

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de  
Telecomunicación

Estudio del estándar 802.15.7 del IEEE sobre  
sistemas de comunicación por luz visible

Intensificación: Sistemas de Telecomunicación

Autor: Antonio Tamayo Balas

Tutor: María José Madero Ayora

Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

# **Estudio del estándar 802.15.7 del IEEE sobre sistemas de comunicación por luz visible**

Autor:

Antonio Tamayo Balas

Tutor:

María José Madero Ayora

Profesor titular

Dep. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado: Estudio del estándar 802.15.7 del IEEE sobre sistemas de comunicación por luz visible

Autor: Antonio Tamayo Balas

Tutor: María José Madero Ayora

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*





# Agradecimientos

---

Mucho ha sido el tiempo invertido en la realización de este proyecto, sobre todo al tener que compaginarlo con un trabajo en el que paso la mayor parte del día. Pero a pesar de las dificultades, por fin lo he conseguido. Durante todos estos años he pasado por momentos buenos y malos, y gracias al apoyo de muchas personas he aprendido de cada uno de ellos.

En primer lugar, agradezco a mis padres todo su apoyo, el saber transmitirme los valores realmente importantes de la vida y sobre todo su espíritu de superación, trabajo y dedicación a la familia. Sin duda son mi ejemplo a seguir y gran parte de lo que soy y lo que he conseguido se lo debo a ellos.

También muchas gracias al resto de mi familia, por sus ánimos cuando eran más necesarios y por enseñarme a ver la parte buena de todas las experiencias.

A mis amigos, por esos momentos de risas, celebraciones y por conseguir que me olvidase de los apuntes y libros después de largas temporadas de estudio.

Y por último a todos los profesores y demás personas que me he encontrado a lo largo de mi etapa educativa, por el conocimiento que cada uno de ellos ha depositado y por despertar en mí la curiosidad del conocimiento. Hago mención especial a mi profesora María José Madero Ayora, tutora de este proyecto, por su paciencia y rápida resolución de los problemas que han surgido durante el desarrollo de este trabajo, que han sido muchos. Sin duda me ha demostrado su gran vocación docente y transmitido sus conocimientos de la mejor manera posible.

*Antonio Tamayo Balas*

*Sevilla, 2016*



# Resumen

---

En la actualidad el sector de las Telecomunicaciones es uno de los más importantes y que mayor impacto tiene en la vida cotidiana de las personas. Cada vez aparecen nuevos sistemas de comunicaciones y aplicaciones asociadas que buscan mejorar la vida de la población. En este trabajo se explica el estándar IEEE 802.15.7 que trata sobre comunicaciones por luz visible, una tecnología en desarrollo que posibilitará la aparición de nuevas y variadas aplicaciones tomando como base la luz visible.

La importancia de este tipo de comunicaciones radica en dos puntos: uso de una parte del espectro que no se había utilizado antes para comunicaciones inalámbricas y mejor aprovechamiento de aplicaciones de luz que habían sido utilizadas tradicionalmente. El primer punto surge de la saturación que presenta el espectro en la banda de radiofrecuencia, con el tiempo se desarrollan mayor número de aplicaciones con necesidad de un gran ancho de banda. Y por otro lado se aprovecha la funcionalidad de iluminación para también proporcionar comunicación, por lo que se ahorrara en energía y en costes de implementación.

En este documento se explicará la estructura de un sistema VLC, se proporcionarán detalles sobre los protocolos que rigen su funcionamiento, la arquitectura que presenta, métodos de conexión de dispositivos y las restricciones que presentan. También se especificarán los servicios que ofrecen cada una de las capas que compone la arquitectura así como las especificaciones de seguridad de cada una de ellas y de esta forma tener una idea completa de estos sistemas.



# Abstract

---

Nowadays, Telecommunications is one of the most important sectors on the daily lives of people. New communication systems and applications are appearing every time that help people to improve their lives. IEEE standard 802.15.7 about visible light communications is explained in this document, a new developing technology that will enable the implementation of new and varied applications using the visible light.

The importance of this type of communications lies in two points: the use of a portion of the spectrum that had not been used before to wireless communications and the use of traditionally lighting applications. The first point arises from the radiofrequency spectrum saturation due to these frequencies are used by many applications and large bandwidth is needed. On the other hand, the functionality of lighting is mixed with information communications, so it will save energy an implementation costs.

This document will describe the structure of a VLC system, it will provide details of protocols to use them, its architecture, device connection methods and constraints. Services offered by each of the layers and their security specifications will be also specified.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xix</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xxi</b>
<b>Acrónimos y Abreviaciones</b>	<b>xxv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos y alcance	1
1.2 Organización	1
<b>2 Introducción a VLC. Descripciones generales</b>	<b>3</b>
2.1 Topologías de red	3
2.1.1 Topología punto a punto ( <i>peer-to-peer</i> )	4
2.1.2 Topología en estrella	4
2.1.3 Topología en difusión ( <i>broadcast</i> )	5
2.2 <i>Espectro de modulación en dominio</i>	5
2.3 <i>Arquitectura</i>	5
2.3.1 Capa PHY	7
2.3.2 Subcapa MAC	8
2.3.3 Soporte para el control de atenuación y mitigación de parpadeo	8
2.4 <i>Principios de funcionamiento</i>	13
2.4.1 Estructura de supertrama	13
2.4.2 Modelo de transferencia de datos	14
2.4.3 Selección de la tasa de reloj	15
2.4.4 Estructura de trama	15
2.4.5 Mejora de la probabilidad de éxito en el envío	15
2.5 <i>Seguridad</i>	16
2.6 <i>Concepto de primitivas</i>	17

<b>3</b>	<b>Especificación de la capa MAC</b>	<b>19</b>
3.1	<i>Descripción funcional de la subcapa MAC</i>	19
3.1.1	Acceso al canal	19
3.1.2	Comienzo de una VPAN	25
3.1.3	Mantenimiento de VPANs	30
3.1.4	Asociación y des-asociación	32
3.1.5	Sincronización	34
3.1.6	Gestión de transacciones	36
3.1.7	Transmisión, recepción y asentimiento	36
3.1.8	Asignación y gestión de GTS	42
3.1.9	Recuperación rápida de enlace	45
3.1.10	Asignación de recursos de canal múltiple	47
3.1.11	Diseño de celda y soporte de movilidad	50
3.1.12	Gestión de la función de color	53
3.1.13	Estabilización del color	57
3.1.14	Visibilidad y soporte de control de atenuación	57
<b>4</b>	<b>Especificación del servicio de la subcapa MAC</b>	<b>61</b>
4.1	<i>Servicio de datos MAC</i>	61
4.1.1	MCPS-DATA.request	61
4.1.2	MCPS-DATA.confirm	61
4.1.3	MCPS-DATA.indication	62
4.1.4	MCPS-PURGE.request	62
4.1.5	MCPS-PURGE.confirm	62
4.1.6	Secuencia de mensajes del servicio de datos	62
4.2	<i>Servicio de gestión MAC</i>	62
4.2.1	Primitivas de asociación	63
4.2.2	Primitivas de des-asociación	63
4.2.3	Primitiva de notificación de baliza	64
4.2.4	Primitivas de lectura de atributos PIB	64
4.2.5	Primitivas de gestión GTS	65
4.2.6	Primitivas para el reinicio de la subcapa MAC	67
4.2.7	Primitivas para la especificación del tiempo de habilitación del receptor	67
4.2.8	Primitivas para el escaneo de canales	67
4.2.9	Primitivas del estado de comunicación	68
4.2.10	Primitivas para la escritura de los atributos PIB	68
4.2.11	Primitivas para la actualización de la configuración de supertrama	68
4.2.12	Primitiva para la sincronización con un coordinador	69
4.2.13	Primitiva para la pérdida de sincronización con un coordinador	69
4.2.14	Primitivas para la petición de datos de un coordinador	70
<b>5</b>	<b>Especificaciones de seguridad</b>	<b>72</b>
5.1	<i>Descripción funcional</i>	72
5.1.1	Procedimiento de seguridad de tramas salientes	72
5.1.2	Procedimiento de seguridad de tramas entrantes	73
<b>6</b>	<b>Especificación de la capa PHY</b>	<b>75</b>
6.1	<i>Modos de operación</i>	75
6.2	<i>Requerimientos generales</i>	77
6.2.1	Plan de bandas	77
6.2.2	Tolerancia de error máxima para múltiples fuentes ópticas	77
6.2.3	Periodos LIFS, SIFS y RIFS mínimos	78
6.2.4	Tiempo de respuesta TX-RX	79
6.2.5	Tiempo de respuesta RX-TX	79
6.2.6	Tolerancia de la frecuencia de reloj en la transmisión de datos	79
6.2.7	Indicador de la calidad de la longitud de onda (WQI)	79



6.3	<i>Modos de datos</i>	80
6.4	<i>Mitigación de atenuación y parpadeo</i>	81
6.4.1	Control de atenuación durante el tiempo de inactividad	81
6.4.2	Control de atenuación durante el tiempo de transmisión de datos	81
6.4.3	Mitigación del parpadeo	83
6.4.4	Estabilización del color en CSK en el transmisor	84
6.5	<i>Formato de PPDU</i>	85
6.5.1	Preámbulo	85
6.5.2	Cabecera PHY	86
6.5.3	Cabecera de control de secuencia (HCS)	87
6.5.4	Campos opcionales	87
6.5.5	Campo PSDU	88
<b>7</b>	<b>Especificaciones del servicio PHY</b>	<b>91</b>
7.1	<i>Servicio de gestión PHY</i>	91
7.1.1	PLME-CCA.request	91
7.1.2	PLME-CCA.confirm	91
7.1.3	PLME-GET.request	91
7.1.4	PLME-GET.confirm	92
7.1.5	PLME-SET.request	92
7.1.6	PLME-SET.confirm	92
7.1.7	PLME-SET-TRX-STATE.request	92
7.1.8	PLME-SET-TRX-STATE.confirm	92
7.1.9	PLME-SWITCH.request	92
7.1.10	PLME-SWITCH.confirm	92
7.2	<i>Servicio de datos PHY</i>	92
7.2.1	PD-DATA.request	93
7.2.2	PD-DATA.confirm	93
7.2.3	PD-DATA.indication	93
<b>8</b>	<b>Especificaciones de PHY I</b>	<b>95</b>
8.1	<i>Codificador externo de corrección de errores hacia adelante</i>	95
8.2	<i>Codificador interno de corrección de error hacia adelante</i>	96
8.2.1	Código de tasa 1/4	96
8.2.2	Código de tasa 1/3	97
8.2.3	Código de tasa 2/3	97
8.3	Codificador run-length limiting	97
8.3.1	Codificación 4B6B para modos VPPM	97
8.3.2	Codificación Manchester para el modo OOK	99
<b>9</b>	<b>Especificaciones de PHY II</b>	<b>101</b>
9.1	Codificador para la corrección de errores hacia adelante	101
<b>10</b>	<b>Especificaciones de PHY III</b>	<b>103</b>
10.1	Scrambler	103
10.2	Codificador de canal	104
10.3	Constelación CSK	104
10.4	Reglas de diseño de la constelación CSK	106
10.4.1	Regla de diseño para 4-CSK	106
10.4.2	Reglas de diseño para 8-CSK	107
10.4.3	Reglas de diseño para 16-CSK	107
10.5	Mapeo de datos para CSK	108
10.6	Combinaciones de bandas de color válidas	109
10.7	Calibración CSK en el receptor	111
<b>11</b>	<b>Conclusión</b>	<b>115</b>
11.1	Conclusión	115

11.2 Líneas futuras de trabajo	116
<b>Referencias</b>	<b>117</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2–1 Clasificación de dispositivos	3
Tabla 3–1 Uso de dirección corta de 16 bits	34
Tabla 3–2 Carga útil de la trama de instrucción para múltiples bandas	49
Tabla 3–3 Carga útil de la trama de instrucción para el salto de canal	50
Tabla 3–4 Tabla de color para la indicación del estado MAC	54
Tabla 3–5 Tabla de color para la indicación de la calidad del canal	56
Tabla 6–1 Modos de operación PHY I	76
Tabla 6–2 Modos de operación PHY II	76
Tabla 6–3 Modos de operación PHY III	77
Tabla 6–4 Plan de bandas de longitud de onda de luz visible	77
Tabla 6–5 Periodos LIFS, SIFS y RIFS mínimos	78
Tabla 6–6 Ejemplos de patrones de visibilidad para códigos 8B10B	81
Tabla 6–7 Mitigación del parpadeo para diferentes modos de modulación	84
Tabla 6–8 Asignación de TPD para varias topologías	86
Tabla 6–9 Cabecera PHY	87
Tabla 6–10 Extensión de atenuación OOK	87
Tabla 8–1 Polinomios generadores	95
Tabla 8–2 Mapeo de la entrada 4B con la salida 6B	98
Tabla 8–3 Codificación Manchester	99
Tabla 8–4 Definición del mapeo de datos para el modo VPPM	99
Tabla 10–1 Selección de semilla de codificación	104
Tabla 10–2 Coordenadas de color $xy$	105
Tabla 10–3 Combinaciones de bandas de color para CSK	110
Tabla 10–4 Ejemplo de combinaciones de bandas de color para (110, 010, 000)	111



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Topologías MAC soportadas	4
Figura 2-2. Espectro de modulación en dominio	5
Figura 2-3. Arquitectura de dispositivo VPAN	6
Figura 2-4. Separación FDM de los tipos PHY en la modulación por dominio	7
Figura 2-5. Adaptación del patrón de atenuación y el ciclo de trabajo de datos según la configuración del control de atenuación.	9
Figura 2-6. Ejemplo de patrón de inactividad y tiempo de compensación	10
Figura 2-7. Estructura de control de atenuación OOK	11
Figura 2-8. Ejemplo de control de atenuación OOK para aumentar el brillo	11
Figura 2-9. Mecanismo de control de atenuación para VPPM	12
Figura 2-10. Ejemplo de control de atenuación para VPPM	12
Figura 2-11. Estructura de supertrama sin GTSS	13
Figura 2-12. Primitivas de servicio	17
Figura 3-1. Ejemplo de estructura de supertrama	20
Figura 3-2. Ejemplo de uso de estructura de trama para múltiples topologías	21
Figura 3-3. Uso de tramas CVD durante los modos de operación en inactividad o recepción	22
Figura 3-4. Espaciado entre tramas	23
Figura 3-5. Diagrama de flujo de acceso aleatorio	25
Figura 3-6. Inicio de VPAN	28
Figura 3-7. Concepto de agregación de canal y canal de guarda	30
Figura 3-8. Transmisión de datos sin asentimiento	40
Figura 3-9. Transmisión de datos con asentimiento	40
Figura 3-10. Escenarios de transmisión utilizando transmisión directa	42
Figura 3-11. Desfragmentación de CFP en rehúso de GTS	44
Figura 3-12. Ejemplo del proceso de parada en la transmisión de datos basado en la cuenta de retransmisiones y activación del FLR	45

Figura 3-13. Ejemplo del proceso de la parada de envío de datos del coordinador en la cuenta de retransmisión y activación FLR	46
Figura 3-14. Diagrama de flujo del proceso de asistencia de bandas de color al FLR	47
Figura 3-15. Ejemplo de uso de canal múltiple	48
Figura 3-16. MSC para información multibanda	49
Figura 3-17. Movilidad física y lógica	50
Figura 3-18. Configuración de célula para movilidad VLC	51
Figura 3-19. Gestión de movilidad para un dispositivo a través de múltiples células	52
Figura 3-20. Configuración de supertrama para el soporte de movilidad	52
Figura 3-21. Tamaño de celda y procedimiento de búsqueda de localización	53
Figura 3-22. MSC cuando se invoca la función de color para la indicación de asociación	54
Figura 3-23. Uso de trama CVD para indicación de asentimiento	55
Figura 3-24. Ejemplo de uso de MSC para trama CVD en la indicación del estado de transferencia del fichero	56
Figura 3-25. Modo de preámbulo extendido proporcionado por la subcapa MAC	58
Figura 3-26. Preámbulo truncado en el modo de preámbulo extendido para el uso del tiempo de inactividad para visibilidad	58
Figura 3-27. Uso de tramas CVD durante la operación en estrella	59
Figura 3-28. Ejemplo del uso del patrón de visibilidad para establecer la mejor conectividad a un dispositivo de la infraestructura	60
Figura 4-1. Modelo de referencia para la subcapa MAC	61
Figura 4-2. Secuencia de mensajes describiendo el servicio de datos MAC	62
Figura 4-3. Secuencia de mensajes para la asociación	63
Figura 4-4. Secuencia de mensajes para la des-asociación iniciada por un dispositivo	64
Figura 4-5. Secuencia de mensajes para la asignación de un GTS iniciada por un dispositivo	66
Figura 4-6. Secuencia de mensajes para el rechazo iniciado por un dispositivo (a) y el coordinador PAN (b)	66
Figura 4-7. Secuencia de mensajes para la actualización de la configuración de supertrama	69
Figura 4-8. Secuencia de mensajes para la sincronización con un coordinador en una VPAN con uso de baliza	70
Figura 4-9. Secuencia de mensajes para la petición de datos desde un coordinador	71
Figura 6-1. Variación máxima permitida en la salida de las fuentes ópticas	78
Figura 6-2. Modos de datos soportados por la subcapa MAC (único, paquete y ráfaga)	80
Figura 6-3. Ciclo proporcional entre dos símbolos de trabajo para conseguir la atenuación fraccional con una precisión del 0.1% en el modo VPPM	83
Figura 6-4. Bucle de control para la estabilización del color	84
Figura 6-5. Implementación del enlace de estabilización del color	85
Figura 6-6. Formato de la PPDU	85
Figura 6-7. Transmisión de preámbulo	86
Figura 6-8. Transmisión de preámbulo de difusión	86
Figura 6-9. Campos opcionales de PPDU	87

Figura 6-10. Estructura del campo PSDU	88
Figura 6-11. Estructura de PPDU	89
Figura 7-1. Puntos de acceso al servicio de la capa PHY	91
Figura 8-1. Modulador de referencia para PHY I	95
Figura 8-2. Código convolucional madre de tasa 1/3 con longitud limitada 7	96
Figura 8-3. Patrón de <i>puncturing</i> /perforado para obtener un código de tasa 1/2	97
Figura 8-4. Patrón de repetición utilizado para obtener un código efectivo de tasa 1/4	97
Figura 8-5. Patrón de perforado/ <i>puncturing</i> para obtener el código de tasa 2/3	97
Figura 8-6. Comparación entre símbolos no codificados y codificados con 4B6B	99
Figura 9-1. Modulador de referencia para PHY II	101
Figura 9-2. Uso del código RS GF(256) con codificador 4B6B	101
Figura 10-1. Sistema CSK para PHY III	103
Figura 10-2. Sistema CSK para PHY III	104
Figura 10-3. Centro de las bandas de color en las coordenadas $xy$	106
Figura 10-4. Reglas de diseño de la constelación 4-CSK	106
Figura 10-5. Reglas de diseño de la constelación 8-CSK	107
Figura 10-6. Reglas de diseño de la constelación 16-CSK	108
Figura 10-7. Mapeo de datos 4-CSK	108
Figura 10-8. Mapeo de datos 8-CSK	109
Figura 10-9. Mapeo de datos 16-CSK	109
Figura 10-10. Ejemplo de constelación CSK para códigos (110, 010, 000)	110
Figura 10-11. Constelación CSK hecha para combinaciones de bandas de color	111
Figura 10-12. Sistema CSK con calibración de color	112
Figura 10-13. Códigos Walsh para calibración del color	113





# Acrónimos y Abreviaciones

---

<b>A/D</b> (analog-to-digital converter)	Convertidor analógico/digital
<b>ACK</b> (acknowledgment)	Asentimiento
<b>AES</b> (advanced encryption standard)	Estándar de cifrado avanzado
<b>AR</b> (acknowledgment request)	Petición de asentimiento
<b>BE</b> (backoff exponent)	Exponente de retroceso
<b>BI</b> (beacon interval)	Intervalo de baliza
<b>BO</b> (beacon order)	Petición de baliza
<b>BSN</b> (beacon-sequence number)	Número de secuencia de baliza
<b>CAP</b> (contention access period)	Periodo de acceso por contención
<b>CC</b> (convolutional code)	Código convolucional
<b>CCA</b> (clear channel assessment)	Evaluación de canal libre
<b>CDR</b> (clock and data recovery)	Recuperación de datos y reloj
<b>CFP</b> (contention-free period)	Periodo libre de contención
<b>CIE</b> Commission Internationale de l'Eclairage (International Commission on Illumination)	(International Commission on Illumination)
<b>CRC</b> (cyclic redundancy check)	Control de redundancia cíclico
<b>CSK</b> (Color-shift keying)	Modulación por desplazamiento de color
<b>CSMA/CA</b> (carrier sense multiple access with collision avoidance)	Acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones
<b>CVD</b> (color visibility dimming)	Atenuación de visibilidad de color
<b>D/A</b> (digital-to-analog converter)	Convertidor digital/analógico
<b>D/L</b> (downlink)	Enlace descendente
<b>DC</b> (direct current)	Corriente continua
<b>DME</b> (device management entity)	Entidad de gestión de dispositivos
<b>ED</b> (energy detection)	Detección de energía
<b>ENC</b> (encryption mode)	Modo de cifrado
<b>FCS</b> (frame check sequence)	Secuencia de control de trama
<b>FDM</b> (frequency division multiplexing)	Multiplexación por división en frecuencia
<b>FEC</b> (forward error correction)	Corrección de errores hacia adelante

<b>FER</b> (frame-error ratio)	Tasa de error de trama
<b>FLP</b> (fast locking pattern)	Patrón de bloqueo rápido
<b>FLR</b> (fast link recovery)	Recuperación de enlace rápido
<b>FOV</b> (field of view)	Campo de visión
<b>GF</b> (Galois field)	Campo finito
<b>GTS</b> (guaranteed time slot)	Ranura de tiempo garantizado
<b>HCS</b> (header-check sequence)	Secuencia de control de cabecera
<b>HP</b> (hopping pattern)	Patrón de salto
<b>IFS</b> (interframe space)	Espacio entre tramas
<b>ID</b> (identifier)	Identificador
<b>IE</b> (information element)	Información de elemento
<b>LD</b> (laser diode)	Diodo láser
<b>LED</b> (light-emitting diode)	Diodo de emisión de luz
<b>LIFS</b> (long interframe space)	Espacio entre tramas largo
<b>LLC</b> (logical link control)	Control de enlace lógico
<b>LPDU</b> (logical link control protocol data unit)	Unidad de datos del protocolo de control de enlace físico
<b>LOS</b> (line of sight)	Línea de visión
<b>MAC</b> (medium access control)	Control de acceso al medio
<b>MCPS</b> (medium-access-control common-part sublayer)	Subcapa de la parte común del control de acceso al medio
<b>MCS</b> (modulation and coding scheme)	Modulación y esquema de codificación
<b>MD</b> (mobile device)	Dispositivo móvil
<b>MFR</b> (medium-access-control footer)	Pie de control de acceso al medio
<b>MFTP</b> (maximum flickering-time period)	Periodo máximo de tiempo de parpadeo
<b>MHR</b> (medium-access-control header)	Cabecera de control de acceso al medio
<b>MIC</b> (message-integrity code)	Código de integridad del mensaje
<b>MLME</b> (medium-access-control link-management entity)	Entidad de gestión del enlace en el control de acceso al medio
<b>MPDU</b> (medium-access-control protocol-data unit)	Unidad de datos del protocolo del control de acceso al medio
<b>MSDU</b> (medium-access-control service-data unit)	Unidad de datos del servicio del control de acceso al medio
<b>NB</b> (number of backoffs)	Número de retrocesos
<b>OOK</b> (on-off keying)	Cifrado de encendido y apagado
<b>PAN</b> (personal-area network)	Red de área personal
<b>PD</b> (physical-layer data)	Dato de capa física
<b>PHR</b> (physical-layer header)	Cabecera de capa física
<b>PHY</b> (physical layer)	Capa física
<b>PIB</b> (physical-layer personal-area-network information base)	Información base de la capa física de la red de área personal
<b>PID</b> (personal-area-network identifier)	Identificador de red de área personal
<b>PLME</b> (physical-layer management entity)	Entidad de gestión de capa física
<b>PPDU</b> (physical-layer data unit)	Unidad de datos de capa física
<b>PSDU PHY</b> (service data unit)	Unidad de datos de servicio de capa física
<b>PWM</b> (pulse-width modulation)	Modulación por anchura de pulsos
<b>P2MP</b> (point-to-multipoint)	Punto a multipunto

---

<b>P2P</b> (peer-to-peer)	Punto a punto
<b>QoS</b> (quality of service)	Calidad del servicio
<b>RIFS</b> (reduced interframe space)	Espacio entre tramas reducido
<b>RLL</b> (run-length limited)	Código Run-Length Limited
<b>RS</b> (Reed-Solomon)	Código Reed-Solomon
<b>RX</b> (receiver) <b>SAP</b> (service access point)	Receptor
<b>SAP</b> (service access point)	Punto de acceso al servicio
<b>SHR</b> (synchronization header)	Cabecera de sincronización
<b>SIFS</b> (short interframe space)	Espacio entre tramas corto
<b>SPDU</b> (session-protocol data unit)	Unidad de datos del protocolo de sesión
<b>SO</b> (superframe order)	Petición de supertrama
<b>SSCS</b> (service-specific convergence sublayer)	Subcapa de convergencia de servicio específico
<b>TDP</b> (topology dependent pattern)	Patrón dependiente de la topología
<b>TRX</b> (transceiver)	Transceptor
<b>TX</b> (transmitter)	Transmisor
<b>U/L</b> (uplink)	Enlace ascendente
<b>VPAN</b> (visible-light communication personal area network)	Red de área personal mediante comunicación por luz visible
<b>VLC</b> (visible-light communication)	Comunicación por luz visible
<b>VPPM</b> (variable pulse-position modulation)	Modulación por posición de pulso variable
<b>WPAN</b> (wireless personal area network)	Red de área personal inalámbrica
<b>WQI</b> (wavelength quality indication)	Indicación de calidad de longitud de onda



# 1 INTRODUCCIÓN

---

En los últimos años hemos presenciado un auge sin precedentes de las Telecomunicaciones. La idea original de esta tecnología se basaba en la transmisión a través de cables y poco a poco ha ido ganando terreno la comunicación inalámbrica. Hoy en día la comunicación inalámbrica domina el sector de las Telecomunicaciones debido, en gran medida, a que permite la movilidad del usuario ya sea dentro de casa (uso de WiFi) o en exteriores mediante el uso de las comunicaciones móviles. En los últimos años se están produciendo importantes avances en el campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas debido a la saturación del espectro radioeléctrico y la necesidad de uso de una parte del espectro que no ha sido utilizada hasta ahora en comunicaciones inalámbricas, la luz visible. El espectro de luz visible se sitúa en el intervalo de longitud de onda comprendido entre los 380 nm y los 780 nm, lo que proporciona grandes anchos de banda.

El estándar que es objeto de estudio en este Trabajo de Fin de Grado define las capas PHY y MAC utilizadas en comunicaciones ópticas inalámbricas de corto alcance que utilicen luz visible. Con el cumplimiento de las especificaciones que recoge este documento se podrán alcanzar tasas de datos suficientes para soportar servicios multimedia de vídeo y audio, la movilidad del enlace visible, la compatibilidad con otras infraestructuras de luz visible, soportar deficiencias como consecuencia de ruido e interferencias de fuentes como la luz ambiental. Así mismo, se cumple con las leyes aplicables a la seguridad del ojo.

## 1.1 Objetivos y alcance

El objetivo de este trabajo es hacer un estudio del estándar 802.15.7 del IEEE, un documento global para las comunicaciones ópticas inalámbricas que utilicen luz visible. Se pretende conseguir lo siguiente:

- Conocimiento de los sistemas VLC.
- Acceso a cientos de THz del espectro no licenciado.
- Inmunidad frente a interferencias electromagnéticas y la no interferencia con sistemas de Radiofrecuencia (RF).
- Seguridad adicional gracias a que el usuario ve el canal de comunicación.
- Incrementar la aparición de nuevos servicios de comunicación y complementar los ya existentes (iluminación de estancias, monitores, indicaciones luminosas, decoración, etc.) mediante infraestructuras de luz visible.

## 1.2 Organización

El trabajo ha seguido la siguiente estructura:

1. El primer capítulo se proporciona una introducción al uso de comunicaciones ópticas inalámbricas.
2. En el segundo capítulo se presentan descripciones generales sobre el contenido que se va a tratar en el documento y una introducción al concepto de VLC.
3. En el tercer capítulo se detalla el funcionamiento del protocolo MAC, de qué está compuesto, métodos de acceso al canal, comienzo y mantenimiento de VPAN, procesos de asociación y sincronización y soporte para el control de visibilidad.
4. En el cuarto capítulo se especifican las primitivas que utiliza la subcapa MAC.
5. En el quinto capítulo se tratan los procedimientos de seguridad para las tramas entrantes y salientes.
6. En el sexto capítulo se detalla el funcionamiento de la capa PHY, los modos de operación, requerimientos de funcionamiento, modo de datos que soporta, procesos de mitigación del parpadeo y control de atenuación.
7. En el séptimo capítulo se explican las primitivas que rigen el funcionamiento de la capa PHY.
8. Y por último, en los capítulos 8, 9 y 10 se describen las especificaciones de los modos de operación PHY: PHY I, PHY II y PHY III.



# 2 INTRODUCCIÓN A VLC. DESCRIPCIONES GENERALES

La comunicación por luz visible (VLC) realiza una transmisión de datos mediante el uso de fuentes ópticas y la modulación de la intensidad de la luz emitida. Ejemplo de estas fuentes son los diodos emisores de luz (LEDs) y el diodo láser (LD). La comunicación por luz visible combina la iluminación y la comunicación de datos y por tanto se destina a diferentes aplicaciones como la iluminación de estancias, paneles luminosos, iluminación de calles, vehículos y señales de tráfico. En este documento se describirá el uso de VLC en redes inalámbricas de área personal (WPAN). Algunas de las características que se tratarán son las siguientes:

- Operación en estrella, punto a punto (*peer to peer*) o difusión (*broadcast*).
- Direcciones cortas de 16 bits o extendidas de 64 bits.
- Acceso aleatorio ranurado con prevención de colisiones.
- Uso de protocolo reconocido por su fiabilidad en la transferencia.
- Indicación de calidad de longitud de onda (WQI).
- Soporte de control de atenuación.
- Soporte de visibilidad.
- Soporte de función de color.
- Soporte de estabilización del color.

## 2.1 Topologías de red

Tal y como se muestra en la Tabla 2-1, hay tres clases de dispositivos considerados en las VLC: infraestructura, móvil y vehículo.

El estándar IEEE 802.15.7 de redes de área personal en comunicaciones por luz visible (VPAN) relaciona las aplicaciones previstas con tres topologías: punto a punto, estrella y difusión, como queda ilustrado en la Figura 2-1.

Tabla 2-1 Clasificación de dispositivos

	Infraestructura	Móvil	Vehículo
Coordinador fijo	Sí	No	No
Fuente de alimentación	Suficiente	Limitada	Moderada
Factor de forma	Sin restricciones	Con restricciones	Sin restricciones
Fuente de luz	Intensa	Débil	Intensa
Movilidad física	No	Sí	Sí
Cobertura	Corto/largo alcance	Corto alcance	Largo alcance
Tasa de datos	Alta/baja	Alta	Baja

En la topología en estrella, la comunicación se establece entre diferentes dispositivos y un controlador central individual, llamado coordinador. En la topología punto a punto, uno de los dos dispositivos que van a asociarse toma la función de coordinador.

Cada dispositivo o coordinador tiene una dirección única de 64 bits, aunque cuando un dispositivo se asocia con un coordinador se le permite la asignación de una dirección de 16 bits. Cada una de las direcciones podrá ser utilizada para la comunicación dentro de la VPAN gestionadas por el coordinador. El coordinador generalmente utilizará una fuente de energía principal, mientras que los dispositivos asociados harán uso de baterías.

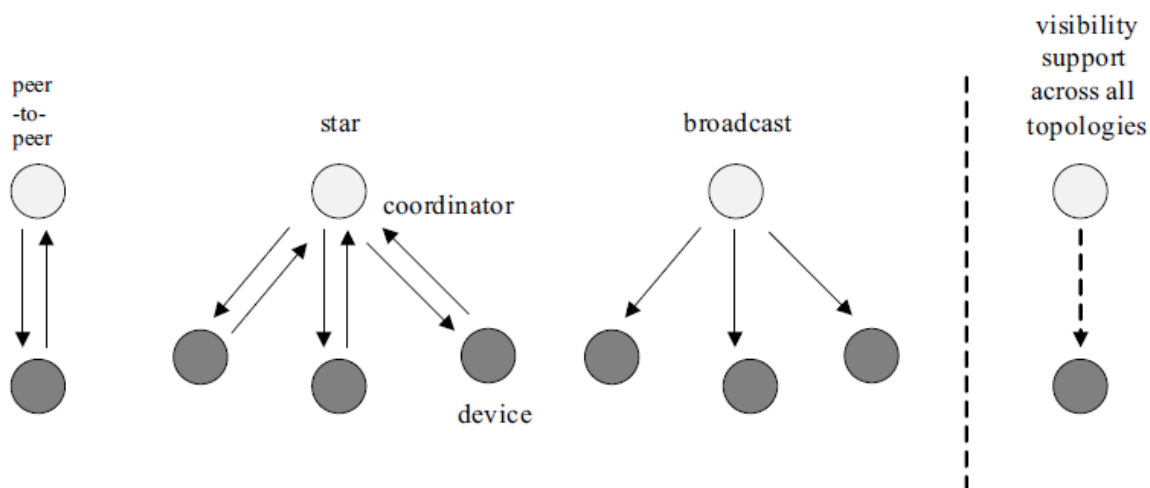


Figura 2-1. Topologías MAC soportadas

Cada VPAN independiente tiene un identificador, este identificador permite la comunicación entre dispositivos dentro de la red utilizando diferentes direcciones. El mecanismo por el cual se elige el identificador de VPAN está fuera del objetivo de este trabajo.

Como se ha indicado antes, además de las topologías punto a punto y en estrella, los dispositivos que cumplen con este estándar también pueden operar en la topología de difusión mientras no estén asociados a ningún dispositivo o no tengan ningún dispositivo asociado a él. En los siguientes puntos se proporciona un pequeño resumen de cómo se forma cada topología soportada.

Todas las topologías proporcionan soporte de visibilidad, de forma que la función de iluminación se mantenga en ausencia de comunicación o en los modos de funcionamiento en recepción o inactividad.

### 2.1.1 Topología punto a punto (*peer-to-peer*)

La estructura básica de la topología punto a punto se ilustra en la Figura 2-1. En esta topología, cada dispositivo es capaz de comunicarse con otro dispositivo que esté dentro de su área de cobertura. Para hacerlo, uno de los puntos actúa como coordinador, por ejemplo el que sea el primer dispositivo en comunicar por el canal.

### 2.1.2 Topología en estrella

La estructura básica de esta topología se muestra en la Figura 2-1. Todas las redes en estrella operan independientemente de otras redes que tengan la misma topología de funcionamiento, esto se realiza gracias a la asignación de un único identificador de VPAN que puede utilizarse por otra red dentro del área de cobertura. Cuando el identificador VPAN haya sido elegido, el coordinador permitirá al resto dispositivos unirse a su red. La capa superior podrá utilizar los procedimientos establecidos para formar la red en estrella.



### 2.1.3 Topología en difusión (*broadcast*)

La estructura básica de la topología en difusión se muestra en la Figura 2-1. El dispositivo en el modo de difusión podrá transmitir señales a otros dispositivos sin formar una red con ellos, en una comunicación unidireccional y para la que no se requiere la dirección de destino.

## 2.2 Espectro de modulación en dominio

La Figura 2-2 muestra el concepto de espectro de modulación en dominio. La fuente de luz visible está siempre encendida, por lo tanto se puede observar la salida del fotodetector y realizar la evaluación de canal libre (CCA). Antes del instante de tiempo  $t=T_1$ , el espectro está en DC, después del instante  $t=T_1$  el espectro se divide entre la señal en DC y la señal de modulación.

