22 y 4.23.

Después de realizar los respectivos análisis para cada caso descrito, la tabla 4.17 presenta una comparación de los resultados de los parámetros que pueden afectar el desempeño de la red, con el fin de llegar a una conclusión general en la que se visualice cuál de los casos arrojó mejores resultados.

Dado que anteriormente se escogió un tamaño de *buffer* adecuado de 64 tramas, se mostrarán solo los resultados obtenidos con dicho valor. Para comparar la latencia en los

diferentes casos, se observaron las figuras correspondientes y se sumaron de manera aproximada las tramas que se reciben con un valor inferior a 125 ms.

	Nodos	Canal Inalámbrico	Técnica de Acceso	Duración de la fase de Acceso	FER [%]	Tramas Rx<125 ms	Consumo de Energía [mW]
ESCENARIO No. 1							
Caso 1a	Equidistantes	Sin Variación Temporal	CSMA/CA	RAP: 8 Ranuras	35.34	1360	N/A
Caso 1b	Equidistantes	Con Variación Temporal	CSMA/CA	RAP: 8 Ranuras	36.85	1290	N/A
ESCENARIO No. 2							
Caso 2a	Distribuidos	Sin Variación Temporal	CSMA/CA	RAP: 8 Ranuras	32.83	1380	N/A
Caso 2b	Distribuidos	Con Variación Temporal	CSMA/CA	RAP: 8 Ranuras	38.01	1170	0.16
Caso 2c	Distribuidos	Con Variación Temporal	CSMA/CA	RAP: 4 Ranuras	42,98	820	0.16
				RAP: 8 Ranuras	38,15	1170	0.16
				RAP: 12 Ranuras	33,26	1370	0.16
				RAP: 16 Ranuras	29,37	1520	0.16
				RAP: 20 Ranuras	25,22	1660	0.16
				RAP: 24 Ranuras	20,09	1900	0.16
				RAP: 28 Ranuras	16,85	2000	0.16
RAP: 32 Ranuras	14,44	2100	0.16				
ESCENARIO No. 3							
Escenario No. 3	Distribuidos	Con Variación Temporal	CSMA/CA y Acceso Programado	RAP: 2, Int. Asig. Programado: 6	13,39	1390	0.06
				RAP: 7, Int. Asig. Programado: 5	12,74	1580	0.07
				RAP: 12, Int. Asig. Programado: 4	13,17	1860	0.09
				RAP: 17, Int. Asig. Programado: 3	13,36	2030	0.11
				RAP: 22, Int. Asig. Programado: 2	13,61	2120	0.12

Tabla 4.17 Resultados de los parámetros de desempeño presentados en los escenarios. Por los Autores.

De la tabla 4.17 y de la ejecución de todos los casos de simulación, se presentan las siguientes conclusiones:

- Para los casos de simulación en los cuales se definió variación temporal en el canal inalámbrico, se incrementó ligeramente el valor de la FER y se redujo el número de tramas recibidas con una latencia inferior a 125 ms, respecto a las obtenidas en los casos con el canal sin variación.
- Al comparar los resultados obtenidos en los escenarios No.1 y No. 2 con variación temporal, se observa un incremento en la FER cuando los nodos se encuentran

distribuidos en el cuerpo, lo cual indica que el efecto de la variación temporal se hace más pronunciado para los enlaces de mayor distancia.

- Los nodos de la red BAN con tasas de datos superiores a 5 tramas/segundo, presentan tramas erradas por canal ocupado, por lo que se hace necesario incrementar la duración del RAP para reducir las fallas por tal motivo.
- Cuando los nodos presentan altas tasas de datos, se debe incrementar el tamaño del *buffer* para evitar tramas erradas por desbordamiento.
- El cálculo de la FER para los diferentes casos de simulación, evidenció que la prioridad de las tramas no afecta directamente a este parámetro, puesto que una alta o baja prioridad no decremента o incrementa respectivamente, las tramas erradas en la red.
- La duración del RAP es un parámetro que al incrementarse, reduce considerablemente la FER en la red y que permite que un número mayor de tramas se reciban de manera exitosa con una latencia inferior a 125 ms, cumpliendo con los requerimientos de las aplicaciones de carácter médico de las BAN.
- Cuando se emplea acceso programado en la red BAN, la FER presenta valores menores a los obtenidos con acceso aleatorio y estos se encuentran próximos a cumplir con el requerimiento de ser inferiores al 10%.
- Al comparar el consumo de energía de los nodos en el escenario No. 2 y No. 3, se evidencia un consumo constante al utilizar CSMA/CA en cualquier duración del RAP, sin embargo el consumo se reduce considerablemente al emplear el método de acceso programado.
- Para realizar un análisis adecuado de los escenarios y casos de simulación, particularmente en Castalia, se debe tener cuidado al escoger el módulo, submódulo y la aplicación a usar, ya que ésta debe contener los parámetros que se desean configurar. Es por esto, que si se requiere analizar el protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.6, se debe escoger el módulo comunicación, el submódulo MAC y la aplicación denominada *BaselineBANMac*.
- Castalia cuenta con múltiples test de simulación, razón por la cual, se debe escoger correctamente la prueba de simulación a utilizar, puesto que de ésta depende la manera como los nodos enviarán sus tramas hacia el *hub*. En el caso de la red BAN simulada, se debe trabajar con la prueba denominada *Throughput Test*, del módulo aplicación.
- La latencia es un parámetro que indica el retardo con que las tramas llegan al *hub* desde los nodos. Ésta permite analizar y predecir el desempeño de la red BAN a partir de la observación de histogramas que muestran el número de tramas con determinados niveles de retardo. De esta forma, un elevado número de tramas que presenten alta latencia, sugiere una futura saturación e incremento de las fallas por canal ocupado y por desbordamiento del *buffer*.

- Con base en los resultados obtenidos en todos los escenarios simulados, se concluye que para obtener el mejor desempeño de la red BAN, en términos de tramas recibidas exitosamente, de FER, de latencia y de consumo de energía, los nodos deben emplear conjuntamente la técnica aleatoria CSMA/CA en un RAP de 12 ranuras y acceso programado en un intervalo de asignación de 4. Con lo cual, se logra obtener una latencia inferior a 125 ms, se reduce la FER hasta un 13.17% y se consigue un consumo de energía de aproximadamente 0.09 mW.

Este capítulo presentó los resultados arrojados por la simulación en los 3 escenarios que componen el plan de pruebas, con los cuales se realizó el análisis de los principales parámetros de los métodos de acceso y su efecto en el desempeño de la red BAN.

El capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas después del desarrollo del proyecto, recomendaciones y trabajos futuros que se pueden implementar con referencia a esta temática.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, las recomendaciones y los trabajos futuros, resultado de la realización de este trabajo de grado. Las conclusiones se basan en los objetivos propuestos y en su desarrollo, tal como se ha registrado en este documento. Las recomendaciones se dan acerca de la metodología de trabajo y los trabajos futuros con respecto a las herramientas de simulación, técnicas de acceso y escenarios de simulación.

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1. Respecto al Método de Acceso

- La técnica de acceso aleatorio CSMA/CA, exige que los nodos se encuentren sensando constantemente el canal, lo cual produce un gasto de energía extra que impacta negativamente el consumo total de la red.
- El método de acceso programado, a diferencia de los métodos basados en contención, reduce considerablemente el consumo de energía en la red BAN, ya que los nodos solo permanecen activos durante el tiempo de transmisión asignado.
- De los métodos de acceso evaluados se verificó que el mejor desempeño de la red, se logra cuando los nodos y el *hub* utilizan conjuntamente acceso aleatorio y acceso programado. Esta coexistencia entre métodos permite cumplir con los requerimientos técnicos propios de la BAN.
- Con la técnica de acceso aleatorio CSMA/CA se obtiene menor latencia que con el método de acceso programado, debido a que los nodos pueden contender por el canal en cualquier momento en que éste se encuentre libre, sin tener que esperar hasta su próximo intervalo de asignación.
- El método de acceso programado presenta una reducción importante en el porcentaje de la FER en comparación con el método de acceso aleatorio. Esto es debido, a que es un método orientado a la conexión, libre de contención y por lo tanto de colisiones.
- Se evidenció que la prioridad que se le asigna a cada nodo para acceder al medio en el proceso de transferencia de datos hacia el *hub*, genera un impacto mínimo en el desempeño de la red.
- La posibilidad de escoger el método de acceso al medio según las necesidades de la red y de establecer una estructura de prioridad para los nodos, hace al protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.6 más complejo, pero al mismo tiempo más flexible para satisfacer los diversos requerimientos de la red BAN.
- El método de acceso aleatorio presenta buena escalabilidad, baja latencia y no necesita de sincronización en el tiempo. Mientras que el método de acceso programado, evita la escucha constante del medio, la recepción de tramas

destinadas a otros nodos y las colisiones, pero requiere de una estricta sincronización en el tiempo.