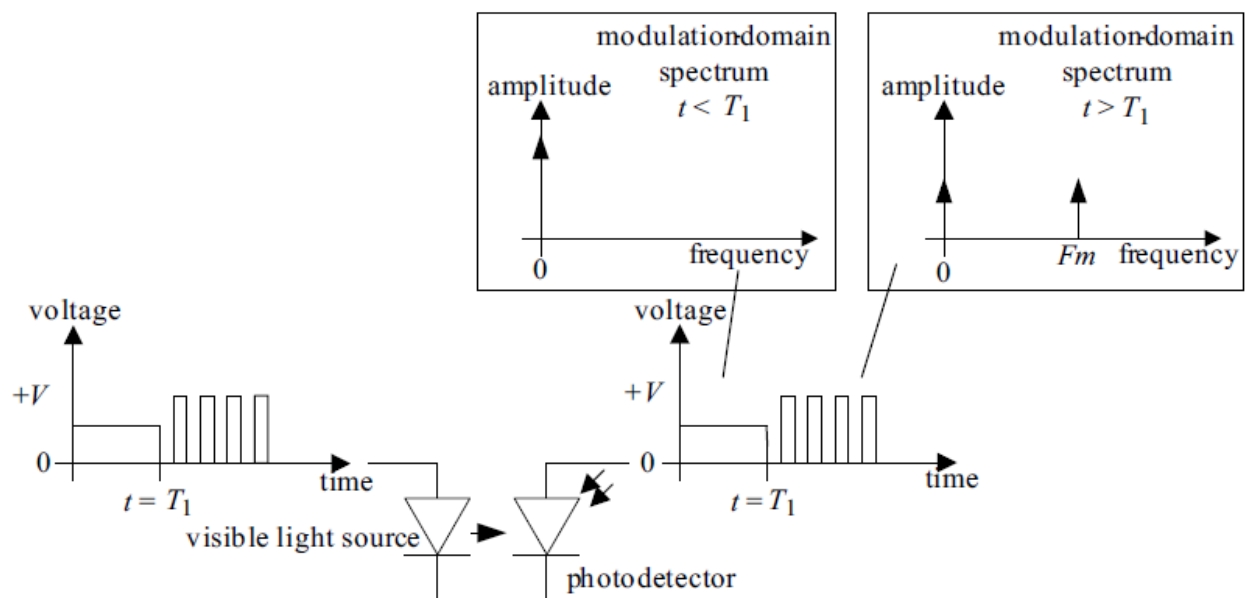


Figura 2-2. Espectro de modulación en dominio

## 2.3 Arquitectura

La arquitectura que presenta este estándar está definida en términos de número de capas y subcapas para simplificar su entendimiento. Cada capa es responsable de una función y ofrece servicios para las capas superiores. La interfaz entre capas sirve para definir los enlaces lógicos que se describen en este documento.

Un dispositivo VPAN se compone de una capa física (PHY), que contiene el transceptor de luz junto con el mecanismo de control de bajo nivel, y una subcapa de control de acceso al medio (MAC) que proporciona acceso al canal físico para todos los tipos de transferencia. La Figura 2-3 muestran de forma gráfica estas capas, que se describirán con más detalle a lo largo de este documento.

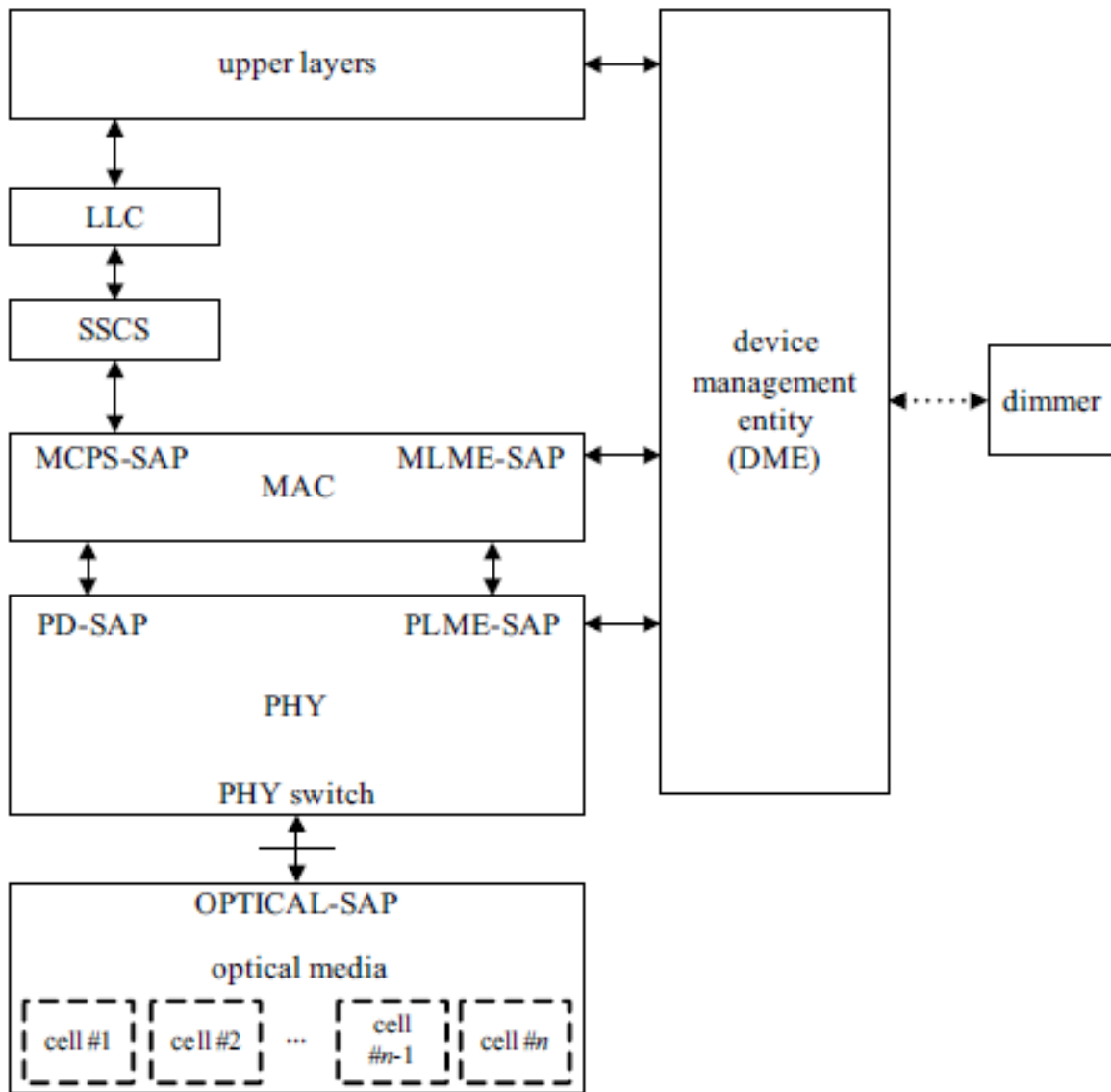


Figura 2-3. Arquitectura de dispositivo VPAN

Las capas superiores, mostradas en la Figura 2-3, están compuestas de una capa de red, que proporciona la configuración de red, y la gestión y encaminamiento de mensajes; y la capa de aplicación, que proporciona la función propia del dispositivo. La capa de control del enlace lógico (LLC) accede a la subcapa MAC a través de la subcapa de convergencia de servicio específico (SSCS).

Esta arquitectura también integra una entidad de gestión de dispositivos (DME), esta se comunica con las entidades PLME y MLME con la función de servir de interfaz entre las capas MAC y PHY con un controlador de atenuación. Esta entidad también puede acceder a ciertos atributos relacionados con el controlador de atenuación para proporcionar información sobre la luminosidad a las capas MAC y PHY. Gracias a la DME también se puede controlar el switch PHY utilizando la PLME para la selección de las fuentes ópticas y fotodetectores. La capa física cambia las interfaces al SAP óptico y se conecta al medio óptico, compuesto de fuentes simples o múltiples y fotodetectores. Se soportan múltiples fuentes ópticas y fotodetectores para facilitar el uso de PHY III y la movilidad celular de los dispositivos VLC. En la movilidad celular, la entidad PLME controla la capa PHY para seleccionar cada célula. El SAP óptico y el switch PHY se unen mediante un vector. El número de líneas que comprende el SAP óptico tiene unas dimensiones de  $n \times m$ , donde  $n$  se corresponde con el número de células y  $m$  se corresponde con cada uno de los flujos de datos procedentes de la capa PHY. En PHY III el valor de  $m$  es tres.

### 2.3.1 Capa PHY

La capa física (PHY) soporta tres tipos:

- PHY I: Este tipo está destinado al uso en exteriores en aplicaciones de baja tasa de datos. Este modo utiliza modulación OOK (on-off keying) y modulación por posición de pulso variable (VPPM) alcanzando tasas de datos en el entorno de los cientos de kb/s.
- PHY II: Este tipo está destinado a uso en interiores en aplicaciones con tasas de datos moderadas. Este modo utiliza modulaciones OOK y VPPM y puede alcanzar tasas de datos en torno a los Mb/s.
- PHY III: Este tipo está destinado a aplicaciones que utilicen modulación CSK (color-shift keying) y que presenten múltiples fuentes y detectores de luz. Este modo alcanza tasas de datos en torno a los MB/s.

#### 2.3.1.1 Estructura de la trama PHY

La unidad de datos del protocolo MAC (MPDU) cuando sale de la subcapa MAC pasa a través de la capa PHY. A la salida de la capa PHY se ha convertido en la unidad de datos del servicio PHY (PSDU) después de haber sido procesada mediante distintos bloques PHY como la codificación de canal o la codificación de línea. La PSDU está definida con una cabecera de sincronización (SHR) que, entre otros campos, contiene un campo de secuencia de preámbulo que permite la sincronización del receptor; y una cabecera PHY (PHR) que, entre otras cosas, contiene el tamaño de la PSDU en octetos. Las cabeceras SHR, PHR y la PSDU forman la trama PHY o la unidad de datos de la capa PHY (PPDU). El formato de la trama PHY se mostrará en el capítulo 6.

#### 2.3.1.2 Interoperabilidad y coexistencia entre tipos PHY

Los tipos de capa PHY coexisten, pero no interoperan entre sí. PHY I y PHY II ocupan diferentes regiones espectrales en el espectro de modulación en dominio, y por tanto necesitan un mecanismo que permita su coexistencia, que en este caso es la multiplexación por división en frecuencia, tal y como se muestra en la Figura 2-4. PHY I y PHY III también ocupan regiones espectrales diferentes, con diferente tasa de datos y óptica, pero es posible la coexistencia entre ellas. Sin embargo, las frecuencias de reloj óptico utilizadas para PHY II y PHY III se solapan, provocando el solapamiento también en el espectro por dominio de frecuencia. Además, no todos los dispositivos ópticos soportan las múltiples bandas de frecuencia que se necesitan para PHY III. Por tanto, todos los dispositivos PHY III utilizan dispositivos PHY II para la detección de otros dispositivos y hacer posible la coexistencia con PHY II.

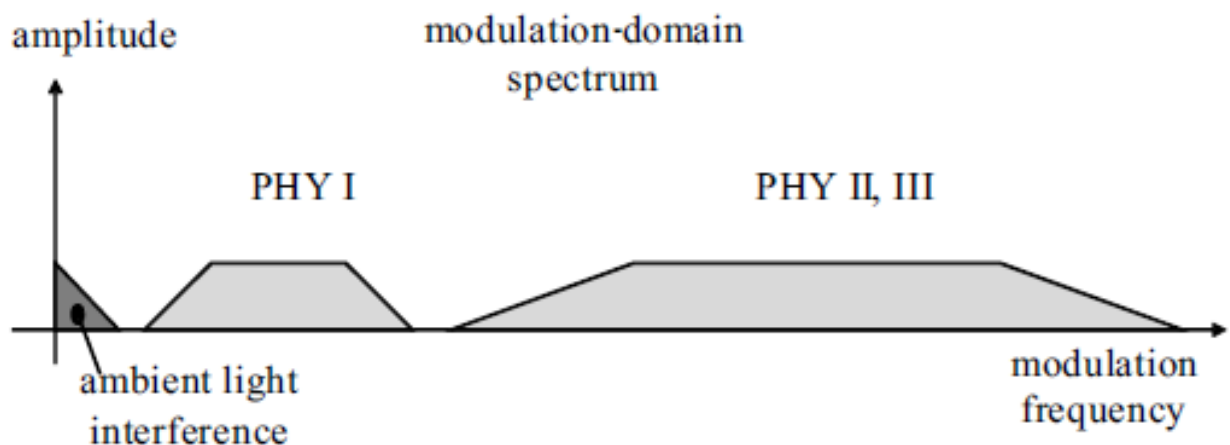


Figura 2-4. Separación FDM de los tipos PHY en la modulación por dominio

### 2.3.2 Subcapa MAC

La subcapa MAC proporciona dos servicios accesibles a través de dos puntos de acceso al servicio (SAPs). A través de la parte común de la subcapa (MCPS-SAP) se accede a los datos MAC, mientras que a la gestión MAC se accede a través de la entidad SAP de gestión de subcapa MAC (MLME-SAP). El servicio de datos MAC habilita la transmisión y recepción de MPDUs sobre el servicio de datos PHY.

Las características de la subcapa MAC son: gestión de balizas, acceso al canal, gestión de la ranura de tiempo garantizado (GTS), validación de trama, envío de trama de asentimiento, asociación y des-asociación. La subcapa MAC proporciona la base para la implementación de mecanismos de seguridad apropiados para cada aplicación. Otras características que proporciona esta subcapa son la función de color, visibilidad, estabilización de color y soporte para el control de atenuación. En el capítulo 3 se hace un estudio detallado sobre esta capa.

### 2.3.3 Soporte para el control de atenuación y mitigación de parpadeo

Durante los periodos de inactividad o recepción, se pueden transmitir los denominados patrones de inactividad de forma que se asegure el control de atenuación en las fuentes de luz. Esto es importante ya que es necesario mantener la visibilidad y el funcionamiento libre de parpadeo en la infraestructura óptica durante los periodos de inactividad o recepción. El patrón de inactividad, mostrado en la Figura 2-5, tiene el mismo ciclo de trabajo que el utilizado durante la comunicación activa de datos de forma que tampoco se aprecia parpadeo durante los periodos de inactividad. La transición entre el funcionamiento activo e inactivo o entre funcionamiento activo y en recepción se puede producir en un amplio periodo de tiempo (bloque active/idle/RX) o en un periodo de tiempo pequeño (dentro de la propia comunicación). En la Figura 2-5 se muestran los ciclos de trabajo para las dos condiciones de brillo alto y bajo. En (a) se muestra un ciclo de trabajo alto para brillo elevado y en (b) un ciclo de trabajo bajo para un brillo bajo.

#### 2.3.3.1 Control de atenuación

El control de atenuación se define como la regulación del brillo de la fuente de luz de acuerdo a los requerimientos del usuario, es una función compartida entre las capas PHY y MAC. Los detalles de la función de control de atenuación de la subcapa MAC serán tema de estudio más adelante.

##### 2.3.3.1.1 Patrón de inactividad y compensación de tiempo

En este estándar se permite la inserción de un patrón de inactividad entre tramas de datos para el control de atenuación tal y como queda reflejado en la Figura 2-6. El ciclo de trabajo del patrón de inactividad puede ser variado para proporcionar diferentes niveles de brillo y así realizar el control de atenuación. El patrón de inactividad puede ser tanto dentro de banda como fuera de banda, tal y como queda definido en el espectro por modulación en dominio, y ambos tipos son compatibles con este estándar. El patrón de inactividad dentro de banda puede ser visto por el receptor y no requiere ningún cambio en la tasa de reloj. En cuanto al patrón de inactividad fuera de banda normalmente se envía a una tasa de reloj óptico mucho más baja y no puede ser visto por el receptor (es decir, no se encuentra en la banda de paso del espectro de la modulación en dominio del receptor). El estándar también establece un tiempo de compensación (tiempo "ON", "OFF" de la fuente de luz) que puede insertarse tanto en el patrón de inactividad como en la trama de datos para reducir o aumentar el brillo medio de una fuente de luz.

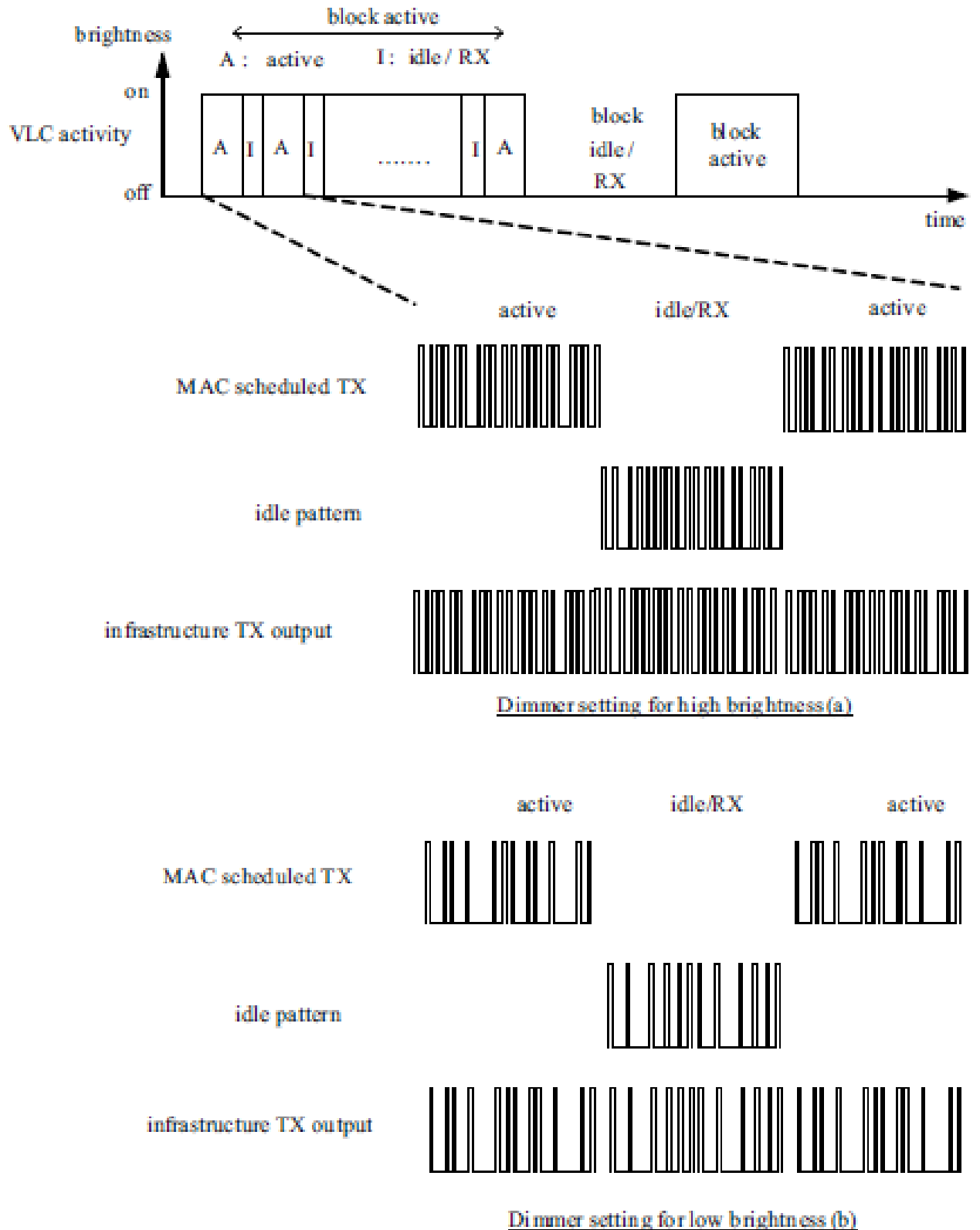


Figura 2-5. Adaptación del patrón de atenuación y el ciclo de trabajo de datos según la configuración del control de atenuación.

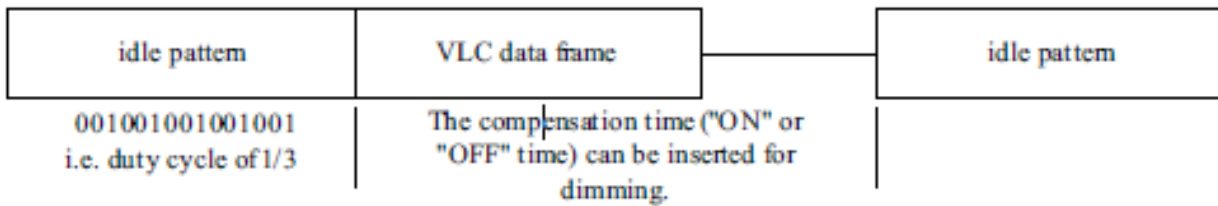


Figura 2-6. Ejemplo de patrón de inactividad y tiempo de compensación

### 2.3.3.1.2 Atenuación del patrón de visibilidad

Los patrones de visibilidad son patrones dentro de banda utilizados en la carga útil de la trama CVD<sup>1</sup>. Los patrones de visibilidad se utilizan para ayudar en funciones como la mitigación del parpadeo, visibilidad continua, detección de dispositivos y estabilización del color. Los patrones de visibilidad no se codifican dentro de la capa PHY y no tienen secuencia de control de trama (FCS) asociada. Para generar patrones de visibilidad de alta resolución entre 0 % y 100 % con pasos de 0.1 %, se deben tener en cuenta algunas limitaciones a la hora de establecer los criterios de diseño:

- El número de transiciones entre unos y ceros puede maximizarse para proporcionar conmutación de alta frecuencia de forma que se evite el parpadeo y se ayude al reloj y al circuito de recuperación de datos (CDR) en el receptor en las tareas de sincronización.
- La generación del patrón de visibilidad puede hacerse de forma simple. Sin embargo, el diseño de miles de patrones para bajas resoluciones (en torno al 0.1 %) no es práctico y puede hacer que el proceso de generación y uso sea una tarea muy complicada.
- Dado que los patrones de visibilidad se transmiten sin cambiar la frecuencia de reloj (en banda), se recomienda el uso de patrones diferentes a palabras de código RLL existentes para evitar conflictos.

La generación de patrones de visibilidad y su uso se definirá más adelante.

### 2.3.3.1.3 Control de atenuación en la modulación por desplazamiento de color (CSK)

La modulación por desplazamiento de color es compatible con el uso de fuentes de luz y fotodetectores multicolor. La modulación CSK tiene las siguientes ventajas:

- La información se proporciona mediante las coordenadas del color: los canales CSK se definen mediante la mezcla de colores que se distribuye en el plano de coordenadas de color; por lo tanto, la conectividad se facilita por el código de color.
- La potencia media es constante: la potencia media total para todas las fuentes de luz en CSK es constante; por lo tanto, la suma de todas las señales de luz es constante.
- Tasa de bits variable: la modulación CSK permite tasas de bits variables gracias al soporte de modulación de orden superior; es decir, la tasa de bits en bruto es igual al tiempo de bit por el símbolo CSK.

En CSK se emplea atenuación en amplitud y se controla el brillo mediante el cambio de la corriente de excitación de la fuente de luz. Sin embargo, un control inapropiado de la corriente de excitación puede producir el desplazamiento del color de la fuente de luz causando problemas para demodular la información enviada. Para una configuración del control de atenuación establecida, la potencia óptica media de la fuente de luz es constante, esto implica que el centro de color de la constelación de color es constante.

### 2.3.3.1.4 Control de atenuación en la modulación OOK

Dado que en la modulación OOK siempre se envían símbolos Manchester simétricos, es necesaria la inserción de un tiempo de compensación dentro de la trama de datos para ajustar la intensidad media de la fuente. La estructura de la trama de control de atenuación OOK se muestra en la Figura 2-7. En este proceso la trama se

<sup>1</sup> Las **tramas CVD** se utilizan para el soporte de color, la visibilidad y el control de la luminosidad. Proporcionan al usuario información visual, mediante colores, sobre el estado de la comunicación o la calidad del canal. En el apartado 3.1.12 se da más detalle.

divide en subtramas y cada subtrama va precedida de un campo de resincronización para el reajuste del reloj de datos después del tiempo de compensación. El tamaño de las subtramas se define después de que se haya calculado el FCS y haya sido aplicada la corrección de errores hacia adelante (FEC). En la Figura 2-8 se muestra un ejemplo del control de atenuación en OOK en el que se incrementa la luminosidad mediante la adición de símbolos de compensación.

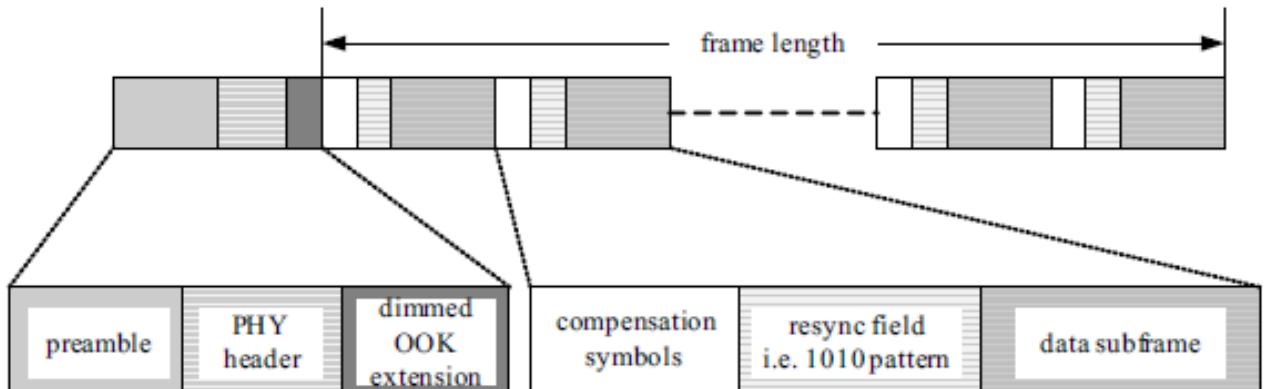


Figura 2-7. Estructura de control de atenuación OOK

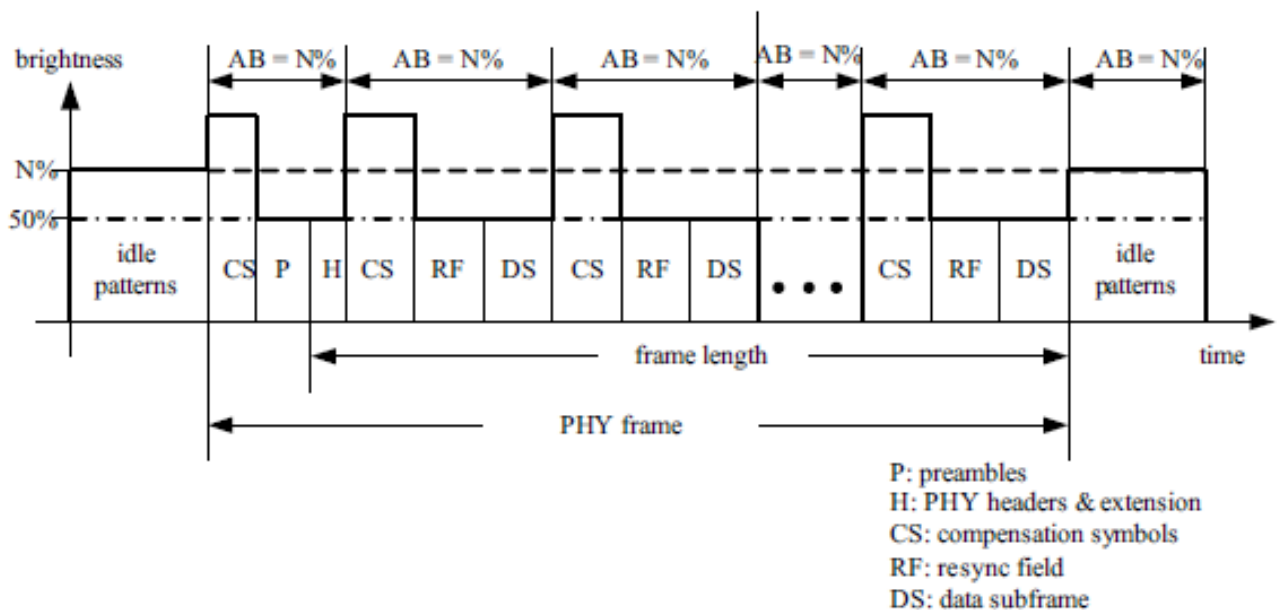


Figura 2-8. Ejemplo de control de atenuación OOK para aumentar el brillo

### 2.3.3.1.5 Control de atenuación en la modulación VPPM

VPPM es un esquema de modulación que proporciona un control de atenuación basado en la anchura de pulsos y ofrece protección contra el parpadeo intratrama. No se produce un desplazamiento del color en la fuente de luz que surge cuando se realiza un control de atenuación en amplitud. La amplitud del pulso en VPPM es siempre constante y por tanto el control de atenuación se realiza mediante la anchura de pulso y no con la amplitud.

La modulación VPPM utiliza las características de 2-PPM (modulación por posición de pulsos) para evitar el parpadeo y la modulación PWM (modulación por anchura de pulsos) para el control de atenuación y brillo. Los bits "0" y "1" se distinguen por la posición del pulso dentro del periodo de la señal y tienen la misma anchura de pulso en sus respectivos periodos. La característica de no parpadeo se obtiene gracias a que el brillo medio en los bits "1" y "0" es constante.

Como se ha explicado es posible ajustar la anchura del pulso según los requerimientos de atenuación, por lo tanto un usuario puede alcanzar el nivel máximo de brillo que puede proporcionar la fuente de luz.

Tal y como se aprecia en la Figura 2-10, la intensidad de la luz del campo *payload* (carga de datos) puede ajustarse mediante el cambio de la anchura del pulso de los símbolos VPPM. La intensidad de la luz en el preámbulo y la cabecera pueden ajustarse insertando símbolos de compensación de diferente longitud e intensidad antes de la trama. En apartados posteriores se detallará el control de atenuación de alta resolución utilizando VPPM.

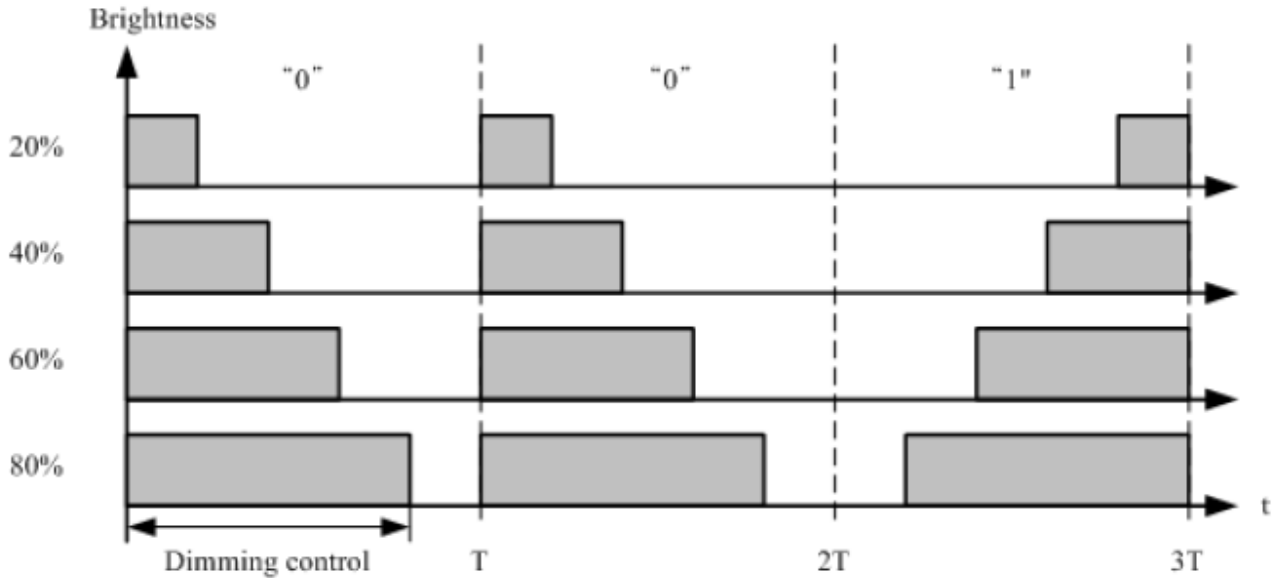


Figura 2-9. Mecanismo de control de atenuación para VPPM

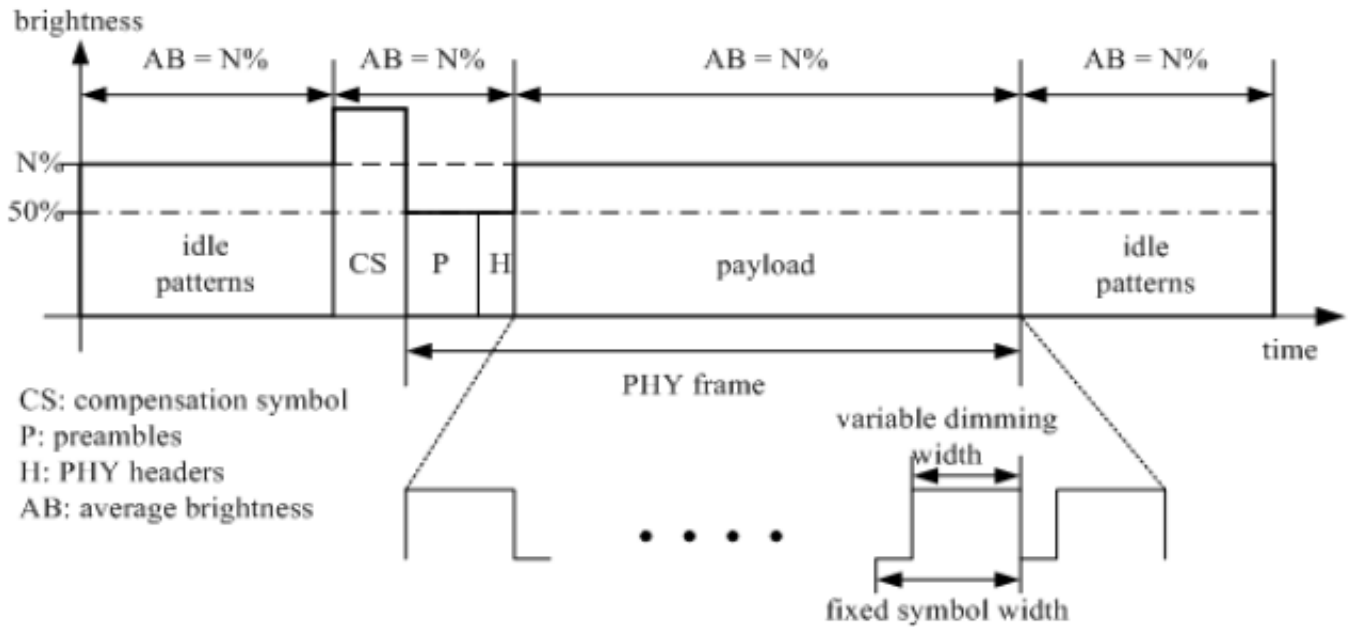


Figura 2-10. Ejemplo de control de atenuación para VPPM

### 2.3.3.2 Mitigación de parpadeo

El parpadeo se define como la fluctuación del brillo de la luz que puede provocar cambios fisiológicos notables en seres humanos. En el estándar se propone la mitigación del parpadeo causado por la modulación de las fuentes de luz en las comunicaciones. El periodo de tiempo de parpadeo máximo (MFTP) se define como el periodo de tiempo máximo en el cual la intensidad de la luz puede cambiar pero en el que el parpadeo resultante no es perceptible por el ojo humano. Para evitar el parpadeo, se deben evitar cambios en el brillo de



la luz superiores al MFTP.

El parpadeo en las comunicaciones VLC se clasifica en dos categorías según el mecanismo de generación: parpadeo intr trama y parpadeo inter trama. El parpadeo intr trama se define como la fluctuación del brillo perceptible dentro de una trama, el parpadeo inter trama se define como la fluctuación del brillo perceptible entre transmisiones de tramas adyacentes.

### 2.3.3.2.1 Mitigación del parpadeo intr trama

La mitigación del parpadeo intr trama se consigue mediante el uso de la codificación por limitación de longitud, uso de esquemas de modulación o ambos. Específicamente, esos esquemas son la codificación Manchester, codificación 4B6B o codificación VPPM.

### 2.3.3.2.2 Mitigación del parpadeo inter trama

El esquema utilizado para la mitigación del parpadeo inter trama consiste en la transmisión de un patrón de inactividad entre tramas de datos, cuyo brillo medio sea igual al de las tramas de datos.

## 2.4 Principios de funcionamiento

Este apartado proporciona una breve descripción de las funciones generales de la subcapa MAC de una VPAN e incluye información sobre la estructura de super trama, modelo de transferencia de datos, estructura de la trama de datos, asentimientos y seguridad.

### 2.4.1 Estructura de super trama

El estándar permite el uso opcional de la estructura de super trama. El formato de la super trama se define por el coordinador. La super trama está delimitada por balizas enviadas por el coordinador, como se muestra en la Figura 2-11a, y se divide en *slots* de igual tamaño. De forma opcional, la super trama puede tener una parte activa y otra inactiva, tal y como se muestra en la Figura 2-11b. La trama de baliza se transmite en el primer *slot* de cada super trama. En el caso de que el coordinador no desee el uso de la estructura de super trama no realizará transmisiones de balizas. Las balizas sirven para sincronizar los dispositivos conectados, para identificar la VPAN y para describir la estructura de super trama a utilizar. Cualquier dispositivo que vaya a conectarse durante el periodo de contención de acceso (CAP) entre dos balizas, disputa el acceso al canal con otros dispositivos a través del acceso aleatorio ranurado. El estándar define cuatro métodos de acceso aleatorio: acceso aleatorio no ranurado, acceso aleatorio ranurado, CSMA/CA no ranurado y CSMA/CA ranurado.