5.1.2. Respecto al Desarrollo de la Simulación

- La definición de los escenarios de simulación con la herramienta Castalia debe desarrollarse a través de líneas de código, ya que ésta no cuenta con una interfaz gráfica para ello.
- Para simular un escenario coherente, se deben establecer de forma anticipada los parámetros técnicos que van a ser considerados en el proceso, tales como la topología, la estructura de prioridad, la técnica de acceso, el comportamiento del canal inalámbrico, entre otros.
- El simulador facilita la ejecución de pruebas simultáneas y permite a su vez ejecutar un gran número de iteraciones, que generan confiabilidad en los resultados obtenidos.
- Castalia requiere en algunos casos, de la realización de pruebas independientes, sí se desean visualizar variables de forma separada.
- Tras ejecutar una prueba de simulación, para variar un parámetro específico, se debe realizar nuevamente la configuración y ejecución de todo el escenario, lo cual hace difícil realizar cambios.

5.1.3. Respecto a los Resultados de la Simulación

- En la red BAN simulada la variación en el tamaño del *buffer* no afecta de manera considerable el desempeño de la red. Sin embargo, se evidencia que los nodos con las tasas de datos más altas requieren de un *buffer* más grande, para evitar tramas erradas por desbordamiento.
- Se evidenció que al utilizar CSMA/CA, se debe incrementar la duración del RAP con el fin de lograr un mejor desempeño de la red, ya que de esta forma se reduce la congestión en el canal.
- Se apreció que para lograr un desempeño óptimo de la red, los nodos deben acceder al medio utilizando un RAP y un intervalo de asignación programado de 12 y 4 ranuras respectivamente.
- En una red BAN la ubicación de los nodos en el cuerpo es un aspecto clave para optimizar el desempeño de la red, debido a que las pérdidas de trayecto y la variación temporal en el canal degradan considerablemente la calidad de los enlaces.
- En la red BAN los nodos con altas tasas de datos presentan tramas erradas por canal ocupado, ya que estos deben transmitir una mayor cantidad de información por unidad de tiempo. Sin embargo, el número tramas erradas por tal motivo, se puede reducir si se incrementa la duración de la fase RAP.

- Se evidenció un incremento en la latencia de las tramas recibidas en el *hub*, cuando el comportamiento del canal inalámbrico presenta variaciones temporales.
- El comportamiento del canal inalámbrico presenta un impacto considerable en el desempeño de la red BAN, debido a que la presencia de variación temporal introduce una condición no ideal al ambiente de simulación, que permite obtener datos que se acercan más a la realidad.
- La fórmula matemática para obtener la FER no es única, existen varias que deben usarse dependiendo del resultado específico que se busque. En este caso, se pretende mostrar un indicador de la proporción de tramas enviadas que se pierden en cualquier parte de la red, para lo cual se utiliza la fórmula presentada en [52], bajo el nombre de tramas perdidas observadas en el enlace.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para seleccionar una herramienta de simulación particular, es necesario hacer un estudio previo y detallado de las características de la misma, que permita determinar si ésta cumple con todos los requisitos necesarios para simular los escenarios planteados, dado que esto permite obtener variables que entreguen resultados más precisos para el análisis.
- Cuando se trabaje con herramientas de simulación de código libre, es recomendable que se conozcan todas las versiones existentes y que se seleccione la que mejor se adapte a los requisitos, tal como ocurre con Castalia, que aunque en sus 3 versiones se implementa el protocolo MAC del estándar IEEE 802.15.6, es solo la última versión la que brinda el conjunto de herramientas más completo para el análisis de resultados.
- De ser posible, es recomendable trabajar con herramientas de simulación que cuenten con una interfaz gráfica amigable al usuario, que permita la creación y configuración de los escenarios visualmente, dado que éstas ayudan a manipular fácilmente las variables y parámetros, de tal forma que en una misma simulación se puedan realizar pruebas o cambios mucho más rápido.
- Cuando se desarrolle un trabajo en simulación, es importante definir claramente los escenarios y casos a tener en cuenta, ya que esto permite estructurar adecuadamente el tipo de pruebas para validar lo que se quiere comprobar.
- Para obtener resultados coherentes y realizar un análisis acertado de los datos obtenidos en las pruebas de simulación, es recomendable determinar un conjunto de iteraciones apropiado, que permita darle validez a los resultados obtenidos y aumentar el nivel de confianza en los mismos.
- Cuando se trabaje con herramientas de simulación de estructura modular y orientada a comandos, es recomendable conocer bien los módulos y submódulos de los que está constituida y cómo estos se relacionan entre sí para que todas las variables puedan operar de forma positiva. Tal es el caso del simulador Castalia.