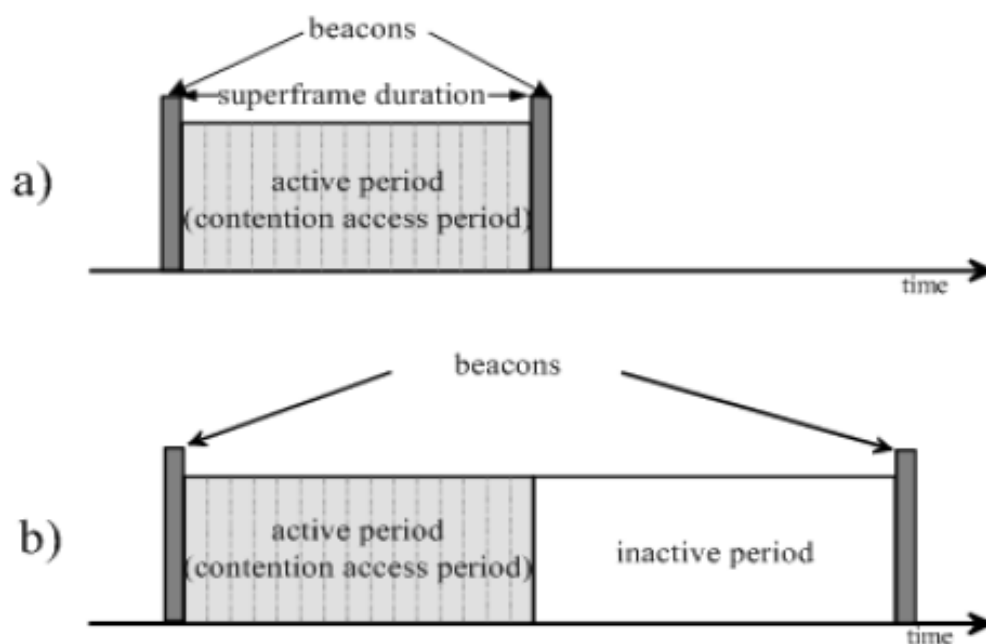


Figura 2-11. Estructura de super trama sin GTSS

Para aplicaciones de baja latencia o aquellas que requieran un ancho de banda de datos específico, el coordinador puede dedicar partes de la supertrama activa para esa aplicación. A esa parte se le llama *slots* de tiempo garantizado (GTSs) y el coordinador puede asignar un número de esos GTSs. Así mismo un GTS puede ocupar más de un periodo de *slot*, más adelante se proporcionará más información sobre esto. Todas las transacciones con procesos de contención deben haberse completado antes de que empiece el periodo libre de contención (CFP). Además, cada dispositivo que transmita en un GTS debe asegurarse de que esa transacción se ha completado antes de que comience el próximo GTS o el final del CFP.

## 2.4.2 Modelo de transferencia de datos

Existen tres tipos de transacciones de transferencia de datos:

- El primer tipo es la transferencia de datos de un dispositivo a un coordinador.
- El segundo tipo es la transferencia de datos de un coordinador a un dispositivo.
- El tercer tipo es la transferencia de datos entre dos dispositivos iguales.

En la topología en estrella o en difusión solo se utilizan los dos primeros tipos, mientras que en la topología punto a punto se pueden utilizar los tres tipos.

El mecanismo utilizado para cada uno de los tipos de transferencia depende de si la red soporta la transmisión de balizas. Se seleccionará el uso de VPANs que permiten baliza en caso de que se requiera sincronización o soporte para dispositivos de baja latencia. En caso contrario, se puede seleccionar la transferencia normal sin el uso de baliza. Sin embargo, la baliza se requiere para la detección de redes.

### 2.4.2.1 Transferencia de datos a un coordinador

Cuando un dispositivo desea transmitir datos a un coordinador en una VPAN que permite el uso de baliza, primero realiza un proceso de escucha del canal para encontrar la baliza. Cuando se encuentra, el dispositivo se sincroniza con la estructura de supertrama. En el instante de tiempo adecuado, el dispositivo transmite su trama de datos al coordinador, utilizando para ello acceso aleatorio ranurado. El coordinador podrá asentir la correcta recepción de los datos transmitiendo una trama de asentimiento.

Cuando un dispositivo desea transferir datos en una VPAN que no permite el uso de baliza, este transmite su trama de datos al coordinador utilizando acceso aleatorio no ranurado. El coordinador asiente la correcta recepción de los datos transmitiendo una trama de asentimiento opcional. En el momento en el que se reciba la trama de asentimiento, la transacción habrá concluido.

### 2.4.2.2 Transmisión de datos desde un coordinador

Cuando un coordinador desea transferir datos a un dispositivo en una VPAN que permite el uso de baliza, este indica en la baliza que está pendiente de enviar el mensaje de datos. Los dispositivos escuchan periódicamente las balizas que envía el coordinador y, si está pendiente de recibir el mensaje, transmite una instrucción MAC requiriendo el envío de los datos utilizando acceso aleatorio ranurado. El coordinador asiente la correcta recepción de los datos transmitiendo una trama de asentimiento. La trama de datos pendiente se envía usando acceso aleatorio ranurado o, si es posible, se envía inmediatamente después de recibir el asentimiento. El dispositivo puede asentir la recepción de los datos transmitiendo una trama de asentimiento opcional. Tras la finalización con éxito de la transacción de datos, el mensaje se elimina de la lista de mensajes pendientes en la baliza.

Cuando un coordinador desea transferir datos a un dispositivo en una VPAN que no permite el uso de baliza, almacena los datos y espera establecer el contacto con el dispositivo para que le realice la petición de datos. Los dispositivos pueden establecer el contacto transmitiendo una instrucción MAC en la que se solicite al coordinador el envío de datos, utilizando para ello acceso aleatorio no ranurado. El coordinador asiente la correcta recepción de los datos transmitiendo una trama de asentimiento. Si la trama de datos está pendiente de envío, el coordinador transmite la trama de datos utilizando acceso aleatorio no ranurado. Si la trama de datos no está pendiente de envío el coordinador lo indica ya sea en la trama de asentimiento que sigue a la petición de datos o en la trama de datos con una carga útil o *payload* de tamaño cero. Si se pide, los dispositivos asentirán la recepción de la trama de datos mediante la transmisión de una trama de asentimiento.

### 2.4.2.3 Transferencia de datos punto a punto

En una VPAN con una topología punto a punto, cada dispositivo puede comunicarse con cualquier otro dispositivo que esté dentro de su área de cobertura. Para hacerlo de forma efectiva, los dispositivos que quieran comunicarse deberán permanecer en un estado de recepción constante o sincronizarse con los otros dispositivos. En el primer caso, los dispositivos pueden transmitir sus datos utilizando acceso aleatorio no ranurado. En último caso, se necesitan tomar otras medidas para conseguir la sincronización.

### 2.4.3 Selección de la tasa de reloj

El estándar soporta múltiples tasas de reloj óptico para adaptarse a una amplia variedad de fuentes y receptores ópticos. También se trata el uso de tasas de reloj asimétricas entre dos dispositivos ya que el transmisor y el receptor son independientes en un dispositivo y pueden soportar diferentes rangos. Un ejemplo es un transmisor de la infraestructura de comunicaciones que no pueda cambiar de forma rápida pero que sea capaz de transmitir con una potencia elevada y requerir una corrección de errores pequeña, mientras que el transmisor de un dispositivo móvil puede cambiar de forma rápida pero puede requerir un soporte de corrección de errores mayor debido a su baja potencia de transmisión. La tasa de reloj óptico para las comunicaciones se establece usando la capa MAC y debe ser comunicada al receptor antes de la transferencia de datos.

### 2.4.4 Estructura de trama

Las estructuras de trama han sido diseñadas para reducir la complejidad mientras se proporciona protección contra errores para los casos de transmisión en un canal ruidoso. Cada una de las sucesivas capas del protocolo añade a la estructura cabeceras y campos específicos de cada capa. La estructura en cada tipo de trama es diferente ya que la función que van a desempeñar es distinta. A continuación se proporciona una lista con los diferentes tipos de trama que podemos encontrarlos.

- Trama de baliza, utilizada por el coordinador para transmitir balizas.
- Trama de datos, utilizadas para todas las transferencias de datos.
- Trama de asentimiento, utilizada para confirmar el éxito en la recepción de la trama.
- Trama de instrucción MAC, utilizada para gestionar la transferencia de instrucciones relacionadas con el control de entidad para la capa MAC.
- Trama CVD, utilizada para mantener una intensidad apropiada en la luz entre las diferentes tramas de datos, realizar una gestión del control de atenuación y para proporcionar información visual al usuario sobre el estado de la comunicación y la calidad del canal.

### 2.4.5 Mejora de la probabilidad de éxito en el envío

Las VPAN del estándar IEE 802.15.7 emplean varios mecanismos para mejorar la probabilidad de éxito en la transmisión de datos como el acceso aleatorio, el asentimiento de trama y la verificación de datos.

#### 2.4.5.1 Mecanismo de acceso aleatorio

El estándar utiliza cuatro tipos de mecanismos de acceso al canal para VPAN, dependiendo de la configuración de la red. Las VPAN que no permiten el uso de baliza utilizan un mecanismo de acceso aleatorio al canal con o sin CSMA/CA. Cada instante de tiempo en el que un dispositivo desea transmitir tramas de datos o instrucciones MAC, debe esperar un periodo de *backoff* aleatorio. Después de la espera, el dispositivo transmite su trama de datos. Si el mecanismo opcional de detección de portadora está activo y el canal se encuentra ocupado después del envío del *backoff*, el dispositivo espera otro periodo aleatorio antes de intentar acceder al canal de nuevo. Las tramas de asentimiento se envían sin utilizar el mecanismo de acceso aleatorio.

Las VPANs que permiten el uso de baliza utilizan un mecanismo de acceso aleatorio ranurado al canal, con o sin CSMA/CA, donde los *slots* de *backoff* están alineados con el comienzo de la transmisión de balizas. Cada instante de tiempo en que un dispositivo quiere transmitir tramas de datos durante el CAP, el dispositivo

localiza el límite del siguiente *slot* de *backoff* y espera un número aleatorio de *slots* de *backoff*. Si el mecanismo de prevención de colisiones está activo y se detecta que el canal está ocupado, después del *backoff* aleatorio el dispositivo espera otro número aleatorio de *slots* de *backoff* antes de intentar acceder al canal de nuevo. Si el canal está inactivo o el mecanismo de detección de portadora no está activo, el dispositivo comienza a transmitir en el siguiente *slot* de *backoff* disponible. Las tramas de asentimiento y baliza se envían sin utilizar el mecanismo de acceso aleatorio.

#### 2.4.5.2 Asentimiento de trama

El éxito en la recepción y validación de la trama de datos o instrucción MAC puede confirmarse con un asentimiento. Si el dispositivo receptor no está disponible para gestionar la trama de datos recibida por alguna razón, el mensaje no será asentido.

Si el dispositivo origen del mensaje no recibe el asentimiento después de un periodo de tiempo, se asumirá que la transmisión no se ha realizado con éxito. Cuando no se requiere el asentimiento, el dispositivo origen asumirá que la transmisión se ha realizado correctamente.

#### 2.4.5.3 Verificación de datos

Se incluye control de redundancia cíclico en la trama MAC y en la cabecera PHY para verificar la validez de los datos recibidos.

## 2.5 Seguridad

Desde una perspectiva de seguridad, las VPANs definidas en el estándar presentan algunas diferencias con respecto a otras redes inalámbricas debido a la direccionalidad y visibilidad establecida como consecuencia de la elección del espectro óptico visible. Gracias a la direccionalidad y la visibilidad, si un receptor no autorizado se encuentra en el camino de la señal de comunicación puede ser reconocido. Además, la señal no viajará a través de medios como paredes, a diferencia de otras redes inalámbricas basadas en radiofrecuencia, por ello siempre se conocerá a los dispositivos que estén comunicándose. Sin embargo, el estándar también proporciona algoritmos de seguridad para asegurar características como la confidencialidad de datos, autenticación y protección contra la repetición.

Los dispositivos pueden ser de bajo coste y por tanto tener capacidades limitadas en términos de potencia de computación, almacenamiento disponible y fuga de potencia, y no se puede asegurar que dispongan de una base de computación de confianza o un generador de números aleatorios de alta capacidad. Estas restricciones limitan la elección de protocolos y algoritmos de cifrado, e influye en el diseño de la arquitectura de seguridad debido a la necesidad del establecimiento de relaciones de confianza entre dispositivos cuyo direccionamiento debe realizarse con cuidado. Muchos de los elementos de la arquitectura de seguridad necesarios pueden ser implementados en capas superiores y por tanto se consideran fuera de los objetivos del estándar.

El mecanismo de cifrado que se va a presentar está basado en el cifrado por clave simétrica y utiliza claves que son proporcionadas por procesos establecidos en capas superiores. Este mecanismo asegura una aplicación segura de las operaciones de cifrado y un almacenamiento seguro de la información de cifrado mediante el uso de medios de autenticación.

El mecanismo de cifrado proporciona combinaciones particulares de los siguientes servicios de seguridad:

- Confidencialidad de datos: seguridad de que la información transmitida solo se muestra a las partes para las que está destinada.
- Autenticidad de datos: seguridad en el conocimiento de la fuente de la información transmitida y, por tanto, de que la información no ha sido modificada en el tránsito al receptor.
- Protección contra repetición: seguridad de que se detecta la información duplicada.

La protección de trama puede ser adaptada trama por trama y permite aplicar diversidad de niveles en la autenticidad de los datos (para minimizar la seguridad en las tramas transmitidas cuando sea requerido).

En la protección de la trama se permite el uso de una clave compartida entre dos dispositivos pares (clave de

enlace) o compartida entre un grupo de dispositivos (clave de grupo), de este modo se permite cierta flexibilidad. Si una clave de grupo se utiliza para comunicaciones punto a punto, la protección se proporciona solo contra dispositivos externos y no contra potenciales dispositivos maliciosos en el grupo al que se ha compartido la clave.

## 2.6 Concepto de primitivas

En este apartado se presenta una visión general sobre el concepto de primitivas de servicio. Los servicios que proporciona una capa son las capacidades que ofrece a la capa superior o subcapa más próxima realizando sus funciones gracias a los servicios de la capa inferior. Este concepto se ve en la Figura 2-12, mostrando la jerarquía de servicios y la relación de los dos usuarios correspondientes y sus entidades de protocolos pares de capas (o subcapas) asociadas.

Los servicios se especifican describiendo el flujo de información entre el usuario y la capa. Este flujo de información se modela mediante eventos instantáneos y discretos, que caracterizan el servicio proporcionado. Cada evento consiste en pasar una primitiva de servicio de una capa a otra a través de un punto de acceso al servicio (SAP) asociado con un usuario. Estas primitivas son una abstracción porque especifican solo el servicio prestado en lugar de los medios por los que se proporcionó.

Los servicios se especifican describiendo las primitivas del mismo y los parámetros que las caracterizan. Un servicio puede tener una o más primitivas relacionadas que constituyen la actividad que está vinculada con el mismo. Cada primitiva de servicio puede tener o no parámetros en los cuales se transmite la información requerida para proporcionar el servicio.

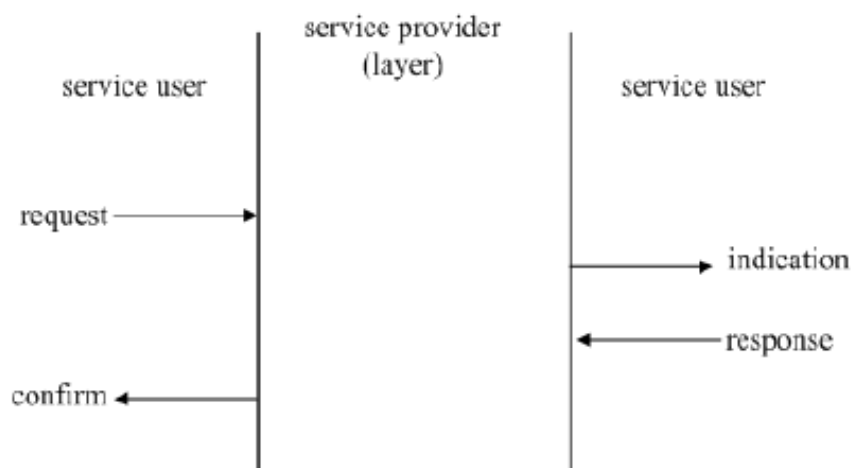


Figura 2-12. Primitivas de servicio

Las primitivas se clasifican en los siguientes cuatro tipos generales:

*Request* (Petición): esta primitiva se utiliza para pedir el inicio de un servicio.

*Confirm* (Confirmación): esta primitiva se utiliza para enviar los resultados de una o más peticiones anteriores de servicio asociadas.

*Indication* (Indicación): esta primitiva se utiliza para proporcionar a la capa superior información sobre un evento interno.

*Response* (Respuesta): esta primitiva se utiliza para completar un procedimiento previamente invocado por una primitiva de indicación.



# 3 ESPECIFICACIÓN DE LA CAPA MAC

---

En este capítulo se trata la subcapa MAC que es objeto de estudio en este estándar. La subcapa MAC administra todo el acceso a la capa física y es la responsable de las siguientes tareas:

- Generación de balizas de red si el dispositivo es un coordinador.
- Sincronización de balizas de red.
- Soporte de asociación y des-asociación de redes VPAN.
- Soporte de función del color.
- Soporte de visibilidad.
- Soporte de control de atenuación.
- Esquema de mitigación del parpadeo.
- Soporte de indicación visual del estado del dispositivo y la calidad del canal.
- Soporte de seguridad del dispositivo.
- Provisión de un enlace fiable entre dos entidades MAC pares.
- Soporte de movilidad.

Como se muestra en la Figura 3-1 con una sola estructura de trama MAC se proporcionan capacidades punto a punto, en estrella o en difusión. Todos estos modos son soportados a través de una estructura de trama integrada de baja complejidad.

Las constantes y atributos que están especificados y mantenidos por la subcapa MAC se escriben en cursiva en el texto de este apartado. Las constantes tienen un prefijo general “a” y los atributos “mac”.

## 3.1 Descripción funcional de la subcapa MAC

En este apartado se proporciona una descripción de la funcionalidad MAC así como dos mecanismos de acceso al canal: acceso basado en contención y acceso libre de contención. El acceso basado en contención permite a los dispositivos acceder al canal utilizando un algoritmo de acceso aleatorio no ranurado. El acceso libre de contención se controla de forma completa por el coordinador a través de uso de GTSS.

### 3.1.1 Acceso al canal

Se van a describir los mecanismos para el acceso al canal físico óptico. El estándar proporciona una estructura de trama MAC para VLC que puede ser configurada para múltiples modos. La trama está compuesta por un número variable de *slots* que pueden definirse como el tiempo mínimo que se necesita para comunicar y enviar el mínimo número de datos a un dispositivo, siempre es fijo.

#### 3.1.1.1 Estructura de supertrama

En una VPAN un coordinador puede limitar su tiempo de canal utilizando una estructura de supertrama. Una supertrama se delimita mediante la transmisión de una trama de baliza que puede tener una parte activa y una inactiva. El coordinador puede entrar en modo de bajo consumo de energía (*sleep*) durante la parte inactiva.

La estructura de supertrama se describe mediante los valores de *macBeaconOrder* y *macSuperframeOrder*. El atributo de la base de información de la capa física de la red de área personal (PIB) *macBeaconOrder*, describe el intervalo en el que el coordinador enviará sus tramas de baliza. El valor de *macBeaconOrder*, *BO*, y el intervalo de baliza, *BI*, se sitúan entre los siguientes valores:  $0 \leq BO \leq 14$ ,  $BI = aBaseSuperframeDuration \times$

$2^{B0}$  relojes ópticos. Si  $BO = 15$ , el coordinador no deberá transmitir las tramas de baliza excepto cuando se requiera hacerlo, como en el caso de recibirse la instrucción de petición de baliza. El valor de *macSuperframeOrder* será ignorado si  $BO = 15$ .

El atributo *macSuperframeOrder* describe el tamaño de la parte activa de la supertrama que incluye la trama de baliza. El valor de *macSuperframeOrder*,  $SO$ , y la duración de la supertrama,  $SD$ , se situará en los siguientes valores:  $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ ,  $SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO}$  relojes ópticos. Si  $SO = 15$ , la supertrama no permanecerá activa después de la baliza. Si  $BO = 15$ , no existirá supertrama (el valor de *macSuperframeOrder* podrá ser ignorado), y *macRxOnWhenIdle* definirá si el receptor está habilitado durante periodos de inactividad del tranceptor.

La parte activa de cada supertrama se divide en *aNumSuperframeSlots slots* igualmente espaciados de duración  $2^{SO} \times aBaseSlotDuration$  y está compuesta de tres partes: una baliza, un CAP y un CFP. La baliza se transmitirá sin el uso de acceso aleatorio al principio del *slot 0*, y el CAP se iniciará inmediatamente después de la baliza. El inicio del *slot 0* se define como el punto en el que se transmite el primer bit de la baliza PPDU. El CFP, si está presente, se sitúa inmediatamente después del CAP y se extiende hasta el final de la parte activa de la supertrama. Cualquier GTS asignado estará contenido dentro del CFP.

Las VPANs que deseen el uso de la estructura de supertrama (se refiere a VPANs que permiten el uso de baliza) deben configurar *macBeaconOrder* a un valor entre 0 y 14, ambos inclusive, y el *macSuperframeOrder* a un valor entre 0 y el valor *macBeaconOrder*, ambos inclusive.

Las VPANs que no deseen el uso de la estructura de supertrama (VPANs que no permitan el uso de baliza) configurarán tanto *macBeaconOrder* como *macSuperframeOrder* a 15. En ese caso, el coordinador no transmitirá baliza, excepto cuando se haya recibido una instrucción de petición de baliza. Todas las transmisiones, con la excepción de las tramas de asentimiento y cualquier trama de datos que siga de forma inmediata el asentimiento de una instrucción de petición de datos, utilizarán el mecanismo de acceso aleatorio no ranurado para acceder al canal. Además, no se permitirá el uso de GTSs.

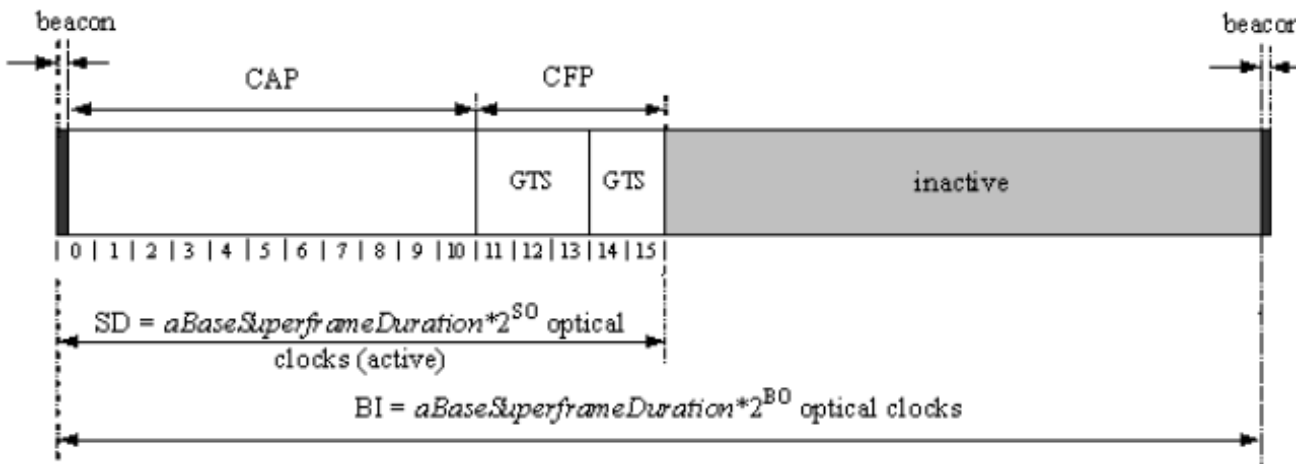


Figura 3-1. Ejemplo de estructura de supertrama



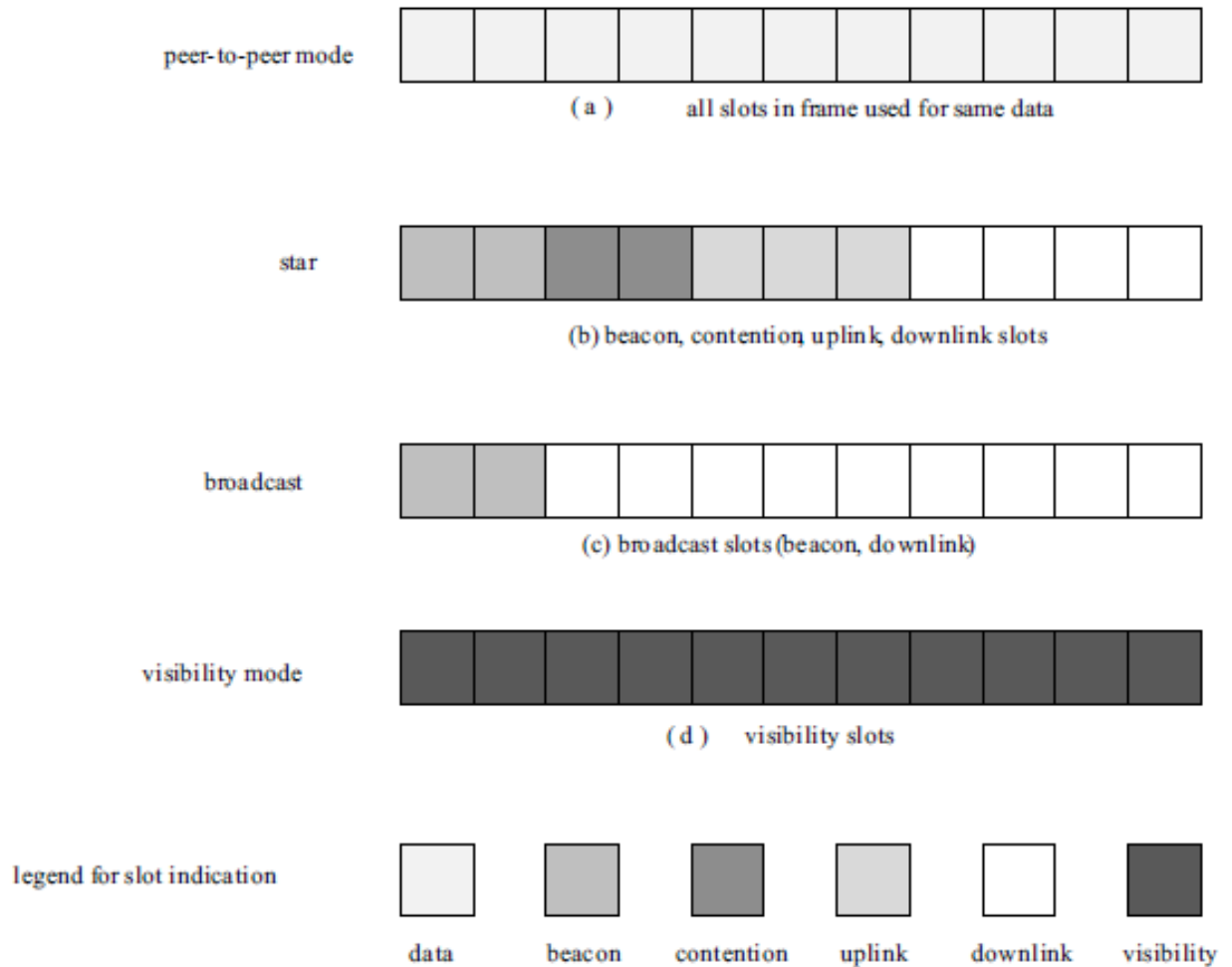


Figura 3-2. Ejemplo de uso de estructura de trama para múltiples topologías

La Figura 3-2 proporciona un ejemplo de uso de configuraciones de la estructura de trama para múltiples topologías como la punto a punto, estrella, difusión y los modos de visibilidad. Los *slots* de baliza se utilizan para el envío de balizas y los *slots* de contención se utilizan en el periodo CAP. Los *slots* GTS del enlace ascendente y descendente se utilizan en los periodos CFP. Los patrones de visibilidad o inactividad pueden enviarse en los *slots* de visibilidad durante los modos de inactividad o recepción de forma que se asegure una salida continua y la mitigación del parpadeo.

#### 3.1.1.1.1 Periodo de acceso por contención (CAP)

Como se ha indicado anteriormente, el CAP empezará inmediatamente después de la baliza y finalizará antes del inicio del CFP. Si el CFP es de tamaño nulo, el CAP se extenderá hasta al final de la parte activa de la supertrama. El CAP tendrá una duración de al menos  $aMinCAPLength$  relojes ópticos, a menos que sea necesario espacio adicional para ajustar de forma temporal el incremento del tamaño de la trama de baliza necesaria para el mantenimiento del GTS. Por esto, aumentará o disminuirá de forma dinámica para ajustarse al tamaño del CFP.

Todas las tramas, excepto las tramas de asentimiento y cualquier trama de datos que se envíe después del asentimiento a una trama de instrucción de petición de datos transmitida en el CAP, utilizará el mecanismo de acceso aleatorio ranurado para acceder al canal. Un dispositivo que esté transmitiendo dentro del CAP se asegurará de que su transmisión ha finalizado (por ejemplo, incluyendo la recepción de asentimiento) un periodo de espaciado entre tramas IFS (ver 3.1.1.1.4) antes del término del CAP. Si no es posible, el dispositivo esperará hasta el CAP de la siguiente supertrama.

3.1.1.1.2 Periodo libre de contención (CFP)

El CFP empezará en el *slot* siguiente al CAP y finalizará antes de que termine la parte activa de la supertrama. Si el coordinador ha asignado GTSSs, se localizará dentro del CFP ocupando *slots* contiguos. El CFP aumentará o disminuirá dependiendo de la duración del conjunto de todos los GTSSs. Las comunicaciones entre dispositivos pueden ocupar un número variable de *slots*, de esta forma, si hay *slots* disponibles, un solo dispositivo o usuario puede tener acceso a más de un *slot* en la trama para transferencias de datos prolongadas.

Las transmisiones que no se realicen dentro del CFP utilizarán un mecanismo de acceso aleatorio no ranurado para acceder al canal. Un dispositivo que esté transmitiendo en el CFP se asegurará que su transmisión finaliza un periodo IFS antes del término de su GTS.

3.1.1.1.3 Soporte de visibilidad durante el acceso al canal

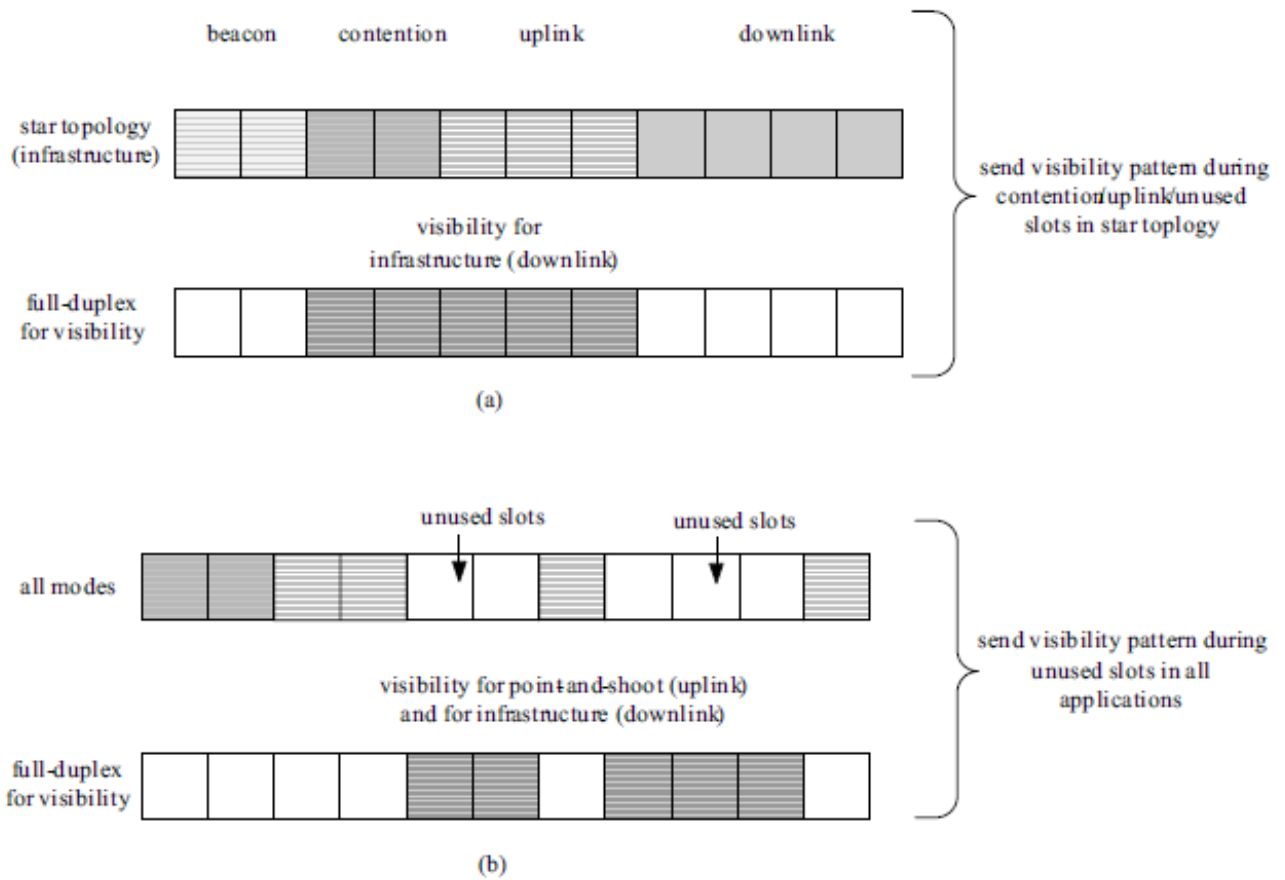


Figura 3-3. Uso de tramas CVD durante los modos de operación en inactividad o recepción

Los *slots* de visibilidad pueden utilizarse durante los *slots* de contención y de enlace ascendente en la topología en estrella. También podrán utilizarse en cualquier topología durante los *slots* que no estén siendo utilizados y así conservar la visibilidad, reducir el parpadeo y mantener el transmisor siempre en “ON”, tal y como muestra la Figura 3-3. El soporte de visibilidad es una característica muy importante en las comunicaciones VLC para mantener la iluminación de la estancia donde se realiza la comunicación. Puede realizarse gracias a la recepción simultánea de datos y a la transmisión de patrones de visibilidad o inactividad. Como se ve en la Figura 3-3, los patrones de inactividad se envían durante los *slots* de contención, de enlace ascendente y los *slots* no utilizados por la infraestructura del enlace descendente para mantener la visibilidad. Los patrones de inactividad también se envían durante *slots* no utilizados por los dispositivos móviles para ayudar en tareas de alineamiento y conseguir una transferencia de datos óptima.

Si el bit de visibilidad continua se encuentra activo en el campo de capacidades, los dispositivos de la infraestructura proporcionarán visibilidad continua.

### 3.1.1.1.4 Espaciado entre tramas (IFS)

La subcapa MAC necesita un periodo de tiempo para procesar los datos que ha recibido de la capa PHY. Para que esto sea posible, dos tramas sucesivas transmitidas desde un dispositivo deberán estar separadas por al menos un periodo IFS. Si la primera transmisión requiere de asentimiento, la separación entre la trama de asentimiento y la segunda transmisión será de al menos un periodo IFS. La duración del periodo IFS depende del tamaño de la trama que ha sido transmitida. Las tramas (por ejemplo, MPDUs) con longitudes menores o iguales que  $aMaxSIFSFrameSize$  octetos deberán seguirse por un periodo SIFS (espacio entre tramas corto) de duración como mínimo  $macMinSIFSPeriod$  relojes ópticos. Las tramas (por ejemplo, MPDUs) con longitudes mayores a  $aMaxSIFSFrameSize$  octetos deberán estar seguidas por un periodo de tiempo (LIFS, espacio entre tramas largo) de una duración de al menos  $macMinLIFSPeriod$  relojes ópticos. Las tramas de rotura (*burst*) tendrán un RIFS (espacio entre tramas reducido) de exactamente  $macMinRIFSPeriod$  relojes ópticos. El IFS para los diferentes modos se definirá más adelante y los conceptos se ilustran en la Figura 3-4.

El algoritmo de acceso aleatorio ranurado deberá tener en consideración estos requerimientos para transmisiones en el CAP.

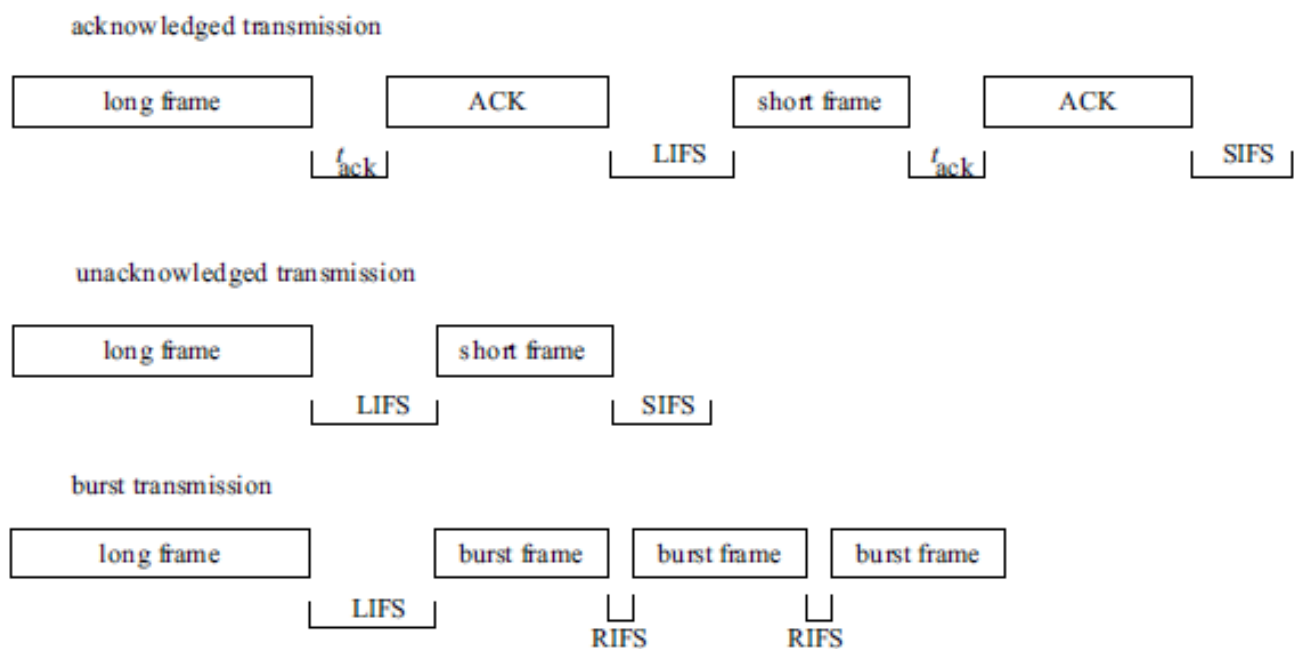


Figura 3-4. Espaciado entre tramas

### 3.1.1.1.5 Algoritmo de acceso aleatorio

El algoritmo de acceso aleatorio ranurado se utilizará para la transmisión de datos o tramas de instrucción MAC dentro del CAP. Ninguno de los algoritmos de acceso aleatorio disponibles se utilizará para la transmisión de tramas de baliza, en VPANs que permitan el uso de baliza, asentimiento de tramas o tramas de datos transmitidas en el CFP.

Si se utilizan balizas en la VPAN, la subcapa MAC empleará la versión ranurada del algoritmo de acceso aleatorio para transmisiones en el CAP de la supertrama. En cambio, si no se utilizan o si no pueden ser detectadas en la VPAN con uso de baliza, la subcapa MAC transmitirá utilizando la versión no ranurada del algoritmo de acceso aleatorio. En ambos casos, el algoritmo es implementado utilizando unidades de tiempo llamadas periodos de *backoff*, donde un periodo de *backoff* será igual a  $aUnitBackoffPeriod$  relojes ópticos.

En el acceso aleatorio ranurado, el periodo de *backoff* de cualquier dispositivo dentro de la VPAN se alinearán con los límites de la supertrama del coordinador, es decir, el inicio del primer periodo de *backoff* de cada dispositivo se alinea con el inicio de la transmisión de la baliza. En el acceso aleatorio ranurado, la subcapa MAC se asegurará de que la capa PHY comienza todas sus transmisiones al inicio de un periodo de *backoff*. En el acceso aleatorio no ranurado, los periodos de *backoff* de uno de los dispositivos de la VPAN no están

relacionados con los periodos de *backoff* de cualquier otro dispositivo en la VPAN.

Cada dispositivo utilizará dos variables para cada intento de transmisión: *NB* y *BE*. *NB* es el número de periodos de *backoff* que requiere el algoritmo de acceso aleatorio mientras se intenta realizar la transmisión actual. Este valor se iniciará a cero antes de cada nuevo intento de transmisión. La variable *BE* es el exponente de *backoff* que establece cuántos periodos de *backoff* esperará un dispositivo antes de intentar el acceso o evaluación del canal. *BE* se iniciará al valor de *macMinBE*.

La Figura 3-5 muestra los pasos en los que se compone el algoritmo de acceso. La subcapa MAC iniciará primero el *NB* y *BE* para el acceso aleatorio ranurado y se buscará el límite del próximo periodo de *backoff*. Después se deberá esperar un número aleatorio de periodos completos de *backoff* en el rango de 0 a  $2^{BE} - 1[\text{step}(2)]$  y requerir a la capa PHY que realice una transmisión o evaluación de canal libre (CCA). En un sistema de acceso aleatorio ranurado, la transmisión, o la CCA si está activa, deberá iniciarse en un periodo de *backoff*. En un sistema no ranurado, la transmisión o la CCA se iniciarán de forma inmediata.

En un sistema de acceso aleatorio ranurado, la subcapa MAC deberá asegurarse de que, después del *backoff*, pueden comenzar las operaciones de acceso aleatorio ranurado que queden por realizar y todos los datos pueden transmitirse antes de que termine el CAP. Así mismo, deberá tenerse en cuenta cualquier bit de relleno utilizado para el soporte de la capa PHY. Si el número de periodos de *backoff* que hay que esperar es mayor que el número de periodos de *backoff* que quedan en el CAP, la subcapa MAC deberá parar la cuenta de periodos de *backoff* al final del CAP e iniciarlo al principio del CAP de la siguiente supertrama. Si el número de periodos de *backoff* es menor o igual al número de periodos de *backoff* restantes para completar el CAP, se aplicará un retardo y se evaluará la posibilidad de continuar. Se procederá si los pasos del algoritmo de acceso aleatorio no ranurado que restan, la transmisión de trama y cualquier asentimiento pueden completarse antes del final del CAP. En caso de que se cumpla lo anterior y el CCA esté activo, se requerirá que la capa PHY realice el CCA en la supertrama actual. Si no puede continuar, se esperará hasta el inicio del CAP de la próxima supertrama y aplicará un retardo aleatorio en el *backoff* antes de evaluar si se puede proceder de nuevo.

Si el CCA está activo y el canal ha sido evaluado para comprobar si está ocupado, la subcapa MAC incrementará tanto el *NB* como el *BE* en una unidad, asegurando que el *BE* no superará el valor de *macMaxBE*. Si el valor de *NB* es menor o igual al *macMaxRABackoffs*, el algoritmo de acceso volverá a realizar un *backoff* aleatorio tal y como se muestra en la Figura 3-5. Si el valor de *NB* es mayor que *macMaxRABackoffs*, el algoritmo de acceso deberá terminar el acceso al canal con el estado de fallo.

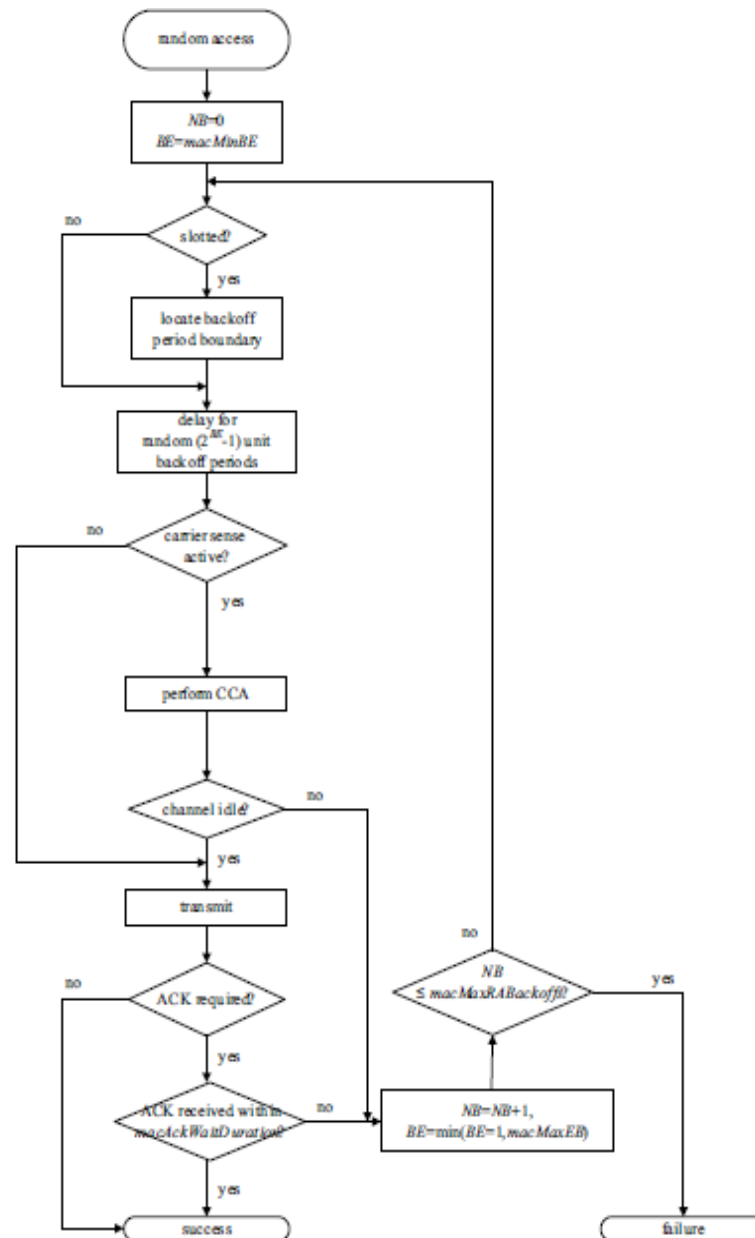


Figura 3-5. Diagrama de flujo de acceso aleatorio

### 3.1.2 Comienzo de una VPAN

#### 3.1.2.1 Escaneo a través de canales

Todos los dispositivos y coordinadores serán capaces de realizar escaneos activos sobre una lista específica de canales. Un dispositivo iniciará el escaneo de canal a través de la primitiva MLME-SCAN.request. Durante el tiempo de escaneo, si es necesario, el dispositivo suspenderá las transmisiones de balizas y solo aceptará tramas recibidas sobre el servicio de datos PHY que esté relacionado con el escaneo que se esté realizando. Una vez que haya concluido el escaneo, el dispositivo deberá reanudar las transmisiones de balizas. El resultado del escaneo se devolverá a través de la primitiva MLME-SCAN.confirm.

##### 3.1.2.1.1 Escaneo activo de canal

Antes de la explicación, es conveniente indicar que el escaneo de canal activo se utiliza en la topología punto a punto.

Un escaneo activo del canal permite a un dispositivo localizar cualquier coordinador que esté transmitiendo

balizas dentro de su área de cobertura. Esto podrá ser utilizado por un coordinador para seleccionar un identificador de VPAN antes de comenzar una nueva VPAN, o puede ser utilizado por un dispositivo antes de la asociación.

Durante el escaneo activo, la subcapa MAC deberá rechazar todas las tramas recibidas que no se correspondan con tramas de baliza. Si la trama de baliza que se recibe contiene una dirección de escaneo que aparece en la lista de direcciones pendientes de escaneo, el dispositivo no deberá extraer los datos.

Antes de comenzar un escaneo, la subcapa MAC almacenará el valor de *macVPANId* y asignará una duración de escaneo de 0xffff. Esto permite al filtro receptor aceptar todas las balizas en lugar de solo las balizas de la VPAN actual. Cuando finalice el escaneo, la subcapa MAC recuperará el valor del *macVPANId* al valor almacenado antes del comienzo del escaneo.

Para la realización de un escaneo activo de un conjunto específico de canales lógicos se utiliza la primitiva MLME-SCAN.request con el parámetro de ScanType establecido para indicar que el escaneo es activo.

Para cada canal lógico, el dispositivo primero deberá seleccionar el canal en cuestión ajustando el parámetro *phyCurrentChannel*, y enviar una instrucción de petición de baliza. Tras la transmisión de la instrucción de petición de baliza, el dispositivo habilitará el receptor un periodo máximo de  $[aBaseSuperframeDuration \times (2n + 1)]$  relojes ópticos, donde  $n$  es el valor del parámetro ScanDuration. Durante ese tiempo, el dispositivo rechazará todas las tramas que no sean de baliza y registrará la información contenida en cada una de las balizas en una estructura del descriptor VPAN, incluyendo el canal de información y el código del preámbulo.

Si se recibe una trama de baliza cuando el parámetro *macAutoRequest* está configurado a TRUE, se deberá almacenar la lista de descriptores de VPAN antes de que se haya completado el escaneo. Al mismo tiempo, la lista deberá enviarse a la siguiente capa superior dentro del parámetro VPANDescriptorList de la primitiva MLME-SCAN.confirm. El dispositivo podrá almacenar un número máximo de descriptores VPAN.

Se asumirá que una trama de baliza es única si tanto el identificador de VPAN como la dirección de la fuente que contiene no se repiten en las otras tramas de baliza recibidas durante el escaneo del canal actual. Si se recibe una trama de baliza cuando se ha configurado *macAutoRequest* a FALSE, cada descriptor de VPAN registrado se enviará a la capa superior en primitivas MLME-BEACON-NOTIFY.indication diferentes. Una trama de baliza recibida que contenga uno o más octetos de carga útil provocará el envío del descriptor VPAN a la siguiente capa superior a través de la primitiva MLME-BEACON-NOTIFY.indication.

Si se recibe una trama de baliza protegida, es decir, el subcampo Security Enabled de la trama está establecido a uno, el dispositivo intentará transformar la trama de baliza a no segura utilizando el proceso descrito en los apartados posteriores. Los elementos relacionados con la seguridad de un descriptor de VPAN correspondiente a una baliza, deberán configurarse al parámetro correspondiente devuelto por el proceso de insegurización. En el elemento SecurityFailure del descriptor de VPAN se establecerá el valor devuelto por el estado del proceso de insegurización que podrá ser SUCCESS, o uno en el caso de códigos de estado que indiquen un error en el proceso de seguridad.

Si *macAutoRequest* está configurado a TRUE, el escaneo activo de un canal particular deberá terminar cuando el número de balizas encontradas iguale el límite de implementación especificado o el canal haya escaneado durante todo el tiempo establecido. Con esta configuración el procedimiento de escaneo terminará cuando el número de descriptores VPAN almacenados iguale el máximo de implementación especificado o se hayan escaneado todos los canales disponibles. Si *macAutoRequest* se ha configurado a FALSE, el escaneo activo de un canal particular terminará cuando el canal haya sido escaneado durante todo el tiempo establecido. En este caso, el procedimiento de escaneo solo terminará cuando todos los canales disponibles hayan sido escaneados. Si un canal no ha sido escaneado durante el tiempo completo se considerará como no escaneado.

#### 3.1.2.1.2 Escaneo de canal pasivo

El escaneo de canal pasivo se realiza en la topología en estrella o difusión.

El escaneo pasivo, al igual que en el escaneo activo, permite al dispositivo ubicar cualquier coordinador que esté transmitiendo tramas de baliza dentro de su área de cobertura. Sin embargo, la instrucción de petición de baliza no se transmite. Este tipo de escaneo puede utilizarse por los dispositivos antes de la asociación. Durante el escaneo pasivo, la subcapa MAC descartará todas las tramas que provengan del servicio de datos PHY y no se correspondan con tramas de baliza. Si se recibe una trama de baliza que contenga la dirección de un dispositivo que aparezca en su lista de direcciones de escaneo pendientes, el dispositivo de escaneo no

deberá extraer los datos pendientes.

Al igual que en el escaneo activo, antes de comenzar un escaneo la subcapa MAC almacenará el valor de *macVPANId* y le asignará una duración de escaneo de 0xffff. Esto permite al filtro receptor aceptar todas las balizas en lugar de solo las balizas de la VPAN actual. Cuando finalice el escaneo, la subcapa MAC recuperará el valor del *macVPANId* al valor almacenado antes del comienzo del escaneo.

Para la realización de un escaneo pasivo de un conjunto específico de canales lógicos se utiliza la primitiva MLME-SCAN.request con el parámetro de ScanType establecido para indicar que el escaneo es pasivo.

Para cada canal lógico, el dispositivo primero deberá seleccionar el canal en cuestión ajustando el parámetro *phyCurrentChannel* y después habilitar su receptor como mucho  $[aBaseSuperframeDuration \times (2n + 1)]$  relojes ópticos, donde la  $n$  es el valor del parámetro ScanDuration. Durante ese tiempo, el dispositivo rechazará todas las tramas que no sean de baliza y registrará la información contenida en cada una de las balizas en una estructura del descriptor VPAN.

Si se recibe una trama de baliza cuando el parámetro *macAutoRequest* está configurado en TRUE, la lista de descriptores de VPAN deberá almacenarse por la subcapa MAC antes de que se haya completado el escaneo. Al mismo tiempo, la lista deberá ser enviada a la siguiente capa superior en el parámetro VPANDescriptorList de la primitiva MLME-SCAN.confirm. Un dispositivo será capaz de almacenar un número máximo de descriptores VPAN.

Se asumirá que una trama de baliza es única si tanto el identificador de VPAN como la dirección de la fuente que contiene no se repiten en las otras tramas de baliza recibidas durante el escaneo del canal actual. Si se recibe una trama de baliza cuando se ha configurado *macAutoRequest* a FALSE, cada descriptor de VPAN registrado se enviará a la capa superior en una primitiva MLME-BEACON-NOTIFY.indication separada. Una trama de baliza recibida que contenga uno o más octetos de carga útil provocará que se envíe el descriptor VPAN a la capa superior a través de la primitiva MLME-BEACON-NOTIFY.indication.

Una vez que se haya completado el escaneo, se emitirá el MLME-SCAN.confirm a la siguiente capa superior con el parámetro VPANDescriptorList nulo. Una trama de baliza recibida que contenga uno o más octetos de carga útil también deberá provocar el envío del descriptor VPAN a la siguiente capa superior a través de la primitiva MLME-BEACON-NOTIFY.indication.

Si se recibe una trama de baliza protegida, es decir, el subcampo Security Enabled en la trama está establecido a uno, el dispositivo intentará transformar la trama de baliza a no segura utilizando el proceso de descrito en el capítulo 5.

Los elementos de seguridad de un descriptor de VPAN correspondiente a una baliza deberán configurarse a los parámetros correspondientes devueltos por el proceso de insegurización. El elemento SecurityFailure del descriptor de VPAN se configurará como SUCCESS si el estado del proceso de insegurización es SUCCESS y se configurará a uno para los otros códigos de estado indicando un error en el proceso de seguridad.

En el descriptor de VPAN se registrará la información de la trama insegurizada aun cuando el estado del proceso de insegurización indique un error.

Si *macAutoRequest* está configurado a TRUE, el escaneo pasivo de un canal particular deberá terminar cuando el número de balizas encontradas iguale el límite de implementación especificado o el canal se haya escaneado durante todo el tiempo establecido. En este caso el procedimiento de escaneo completo terminará cuando el número de descriptores VPAN almacenados iguale el máximo de implementación especificado o se hayan escaneado todos los canales disponibles. Si *macAutoRequest* se ha configurado a FALSE, el escaneo pasivo del canal terminará cuando el canal haya sido escaneado durante todo el tiempo establecido. En cuanto al procedimiento de escaneo completo, solo terminará cuando todos los canales en el conjunto de canales disponibles hayan sido escaneados. Si un canal no ha sido escaneado durante el tiempo completo se considerará como no escaneado.

### 3.1.2.2 Inicio de VPAN

El modo de difusión no establece requerimientos para empezar una VPAN. Para el inicio de una VPAN se debe realizar un intercambio de capacidades para todas las comunicaciones bidireccionales durante el descubrimiento del dispositivo. Si un dispositivo soporta múltiples canales de color de transmisión, se pueden intercambiar las métricas WQI (indicación de calidad de longitud de onda) para la selección de canal. En



caso de que el dispositivo soporte un solo canal de color no habrá requerimientos aplicables al proceso de selección de canal. En la topología en estrella, el coordinador establece la VPAN mediante el envío de tramas de baliza, por contra, en la topología punto a punto, un dispositivo podrá enviar tanto instrucciones de asociación como de escaneo activo para iniciar una comunicación con el dispositivo par.

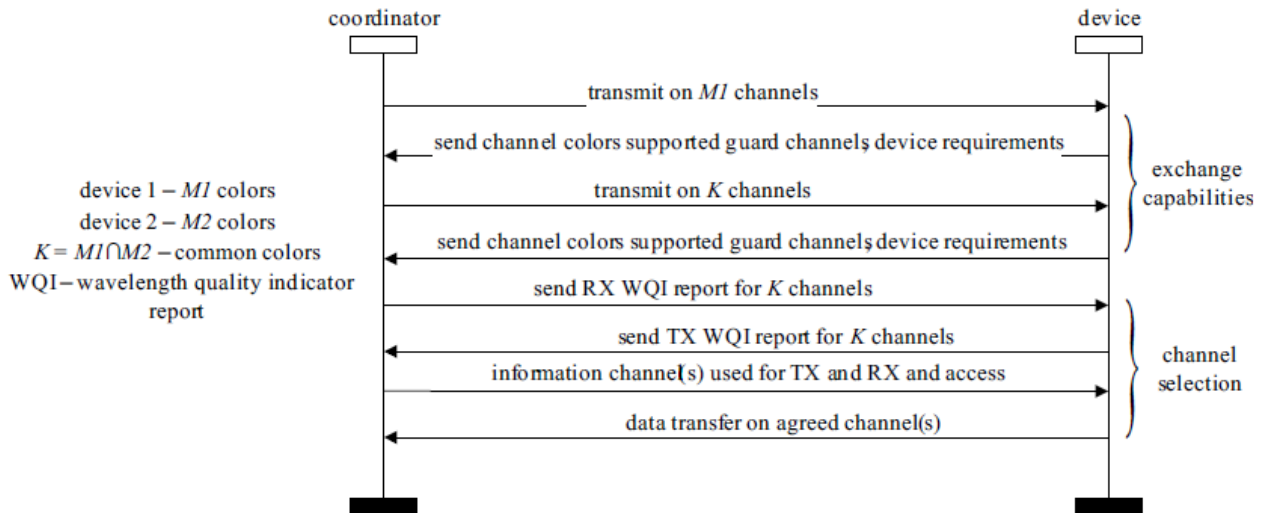


Figura 3-6. Inicio de VPAN

El dispositivo 1 soportará  $M1$  canales de color y el dispositivo 2  $M2$  canales de color.  $K$  será el número de canales compartidos entre el dispositivo 1 y el dispositivo 2, donde  $K \geq 1$ . En la red punto a punto, el primer dispositivo, que será el dispositivo coordinador, inicia la comunicación y transmite en todos los canales soportados,  $M1$ . Si en el transmisor y receptor hay hardware independiente para cada color, es posible el uso de transmisiones paralelas siempre que los canales de color de guarda no se utilicen para la elección de cualquier de color. Cada dispositivo comunica sus capacidades a los otros dispositivos de la red, además de los requerimientos de la aplicación a través de los elementos de información de capacidad (IE) MAC y PHY proporcionados. Los IE MAC también informan sobre el número de canales agregados soportados y los colores de guarda asociados para cada canal. El otro dispositivo intentará recibir y sincronizarse en todos los  $K$  canales compartidos entre los dispositivos. Sin embargo, es posible que solo pueda recibir en ' $x$ ' canales, donde  $1 \leq x \leq K$  debido a la interferencia con otras fuentes de luz. El segundo dispositivo recibirá en al menos uno de los canales para poder establecer la comunicación. La WQI se calcula basándose en la energía interferente procedente de la luz ambiental y la energía recibida durante la transmisión en los  $K$  canales. El segundo dispositivo proporcionará sus canales soportados, canales de guarda y requerimientos de aplicación como parte del intercambio de información de capacidad y transmitirá al primer dispositivo en los  $K$  canales comunes. El primer dispositivo intentará recibir y sincronizarse en todos los  $K$  canales, pero solo recibirá en ' $y$ ' canales, donde  $1 \leq y \leq K$  debido a la interferencia. Ya que las comunicaciones VLC son muy direccionales es posible que la ' $x$ ' y la ' $y$ ' sean diferentes. Por ejemplo, si el primer dispositivo está cerca de una ventana, podrá recibir mayor interferencia por luz ambiental que el segundo dispositivo. El primer dispositivo también calcula su RX WQI para todos los  $K$  canales y transmite el informe WQI de vuelta al segundo dispositivo.

De forma simultánea, el segundo dispositivo calcula las métricas WQI basándose en la información recibida del primer dispositivo. Los canales donde la recepción no sea posible se etiquetarán como inutilizables mediante la recepción de un WQI de 0. El segundo dispositivo enviará su RX WQI para todos los  $K$  canales de vuelta al primer dispositivo.

La capa PHY proporciona el soporte para la indicación de calidad de longitud de onda (WQI) y se pasa a la capa MAC a través de la interfaz PD-SAP.

En la topología de red en estrella, el coordinador actúa como el que inicia la detección y asociación del dispositivo y utiliza el CAP para las peticiones de asociación, y las tramas de baliza/gestión para difundir sus concesiones de asociación.

El inicio de una VPAN solo es aplicable a los modos de comunicación bidireccionales y no para comunicaciones en difusión.



### 3.1.2.3 Generación de baliza

Un dispositivo permitirá la transmisión de tramas de baliza solo si el parámetro *macShortAddress* no es igual a 0xffff.

El coordinador empezará a transmitir balizas solo si el parámetro *BeaconOrder* es menor de 15 y para ello utilizará la primitiva *MLME-START.request*. El coordinador empezará la transmisión de balizas ya sea como coordinador de una nueva VPAN o como dispositivo de una VPAN previamente establecida, dependiendo de la configuración del parámetro *VPANCoordinator*. El coordinador empezará la transmisión de balizas en una VPAN previamente establecida solo si se ha asociado de manera satisfactoria con la VPAN.

Para el coordinador (el parámetro *VPANCoordinator* está configurado a TRUE), la subcapa MAC ignorará el parámetro *StartTime* y empezará las transmisiones de baliza de forma inmediata. También empezará la transmisión de balizas inmediatamente si el parámetro *StartTime* está a cero.

Si el dispositivo no actúa como coordinador y el parámetro *StartTime* no es cero, se realizará un cálculo del tiempo para iniciar la transmisión de balizas. Cuando la subcapa MAC recibe la baliza del coordinador, el parámetro *StartTime*, que se ajusta a los límites del *slot* de *backoff*, se añade al tiempo obtenido del reloj local y de esta forma se consigue el tiempo para el inicio de la transmisión. La subcapa MAC empezará las transmisiones de balizas cuando el tiempo actual iguale el número calculado.

Para calcular el tiempo de transmisión de baliza de la subcapa MAC, se deberá realizar un seguimiento de la baliza recibida del coordinador al cual está asociado.

Si la primitiva *MLME-START.request* se emite con el parámetro *StartTime* a cero y la subcapa MAC no está realizando un seguimiento de las balizas de su coordinador, la MLME no empezará la transmisión de balizas pero emitirá la primitiva *MLME-START.confirm* con el estado de *TRACKING\_OFF*.

Si el dispositivo pierde entre una y (*aMaxLostBeacons* - 1) tramas de baliza consecutivas de su coordinador, el dispositivo deberá continuar transmitiendo sus propias balizas basadas en el parámetro *macBeaconOrder* y su reloj local.

Si el dispositivo recibe una trama de baliza de su coordinador y, por tanto no ha perdido la sincronización, el dispositivo continuará transmitiendo sus propias balizas basándose en el parámetro *StartTime* y la baliza entrante. Si el dispositivo pierde la sincronización con su coordinador, la MLME de su dispositivo emitirá la primitiva *MLME-SYNC-LOSS.indication* a su capa superior y de forma inmediata se parará la transmisión de sus balizas. La capa superior podrá, en cualquier momento posterior a la recepción de la primitiva *MLME-SYNC-LOSS.indication*, continuar la transmisión de balizas mediante la emisión de una nueva primitiva *MLME-START.request*.

En la recepción de la primitiva *MLME-START.request*, se configurará el identificador de VPAN al valor *macVPANId* y establecerá este valor en el campo de Source VPAN Identifier (Identificador de Fuente VPAN) de la trama de baliza. La dirección utilizada en el campo Source Address (Dirección de Fuente) de la trama de baliza contendrá el valor de *aExtendedAddress* si *macShortAddress* es igual a 0xffffe, o *macShortAddress* en caso contrario.

El tiempo de transmisión de la baliza más reciente se registrará en *macBeaconTxTime* y se tomará siempre en la misma posición en cada trama de baliza. Esta posición, especificada en el atributo *macTimeStampOffset*, es la misma a la utilizada en la muestra de tiempo de la trama de baliza de entrada.

Todas las tramas de baliza deberán ser transmitidas en el inicio de cada supertrama en un intervalo igual a  $aBaseSuperframeDuration \times 2^n$  relojes ópticos, donde *n* es el valor de *macBeaconOrder* (la construcción de la trama de baliza se especifica en 5.2.2.1)

Se le dará prioridad a la transmisión de balizas antes que a cualquier otra operación de transmisión y recepción.

### 3.1.2.4 Detección de dispositivos

El coordinador indica que está dentro de una VPAN a otros dispositivos de la misma mediante la transmisión de tramas de baliza, esto permite a los otros dispositivos su detección para el establecimiento de una comunicación entre ellos.

La detección de dispositivos se realizará a 11.67 kbps con un reloj óptico de 200 kHz para la capa PHY I y a 1.25 Mbps con un reloj óptico de 3.75 MHz para PHY II. PHY III no proporciona soporte para la detección de dispositivos y hacen uso del modo PHY II para la detección antes del funcionamiento en PHY III. El modo de atenuación OOK puede utilizarse para el control de atenuación en el proceso de detección de dispositivos. Este modo se indica utilizando el atributo PIB MAC *macUseDimmedOOKmode*. Durante el proceso de detección de dispositivos también se intercambian las capacidades MAC y PHY de cada uno de ellos así como las capacidades de soporte de la tasa de reloj. Una vez que se han intercambiado las capacidades, los tres tipos PHY continúan con el modo regular de transmisión de datos. La detección de dispositivos requiere una comunicación bidireccional y no es aplicable en difusión.

### 3.1.2.5 Canales de guarda y agregación

El plan de bandas proporciona soporte para siete canales lógicos en la subcapa MAC. Sin embargo, para poder realizar la asociación sin el conocimiento de las capacidades del receptor y para realizar la difusión unidireccional, el receptor VLC soportará la recepción del espectro de luz visible al completo.

La agregación de canal se utiliza para indicar las fuentes ópticas que abarcan múltiples bandas del plan de bandas y que intencionadamente transmiten en muchas de ellas gracias a la elección de la fuente de luz óptica. Los canales de guarda se utilizan para indicar las fuentes ópticas que de forma no intencionada interfieren en otras bandas y cuya información se descarta en el receptor para un mejor rendimiento.

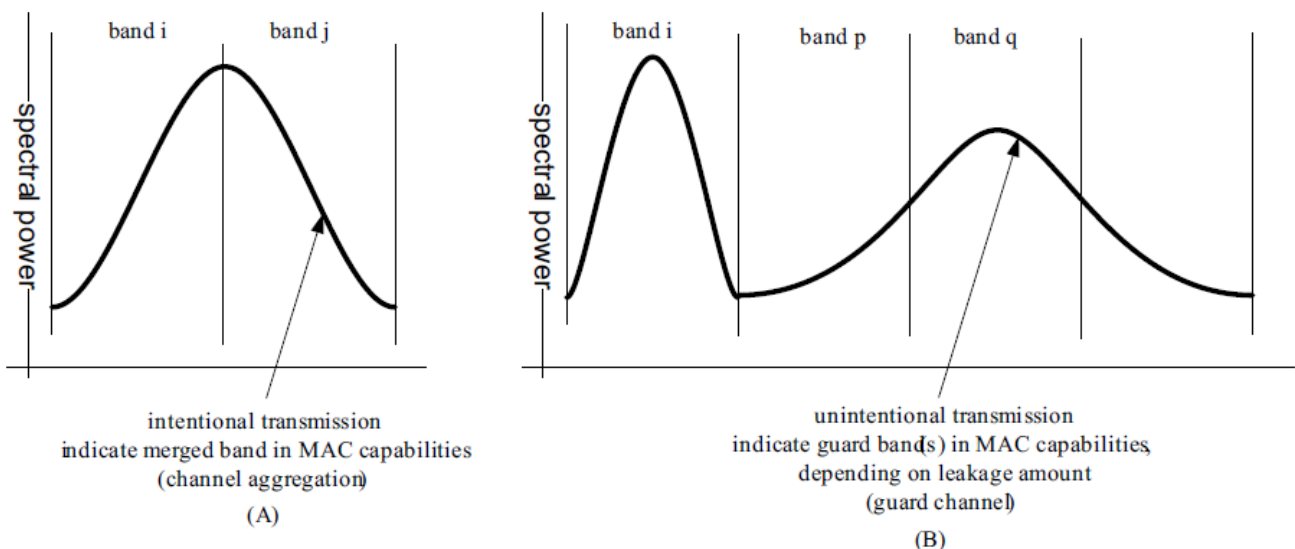


Figura 3-7. Concepto de agregación de canal y canal de guarda

En caso de que múltiples bandas estén agregadas o diferentes fuentes ópticas estén transmitiendo de forma simultánea, el contenido del preámbulo y la cabecera será el mismo para todas las fuentes ópticas mientras no se conozcan cuáles son las capacidades del receptor durante la detección de dispositivos. Los detalles sobre la gestión de la agregación de canal y el canal de guarda se proporcionan en los elementos de información sobre capacidades de la capa PHY de MAC. El criterio utilizado para definir un canal de color de guarda o un canal agregado se basa en que la interferencia producida en el otro canal exceda un 20 dB sobre el máximo valor de la potencia de la señal dentro del canal. El dispositivo de transmisión indicará la disposición de agregación de canal o el canal de guarda utilizando las capacidades PHY durante la detección y asociación del dispositivo para modos de comunicación bidireccionales.

### 3.1.3 Mantenimiento de VPANs

En algunos casos se pueden dar situaciones en las cuales existen dos VPANs en el mismo espacio de operación con el mismo identificador VPAN. Si se produce este conflicto, el coordinador y sus dispositivos seguirán el procedimiento de resolución de conflictos de identificador. Este procedimiento es opcional para un dispositivo.

### 3.1.3.1 Detección

El proceso de detección de VPANs duplicadas requiere del estudio de diferentes variables y parámetros para que el coordinador o el dispositivo interpreten el conflicto entre identificadores. El coordinador entenderá que hay conflicto de identificador VPAN si se dan alguna de las siguientes situaciones:

- Se recibe una trama de baliza en el coordinador con el subcampo VPAN Coordinator, configurado a uno y con el identificador de VPAN igual a *macVPANId*.
- Se recibe en el coordinador una instrucción de notificación de conflicto VPAN ID, de un dispositivo asociado en su VPAN.

Un dispositivo que esté asociado a través de un coordinador (*macAssociatedVPANCoord* configurado a TRUE) entenderá que hay conflicto en el identificador de VPAN cuando se presente lo siguiente:

- Se recibe una trama de baliza con el subcampo VPAN Coordinator a uno, el identificador de VPAN igual a *macVPANId* y con una dirección igual a *macCoordShortAddress* o *macCoordExtendedAddress*.

### 3.1.3.2 Resolución

Cuando un dispositivo detecte un conflicto de identificador de VPAN, se generará la instrucción de notificación de conflicto de ID VPAN y se enviará al coordinador. En caso de que la instrucción contenga una petición de asentimiento, el coordinador confirmará la recepción de la misma mediante el envío de una trama de asentimiento. Cuando el dispositivo reciba la trama de asentimiento, la entidad MLME emitirá una primitiva MLME-SYNC-LOSS.indication con el parámetro LossReason configurado a VPAN\_ID\_CONFLICT. Si el dispositivo no recibe la trama de asentimiento, la MLME no informará a la capa superior del conflicto.