- Cuando se seleccione una herramienta de simulación como Castalia, que cuenta con múltiples test de simulación, se debe escoger correctamente la prueba a utilizar, puesto que de ésta depende la manera en que el tráfico fluirá desde los nodos hacia el *hub*.
- Para que los resultados de la simulación se obtengan lo suficientemente rápido, se debe tener una máquina con buenas capacidades que cumpla con todos los requerimientos necesarios para soportar el software. Sin embargo, en el caso de Castalia la capacidad de cómputo no es elevada.
- En el procedimiento de acceso al medio de una BAN, es de suma importancia tener en cuenta los parámetros que en cualquier momento pueden afectar el desempeño de la red, con el fin de contrarrestar sus efectos y evitar un mal funcionamiento de la misma, ofreciendo a los usuarios la calidad y confiabilidad necesarias en este tipo de redes.

5.3. TRABAJOS FUTUROS

- Las herramientas de simulación que provean soporte completo para la movilidad de los nodos se aproximan más a la realidad de una BAN, ya que los nodos al estar ubicados en diferentes partes del cuerpo, permanecen en constante movimiento. Se propone hacer uso de dicha característica en trabajos posteriores, para realizar un análisis del desempeño de la red bajo condiciones de movilidad.
- Castalia no implementa completamente la estructura definida para la supertrama del modo *beacon* con supertrama limitada por tramas *beacon*, ya que la que presenta el simulador no cuenta con las fases de acceso EAP, CAP, ni con la trama B2. Se propone realizar la implementación de dichas fases y añadir la trama B2, por medio de módulos funcionales para obtener un análisis del desempeño de la red BAN.
- Dado que Castalia es una herramienta basada en comandos, se propone desarrollar una interfaz gráfica amigable al usuario, que permita realizar la configuración de los diferentes parámetros para facilitar la visualización y comprensión de los escenarios.
- La red BAN funciona en una topología física en estrella que se puede configurar como estrella extendida a dos saltos. Se plantea que en trabajos posteriores se implemente esta característica en la herramienta de simulación, configurando los nodos como repetidores para analizar el desempeño de la red, bajo dicha topología.
- A pesar de que la red BAN por definición opera en una topología física en estrella, se propone realizar una comparación del análisis del desempeño de la red para diferentes distribuciones espaciales de los nodos, tal como anillo, malla, lineal, entre otras.

REFERENCIAS

- [1] F. Martelli, C. Buratti, and R. Verdone, "On the performance of an IEEE 802.15.6 Wireless Body Area Network," *Wireless Conference 2011 - Sustainable Wireless Technologies (European Wireless), 11th European*, pp. 1-6, 2011.
- [2] C. Huasong, Gonza, x, S. Iez-Valenzuela, and V. C. M. Leung, "Employing IEEE 802.15.4 for Quality of Service Provisioning in Wireless Body Area Sensor Networks," in *Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2010 24th IEEE International Conference on*, 2010, pp. 902-909.
- [3] R. Annur, N. Wattanamongkhon, S. Nakpeerayuth, L. Wuttisittikulkij, and J. Takada, "Applying the Tree Algorithm with Prioritization for Body Area Networks," in *Autonomous Decentralized Systems (ISADS), 2011 10th International Symposium on*, 2011, pp. 519-524.
- [4] M. P. B Zhen, SH Lee, ET Won, A Astrin, "TG6 Technical Requirements Document (TRD)," 2008.
- [5] L. C. Arif Onder Isikman, Feiquan Chen, Peng Li, "Body Area Networks," pp. 1-7, 2011.
- [6] M. Maman, F. Dehmas, R. D'Errico, and L. Ouvry, "Evaluating a TDMA MAC for body area networks using a space-time dependent channel model," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on*, 2009, pp. 2101-2105.
- [7] S. Rashwand, J. Misic, and H. Khazaei, "IEEE 802.15.6 under saturation: Some problems to be expected," *Communications and Networks, Journal of*, vol. 13, pp. 142-148, 2011.
- [8] S. Rashwand, J. Misic, and H. Khazaei, "Performance analysis of IEEE 802.15.6 under saturation condition and error-prone channel," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2011 IEEE*, 2011, pp. 1167-1172.
- [9] A. Reichman, "Standardization of body area networks," in *Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, 2009. COMCAS 2009. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1-4.
- [10] B. Miscopein, J. Schwoerer, and J. M. Gorce, "Cooperative beacon-free MAC layer for body area networks," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on*, 2009, pp. 2157-2161.
- [11] K. J. L. Jerome P. Lynch, "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensors Networks for Structural Health Monitoring," *Shock and Vibration Digest*, vol. 38, pp. 91-128, March 2006.
- [12] R. Palaniappan, T. Clarke, P. Wahid, N. Behdad, and P. Kincaid, "A self-organizing hybrid sensor system with distributed data fusion for intruder tracking and surveillance," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE*, 2008, pp. 1-4.
- [13] "IEEE Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 15.6: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs) used in or around a body," *IEEE P802.15.6/D06, November 2011*, pp. 1-264, 2011.
- [14] B. B. Benoit Latré, Ingrid Moerman, Chris Blondia and Piet Demeester, "A Survey on Wireless Body Area Networks," *Journal of Medical Systems*, vol. 17, pp. 1-18, 2012.

- [15] M. A. Ameen, J. Liu, S. Ullah, and K. Kyung Sup, "A power efficient MAC protocol for implant device communication in Wireless Body Area Networks," in *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE*, 2011, pp. 1155-1160.
- [16] O. Omeni, A. Wong, A. J. Burdett, and C. Toumazou, "Energy Efficient Medium Access Protocol for Wireless Medical Body Area Sensor Networks," *Biomedical Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 2, pp. 251-259, 2008.
- [17] M. A. Ameen, A. Nessa, and K. Kyung Sup, "QoS Issues with Focus on Wireless Body Area Networks," in *Convergence and Hybrid Information Technology, 2008. ICCIT '08. Third International Conference on*, 2008, pp. 801-807.
- [18] X. Jiang and Z. Yunru, "A Survey on Body Area Network," in *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom '09. 5th International Conference on*, 2009, pp. 1-4.
- [19] D. Lewis. (2008, 14 Jul. 2012). *802.15.6 Call for Applications - Response Summary*. Disponible en: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/08/15-08-0407-05-0006-tg6-applications-summary.doc>,
- [20] K. S. Kwak, S. Ullah, and N. Ullah, "An overview of IEEE 802.15.6 standard," in *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), 2010 3rd International Symposium on*, 2010, pp. 1-6.
- [21] N. F. Timmons and W. G. Scanlon, "An adaptive energy efficient MAC protocol for the medical body area network," in *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on*, 2009, pp. 587-593.
- [22] S. Kutty and J. A. Laxminarayan, "Towards energy efficient protocols for wireless body area networks," in *Industrial and Information Systems (ICIIS), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 31-34.
- [23] F. C. C. (FCC). (2003, Sep 2012). *Medical Device Radiocommunications Service (MedRadio)*. Disponible en: <http://www.fcc.gov/encyclopedia/medical-device-radiocommunications-service-medradio>
- [24] F. C. C. (FCC). (2003). *Wireless Medical Telemetry Service (WMTS)*. Disponible en: <http://www.fcc.gov/encyclopedia/wireless-medical-telemetry-service-wmts>
- [25] *Fcc Dedicates Spectrum Enabling Medical Body Area Networks To Transform Patient Care, Lower Health Care Costs, And Spur Wireless Medical Innovation*, Fcc, 2012.
- [26] I. ITU. (2012, 18/08/2012). *ITU Radio Regulation 5.150 - ISM Bands.*: <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/PracticeNote.aspx?id=3191>
- [27] *Regulations and Standards for Wireless Medical Applications*, I.-R. Canada, 2009.
- [28] N. Bradai, S. Belhaj, L. Chaari, and L. Kamoun, "Study of medium access mechanisms under IEEE 802.15.6 standard," in *Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2011 4th Joint IFIP*, 2011, pp. 1-6.
- [29] J. D. Day and H. Zimmermann, "The OSI reference model," *Proceedings of the IEEE*, vol. 71, pp. 1334-1340, 1983.
- [30] ITU-T, "Information Technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model," in *Recommendation X.200*, ed, 1994
- [31] B. Shrestha, E. Hossain, and S. Camorlinga, "IEEE 802.15.4 MAC With GTS Transmission for Heterogeneous Devices With Application to Wheelchair Body-Area Sensor Networks," *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 767-777, 2011.