Cuando el coordinador haya detectado el conflicto de identificador VPAN, la MLME emitirá MLME-SYNC-LOSS.indication a la capa superior con el parámetro LossReason configurado a VPAN\_ID\_CONFLICT. La capa superior del coordinador realizará un escaneo activo y, utilizando la información del escaneo, seleccionará un identificador VPAN para evitar el conflicto. Cuando la capa superior haya seleccionado el nuevo identificador de VPAN, emitirá MLME-STAR.request con el parámetro CoordRealignement configurado a TRUE para el realineamiento de la VPAN.

### 3.1.3.3 Realineamiento de VPAN

Si un coordinador recibe una primitiva MLME-START.request con el parámetro CoordRealignement configurado en TRUE, el coordinador transmitirá una instrucción de realineamiento que contenga los nuevos valores para los parámetros de VPANId, LogicalChannel.

Cuando el coordinador esté transmitiendo balizas y el parámetro CoordRealignement contenga el valor TRUE, la siguiente baliza programada se transmitirá en el canal actual utilizando la configuración de supertrama establecida previamente, con el subcampo de trama en espera del control de trama a uno. Inmediatamente después, se transmitirá la instrucción de realineamiento de coordinador en el canal actual utilizando acceso aleatorio no ranurado.

En caso de que el coordinador no esté transmitiendo balizas y el parámetro CoordRealignement contenga el valor TRUE, la instrucción de realineamiento de coordinador se transmitirá de forma inmediata en el canal actual utilizando acceso aleatorio no ranurado.

Si se produce un error en la transmisión de la instrucción anterior debido a un fallo en el acceso al canal, la MLME se lo notificará a la capa superior mediante la emisión de la primitiva MLME-START.confirm con el estado de CHANNEL\_ACCESS\_FAILURE. La capa superior podrá emitir la primitiva MLME-START.request de nuevo.

En caso de una correcta transmisión de la instrucción, la nueva configuración de supertrama y los parámetros de canal se pondrán en operación en la posterior baliza programada, o de forma inmediata si el coordinador no está transmitiendo balizas, y la subcapa MAC emitirá la primitiva MLME-STAR.confirm con el estado SUCCESS.

### 3.1.3.4 Realineamiento en una VPAN

Si un dispositivo recibe la instrucción de realineamiento de coordinador procedente de un coordinador al que está asociado, la MLME emitirá una primitiva de MLME-SYNC-LOSS.indication con el parámetro LossReason establecido en REALIGNMENT y el VPANId, LogicalChannel y los parámetros relativos a la seguridad configurados a sus campos correspondientes en la instrucción de realineamiento de coordinador. La capa superior del coordinador podrá emitir una primitiva MLME-START.request con el parámetro CoordRealignement configurado a TRUE. La capa superior de un dispositivo diferente al coordinador podrá modificar la configuración de supertrama o los parámetros del canal mediante el uso de la primitiva MLME-SET.request.

### 3.1.3.5 Actualización de la configuración de supertrama y atributos PIB de canal

Para actualizar la configuración de supertrama y los atributos de canal, la MLME asignará valores de los parámetros de la primitiva MLME-START.request a los atributos PIB apropiados.

Se deberá configurar *macBeaconOrder* al valor del parámetro BeaconOrder. Si *macBeaconOrder* es igual a 15, la MLME configurará el *macSuperframeOrder* a 15, en este caso se configura una VPAN sin uso de baliza. Si *macBeaconOrder* es menor a 15, la subcapa MAC configurará el *macSuperframeOrder* al valor del parámetro *SuperframeOrder*.

La subcapa MAC también actualizará el *macVPANId* con el valor del parámetro VPANId y actualizará el *phyCurrentChannel* con los valores de los parámetros LogicalChannel mediante la emisión de la primitiva MLME-SET.request.

## 3.1.4 Asociación y des-asociación

En los siguientes apartados se tratarán los procedimientos de asociación y des-asociación.

### 3.1.4.1 Asociación

Un dispositivo intentará asociarse solo después de haber reiniciado la subcapa MAC mediante la emisión de la primitiva MLME-RESET.request con el parámetro SetDefaultPIB establecido en TRUE, y después de haber completado un escaneo activo o pasivo de canal. Además, se seguirá un algoritmo para la selección de una VPAN de la lista de descriptores de VPAN obtenida del procedimiento de escaneo de canal, con el objetivo de asociarse a ella.

Después de la selección de una VPAN, la capa superior pedirá a la MLME a través de la primitiva MLME-ASSOCIATE.request que configure los atributos PHY y MAC PIB a los valores necesarios para la asociación:

- *phyCurrentChannel* se establecerá al mismo valor contenido en el parámetro LogicalChannel de la primitiva MLME-ASSOCIATE.request.
- *macVPANId* se establecerá al mismo valor del parámetro CoordVPANId de la primitiva MLME-ASSOCIATE.request
- Dependiendo de la dirección que se conozca de la trama de baliza procedente del coordinador, los atributos *macCoordExtendedAddress* o *macCoordShortAddress* se configurarán al mismo valor contenido en el parámetro CoordAddress de la primitiva MLME-ASSOCIATE.request.

Un coordinador permitirá la asociación solo si el valor de *macAssociationPermit* es TRUE. De la misma forma, un dispositivo solo deberá intentar asociarse a una VPAN a través del coordinador que en ese momento está permitiendo la asociación, como se indica en el resultado del procedimiento de escaneo. Si un coordinador con el valor *macAssociationPermit* igual a FALSE recibe una instrucción de petición de asociación procedente de un dispositivo, la instrucción será ignorada.

Para optimizar el procedimiento de asociación en una VPAN que permita el uso de baliza, el dispositivo realizará un seguimiento de la baliza del coordinador al que quiere asociarse. Para esto, la capa superior emitirá la primitiva MLME-SYNC.request con el parámetro TrackBeacon con el valor TRUE.

La subcapa MAC de un dispositivo no asociado iniciará el procedimiento de asociación mediante el envío de la instrucción de petición de asociación, al coordinador de una VPAN existente. En caso de que no

pueda enviarse por fallo en el canal, la subcapa MAC deberá notificarlo a la capa superior. Debido a que la solicitud contiene una petición de asentimiento, el coordinador deberá confirmar la recepción mediante el envío de una trama de asentimiento.

El asentimiento a la petición de asociación no significa que el dispositivo se haya asociado. El coordinador necesita un tiempo para determinar si los recursos disponibles en la VPAN son suficientes para permitir la asociación de otro dispositivo. La capa superior deberá tomar la decisión dentro del periodo *macResponseWaitTime* relojes ópticos. Si la capa superior del coordinador comprueba que el dispositivo había sido asociado previamente a la VPAN, la información que estaba almacenada debe ser eliminada. Si hay suficientes recursos disponibles, se le asignará una dirección de 16 bits al dispositivo, y la subcapa MAC generará una instrucción de respuesta a asociación, que contenga la nueva dirección y el estado indicando el éxito de la asociación. Si no se dispone de recursos suficientes, el coordinador informará al a subcapa MAC, y la MLME generará una instrucción de respuesta a la asociación que contenga un estado indicando el fallo. Esta instrucción se enviará utilizando transmisión indirecta.

Si el subcampo de dirección asignada del campo de información de capacidad de la instrucción de petición de asociación está establecido a uno, la capa superior del coordinador asignará una dirección de 16 bits en un rango que depende del modo de direccionamiento soportado por el coordinador, como se describe en la Tabla 3-1. En caso de que el subcampo de dirección asignada esté establecido a cero, la dirección de 16 bits será igual a 0xffff. La dirección 0xffff es un caso especial que indica que el dispositivo se ha asociado pero que el coordinador no le ha asignado una dirección. En ese caso el dispositivo utilizará solo una dirección extendida de 64-bit para operar en la red.

Como se ha explicado, en la recepción del asentimiento correspondiente a la petición de asociación el dispositivo deberá esperar al menos *macResponseWaitTime* relojes ópticos para tomar la decisión de asociación. El atributo PIB *macResponseWaitTime* es un parámetro dependiente de la topología de red a la que el dispositivo intenta conectarse.

Si el dispositivo realiza seguimiento de baliza, intentará extraer la instrucción de respuesta a asociación del coordinador cuando se indique en la trama de baliza. En caso contrario, se extraerá la instrucción de respuesta de asociación después del periodo *macResponseWaitTime*.

Si el dispositivo no extrae la instrucción de respuesta de asociación del coordinador en el *macResponseWaitTime*, la MLME emitirá una primitiva MLME-ASSOCIATE.confirm con el estado NO\_DATA y el intento de asociación será considerado fallido. En este caso, la capa superior terminará cualquier seguimiento de la baliza mediante la emisión de la primitiva MLME-SYNC.request con el parámetro TrackBeacon establecido a FALSE.

La primitiva MLME-ASSOCIATE.response y su respuesta también contendrán información acerca de las capacidades del dispositivo y el coordinador podrá utilizarlas durante las comunicaciones futuras.

Debido a que la instrucción de respuesta a la asociación contiene una petición de asentimiento, el dispositivo que solicita la asociación confirmará la recepción mediante el envío de la trama de asentimiento. Si la asociación se ha realizado con éxito, el dispositivo almacenará la dirección contenida en el campo Short Address de 16 bits de la instrucción en *macShortAddress*.

Si el campo de estado de asociación de la instrucción indica que la asociación no ha podido realizarse, el dispositivo establecerá en *macVPANId* al valor por defecto (0xffff).

Tabla 3–1 Uso de dirección corta de 16 bits

Valor de <i>macShortAddress</i>	Descripción
0x0000-0xffff	Si se incluye una dirección de fuente, el dispositivo utilizará un modo de direccionamiento de fuente apropiado para tramas de instrucción MAC.
0xffff	Si se incluye una dirección de fuente, el dispositivo utilizará el modo de direccionamiento de fuente extendido para tramas de datos y baliza, y el modo de direccionamiento de fuente apropiado para tramas de instrucción MAC.
0xffff	El dispositivo no está asociado y, por lo tanto, no realizará ninguna comunicación de trama de datos. El dispositivo utilizará el modo de direccionamiento de fuente apropiado para tramas de instrucción MAC.

### 3.1.4.2 Des-asociación

El procedimiento de des-asociación es iniciado por la capa superior mediante la emisión de la primitiva MLME-DISASSOCIATE.request al MLME.

Cuando el coordinador quiere que un dispositivo abandone la VPAN, la MLME del coordinador enviará la instrucción de notificación de des-asociación en la forma especificada por el parámetro TxIndirect de la primitiva MLME-DISASSOCIATE.request que ha enviado previamente la capa superior. Si TxIndirect es TRUE, la MLME del coordinador enviará la instrucción de notificación de des-asociación al dispositivo mediante transmisión indirecta, es decir, la trama de instrucción se añadirá a la lista de transacciones pendientes almacenada en el coordinador y se enviará siguiendo el método descrito en 3.1.7. Si la trama de instrucción no se extrae de forma adecuada por el dispositivo, el coordinador considerará al dispositivo como no asociado. En otro caso, la MLME enviará la instrucción de notificación de des-asociación al dispositivo directamente. Si esta instrucción no se puede enviar debido a un fallo en el acceso al canal, la subcapa MAC lo notificará a la capa superior.

Debido a que la instrucción de des-asociación contiene petición de asentimiento, el dispositivo deberá confirmar la recepción mediante el envío de la trama de asentimiento. Si la transmisión directa o indirecta falla, el coordinador considerará al dispositivo como no asociado.

Si un dispositivo asociado desea abandonar la VPAN, la MLME del dispositivo enviará una instrucción de notificación de des-asociación al coordinador. Si la instrucción no puede enviarse debido a un fallo en el acceso al canal, la subcapa MAC lo notificará a la capa superior. Como la petición de des-asociación contiene solicitud de asentimiento, se deberá enviar una trama de asentimiento para confirmar la recepción. En caso de que no se reciba, el dispositivo se considerará como no asociado.

Si la dirección de fuente contenida dentro de la instrucción de notificación de des-asociación es igual a *macCoordExtendedAddress*, el dispositivo se considerará como no asociado. En caso contrario se deberá verificar que la dirección de fuente se corresponde a uno de los dispositivos asociados. Si es así, el coordinador deberá considerar al dispositivo como no asociado. La instrucción se ignorará si no se cumplen ninguna de las condiciones de des-asociación establecidas.

Un dispositivo se des-asociará mediante el borrado de todas las referencias a la VPAN, la MLME configurará a los atributos *macVPANId*, *macShortAddress*, *macAssociatedVPANCoord*, *macCoordShortAddress* y *macCoordExtendedAddress* a los valores por defecto. La capa superior en el coordinador des-asociará al dispositivo eliminando cualquier referencia al mismo.

El resultado del procedimiento de des-asociación se notificará a través de la primitiva MLME-DISASSOCIATE.confirm por parte del dispositivo.

### 3.1.5 Sincronización

En este apartado se especifican los procedimientos que seguirán los coordinadores para generar tramas de baliza y los dispositivos para sincronizarse con el coordinador. Para VPANs que soporten el uso de baliza, la sincronización se realiza mediante la recepción y decodificación de tramas de baliza. Para VPANs que no soporten balizas, la sincronización se realiza mediante la realización de un sondeo al coordinador para recibir

los datos.

### 3.1.5.1 Sincronización con balizas

Todos los dispositivos que operen en VPAN con uso de baliza (*macBeaconOrder* < 15) deberán ser capaces de sincronizarse a través de balizas para detectar cualquier mensaje pendiente o para realizar un seguimiento de la misma. Los dispositivos podrán sincronizarse con balizas que contengan el identificador VPAN especificado en el *macVPANId*. Si en *macVPANId* se especifica el identificador VPAN de difusión (0xffff) el dispositivo no intentará la sincronización.

En el dispositivo, a través de la primitiva MLME-SYNC.request se establece la adquisición de baliza. Si en la primitiva MLME-SYNC.request se especifica seguimiento de baliza, el dispositivo intentará adquirir la baliza y mantener un seguimiento mediante la activación de su receptor. Si el seguimiento no está especificado, el dispositivo intentará adquirir la baliza solo una vez o terminar el seguimiento después de la siguiente baliza.

Para conseguir la sincronización a través de baliza, el dispositivo habilitará su receptor y buscará en un periodo de, como mucho, [*aBaseSuperframeDuration* × (2*n* + 1)] relojes ópticos, donde *n* es el valor de *macBeaconOrder*. Si no se recibe la trama en la que se especifica el identificador actual de la VPAN del dispositivo, la MLME repetirá la búsqueda. Una vez que el número de balizas perdidas alcance *aMaxLostBeacons*, la MLME lo notificará a la capa superior mediante la emisión de la primitiva MLME-SYNC-LOSS.indication con la razón de la pérdida BEACON\_LOSS.

La MLME asignará muestras de tiempo a cada trama de baliza recibida en el mismo símbolo dentro de cada trama, la localización de cada una se describe en el atributo *macTimeStampOffset*. La posición será la misma que la utilizada en la marca de tiempo de la trama de baliza de salida, almacenada en *macBeaconTxTime*.

Si se recibe una trama de baliza protegida, el dispositivo intentará insegurizar la trama de baliza utilizando el proceso de insegurización descrito en 5.1.2.

Si el estado devuelto por el proceso de insegurización no es SUCCESS, la MLME emitirá una primitiva MLME-COMM-STATUS.indication con el parámetro de estado del proceso de insegurización indicando error.

Los elementos de seguridad del descriptor VPAN correspondientes a la baliza se establecerán al parámetro correspondiente devuelto por el proceso de insegurización.

Cuando se reciba una trama de baliza, la MLME la rechazará si los campos Source Address (Dirección de Fuente) y Source VPAN Identifier (Identificador de Fuente VPAN) de la cabecera de control de acceso al medio (MHR) de la trama de baliza no se corresponden con la dirección fuente del coordinador (*macCoordShortAddress* o *macCoordExtendedAddress*, dependiendo del modo de direccionamiento) y el identificador del dispositivo (*macVPANId*).

Si se recibe una trama de baliza válida y *macAutoRequest* está establecido a FALSE, la MLME indicará a la capa superior los parámetros de la baliza mediante la emisión de la primitiva MLME-BEACON-NOTIFY.indication. Si se recibe una trama de baliza y *macAutoRequest* está configurado en TRUE, la MLME emitirá primero la primitiva MLME-BEACON-NOTIFY.indication si la baliza contiene carga útil. La MLME comparará después su dirección con las direcciones del campo Address List de la trama de baliza. Si la dirección del campo Address List contiene una dirección corta de 16 bits o extendida de 64 bits correspondiente al dispositivo y el identificador de fuente VPAN es igual al *macVPANId*, la MLME seguirá el procedimiento de extracción de datos pendientes del coordinador como se explica en 3.1.7.3.

Si está activado el seguimiento de baliza, la MLME habilitará el receptor un tiempo antes de la próxima transmisión de trama de baliza, es decir, justo antes del inicio de la próxima supertrama. Si el número de balizas perdidas consecutivas por la MLME alcanza *aMaxLostBeacons*, la MLME responderá con la primitiva MLME-SYNC-LOSS.indication con la razón de pérdida BEACON\_LOST.

### 3.1.5.2 Sincronización sin balizas

Todos los dispositivos que operen en VPAN que no permitan el uso de baliza (*macBeaconOrder* = 15) serán capaces de obtener del coordinador los datos según los criterios de la capa superior.

Un dispositivo sondeará los datos del coordinador cuando la MLME reciba la primitiva MLME-

POLL.request. En la recepción de la primitiva, la MLME seguirá el procedimiento para la extracción de los datos pendientes del coordinador como se muestra en 3.1.7.3.

### 3.1.6 Gestión de transacciones

Las transacciones pueden ser iniciadas por los dispositivos antes que por el coordinador. Por ello tanto el coordinador necesita indicar en su baliza cuando están pendientes de recepción de mensajes procedentes de dispositivos como los dispositivos necesitan sondear el coordinador para determinar si tienen algún mensaje pendiente. Estas transferencias se llaman transmisiones indirectas.

El coordinador iniciará la gestión de una transacción cuando reciba la petición de transmisión indirecta a través de la primitiva MCPS-DATA.request o a través de la petición de la MLME para el envío de la instrucción MAC (instigada por una primitiva de la capa superior como la primitiva MLME-ASSOCIATE.response). Cuando la transacción haya terminado, la subcapa MAC indicará un valor de estado a la capa superior.

La información contenida en la petición de transmisión indirecta constituye una transacción y el coordinador deberá ser capaz de almacenarla. Ante la recepción de una petición de transmisión indirecta, si no hay capacidad para almacenar otra transacción, la subcapa MAC deberá indicar a su capa superior el estado TRANSACTION\_OVERFLOW en la primitiva correspondiente.

Si el coordinador es capaz de almacenar más de una transacción, se asegurará que todas las transacciones para el mismo dispositivo se envían en el mismo orden en que llegaron a la subcapa MAC. Para cada transacción enviada, si existe otra para el mismo dispositivo, la subcapa MAC configurará el subcampo pendiente de trama a uno, indicando que hay datos adicionales.

Cada transacción permanecerá en el coordinador como máximo un periodo *macTransactionPersistenceTime*. Si la transacción no se extrae correctamente por el dispositivo dentro de este tiempo, la información de la transacción deberá rechazarse y la subcapa MAC indicará a la capa superior el estado TRANSACTION\_EXPIRED con la primitiva apropiada.

Si la transacción se realiza con éxito, la información de transacción se descartará y la subcapa MAC indicará a la capa superior el estado SUCCESS en la primitiva correspondiente.

En VPAN con uso de baliza, si hay transacciones pendientes a la dirección de difusión, el subcampo de trama pendiente del campo de control de trama en la trama de baliza se establecerá a uno y el mensaje pendiente de envío se transmitirá de forma inmediata utilizando el algoritmo de acceso aleatorio no ranurado. Solo se podrá permitir el envío de forma indirecta de un mensaje de difusión por supertrama.

En VPANs que permitan el uso de baliza, un dispositivo que reciba una baliza que contenga su dirección en la lista de direcciones pendientes intentará extraer los datos del coordinador. En VPANs que no permitan el uso de baliza, un dispositivo intentará extraer los datos del coordinador cuando reciba la primitiva MLME-POLL.request.

### 3.1.7 Transmisión, recepción y asentimiento

#### 3.1.7.1 Transmisión

Cada dispositivo almacenará el valor actual de su número de secuencia de datos (data-sequence number DSN) en el atributo PIB *macDSN* y lo iniciará a un valor aleatorio. Cada vez que se genere un dato o una trama de instrucción, la subcapa MAC copiará el valor de *macDSN* dentro del campo Sequence Number (Número de Secuencia) del MHR de la trama saliente y lo incrementará en uno. Cada dispositivo generará un DSN independientemente del número de dispositivos únicos con los que se desee comunicar.

En caso de que sea el coordinador el que realice la transmisión, seguirá el mismo proceso.

Cada coordinador almacenará el valor de su número de secuencia de baliza en el atributo PIB *macBSN* y lo iniciará a un valor aleatorio. Cada vez que se genere una trama de baliza, la subcapa MAC copiará el valor de *macBSN* dentro del campo Sequence Number (Número de Secuencia) del MHR de la trama saliente y lo incrementará en uno.

Tanto el DSN como el BSN son valores de 8 bits y, por lo tanto, tiene un uso limitado a la capa superior (en el caso del DSN, en la detección de tramas retransmitidas).



El campo Source Address, si se muestra, contendrá la dirección del dispositivo que envía la trama. Cuando un dispositivo ha sido asociado y se le ha asignado una dirección de 16 bit (*macShortAddress* no es igual a 0xffffe o 0xffff), cuando sea posible, utilizará esta dirección de forma preferente a su dirección de 64 bits extendida. Cuando un dispositivo no se ha asociado a una VPAN (o *macShortAddress* es igual a 0xffff) utilizará su dirección de 64 bits extendida en todas las comunicaciones que requiera el campo Source Address. Si no se muestra el campo Source Address, se asumirá que el generador de la trama es el coordinador y el campo Destination Address (Dirección de destino) contendrá la dirección del receptor.

Si el campo Destination Address se muestra, se seguirá el mismo proceso que se ha explicado en el párrafo anterior. Si no existe dirección de destino, el coordinador asumirá ser el receptor de la trama y el campo Source Address contendrá la dirección del generador de la trama.

Si existe tanto el direccionamiento origen como el de destino, la subcapa MAC comparará los identificadores de VPAN origen y destino. Si los identificadores son iguales, el subcampo VPAN ID Compression del campo de control de trama se establecerá a uno y el identificador de VPAN origen se omitirá de la trama transmitida. Si los identificadores de VPAN son diferentes, el subcampo VPAN ID Compression estará a cero y los identificadores de VPAN origen y destino deberán ser incluidos en la trama transmitida. Si solo está presente la información de direccionamiento origen o destino, el subcampo VPAN ID Compression del campo de control de trama se establecerá a cero y el campo de identificador de VPAN de la única dirección se incluirá en la trama transmitida.

Si la trama se va a transmitir en una VPAN que permite el uso de baliza, el dispositivo que va a transmitir intentará encontrar la baliza del coordinador antes de la transmisión. Si no se está realizando un seguimiento a la baliza y por tanto el dispositivo no conoce donde aparecerá la baliza, deberá habilitar su receptor y buscar durante un periodo máximo de  $[aBaseSuperframeDuration \times (2n + 1)]$  relojes ópticos, donde  $n$  es el valor de *macBeaconOrder*, para encontrar la baliza. Si la baliza no se ha encontrado después de este tiempo, el dispositivo transmitirá la trama siguiendo la aplicación de una versión no ranurada del algoritmo de acceso aleatorio. Una vez que se haya encontrado la baliza, ya sea después de una búsqueda o mientras se realiza el seguimiento, la trama se transmitirá en la parte apropiada de la supertrama. Las transmisiones en el CAP seguirán la correcta aplicación de la versión ranurada del algoritmo de acceso aleatorio y la transmisión en un GTS no utilizará acceso aleatorio.

Si la trama se va a transmitir en una VPAN sin uso de baliza, se transmitirá aplicando la versión no ranurada del algoritmo de acceso aleatorio.

Para cualquier tipo de VPAN, si la transmisión es directa y se origina debido a una primitiva emitida por la capa superior y el algoritmo de acceso falla, se debe notificar a la capa superior. Si la transmisión es indirecta y el algoritmo de acceso falla, la trama se mantendrá en la cola de transacción hasta que su envío se solicite de nuevo y se transmita con éxito o hasta que la transacción expire.

El dispositivo deberá procesar la trama mediante el uso del procedimiento de seguridad de tramas salientes descrito en 5.1.1.

Si el estado del procedimiento no es SUCCESS, la MLME emitirá la primitiva de confirmación correspondiente o MLME-COMM-STATUS.indication indicando el error.

Para transmitir la trama, la subcapa MAC primero habilitará el transmisor mediante la emisión de la primitiva PLME-SET-TRX-STATE.request con el estado de TX\_ON a la capa PHY. En la recepción de la primitiva PLME-SET-TRX-STATE.confirm con el estado ya sea SUCCESS o TX\_ON, la trama construida se transmitirá mediante la emisión de la primitiva PD-DATA.request. Finalmente, cuando se haya recibido la primitiva PD-DATA.confirm, la subcapa MAC deshabilitará el transmisor con la emisión de la primitiva PLME-SET-TRX-STATE.request y con el estado RX\_ON o TRX\_OFF a la capa PHY, dependiendo de si el receptor va a ser habilitado después de la transmisión. En el caso de que se requiera asentimiento (subcampo Acknowledgment Request de la trama a uno), la subcapa MAC habilitará el receptor inmediatamente después de la transmisión de la trama configurando la primitiva anterior con el estado RX\_ON.

### 3.1.7.2 Recepción y rechazo

Cada dispositivo podrá elegir si la subcapa MAC va a habilitar su receptor durante los periodos de inactividad.

Entre las tareas de un transceptor se incluyen la petición de transmisión con recepción de asentimiento, si se

requiere, o las peticiones de recepción. Al finalizar cada tarea, la subcapa MAC pedirá a la capa PHY que habilite o deshabilite el receptor dependiendo de los valores de *macBeaconOrder* y *macRxOnWhenIdle*. Si *macBeaconOrder* es menor a 15, el valor de *macRxOnWhenIdle* se considerará relevante solo durante periodos de inactividad del CAP de la supertrama entrante. Si *macBeaconOrder* es igual a 15, el valor de *macRxOnWhenIdle* siempre se considerará importante.

Un dispositivo que tenga el receptor habilitado será capaz de recibir y decodificar las transmisiones de todos los dispositivos que cumplan con este estándar, que estén operando actualmente en el mismo canal y esté en su espacio de operación, considerando la interferencia con otras fuentes. La subcapa MAC será capaz de filtrar las tramas entrantes y solo enviará a las capas superiores las que sean de su interés.

La subcapa MAC rechazará todas las tramas recibidas que no contengan un valor correcto en el campo FCS en el MFR y aceptará solo aquellas que cumplan con los siguientes requisitos de filtrado:

- El subcampo Frame Type (Tipo de Trama) no contendrá un tipo de trama reservado.
- Si en la trama se incluye un identificador de VPAN de destino, deberá coincidir con el *macVPANId* o será el identificador de difusión (0xffff).
- Si en la trama se incluye una dirección de destino corta deberá coincidir con *macShortAddress* o la dirección de difusión (0xffff). De otra manera si una dirección de destino extendida se incluye en la trama, deberá coincidir con *aExtendedAddress*.
- Si el tipo de trama es una trama de baliza, el identificador de VPAN fuente coincidirá con *macVPANId* a menos que *macVPANId* sea igual a 0xffff. Es este caso la trama de baliza se aceptará sin tener en cuenta el identificador fuente de VPAN.
- Si solo se incluyen campos de direccionamiento fuente en la trama de datos o instrucción MAC, la trama se aceptará solo si el dispositivo es el coordinador y el identificador fuente coincide con *macVPANId*.

Solo si no se satisfacen los requerimientos de tercer nivel, la subcapa MAC rechazará las tramas entrantes sin procesarlas. En caso de que se satisfagan los requerimientos, la trama se considerará válida y será procesada.

Para tramas válidas que no se transmitan a difusión, si el tipo de trama indica que es de datos o instrucción MAC y el subcampo Acknowledgment Request del campo de control de trama está establecido a uno, la subcapa MAC enviará una trama de asentimiento. Antes de la transmisión del asentimiento de la trama, el número de secuencia incluido en la trama de datos recibida o trama de instrucción MAC se copiará en el campo Sequence Number de la trama de asentimiento. Este paso indicará al origen de la transacción que han recibido la trama de asentimiento apropiada.

Si el subcampo VPAN ID Compression del campo de control de trama se establece a uno y la información de direccionamiento origen y destino está contenida en la trama, la subcapa MAC asumirá que el campo de identificador de VPAN origen omitido es igual al campo de identificador VPAN de destino.

El dispositivo procesará la trama utilizando el procedimiento de seguridad de trama entrante descrito en 5.1.2.

Si el estado del procedimiento de seguridad de trama entrante no es SUCCESS, la MLME emitirá la primitiva de confirmación correspondiente o MLME-COMM-STATUS.indication indicando el error, y con los parámetros de seguridad establecidos a los parámetros devueltos por el proceso de insegurización.

Si la trama es válida y se corresponde con una trama de datos, la subcapa MAC la pasará a la capa superior. Esto se hace mediante la emisión de la primitiva MCPS-DATA.indication conteniendo la información de la trama.

Si la trama es válida y se corresponde con una instrucción MAC o una trama de baliza, será procesada de forma adecuada por la subcapa MAC y se enviará a la capa superior la correspondiente primitiva de confirmación o indicación.

### 3.1.7.3 Extracción de datos pendiente de un coordinador

Un dispositivo en una VPAN que permita el uso de baliza puede determinar si tiene tramas pendientes examinando el contenido de la trama de baliza recibida. Si el campo Address List de la trama de datos contiene

la dirección del dispositivo y *macAutoRequest* es TRUE, la MLME del dispositivo enviará una instrucción de petición de datos al coordinador durante el CAP con el subcampo Acknowledgment Request del campo de control de trama establecido a uno. Hay otros casos para los que la MLME enviará una instrucción de petición de datos al coordinador:

- La MLME recibe la primitiva MLME-POLL.request.
- Un dispositivo podrá enviar una instrucción de petición de datos durante un periodo de tiempo de *macResponseWaitTime* relojes ópticos después del asentimiento a una trama de instrucción de petición, como durante el procedimiento de asociación.

Si la instrucción de petición de datos se origina desde una primitiva MLME-POLL.request, la MLME llevará a cabo un proceso de seguridad basándose en los parámetros SecurityLevel, KeyIdMode, KeySource y KeyIndex. Por otro lado, se deberá llevar a cabo el proceso de seguridad basándose en los atributos PIB *macAutoRequestSecurityLevel*, *macAutoRequestKeySource* y *macAutoRequestKeyIndex*.

Cuando se reciba una instrucción de petición de datos con éxito, el coordinador enviará una trama de asentimiento confirmando la recepción. Si el coordinador determina que el dispositivo tiene una trama pendiente de envío establecerá el subcampo de trama pendiente de la trama de asentimiento a uno para indicarlo.

En caso de recibir la trama de asentimiento con el subcampo de trama pendiente a cero el dispositivo entenderá que no hay datos pendientes de envío.

Ante la recepción de la trama de asentimiento con el subcampo de trama pendiente a uno, el dispositivo habilitará su receptor como máximo el número *macMaxFrameTotalWaitTime* relojes ópticos del CAP para recibir la correspondiente trama de datos del coordinador. En caso de que el coordinador tenga una trama de datos pendiente de envío al dispositivo solicitante, el coordinador enviará la trama al dispositivo utilizando uno de los mecanismos establecidos. Si no hay tramas de datos pendientes de envío para el dispositivo, el coordinador enviará una trama de datos sin petición de asentimiento conteniendo una carga de datos de longitud nula para indicar que no hay datos pendientes.

La trama de datos que sigue al asentimiento de una instrucción de petición de datos se transmitirá utilizando uno de los siguientes mecanismos:

- Sin uso de acceso aleatorio ranurado, la subcapa MAC comenzará la transmisión de la trama de datos entre *aTurnaroundTime-RX-TX* y  $(aTurnaroundTime-RX-TX + aUnitBackoffPeriod)$  relojes ópticos, en el *slot* de *backoff*, y quedará tiempo en el CAP para el mensaje, el IFS apropiado y el asentimiento. Si la trama de asentimiento solicitada no se recibe seguidamente a la trama de datos, el proceso empezará de nuevo después de una nueva instrucción de petición de datos.
- Utilizando acceso aleatorio ranurado.

Si el dispositivo no recibe la trama de datos del coordinador dentro de *macMaxFrameTotalWaitTime* relojes ópticos del CAP entenderá que no hay datos pendientes de envío por parte del coordinador.

Si el subcampo de trama pendiente de la trama de datos recibida del coordinador está establecido a uno, el dispositivo todavía tendrá que recibir más datos por parte del coordinador. En este caso podrá obtener los datos mediante el envío de una instrucción de petición de datos al coordinador.

### 3.1.7.4 Uso de asentimientos y retransmisiones

#### 3.1.7.4.1 No asentimiento

Una trama transmitida con el subcampo Acknowledgment Request establecido en cero no se asentirá por parte del receptor. Por ello el dispositivo origen de la trama asumirá que la transmisión se ha realizado con éxito.

En la Figura 3-8 se muestra el flujo de mensajes en el escenario de transmisión de una única trama de datos de una fuente a un receptor sin petición de asentimiento. En este caso, transmisor envía la trama de datos con el subcampo Acknowledgment Request (AR) del campo de control de trama igual a cero.

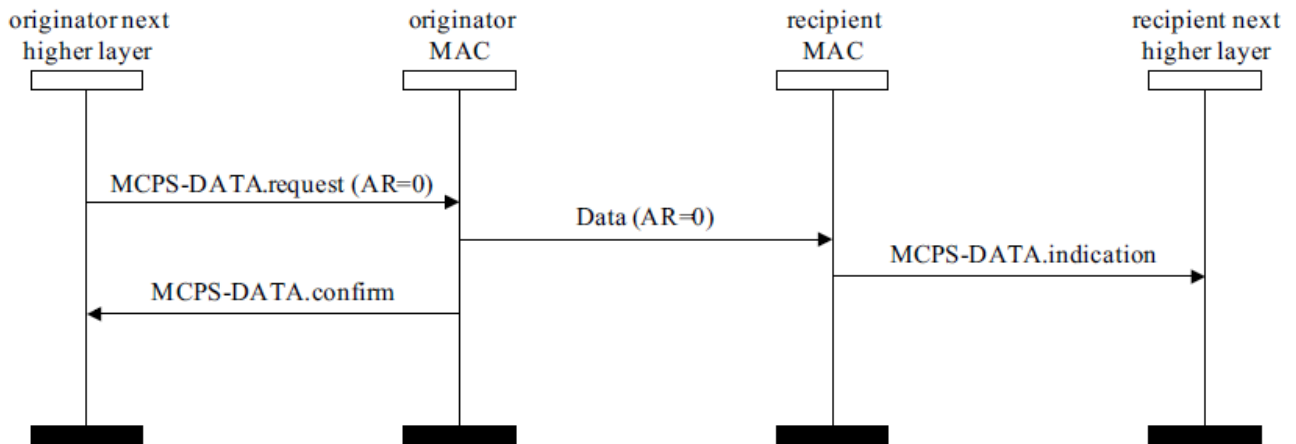


Figura 3-8. Transmisión de datos sin asentimiento

### 3.1.7.4.2 Asentimiento

En el caso de que el subcampo Acknowledgment Request del campo de control de trama esté establecido a uno, la trama deberá ser asentida por el receptor. Si el receptor recibe de forma correcta la trama, generará y enviará una trama de asentimiento que contenga el mismo DSN que la trama de datos o la trama de instrucción MAC que está siendo asentida.

La transmisión de una trama de asentimiento en VPAN sin uso de baliza o en un CFP comenzará  $aTurnaroundTime-RX-TX$  relojes ópticos después del último instante de reloj óptico de la trama de datos o trama de instrucción MAC. La transmisión de una trama de asentimiento en el CAP comenzará ya sea  $aTurnaroundTime-RX-TX$  relojes ópticos después del último instante de la trama de datos o trama de instrucción MAC, o en otro caso, en el límite del *slot* de *backoff*. En este último caso, la transmisión de la trama de asentimiento comenzará entre  $aTurnaroundTime-RX-TX$  y  $(aTurnaroundTime-RX-TX + aUnitBackoffPeriod)$  relojes ópticos después del último instante de la trama de datos o instrucción MAC.

El flujo de mensajes de la Figura 3-9 muestra el escenario de transmisión de una sola trama de datos de un transmisor a un receptor con asentimiento. En este caso, el transmisor indica al receptor que requiere asentimiento mediante la transmisión de la trama de datos con el subcampo Acknowledgment Request (AR) establecido a uno.