- [32] L. Cheolhyo, L. Hyung-Soo, and C. Sangsung, "An enhanced MAC protocol of IEEE 802.15.4 for wireless body area networks," in *Computer Sciences and Convergence Information Technology (ICCIT), 2010 5th International Conference on*, 2010, pp. 916-919.
- [33] J. S. Yoon, A. Gahng-Seop, J. Seong-Soon, and M. J. Lee, "PNP-MAC: Preemptive Slot Allocation and Non-Preemptive Transmission for Providing QoS in Body Area Networks," in *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2010 7th IEEE*, 2010, pp. 1-5.
- [34] K. A. Ali, J. H. Sarker, and H. T. Mouftah, "Urgency-Based MAC Protocol for Wireless Sensor Body Area Networks," in *Communications Workshops (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 1-6.
- [35] K. L. C. M. MacKenzie, F. McCabe, P. F. Brown, R. Metz, B. A. Hamilton. (2006, Sept 30 2012). Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0. (*Oct 12 2006*), 1-31. Disponible en: <http://docs.oasis-open.org/soa-rm/v1.0/soa-rm.pdf>
- [36] J.-M. Ho, "Best-Effort Scheduled Access," USA Patent, 2012.
- [37] B. S. S. Ullah, S. M. Islam, P. Khan, S. Saleem and K. S. Kwak, "A Study of Medium Access Control Protocols for Wireless Body Area Networks," *Sensors*, vol. 10, pp. 128-145, 2009.
- [38] Y. Zhuo, Y. Yu-Dong, and Z. Di, "Random access in a cognitive radio network with slotted Aloha for primary users and CSMA for secondary users," in *Sarnoff Symposium, 2010 IEEE*, 2010, pp. 1-5.
- [39] A. Boulis. (2011, Oct 28 2012). *A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks, version 3.2* [User's manual]. Disponible en: <http://castalia.npc.nicta.com.au/pdfs/Castalia%20-%20User%20Manual.pdf>
- [40] A. T. S. Shin, "QoS Provisioning in Wireless Body Area Networks: a review on MAC aspects," *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 6, pp. 1267 - 1285, 2012.
- [41] H. Garudadri and P. K. Baheti, "Packet loss mitigation for biomedical signals in healthcare telemetry," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2009. EMBC 2009. Annual International Conference of the IEEE*, 2009, pp. 2450-2453.
- [42] N. F. Mir, *Computer and Communication Networks*: Pearson Education, 2006.
- [43] S. G. Min Chen, Athanasios Vasilakos, Huasong Cao, Victor C. M. Leung, "Body Area Networks: A Survey," *Mobile Networks and Applications*, vol. 16, pp. 1-25, 2010.
- [44] C. Mellon. (2007, Jun. 12 2012). *NS Tutorial*. Disponible en: http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf
- [45] L. Begg, W. Liu, S. Pawlikowski, S. Perera, and H. Sirisena, "Survey of simulators of next generation networks for studying service availability and resilience," Department of Computer Science and Software Engineering, University of Canterbury 2006.
- [46] A. Köpke, M. Swigulski, K. Wessel, D. Willkomm, P. Haneveld, T. Parker, O. Visser, H. Lichte, and S. Valentin, "Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++ the MiXiM vision," in *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, 2008, p. 71.
- [47] O. M. Ülgen, John J. Black, B. Johnsonbaugh, R. Klungle, "Simulation Methodology -- A Practitioner's Perspective," University of Michigan-Dearborn, MI, 2006.

- [48] V. Wojcik, "Steps in Simulation and Model Building," in *Simulation Methodology – Discrete Event Simulation*, ed Ontario, Canada, 2003.
- [49] W. LAB. (14 Jul. 2012). *BAN Applications*. Disponible en: <http://www.wisar.org/research/applications.html>
- [50] S. Hanna, "Regulations and Standards for Wireless Medical Applications," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Medical Information & Communication Technology*, Montreal, Canada, 2009.
- [51] J. Olsén, "On packet loss rates used for TCP network modeling," Citeseer2003.
- [52] J. U. Olsén, *Disciplinary Domain of Science and Technology, Mathematics and Computer Science, Department of Mathematics, Mathematical Statistics*, "On packet loss rates used for TCP network modeling," ed. Uppsala University, Sweden, 2003.