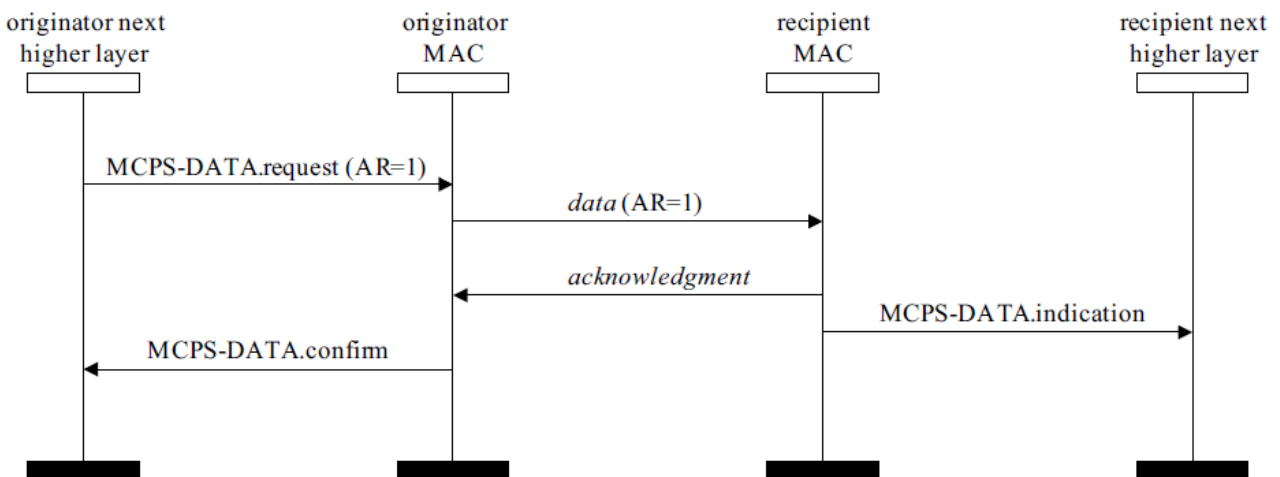


Figura 3-9. Transmisión de datos con asentimiento

### 3.1.7.4.3 Retransmisiones

Como se ha dicho antes, un dispositivo que envía una trama con el subcampo Acknowledgment Request establecido a cero asumirá que la transmisión se ha realizado con éxito y por tanto no se llevará a cabo el procedimiento de retransmisión.

En caso contrario se esperará como máximo un periodo de *macAckWaitDuration* relojes ópticos la recepción de la trama de asentimiento correspondiente. Si la trama de asentimiento se recibe dentro de ese periodo de tiempo y contiene el mismo DSN que la transmisión original, se considerará que la transmisión es válida y no será necesario tomar ninguna acción adicional. En caso contrario, el dispositivo entenderá que el intento de transmisión ha sido fallido.

Si la transmisión es indirecta y ha fallado, el coordinador no retransmitirá la trama de datos o trama de instrucción MAC. En su lugar, la trama permanecerá en la cola de transacción del coordinador y solo podrá extraerse después de la recepción de una nueva instrucción de petición de datos. Si esta se recibe, el dispositivo origen transmitirá la trama utilizando el mismo DSN que se utilizó en la transmisión original.

Si la transmisión fallida era una transmisión directa, el dispositivo repetirá el proceso de transmisión de la trama de datos o trama de instrucción MAC y esperará el asentimiento como máximo *macMaxFrameRetries* veces. La trama de retransmisión deberá tener el mismo DSN que se utilizó en la transmisión original. Cada retransmisión solo se realizará si puede establecer en la misma porción de la supertrama, es decir el mismo CAP o GTS en el que se realizó la transmisión original. Si no puede realizarse, la transmisión se aplazará hasta que pueda realizarse en la misma porción de la supertrama siguiente. Si no se recibe asentimiento después de *macMaxFrameRetries* retransmisiones, la subcapa MAC asumirá que la transmisión ha fallado y lo notificará a la capa superior.

### 3.1.7.5 Escenarios de transmisión

Debido a la naturaleza imperfecta de los medios inalámbricos, una trama transmitida no siempre alcanza el destino previsto. En la Figura 3-10 se ilustran tres escenarios de transmisión de datos diferentes:

- *Transmisión de datos con éxito.* La subcapa MAC origen transmite la trama de datos al receptor a través del servicio de datos PHY. Ante la espera de asentimiento, la subcapa origen inicia un temporizador que expirará después de *macAckWaitDuration* relojes ópticos. La subcapa MAC receptora recibe la trama y envía un asentimiento al origen y pasa la trama de datos a la capa superior. El origen recibe el asentimiento del receptor antes de que el temporizador expire y después deshabilitará y reseteará el temporizador. La transferencia de datos se ha completado y la subcapa MAC emitirá una confirmación de éxito a la capa superior.
- *Trama de datos perdida.* Al igual que en el caso anterior, la subcapa MAC origen transmite la trama de datos al receptor a través del servicio de datos PHY. Ante la espera de asentimiento, la subcapa origen inicia un temporizador que expirará después de *macAckWaitDuration* relojes ópticos. El receptor no recibe la trama de datos y no responde con asentimiento antes de que expire el temporizador, por tanto se entenderá que la trama de datos se ha perdido. En caso de transmisión directa el dispositivo origen retransmitirá la trama de datos como máximo *macMaxFrameRetries* veces. Si los intentos de transferencia de datos fallan ( $1 + \textit{macMaxFrameRetries}$ ) veces, la subcapa MAC origen emitirá una confirmación de fallo a la capa superior. En la transmisión indirecta, la trama de datos permanecerá en la cola de transacción hasta que se reciba una nueva petición de datos y sea correctamente asentida, o hasta que se alcance el *macTransactionPersistenceTime*. Si se alcanza, la información de transacción se rechazará y la subcapa MAC emitirá una confirmación de fallo a la capa superior.
- *Trama de asentimiento perdida.* Este caso es igual al primero pero ahora la subcapa MAC origen no recibe la trama de asentimiento y el temporizador expira, por tanto se considera que la transferencia de datos ha fallado. En una transmisión directa el dispositivo origen retransmitirá la trama de datos como máximo *macMaxFrameRetries* veces. Si los intentos de transferencia de datos fallan ( $1 + \textit{macMaxFrameRetries}$ ) veces, la subcapa MAC origen emitirá una confirmación de fallo a la capa superior. En la transmisión indirecta, la trama de datos permanecerá en la cola de transacción hasta que se reciba una nueva petición de datos y sea correctamente asentida, o hasta que se alcance el *macTransactionPersistenceTime*. Si se alcanza, la información de transacción se rechazará y la subcapa MAC emitirá una confirmación de fallo a la capa superior.

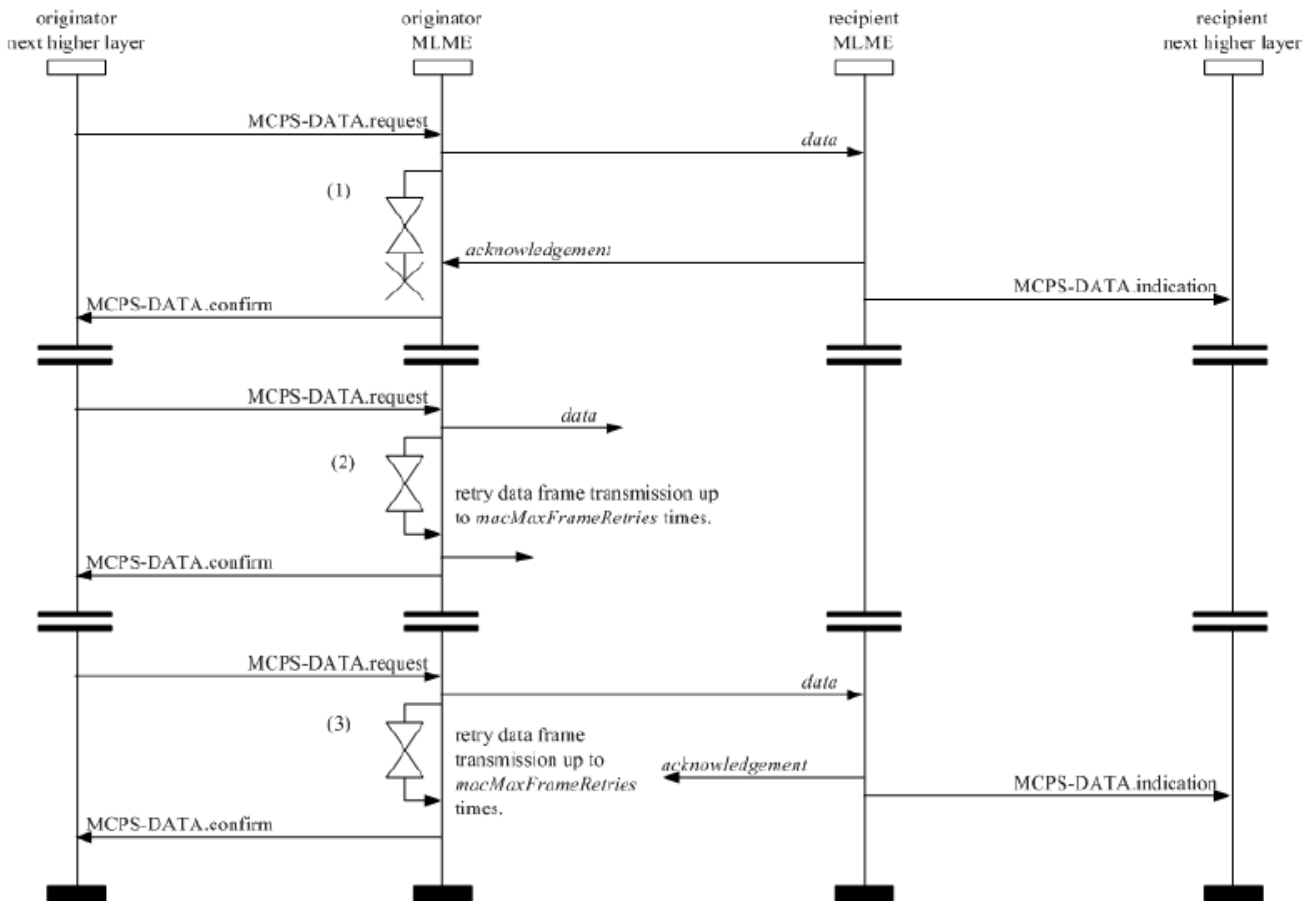


Figura 3-10. Escenarios de transmisión utilizando transmisión directa

### 3.1.8 Asignación y gestión de GTS

El GTS es opcional y permite a un dispositivo operar en el canal dentro de la porción de la supertrama que tiene dedicada (en la VPAN) de forma exclusiva a ese dispositivo. El GTS será asignado solo por el coordinador y se utilizará solo para comunicaciones entre el coordinador y el dispositivo asociado dentro de la VPAN. Un solo GTS podrá sobrepasar uno o más *slots* de supertrama. El coordinador asignará un número de GTSs al mismo tiempo si hay suficiente espacio en la supertrama.

El GTS se asignará antes del uso y el coordinador decidirá si se basará en los requerimientos de la petición de GTS y la capacidad actual disponible en la supertrama para su asignación. El GTS se asignará siguiendo la base *first-come-first-served* (asignación según el orden de llegada de peticiones), y todos los GTSs se ubicarán de forma contigua el final de la supertrama y después del CAP. Cada GTS será rehusado cuando no se requiera o en cualquier momento según determine el coordinador o el dispositivo que realizó la petición de GTS originalmente. Un dispositivo que tenga asignado un GTS podrá operar también en el CAP.

Una trama de datos transmitida en un GTS asignado utilizará solo direccionamiento corto.

La gestión de GTSs se iniciará exclusivamente por parte del coordinador. Para facilitar la gestión del GTS, el coordinador podrá almacenar toda la información necesaria para gestionar siete GTSs. Para cada GTS, el coordinador podrá almacenar su *slot* de inicio, longitud, dirección y dirección de dispositivos asociados.

La dirección GTS, que es relativa al flujo de datos del dispositivo al que pertenezca el GTS, se especifica para transmitir o para recibir. Por lo tanto, la dirección del dispositivo identificará de forma única cada GTS. Cada dispositivo podrá requerir un GTS de transmisión y/o un GTS de recepción. Para cada GTS asignado el dispositivo será capaz de almacenar el *slot* de inicio, longitud y dirección. Si a un dispositivo se le ha asignado un GTS de recepción permitirá la recepción en el GTS completo. En el mismo sentido, el coordinador permitirá la recepción en el GTS completo si a un dispositivo se le ha asignado un GTS de transmisión. Si se

recibe una trama de datos que requiere asentimiento durante un GTS de recepción, el dispositivo transmitirá la trama de asentimiento. De forma similar, un dispositivo será capaz de recibir una trama de asentimiento durante un GTS de transmisión.

Un dispositivo intentará asignar y utilizar un GTS solo si en ese momento está realizando un seguimiento de las balizas. Si un dispositivo pierde la sincronización con el coordinador todas sus asignaciones de GTS se perderán.

### 3.1.8.1 Reasignación de GTS

La reasignación de GTS podrá producir la fragmentación de la supertrama. Por ejemplo, la Figura 3-11 muestra tres estados de una supertrama con GTSs asignados. En el estado 1, los tres GTSs se asignan comenzando en los *slots* 14, 10 y 8 respectivamente. Si se rehúsa el GTS 2 (etapa 2) habrá una interrupción o hueco en la supertrama en la que no puede realizarse ninguna comunicación. Para solucionar esto, GTS 3 tendrá que desplazarse para rellenar el hueco que deja el GTS 2 y se incrementará el tamaño del CAP (etapa 3).

El coordinador se asegurará de que cualquier intervalo sin utilizar entre dos GTSs que tenga lugar en el CFP, y que aparezca debido al rechazo de un GTS, se elimina para maximizar la longitud del CAP.

Cuando el GTS sea rehusado por el coordinador, se añadirá un descriptor de GTS dentro de la trama de baliza indicando que el GTS ha sido rehusado. Si el rechazo se inicia por un dispositivo, el coordinador no añadirá un descriptor de GTS dentro de la trama de baliza. Para cada dispositivo con un GTS asignado cuyo *slot* de inicio sea menor que el GTS que ha sido rehusado, el coordinador actualizará el GTS con el nuevo *slot* de inicio y añadirá un descriptor GTS a la baliza correspondiente para su ajuste. El nuevo *slot* de inicio se ajustará para que no haya espacio entre este GTS al final del CFP, si el GTS aparece al final del CFP, o al inicio del siguiente GTS en el CFP.

En las situaciones en las cuales se llevan a cabo múltiples reasignaciones al mismo tiempo, el coordinador elegirá realizarlas en etapas. El coordinador mantendrá cada descriptor GTS en su baliza para *aGTSDescPersistenceTime* de supertrama.

En los casos donde el coordinador considere necesario incluir un descriptor GTS en su baliza, se permitirá reducir su CAP por debajo de *aMinCAPLength* para ajustar el incremento temporal en la longitud de la trama de baliza. Después del *aGTSDescPersistenceTime* de supertrama, el coordinador eliminará el descriptor GTS de la baliza.

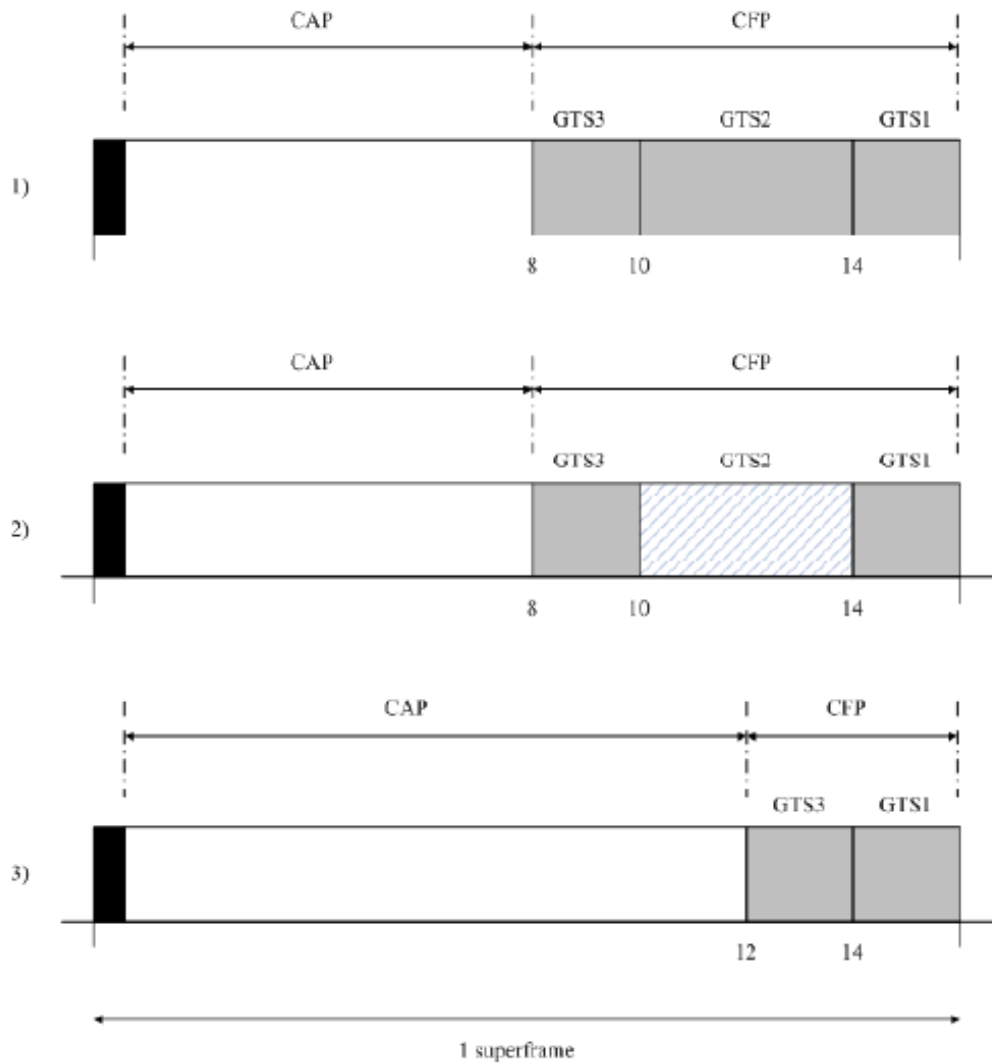


Figura 3-11. Desfragmentación de CFP en rehúso de GTS

### 3.1.8.2 Expiración de GTS

La MLME del coordinador intentará detectar cuándo un dispositivo termina de utilizar un GTS teniendo en cuenta las siguientes reglas:

- Para GTSs de transmisión: la MLME del coordinador asumirá que no se utilizará más el GTS si no se recibe trama de datos del dispositivo en al menos  $2n$  supertramas.
- Para GTSs de recepción: la MLME del coordinador asumirá que el dispositivo no utilizará más su GTS si no se reciben tramas de asentimiento del dispositivo en al menos  $2n$  supertramas. Si la trama de datos enviada en el GTS no requiere asentimiento, la MLME del coordinador no podrá detectar si un dispositivo está utilizando su GTS de recepción. Sin embargo, el coordinador es capaz de rehusar el GTS en cualquier momento.

El valor de  $n$  se define de la siguiente forma:

$$n = 2^{(8 - \text{macBeaconOrder})} \quad 0 \leq \text{macBeaconOrder} \leq 8$$

$$n = 1 \quad 9 \leq \text{macBeaconOrder} \leq 14$$



### 3.1.9 Recuperación rápida de enlace

En la topología en estrella, el proceso de recuperación rápida de enlace se activará en el dispositivo durante la comunicación. La activación se iniciará cuando el dispositivo no reciba un número de asentimientos (ACKs) dado por el atributo PIB *macNumAcks*. En el proceso de recuperación rápida de enlace, el dispositivo podrá decidir cuándo parar de enviar datos. El dispositivo podrá también enviar la señal de recuperación rápida de enlace (FLR, *Fast Link Recovery*) de forma repetida al coordinador (dentro del recurso asignado). Cuando se reciba la señal FLR, el coordinador enviará una FLR de respuesta al dispositivo, reanudándose la comunicación después de que el dispositivo reciba la respuesta. Si el dispositivo no recibe una señal FLR de respuesta antes de la expiración de un temporizador dado por el atributo PIB *macLinkTimeOut*, el dispositivo asumirá que el enlace se ha perdido y procederá a la des-asociación.

La señal FLR y la respuesta se enviarán a la menor tasa de datos posible.

La Figura 3-12 muestra un ejemplo del proceso de parada de envío de datos al dispositivo basado en la cuenta de retransmisión.

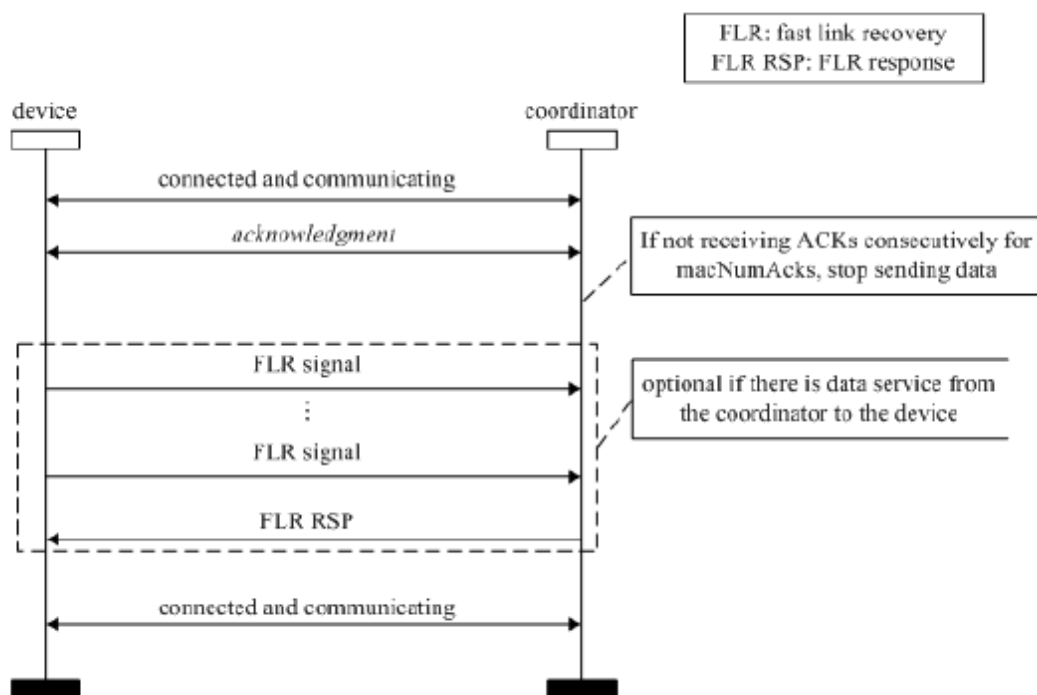


Figura 3-12. Ejemplo del proceso de parada en la transmisión de datos basado en la cuenta de retransmisiones y activación del FLR

En la topología en estrella, la recuperación de enlace rápido también podrá ser activada por el coordinador. Se llevaría a cabo el mismo proceso explicado anteriormente pero en este caso el coordinador es el responsable de la recuperación. El coordinador enviará la señal FLR repetidamente al dispositivo.

La Figura 3-13 muestra un ejemplo del proceso de parada en el envío de datos al coordinador basado en la cuenta de retransmisión.

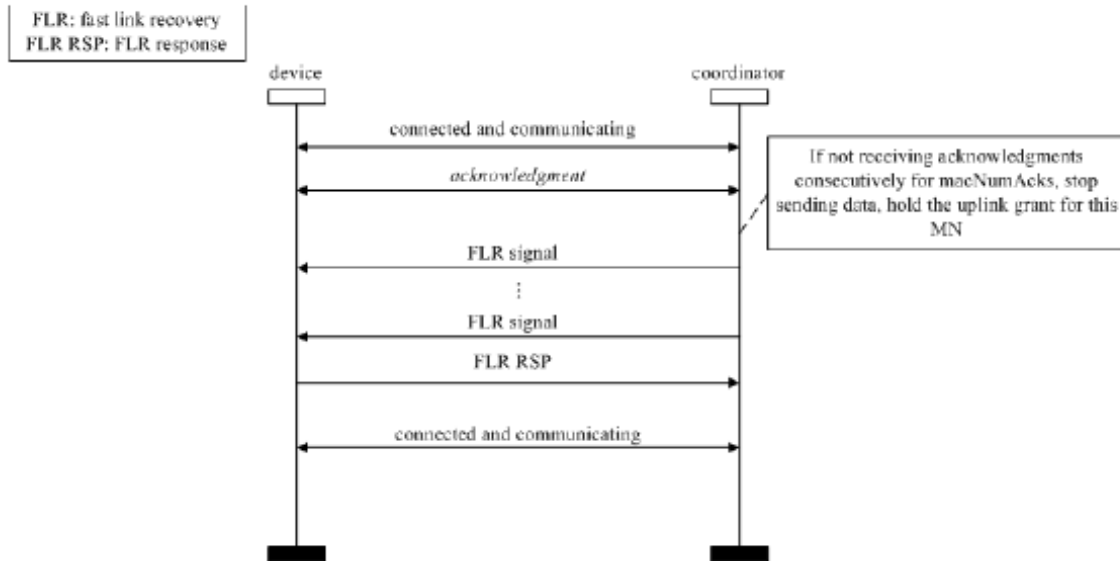


Figura 3-13. Ejemplo del proceso de la parada de envío de datos del coordinador en la cuenta de retransmisión y activación FLR

En la comunicación VLC punto a punto, el dispositivo dará a conocer a los otros dispositivos el nivel de su batería. Si se satisfacen las condiciones para activar el proceso FLR, el dispositivo comparará el nivel de su batería con el de sus iguales (los cuales están comunicando). Si el nivel de la batería es menor que el de sus iguales, el dispositivo parará el envío de datos y esperará. Si el nivel de la batería del dispositivo es mayor que el de sus iguales, el dispositivo parará el envío de datos e iniciará el proceso FLR.

Cuando el proceso se active y si el dispositivo tiene bandas adicionales, todas estas bandas también podrán empezar a enviar señales de FLR para recuperar el enlace. Así mismo el dispositivo dispondrá una banda para obtener la respuesta FLR y continuar la comunicación.

El campo de dirección de MHR en la señal FLR y en la respuesta se incluirá la dirección o el identificador de las bandas de color.

La Figura 3-14 muestra el diagrama de flujo del proceso de disposición de la banda de color adicional para el proceso FLR.

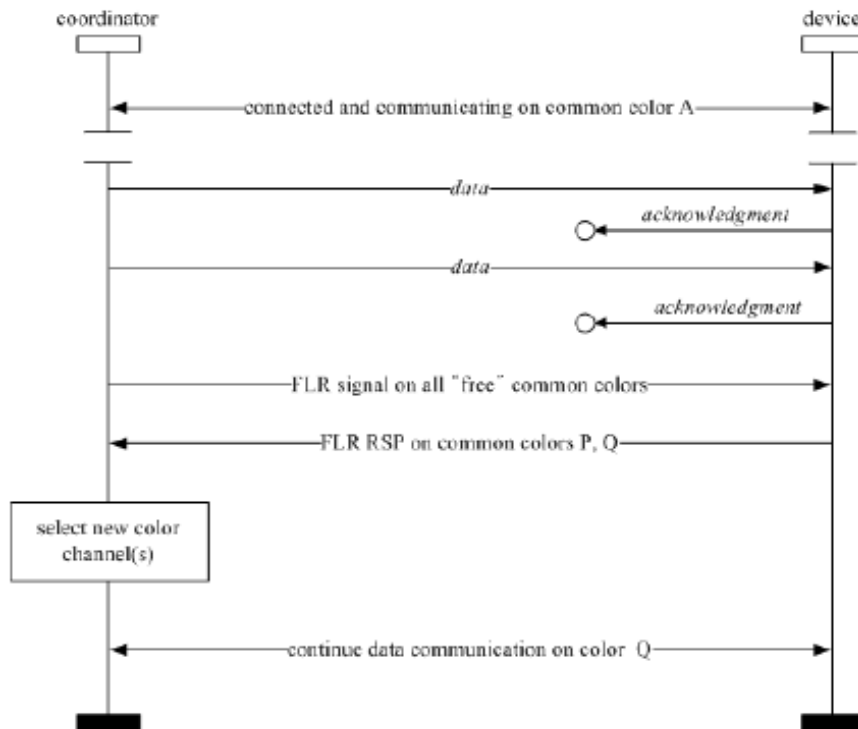


Figura 3-14. Diagrama de flujo del proceso de asistencia de bandas de color al FLR

### 3.1.10 Asignación de recursos de canal múltiple

#### 3.1.10.1 Información de canal múltiple

Cuando el coordinador no tiene *slots* de tiempo para asignar a un nuevo usuario, el coordinador ampliará los recursos utilizando múltiples bandas. La Figura 3-15 muestra un ejemplo de uso de banda múltiple.

Cuando el dispositivo 2 intenta iniciar el acceso al coordinador para la comunicación y no hay *slots* de tiempo disponibles pero otras bandas sí están disponibles para el dispositivo, el coordinador asignará una de estas bandas, siempre que no coincida con la banda predeterminada. Durante la detección del dispositivo se intercambiarán las capacidades para todas las comunicaciones bidireccionales. Si se utilizan múltiples bandas, el coordinador deberá transmitir al dispositivo el “Src\_multi\_info” en el campo de carga útil de la instrucción MAC (definido en la Tabla 3-2). Después el dispositivo 2 responderá al coordinador utilizando “Des\_multi\_info” informando al dispositivo de las múltiples bandas disponibles.

Si el coordinador no soporta múltiples bandas porque tiene una fuente de luz que opera en una sola banda o no quiere utilizar múltiples canales, el coordinador deberá transmitir Src\_multi\_info con el código ‘0000000’.

Si el dispositivo no puede soportar múltiples bandas debido a limitaciones de hardware como una fuente de luz de banda única o una situación de interferencia, o no quiere utilizar múltiples bandas, el dispositivo deberá responder con Des\_multi\_info con el código ‘0000000’.

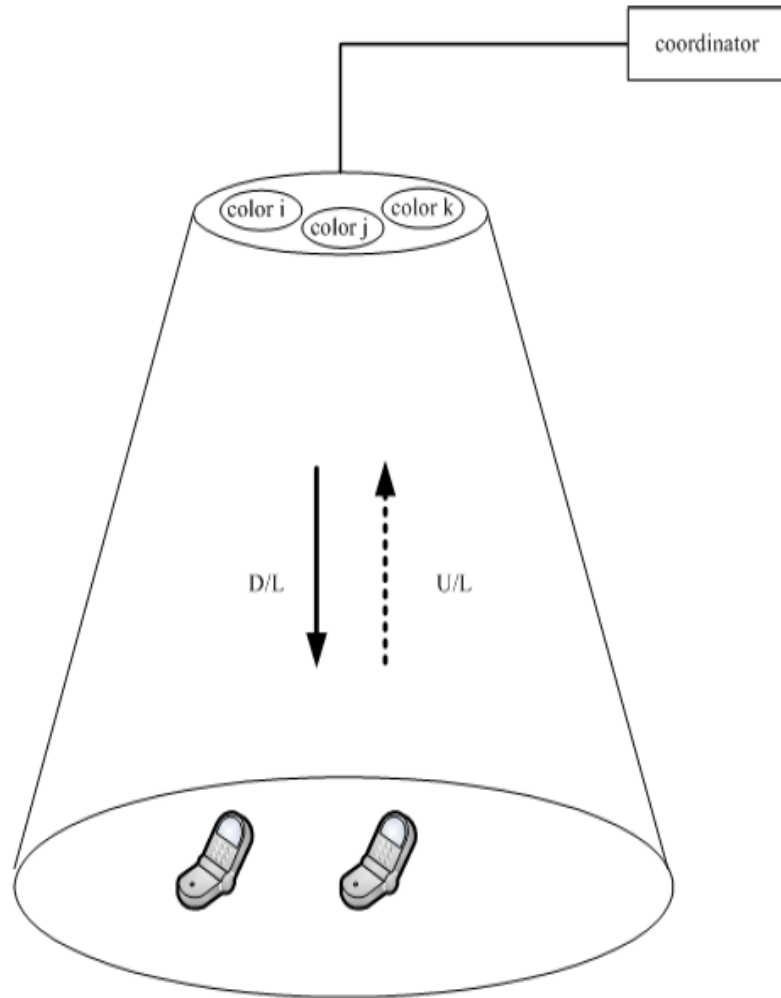


Figura 3-15. Ejemplo de uso de canal múltiple

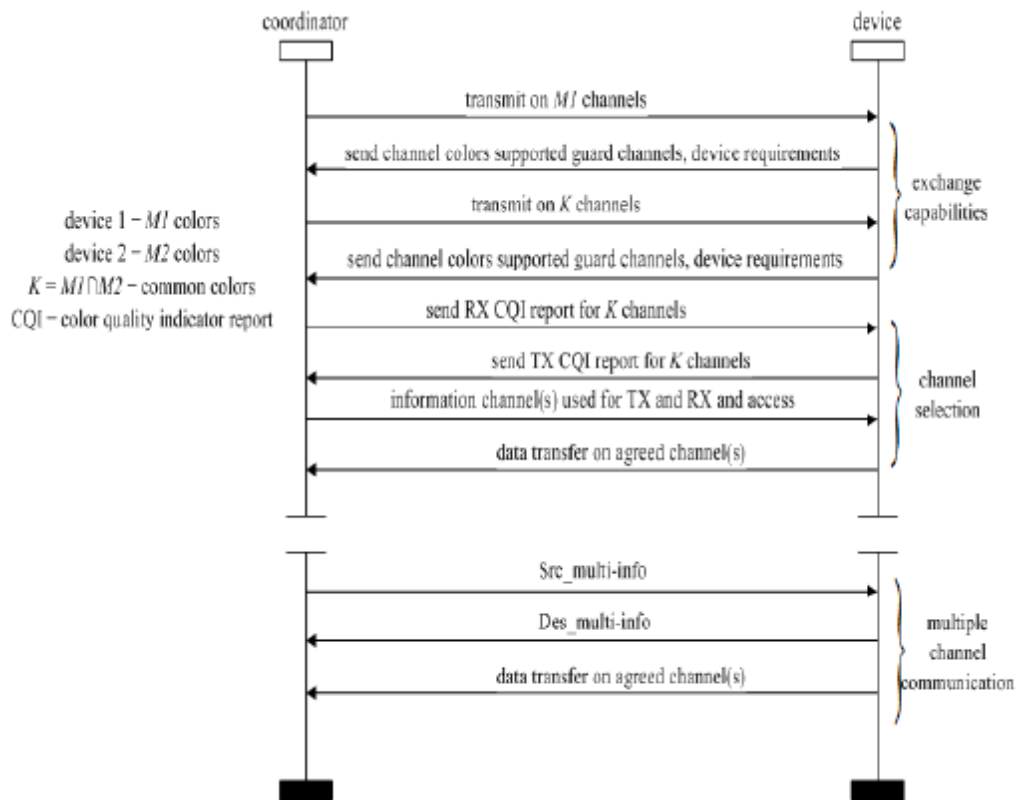


Figura 3-16. MSC para información multibanda

Tabla 3-2 Carga útil de la trama de instrucción para múltiples bandas

Carga útil de la trama de instrucción MAC	Bits	Uso/Descripción
Src_multi_info	b0...b6	Bits que indican los canales disponibles para el coordinador  ex: 0000000: No uso del modo de canal múltiple  ex: 0000001: uso de canal “Band 7”
Des_multi_info	b0...b6	Bits que indican los canales disponibles para el dispositivo móvil  ex: 0000101: uso de canal “Band 5” y “Band 7”  ex: 0000000: No uso del modo de canal múltiple  ex: 0000001: uso de canal “Band 7”  ex: 0000101: uso de canal “Band 5” y “Band 7”

### 3.1.10.2 Salto de banda para evitar interferencias

Un solo coordinador puede gestionar múltiples células que son susceptibles de recibir interferencias. Si se presentan interferencias causadas por una luz adyacente, se puede utilizar el salto de banda para mitigar la interferencia. Cuando los sistemas de comunicaciones VLC utilizan el mismo *slot* de tiempo entre fuentes de luz adyacentes o células con bandas de comunicación múltiples, y cuando la capa PHY utilice múltiples

bandas, se puede utilizar el salto de banda. Se deberán adoptar patrones de salto preasignados (HPs) para evitar la interferencia e incrementar la capacidad del sistema.

El patrón de salto se asignará al dispositivo y su operación deberá basarse en los pasos que estén especificados en el mismo. El coordinador transmitirá al dispositivo 'H\_pattern' utilizando la trama de instrucción MAC definida en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Carga útil de la trama de instrucción para el salto de canal

Carga útil de la trama de instrucción MAC	Bit	Uso/Descripción	Down/Up Link
H_pattern	B0, b1, b2, b3, b4	Información de salto de banda	D/L

Si el sistema VLC no utiliza múltiples bandas (Src\_multi\_info establecido en el código '0000000') no se soporta la función de salto. Los patrones de salto se estructurarán de forma que no cambie la percepción visual de la luz.

### 3.1.11 Diseño de celda y soporte de movilidad

Se podrá presentar la necesidad de cambio de enlace debido a movimientos físicos o interferencias. La movilidad puede ser de dos tipos: física y lógica. La movilidad física se produce cuando el dispositivo VLC M1 cambia su posición debido al movimiento dentro del área de cobertura de la infraestructura I1, mientras que la movilidad lógica se produce cuando el dispositivo M1 cambia su enlace de comunicación desde un enlace de la infraestructura I2 a otro con la infraestructura I3 debido a interferencias o a un cambio de canal de forma deliberada.

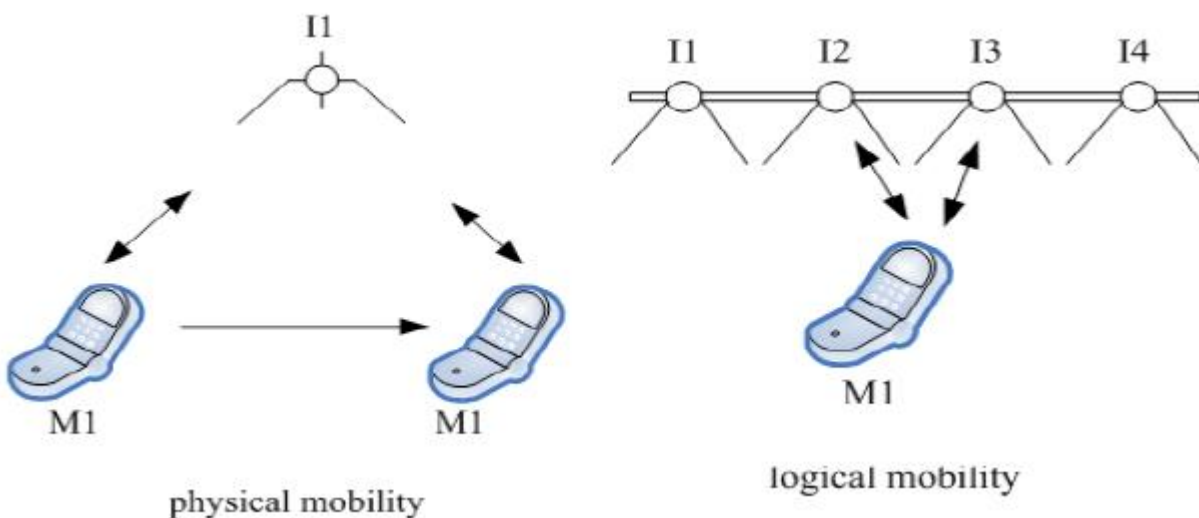


Figura 3-17. Movilidad física y lógica

Un coordinador DME puede separar el medio óptico en múltiples células para el soporte de aplicaciones como los servicios basados en la localización.

#### 3.1.11.1 Movilidad usando información de frontera

Un coordinador único puede gestionar la movilidad de un dispositivo a través de múltiples células utilizando el switch PHY controlado por la DME, como se muestra en la Figura 3-18. Cada elemento óptico en la célula se denota por  $cell\_ID(i,j)$ , donde  $j$  es el índice del elemento en la célula  $i^{th}$ . El tamaño y la posición de la célula en el medio óptico puede ser variable y programado por la DME.

Si el dispositivo 1 se mueve a una célula próxima, por ejemplo, de la  $cell\_ID(i,j)$  a la  $cell\_ID(i+1,j)$ , el

coordinador puede detectar la movilidad del dispositivo utilizando la señal del enlace ascendente (es decir, la trama de asentimiento).

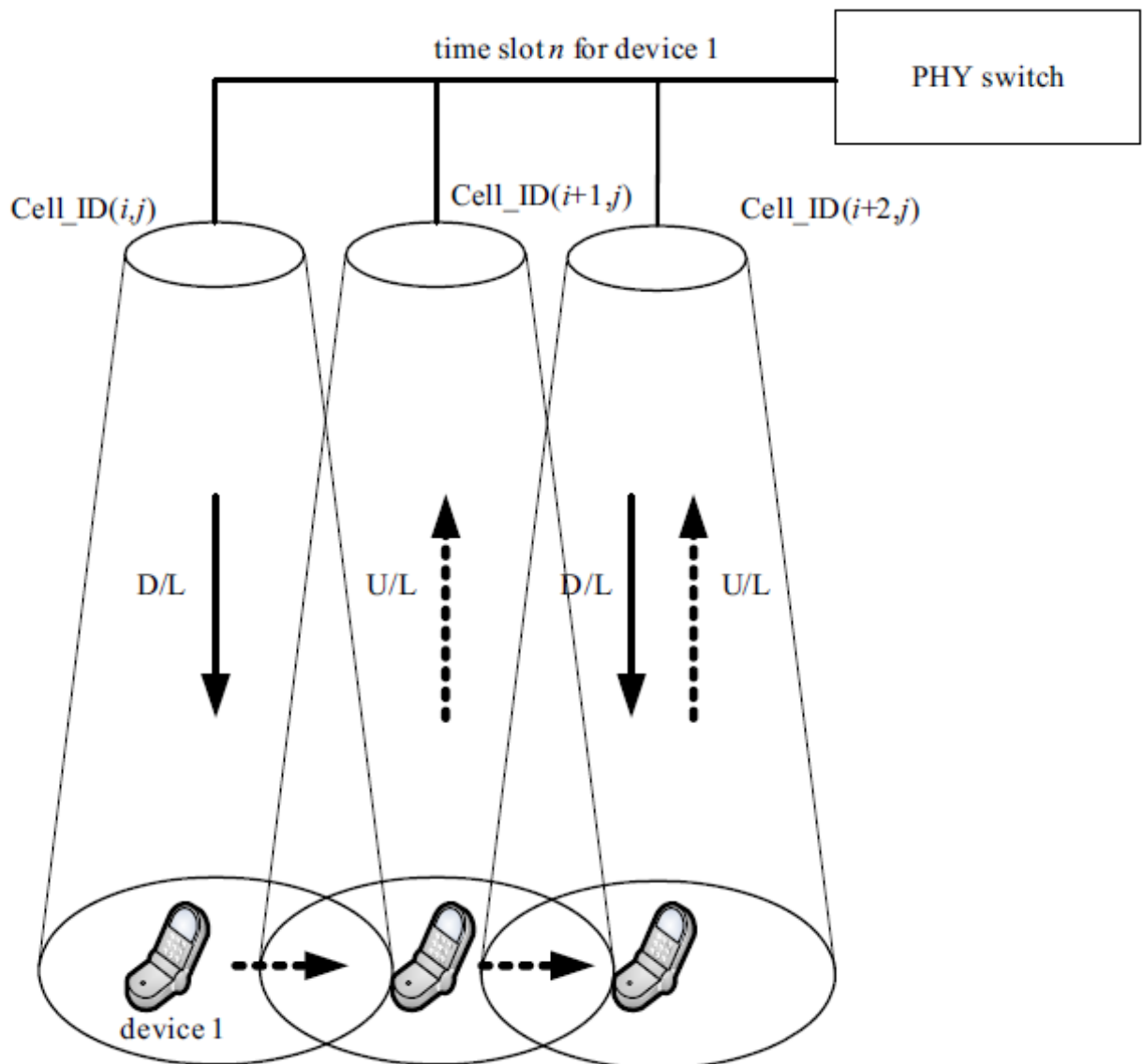


Figura 3-18. Configuración de célula para movilidad VLC

En la Figura 3-19 se muestra la gestión de la movilidad de un dispositivo a través de múltiples células. Cuando el dispositivo 1 se mueve de la  $Cell\_ID(i,j)$  a la  $Cell\_ID(i+1,j)$ , el coordinador no podrá recibir la transmisión del enlace ascendente (por ejemplo, la trama de asentimiento o la trama CVD) de la  $Cell\_ID(i,j)$ . El coordinador buscará al dispositivo a través de las células adyacentes como  $Cell\_ID(i+1,j)$  y  $Cell\_ID(i-1,j)$  durante los mismos *slots* de tiempo asignados al dispositivo 1 en la supertrama. Los otros dispositivos en la  $Cell\_ID(i,j)$  continuarán la comunicación en la misma célula. El coordinador también podrá aumentar el tamaño de la célula para proporcionar cobertura a la movilidad del dispositivo. De esta forma, si el coordinador puede continuar la comunicación con el dispositivo en la  $Cell\_ID(i+1,j)$ , la DME del coordinador podrá establecer el *switch* PHY para el uso de la  $Cell\_ID(i+1,j)$  por parte del dispositivo 1 durante los *slots* de tiempo asignados al dispositivo 1 y después el *switch* volverá a la  $Cell\_ID(i,j)$  para servir cualquier dispositivo que esté en la misma durante los *slots* de tiempo que queden. El proceso de búsqueda podrá terminar si no se encuentra el dispositivo dentro del periodo de expiración del enlace definido en el atributo PIB *macLinkTimeOut*, y por tanto se considerará al dispositivo no asociado con el coordinador.

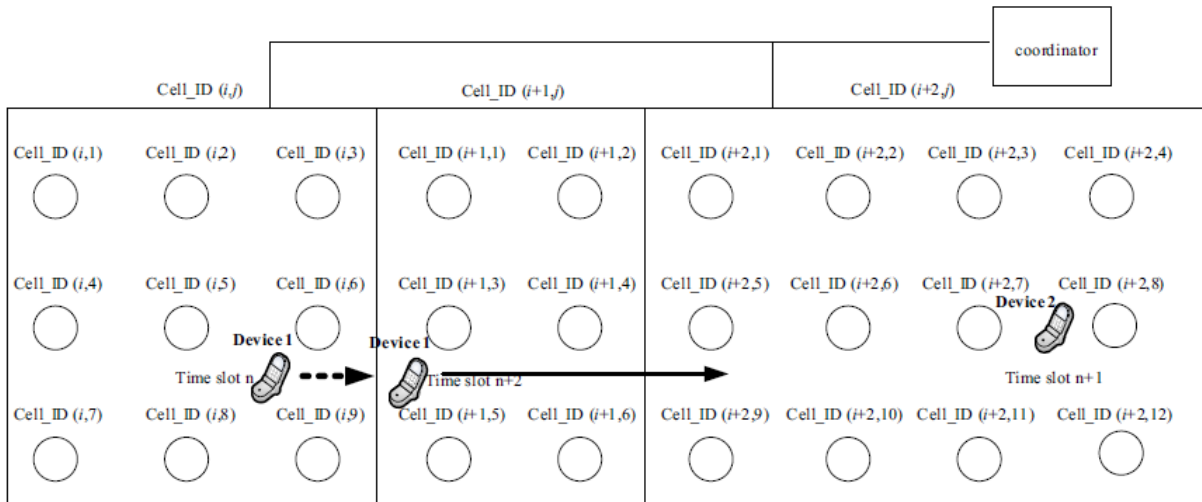


Figura 3-19. Gestión de movilidad para un dispositivo a través de múltiples células

### 3.1.11.2 Configuración de célula durante la supertrama

Para poder gestionar el acceso de nuevos dispositivos a través de una supertrama completa, el medio óptico se configurará para operar en una única macrocélula durante los periodos de baliza y CAP. Una vez que los dispositivos sean detectados y asociados, se determinará tanto el tamaño de la célula como sus posiciones y se podrá aplicar la estructura de célula a los dispositivos individuales para la comunicación, como se muestra en la Figura 3-20.

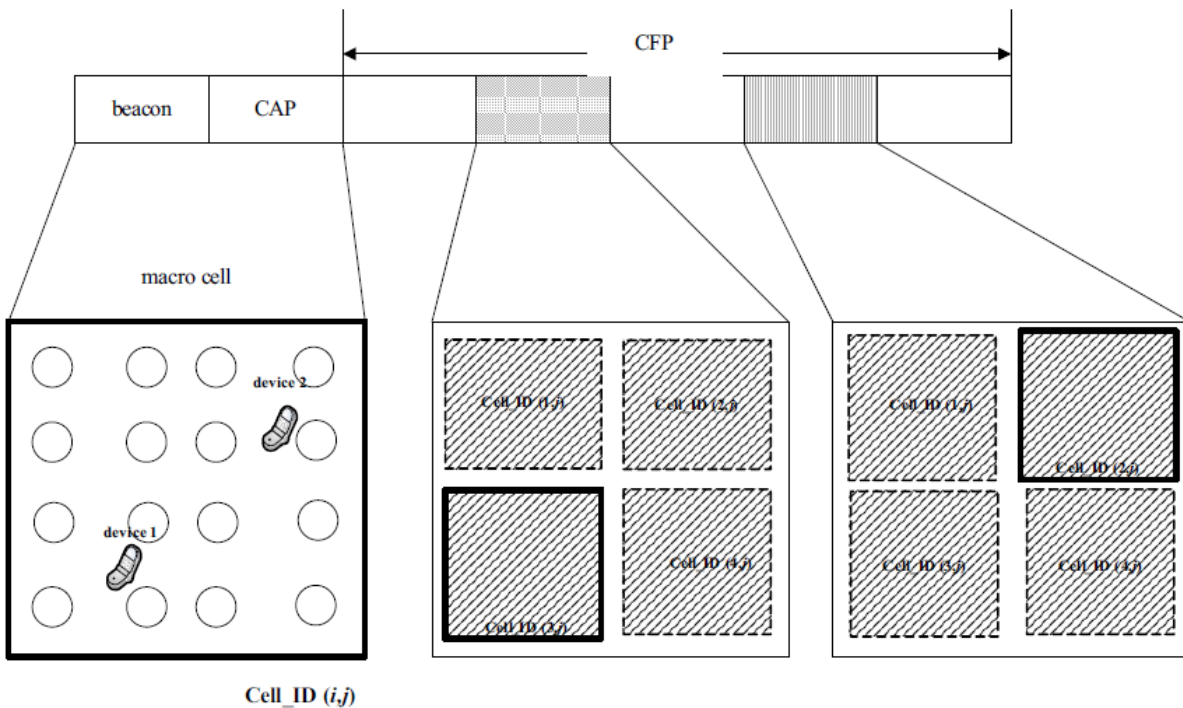


Figura 3-20. Configuración de supertrama para el soporte de movilidad

### 3.1.11.3 Tamaño de celda y procedimiento de búsqueda de localización

Una vez que el dispositivo se ha asociado con el coordinador utilizando la baliza y el CAP, el coordinador



podrá establecer el tamaño y la localización de la célula para prestar servicio a los nuevos dispositivos en el CFP con un tamaño de célula menor. Para hacerlo, el coordinador primero establecerá el bit *cellSearchEn* del campo de especificación de supertrama de la trama de baliza. Si este bit se ha establecido, se transmite *cellSearchLength* como campo adicional de la trama de baliza y el coordinador reajustará la asignación del GTS de supertrama para asegurar que el primer *slot cellSearchLength* del CFP se asigna al tamaño de la célula y la búsqueda de ubicación.

Los primeros *slots cellSearchLength* se utilizan como *slots* de visibilidad. En ellos, el coordinador transmite tramas CVD de forma secuencial en todas las células. La Figura 3-21 muestra un ejemplo de búsqueda secuencial para 4 células. CS1, ..., CS4 son los 4 *slots* de búsqueda de célula que están disponibles para la búsqueda gracias a la configuración del *cellSearchLength* a 4 y al ajuste del bit *cellSearchEn* en la trama de baliza.

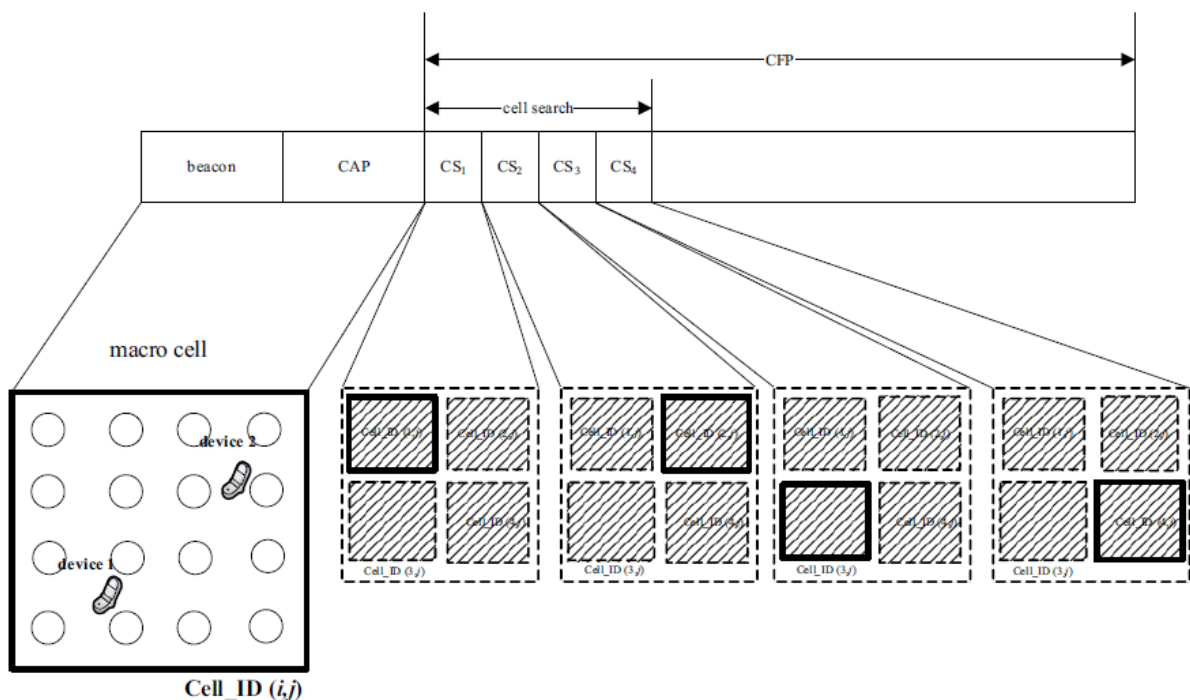


Figura 3-21. Tamaño de celda y procedimiento de búsqueda de localización

Si un dispositivo recibe una baliza con el bit *cellSearchEn* a 1, transmitirá de forma continua tramas CVD durante los *slots cellSearchEn* mientras monitoriza la recepción de tramas CVD del coordinador. El dispositivo comprobará la WQI durante cada *slot cellSearchLength* y enviará la información de vuelta al coordinador utilizando la trama de instrucción de notificación de movilidad.

El coordinador tomará la determinación del tamaño de células y la localización de las mismas basándose en la información recogida de la instrucción de notificación de movilidad y a través de la propia recepción de tramas CVD del dispositivo durante los *slots* de búsqueda de célula.

### 3.1.12 Gestión de la función de color

La trama CVD, mediante el uso de varios colores, puede ser utilizada para mostrar los diferentes estados de un dispositivo. Los colores asignados a cada estado están basados en *phyColorFunction*. Diferentes estados pueden elegir el mismo color, dependiendo del número de colores soportados por el dispositivo. El uso de la función de color a través de la trama CVD también podrá cambiar el color de la luz emitida.

#### 3.1.12.1 Uso de la trama CVD para la indicación del estado MAC

Las tramas CVD se utilizan entre cambios de estado para proporcionar al usuario información visual sobre el

estado de las comunicaciones. Las primitivas MLME para asociación, escaneo y des-asociación se utilizan para tareas de soporte de esta funcionalidad. Los atributos PIB *macDuringASSOCColor*, *macDuringDISASSOCColor* y *macDuringSCANColor* se utilizan para la asignación de color de la trama CVD cuando se envía para indicar el estado MAC durante la asociación, des-asociación o proceso de escaneo.

Tabla 3-4 Tabla de color para la indicación del estado MAC

Estado	Elección de color	Rango de resolución del color
Escaneo	Color "A"	0-255
Asociación	Color "B"	0-255
Des-asociación	Color "C"	0-255

Por ejemplo, el dispositivo envía una petición de asociación al coordinador (ver Figura 3-22) y esto se indica al usuario con la elección de un color. La información sobre la elección de color se comunica utilizando la primitiva ASSOCIATE.request.

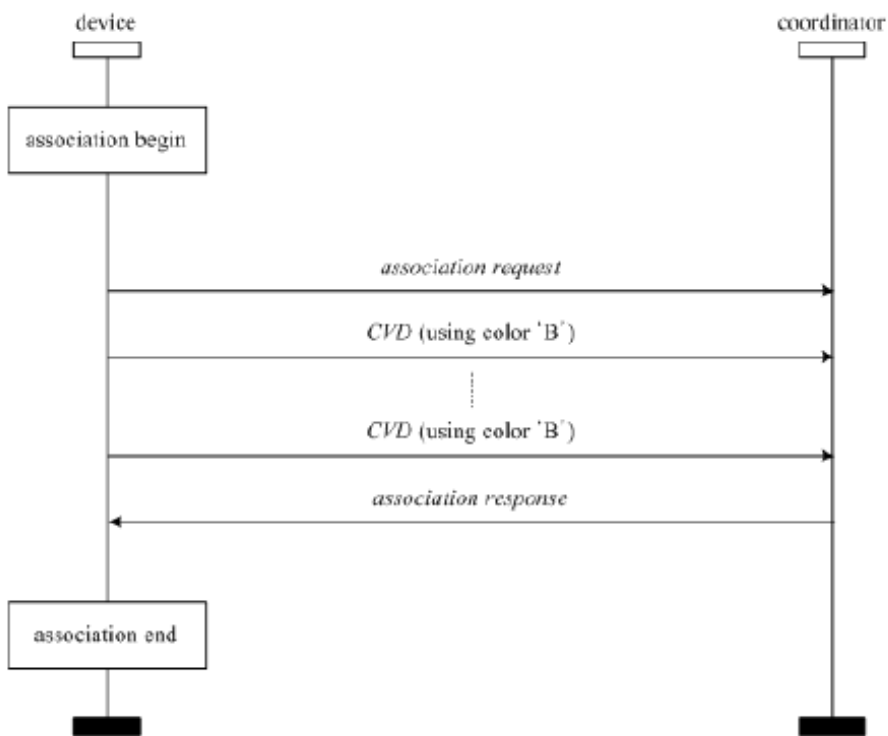


Figura 3-22. MSC cuando se invoca la función de color para la indicación de asociación

### 3.1.12.2 Uso de trama CVD para indicación de asentimiento

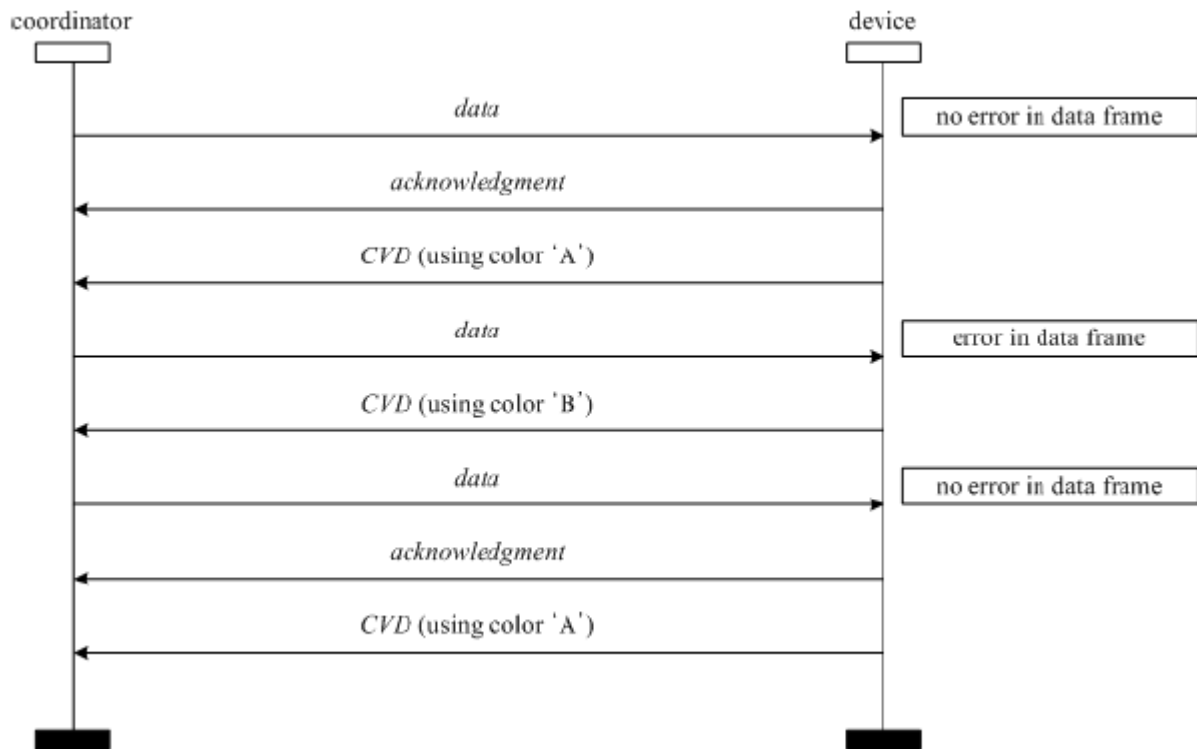


Figura 3-23. Uso de trama CVD para indicación de asentimiento

La Figura 3-23 muestra un ejemplo de cómo puede deducir el usuario si un receptor recibe de forma correcta o no. De acuerdo a esta figura, el dispositivo envía una trama CVD después de enviarse la trama de asentimiento. La trama CVD puede indicar que los datos recibidos contienen errores o no, basándose en la elección de colores. El atributo PIB *macColorReceived* se utiliza para la asignación de color a la trama CVD cuando la trama de ACK se envía y para obtención de la función de color para la indicación del estado del ACK. El atributo PIB, *macColorNotReceived*, se utiliza para la asignación de color a la trama CVD cuando no se envía trama de ACK pero la función de color de la indicación del estado de no-ACK se obtiene de la trama CVD.

### 3.1.12.3 Uso de la trama CVD para la indicación de la calidad del canal

La Tabla 3-5 describe cómo puede deducir el usuario la calidad de las transmisiones de datos o la calidad de la comunicación mediante la trama CVD. La calidad del canal puede obtenerse mediante diferentes métricas, por ejemplo, las estadísticas del índice de error de trama (FER) pueden ser promediadas sobre múltiples tramas. Esta información puede indicar al usuario falta de alineamiento. Se pueden utilizar diferentes colores para indicar diferentes estados de falta de alineamiento, aunque la elección del color y el rango FER es cuestión del implementador y está fuera del objetivo de este estándar.

Tabla 3-5 Tabla de color para la indicación de la calidad del canal

Color de la trama CVD	Calidad del canal
Color "A"	FER actual < FER #1
Color "B"	FER #1 ≤ FER < FER #2
Color "C"	FER actual ≥ FER #2

3.1.12.4 Uso de la trama CVD para la indicación del estado de transferencia de ficheros

La Figura 3-24 muestra un ejemplo sobre cómo puede deducir el usuario el tamaño de los ficheros enviados y que quedan por enviar a través del color de la trama CVD, en la figura se muestra la transferencia de ficheros del coordinador a un dispositivo. Diferentes elecciones de colores pueden representar diferentes estados del proceso de transferencia de ficheros. Para utilizar esta indicación el dispositivo necesita conocer el tamaño total del fichero que se pretende enviar. El tamaño restante del fichero a enviar puede obtenerse restando el tamaño del fichero transferido del tamaño total del fichero. El atributo PIB *macCFAppColor* se utiliza para la asignación de color a la trama CVD cuando esta trama se envía para indicar la información que depende de la aplicación, como por ejemplo el estado de transferencia del fichero.

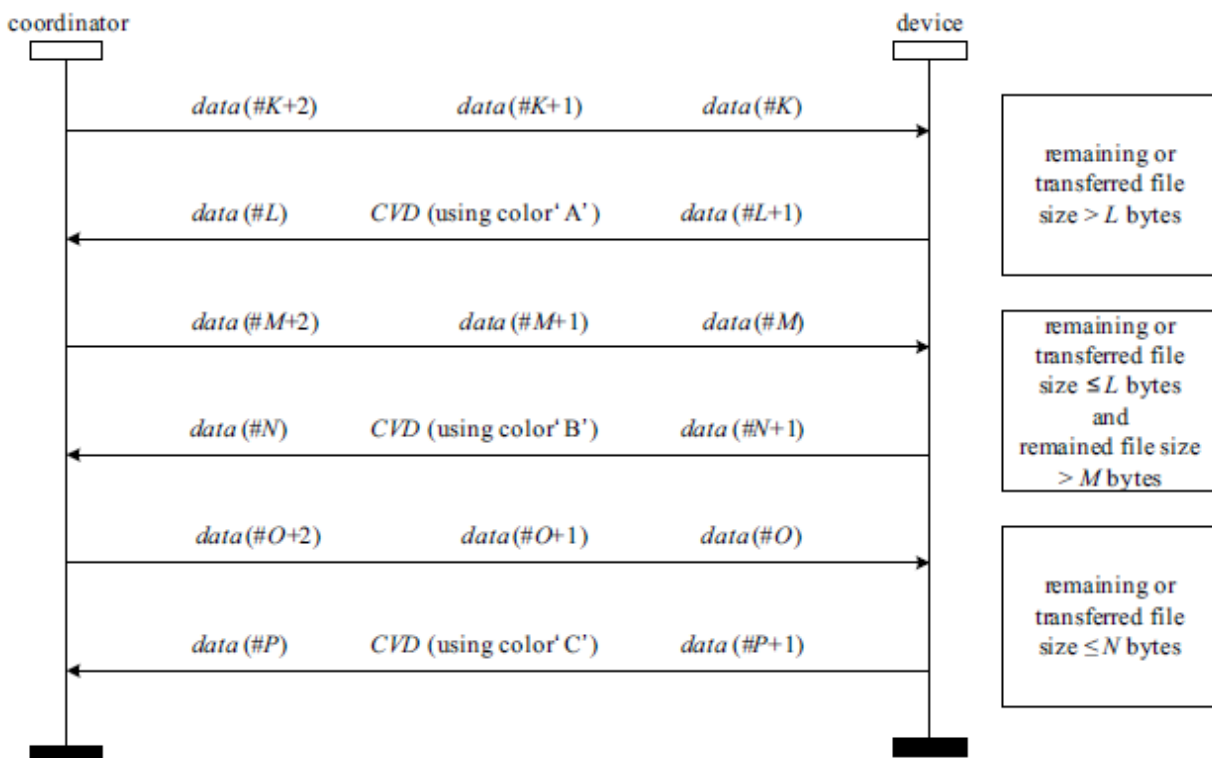


Figura 3-24. Ejemplo de uso de MSC para trama CVD en la indicación del estado de transferencia del fichero

3.1.12.5 Mecanismo de asignación de color genérico

La función de color puede utilizarse para más aplicaciones a las expuestas en los apartados anteriores. Los colores para el soporte de varias funciones de color se elegirán desde el atributo PIB *phyColorFunction*, utilizando las primitivas MLME-SET.request y PLME-SET.request disponibles para el DME mostrado en la Figura 2-3.

### 3.1.13 Estabilización del color

Cuando un dispositivo se conecta a una red (administrada por un coordinador) informa sobre sus capacidades de estabilización del color en enlaces CSK. Se asume que al menos uno de los enlaces funcionará como un enlace bidireccional CSK. Si no, no se invocará la función de estabilización del color en la red.

El dispositivo y el coordinador seguirán los pasos de asociación. Tras la emisión de MLME-ASSOCIATE.request el dispositivo envía una petición de asociación anunciando su capacidad para la estabilización de color en enlaces CSK. Cuando se haya recibido la petición, la MLME del coordinador crea una MLME-ASSOCIATE.indication a la capa superior, ahí se tomará la decisión sobre dónde se invocará la estabilización del color. Si el enlace que va a establecerse es CSK dúplex, el coordinador también podrá elegir estabilizar el color del dispositivo TX. (Como se ha dicho antes, estamos hablando del caso de estabilización del color en el coordinador, pero hay otros casos posibles que pueden ser inferidos de esta descripción). Después de esto, se establece el campo de respuesta de negociación de capacidades y se traslada la información pendiente por la MLME del coordinador dentro del mensaje de respuesta de asociación MAC. Una vez que se ha recibido este mensaje, la MLME del dispositivo crea el MLME-ASSOCIATE.confirm y lo envía a la capa superior para un procesamiento futuro.

Cuando el coordinador comience a enviar tramas CVD al dispositivo, el dispositivo enviará información sobre estabilización del color de vuelta al coordinador. Una vez transcurrido el tiempo establecido en la variable *macColorStabilizationTimer*, la información actual se envía de nuevo desde el dispositivo al coordinador.

Cuando se produzca la des-asociación, la variable *macColorStabilization* se configura a su estado por defecto '00'.

### 3.1.14 Visibilidad y soporte de control de atenuación

El estándar objeto de estudio en este trabajo proporciona soporte de visibilidad para los siguientes propósitos:

- Alineamiento (detección de dispositivo, negociación y conexión).
- Guiado visible para el alineamiento de usuario.
- Infraestructura continua de salida de luz.
- Parpadeos para indicar interferencia inesperada, avisos de desconexión.

#### 3.1.14.1 Patrones de visibilidad

La subcapa MAC pasa el requerimiento de patrón de visibilidad a la capa PHY a través de la interfaz PLME utilizando el atributo PIB *phyDim*. El envío del patrón de inactividad es un requerimiento obligatorio para la infraestructura durante la operación de recepción o inactividad para asegurar la iluminación continua. El envío del patrón de visibilidad es opcional para dispositivos móviles.

#### 3.1.14.2 Modo de preámbulo extendido para visibilidad

La subcapa MAC proporciona un modo de preámbulo extendido para la visibilidad. La ventaja de este modo es que dispone tiempo adicional para la sincronización mientras que se proporciona visibilidad de forma simultánea.

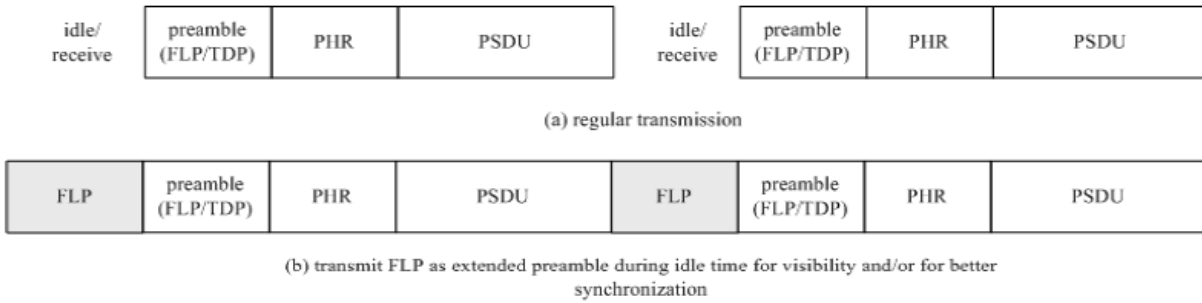


Figura 3-25. Modo de preámbulo extendido proporcionado por la subcapa MAC

La subcapa MAC utiliza el conocimiento del tiempo de inactividad y puede incrementar el número de repeticiones del preámbulo durante la transmisión de la trama para alcanzar este tiempo completamente. El preámbulo extendido es continuo al preámbulo existente de la siguiente trama de transmisión. Existe la posibilidad de que el tiempo de inactividad no pueda ser un múltiplo entero de la longitud del preámbulo. En esos casos, es aceptable transmitir una fracción del preámbulo (parte final) para mantener la visibilidad, esta fracción del preámbulo se llama preámbulo truncado.

La subcapa MAC puede elegir entre transmitir el patrón de inactividad o el preámbulo extendido cuando se esté en modo de inactividad durante la operación regular. La elección se toma por parte de la DME y se indica a la capa PHY a través del acceso PLME al atributo PIB *phyUseExtendedMode*.

La parte del patrón de bloqueo rápido (FLP) de la secuencia de preámbulo (1010...) se utilizará en el modo de preámbulo extendido como se muestra en la Figura 3-26. Cuando el tiempo de inactividad no sea un múltiplo entero del preámbulo, solo una fracción del patrón de preámbulo como '010' se enviará para completar el tiempo de inactividad.

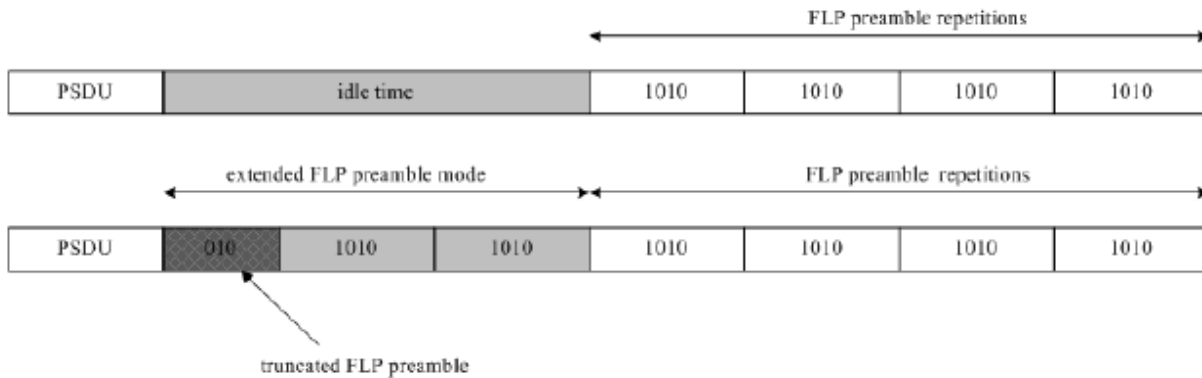


Figura 3-26. Preámbulo truncado en el modo de preámbulo extendido para el uso del tiempo de inactividad para visibilidad

### 3.1.14.3 Transmisión del patrón de visibilidad durante el enlace ascendente para la topología en estrella

Para la topología en estrella, asumiendo que el patrón de visibilidad se envía “en banda” como se describe en el dominio de modulación, la señal de visibilidad *point-and-shoot* del dispositivo móvil no puede ser transmitida de forma continua debido a que múltiples usuarios pueden apuntar al coordinador fijo. Esto hace que sea difícil de alcanzar la señal de visibilidad por el bajo ciclo de trabajo. Por tanto, la información sobre los periodos de inactividad se transmite en las balizas y los dispositivos móviles utilizan estos periodos de inactividad para la transmisión de patrones de visibilidad al coordinador fijo. Todos los móviles que se comuniquen con el coordinador compartirán *slots* vacíos para la transmisión de tramas CVD durante el enlace ascendente.

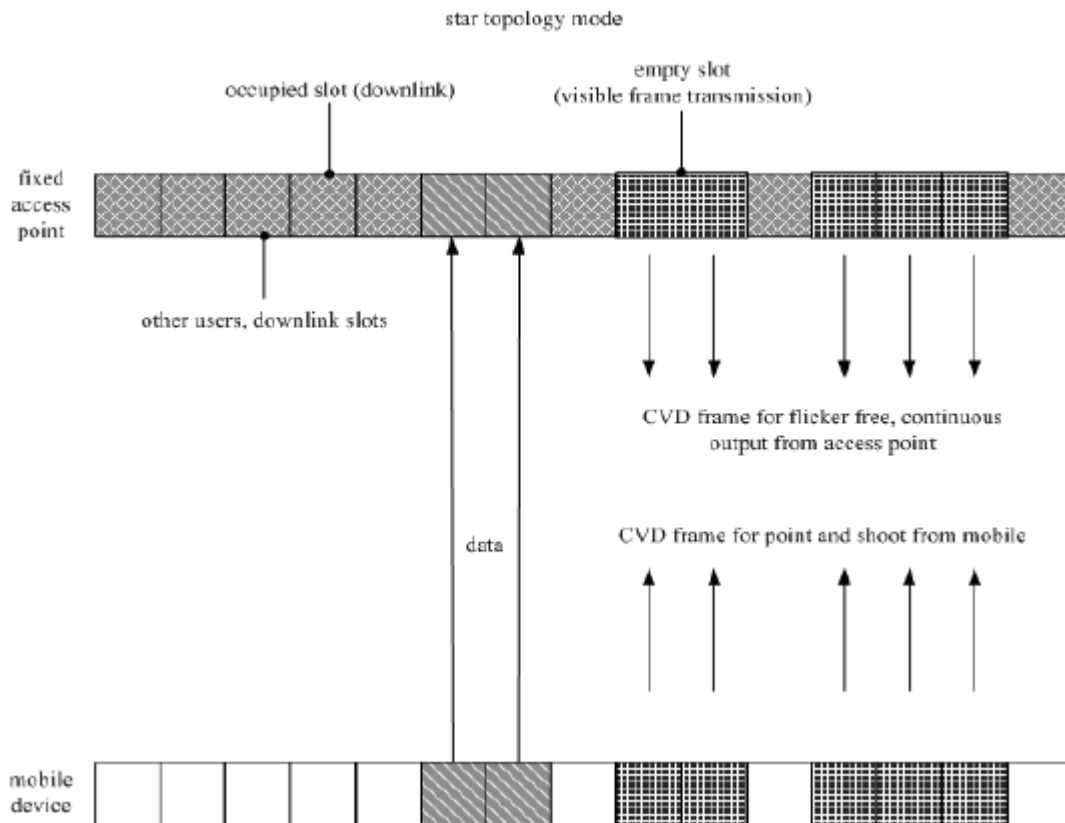


Figura 3-27. Uso de tramas CVD durante la operación en estrella

#### 3.1.14.4 Capacidad de anulación de atenuación

La función de control de atenuación puede establecerse a un máximo de brillo para facilitar la comunicación VLC. Cuando se haya completado la comunicación VLC, el control de atenuación gestiona el controlador de fuente óptica y vuelve a la operación normal.

La señal de petición de anulación de atenuación se añade a la MLME SAP y se proporciona por la interfaz de control de atenuación externa utilizando el atributo PIB *macDimOverrideRequest*. Esta petición se establecerá a '1' durante la operación VLC y a '0' después de que se haya completado la comunicación. El circuito de control de atenuación puede decidir si acepta o rechaza la petición. Las primitivas MLME-GET y MLME-SET se utilizan para leer y escribir los atributos PIB para el control de atenuación.

#### 3.1.14.5 Anulación de la señal PWM

La señal de petición de anulación de señal PWM se añade a la MLME SAP utilizando el atributo PIB *macDimPWMOVERRIDERequest*, y se proporciona a la interfaz de control de atenuación externa. Este atributo establecerá '1' para informar al circuito de control de atenuación de que la capa PHY será responsable del control de atenuación y para deshabilitar cualquier circuito PWM presente en el control de atenuación. Las primitivas MLME-GET y MLME-SET se utilizan para leer y escribir los atributos PIB para el control de atenuación.

#### 3.1.14.6 Detección y asociación de dispositivos en presencia de atenuación

El patrón de visibilidad puede ayudar a la detección de dispositivos cuando el patrón de inactividad o de datos ha sido modificado por los cambios en la modulación en las capas PHY y MAC para la gestión de la atenuación. Basándose en el cambio de patrón de atenuación y el ciclo de trabajo, el dispositivo VLC podrá elegir asociarse con un coordinador diferente que no esté siendo atenuado o que tiene un mayor ciclo de trabajo (mayor iluminación). La cabecera de la trama CVD se envía a la tasa de datos más baja que

corresponda a la tasa de reloj actual. En la Figura 3-28 se muestra un ejemplo de uso del patrón de visibilidad como una señal para establecer la mejor conectividad a un dispositivo de infraestructura.

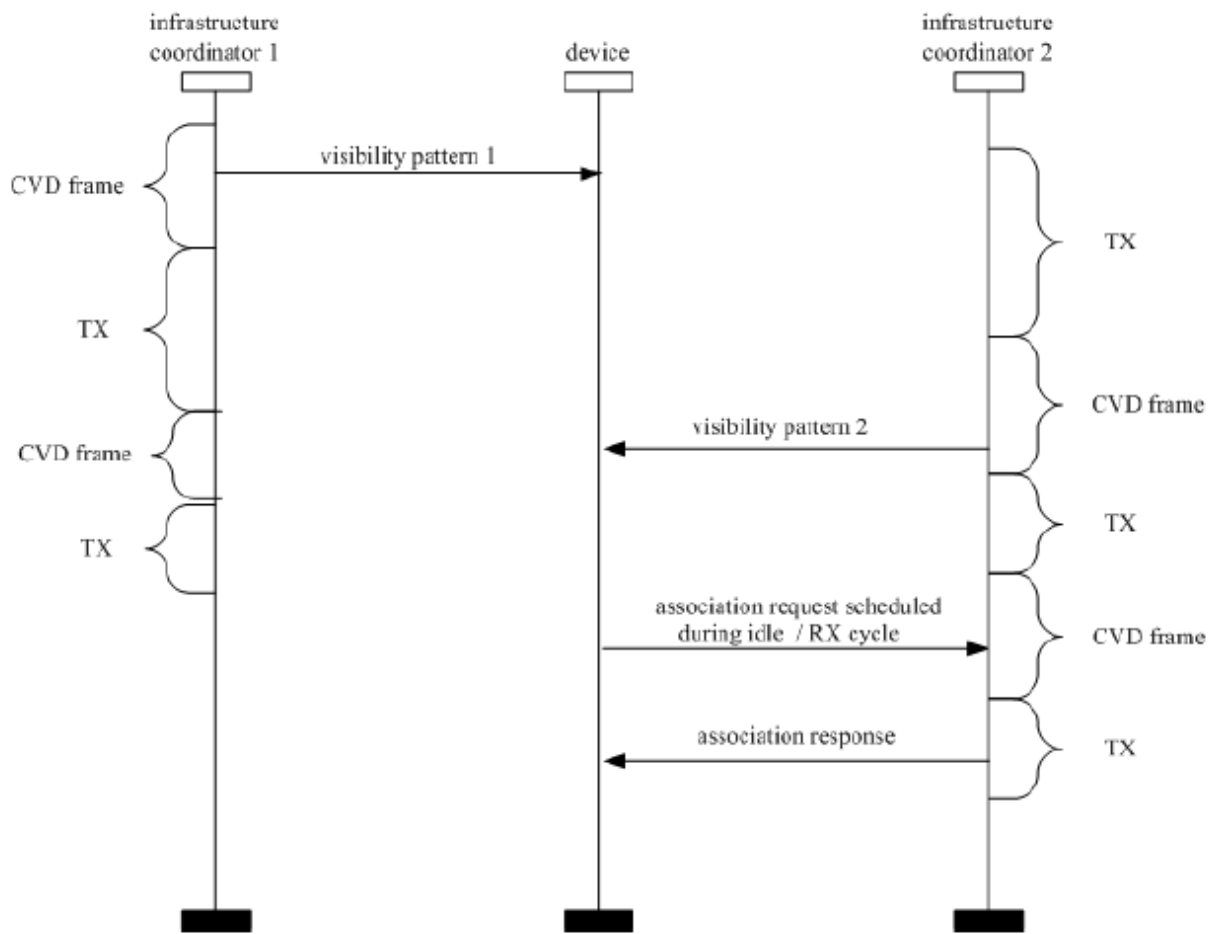


Figura 3-28. Ejemplo del uso del patrón de visibilidad para establecer la mejor conectividad a un dispositivo de la infraestructura



# 4 ESPECIFICACIÓN DEL SERVICIO DE LA SUBCAPA MAC

La subcapa MAC proporciona una interfaz entre el SSCS, DME y la capa PHY. Esta subcapa incluye de forma conceptual una entidad de gestión llamada MLME (*medium-access-control link-management entity*, Entidad de gestión del enlace en el control de acceso al medio). Esta entidad proporciona las interfaces de servicio a través de las cuales se invocan las funciones de gestión de la capa. La MLME también es responsable de mantener la base de datos de los objetos gestionados.

La figura 4-1 representa los componentes e interfaces de la subcapa MAC.

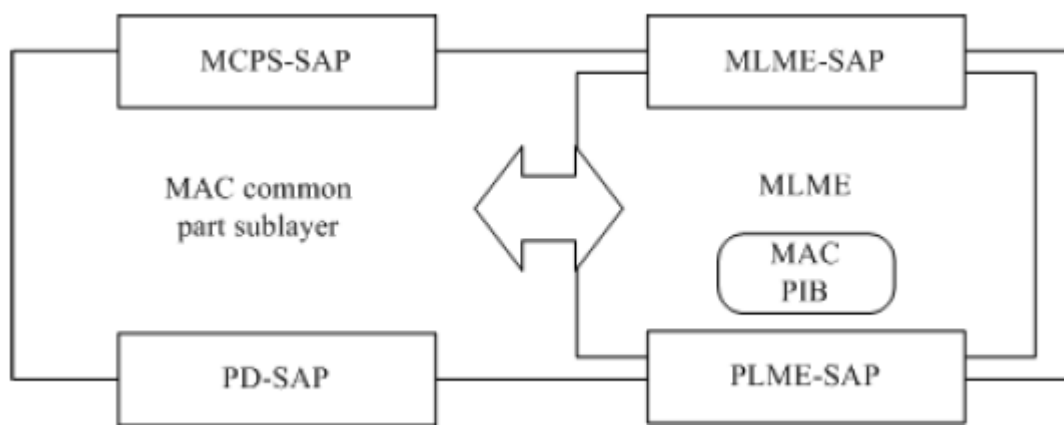


Figura 4-1. Modelo de referencia para la subcapa MAC

La subcapa MAC proporciona los siguientes dos servicios, a los que se accede a través de dos SAPs:

- El servicio de datos MAC, se accede a través de la subcapa de parte común MAC (MCPS) del SAP de datos (MCPS-SAP).
- Servicio de gestión MAC, se accede a través del MLME-SAP.

Estos dos servicios proporcionan la interfaz entre el SSCS y la capa PHY, a través de las interfaces PD-SAP y PLME-SAP. Además, para esas interfaces externas, también existe una interfaz implícita entre la MLME y el MCPS que permite que la MLME use el servicio de datos MAC.

## 4.1 Servicio de datos MAC

El MCPS-SAP soporta el transporte de las unidades de dato del protocolo SSCS (SPDUs) entre entidades SSCS pares.

### 4.1.1 MCPS-DATA.request

Esta primitiva solicita la transferencia de datos SPDU de la entidad SSCS local a una entidad SSCS par. En el modo empaquetado varias MSDU pasan a través de entidades SSCS locales a la entidad SSCS par.

### 4.1.2 MCPS-DATA.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado de una petición de transferencia de datos SPDU (MSDU) de una

entidad local SSCS a una entidad SSCS par. La primitiva MCPS-DATA.confirm puede devolver el estado SUCCESS, indicando que la petición de transmisión se ha realizado con éxito, o el código de error apropiado.

#### 4.1.3 MCPS-DATA.indication

Esta primitiva indica la transferencia de datos SPDU (MSDU) desde la subcapa MAC hasta la entidad SSCS local. En el modo empaquetado, se pasan múltiples MSDU a través de entidades SSCS locales a una entidad SSCS par.

#### 4.1.4 MCPS-PURGE.request

Esta primitiva es opcional para el dispositivo y permite a la capa superior eliminar una MSDU de la cola de transacción.

#### 4.1.5 MCPS-PURGE.confirm

Esta primitiva permite a la subcapa MAC notificar a la capa superior el éxito en su petición de eliminación de una MSDU de la cola de transacción. Se genera en la entidad de la subcapa MAC en respuesta a la primitiva MCPS-PURGE.request. Esta primitiva devuelve el estado de SUCCESS, indicando que se ha realizado la eliminación con éxito, o INVALID\_HANDLE, indicando un error.

#### 4.1.6 Secuencia de mensajes del servicio de datos

En la Figura 4-2 se ilustra la secuencia de mensajes para la correcta transferencia de datos entre dos dispositivos.

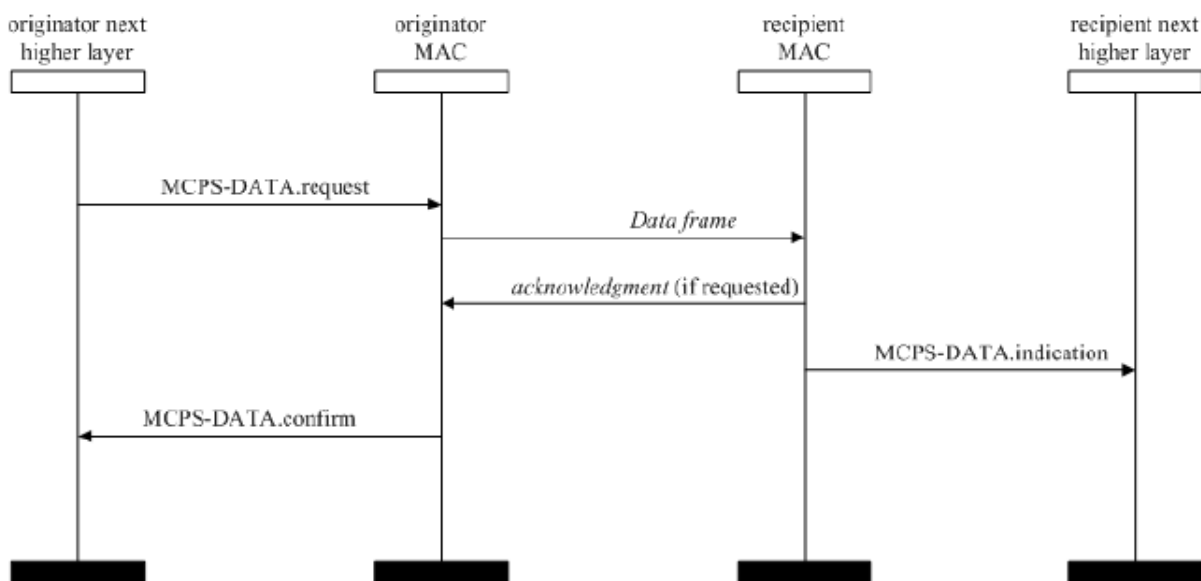


Figura 4-2. Secuencia de mensajes describiendo el servicio de datos MAC

## 4.2 Servicio de gestión MAC

El MLME-SAP permite el transporte de instrucciones de gestión entre la capa superior y el MLME.

## 4.2.1 Primitivas de asociación

### 4.2.1.1 MLME-ASSOCIATE.request

Esta primitiva permite al dispositivo solicitar la asociación con un coordinador. Es generada por la capa superior de un dispositivo no asociado y se emite a la MLME para realizar la solicitud. Si el dispositivo desea asociarse a través de un coordinador en una VPAN con uso de baliza, la MLME opcionalmente podrá realizar un seguimiento a la baliza del coordinador antes de la emisión de la primitiva.

### 4.2.1.2 MLME-ASSOCIATE.indication

Esta primitiva se utiliza para indicar la recepción de una instrucción de petición de asociación. Se genera por parte de la MLME del coordinador y se emite a la capa superior para indicar la recepción de la instrucción.

### 4.2.1.3 MLME-ASSOCIATE.response

Esta primitiva se utiliza para iniciar una respuesta a una primitiva MLME-ASSOCIATE.indication. Se genera por la capa superior del coordinador y se emite a su MLME para responder a la primitiva MLME-ASSOCIATE.indication.

### 4.2.1.4 MLME-ASSOCIATE.confirm

Esta primitiva se utiliza para informar a la capa superior del dispositivo que inicia la petición sobre si la solicitud de asociación se ha realizado con éxito o no.

### 4.2.1.5 Secuencia de mensajes de asociación

En la Figura 4-3 se muestra la secuencia de mensajes que se utilizan por un dispositivo que no realiza seguimiento de baliza al coordinador para asociarse a una VPAN.

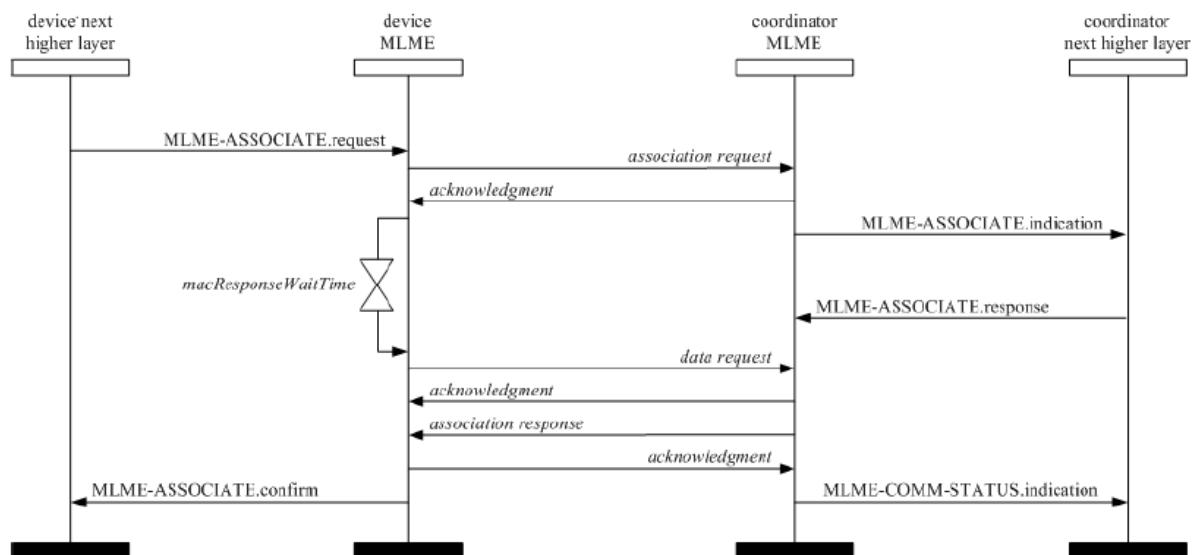


Figura 4-3. Secuencia de mensajes para la asociación

## 4.2.2 Primitivas de des-asociación

Las primitivas de des-asociación MLME-SAP definen el proceso de des-asociación de un dispositivo de una VPAN. Todos los dispositivos proporcionarán una interfaz para estas primitivas.

#### 4.2.2.1 MLME-DISASSOCIATE.request

Esta primitiva se utiliza por los dispositivos asociados para notificar al coordinador que pretende salir de la VPAN. También se utiliza por el coordinador para indicar a los dispositivos asociados cómo dejar la VPAN. Se genera por la capa superior de un dispositivo asociado y es emitida por la MLME para solicitar la des-asociación de la VPAN.

#### 4.2.2.2 MLME-DISASSOCIATE.indication

Esta primitiva se utiliza para indicar la recepción de una instrucción de notificación de des-asociación. Se genera por la MLME y se emite a la capa superior después de la recepción de la instrucción de notificación de des-asociación.

#### 4.2.2.3 MLME-DISASSOCIATE.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado de la primitiva MLME-DISASSOCIATE.request. Se genera por la MLME inicial y se emite a la capa superior en respuesta a la primitiva de petición. La primitiva responde el estado SUCCESS, indicando que la petición de asociación se ha realizado con éxito, o el código de error apropiado.

#### 4.2.2.4 Secuencia de mensajes de des-asociación

La petición de des-asociación puede originarse tanto por el dispositivo como por el coordinador. La Figura 4-4 ilustra la secuencia de mensajes necesaria para la des-asociación de un dispositivo de una VPAN.

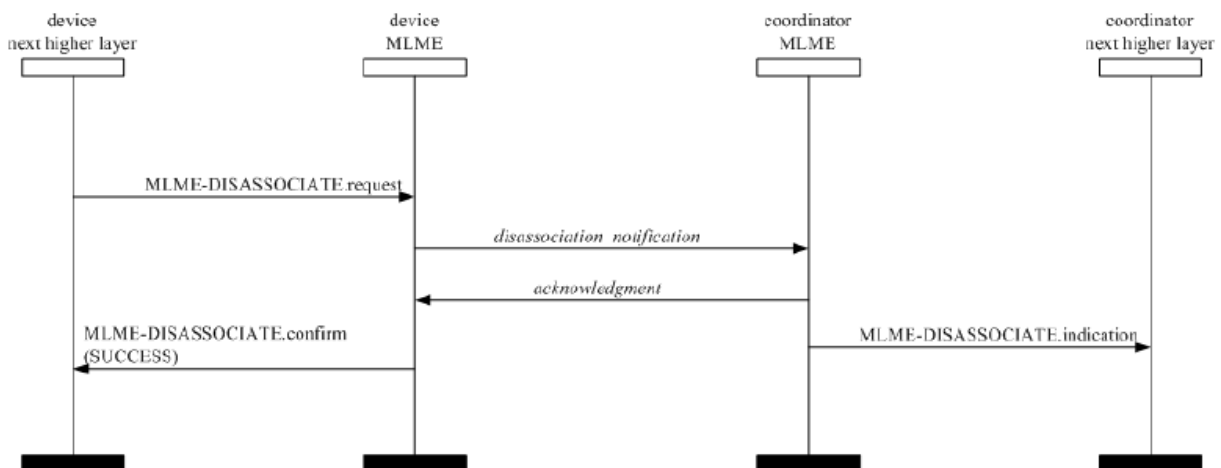


Figura 4-4. Secuencia de mensajes para la des-asociación iniciada por un dispositivo

### 4.2.3 Primitiva de notificación de baliza

La primitiva de notificación de baliza MLME-SAP define cómo se puede notificar a un dispositivo cuando la baliza se recibe durante las condiciones normales de operación. Todos los dispositivos proporcionarán una interfaz para las primitivas de notificación de baliza.

#### 4.2.3.1 MLME-BEACON-NOTIFY.indication

Esta primitiva se utiliza para enviar a la capa superior los parámetros contenidos dentro de tramas de baliza recibidos por la subcapa MAC. La primitiva también envía una medida de la WQI y el tiempo en el que se ha recibido la trama de baliza.

### 4.2.4 Primitivas de lectura de atributos PIB

Estas primitivas definen cómo leer los valores de los atributos PIB. Todos los dispositivos proporcionarán una

interfaz para obtener esas primitivas.

#### **4.2.4.1 MLME-GET.request**

Esta primitiva solicita información sobre un atributo dado. Se genera por la capa superior y es emitida por su MLME para obtener información sobre el PIB.

#### **4.2.4.2 MLME-GET.confirm**

Esta primitiva informa sobre el resultado de una petición de información. Se genera por el MLME y se emite a la capa superior en respuesta a la primitiva MLME-GET.request. Esta primitiva devolverá el estado de SUCCESS, indicando que la respuesta a la lectura del atributo PIB se ha hecho de forma satisfactoria, o un código de error UNSUPPORTED\_ATTRIBUTE. Cuando se devuelva el código de error, el valor del parámetro PIBAttribute se establecerá a cero.

### **4.2.5 Primitivas de gestión GTS**

Las primitivas de gestión GTS MLME-SAP definen cómo se solicitan y gestionan los GTSs. Un dispositivo que desee utilizar estas primitivas o un GTS en general deberá realizar un seguimiento a las balizas de su coordinador. El uso de estas primitivas es opcional.

#### **4.2.5.1 MLME-GTS.request**

Esta primitiva permite al dispositivo enviar una petición al coordinador para asignar un nuevo GTS o rehusar uno existente. El coordinador también puede utilizarlas para iniciar la denegación de un GTS existente.

#### **4.2.5.2 MLME- GTS.indication**

Esta primitiva indica que el GTS ha sido asignado o que un GTS previamente asignado ha sido rehusado. Se genera por la MLME del coordinador a su capa superior siguiendo la recepción de una instrucción de petición de GTS.

#### **4.2.5.3 MLME-GTS.confirm**

Esta primitiva informa sobre el resultado de una petición de asignación de un nuevo GTS o rechazo de uno existente.

4.2.5.4 Secuencia de mensajes de gestión GTS

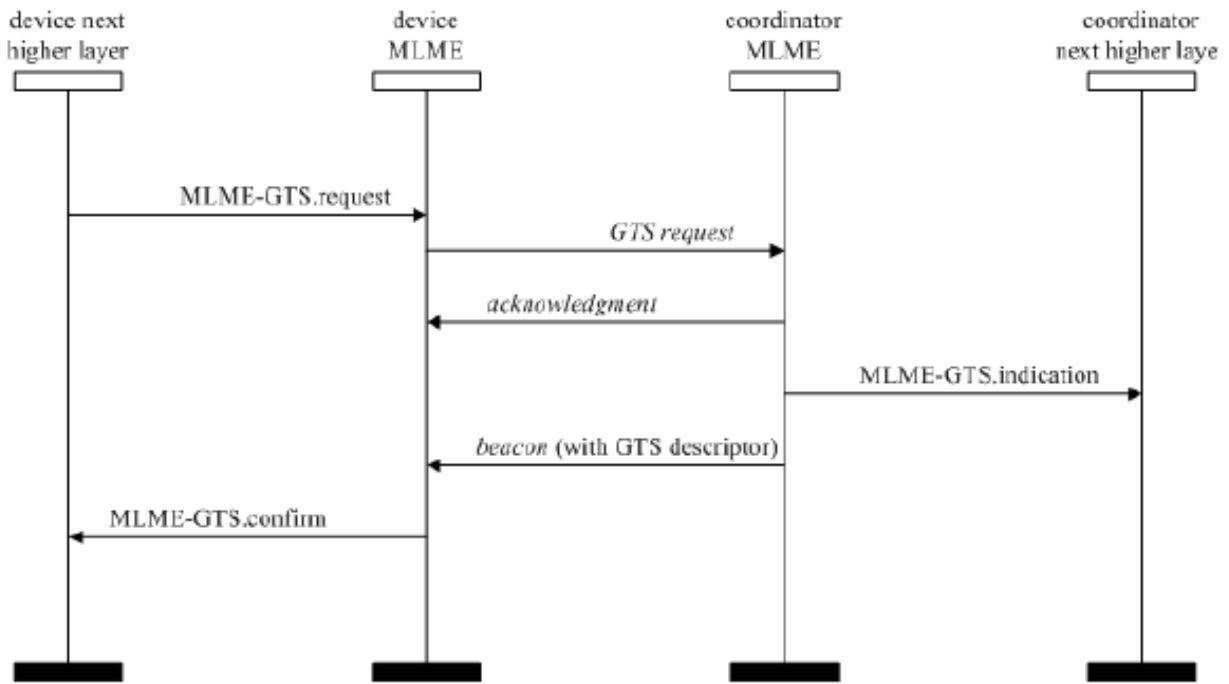


Figura 4-5. Secuencia de mensajes para la asignación de un GTS iniciada por un dispositivo

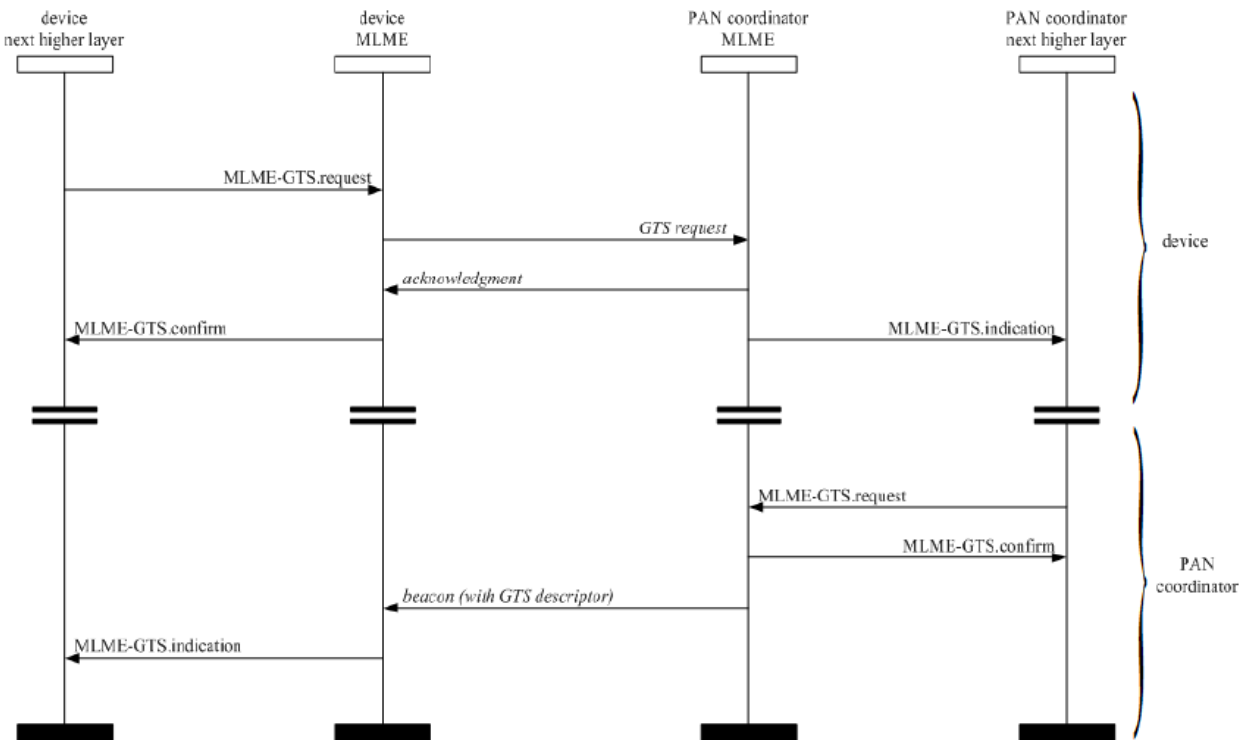


Figura 4-6. Secuencia de mensajes para el rechazo iniciado por un dispositivo (a) y el coordinador PAN (b)

## 4.2.6 Primitivas para el reinicio de la subcapa MAC

Las primitivas MLME-SAP para el reinicio especifican como reiniciar la subcapa MAC a los valores por defecto. Todos los dispositivos proporcionarán una interfaz para estas primitivas de reinicio.

### 4.2.6.1 MLME-RESET.request

Estas primitivas permiten a la capa superior solicitar que la MLME realice una operación de reinicio. Se genera por la capa superior y se emite por la MLME para la petición de reinicio de la subcapa MAC a las condiciones iniciales. Esta primitiva se emite antes del uso de las primitivas MLME-START.request o MLME-ASSOCIATE.request.

### 4.2.6.2 MLME-RESET.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado de la operación de reinicio. Se genera por la MLME y es emitida a la capa superior en respuesta a su primitiva de petición y siguiendo la recepción de la primitiva PLME-SET-TRX-STATE.confirm.

## 4.2.7 Primitivas para la especificación del tiempo de habilitación del receptor

Las primitivas MLME-SAP de estado del receptor definen cómo un dispositivo puede habilitar o deshabilitar el receptor en un tiempo dado. Estas primitivas de estado de recepción son opcionales.

### 4.2.7.1 MLME-RX-ENABLE.request

Esta primitiva permite a la capa superior solicitar que el receptor esté habilitado o deshabilitado un periodo de tiempo establecido. Se genera por la capa superior y es emitida por la MLME para habilitar el receptor en el instante de inicio de la supertrama actual o la siguiente en una VPAN con uso de baliza, o inmediatamente en una VPAN sin uso de baliza. Esta primitiva también se podrá generar para cancelar una petición de habilitación del receptor generada de forma previa. El receptor se habilitará o deshabilitará una vez por primitiva de petición.

### 4.2.7.2 MLME-RX-ENABLE.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado del intento de habilitación o deshabilitación del receptor. Se genera por la MLME y se emite a la capa superior en respuesta a una primitiva MLME-RX-ENABLE.request. Devolverá el estado SUCCESS, si la petición de habilitación se realiza con éxito, o el código de error apropiado en caso contrario.

## 4.2.8 Primitivas para el escaneo de canales

Las primitivas MLME-SAP de escaneo definen cómo puede determinar un dispositivo el uso de energía o la presencia o ausencia de VPAN en el canal de comunicación. Todos los dispositivos proporcionarán una interfaz para esas primitivas de escaneo.

### 4.2.8.1 MLME-SCAN.request

Estas primitivas se utilizan para iniciar un escaneo de canal sobre una lista de canales. Un dispositivo puede utilizar un escaneo de canal para medir la energía del canal y buscar al coordinador con el cual está asociado, o buscar todos los coordinadores que estén transmitiendo tramas de baliza dentro del área de cobertura del mismo. Esta primitiva puede utilizarse para realizar un escaneo pasivo o activo con el objetivo de localizar tramas de baliza que contengan cualquier identificador VPAN.

### 4.2.8.2 MLME-SCAN.confirm

Estas primitivas informan sobre el resultado de la petición de escaneo de canal. Se genera por la MLME y se emite a la capa superior cuando finaliza el escaneo de canal iniciado por la primitiva de petición. Devolverá el estado SUCCESS o el código de error apropiado.

## 4.2.9 Primitivas del estado de comunicación

Definen cómo se comunica la MLME con la capa superior para proporcionar información sobre el estado de transmisión, cuando la transmisión viene provocada por una primitiva de respuesta, y sobre los errores de seguridad en los paquetes entrantes. Todos los dispositivos proporcionarán una interfaz para la primitiva del estado de la comunicación.

### 4.2.9.1 MLME-COMM-STATUS.indication

Esta primitiva permite a la MLME indicar el estado de la comunicación. Mediante la recepción de esta primitiva se notifica a la capa superior el estado de la comunicación y se notifica sobre cualquier error que haya ocurrido durante el procesamiento de seguridad de la trama entrante.

## 4.2.10 Primitivas para la escritura de los atributos PIB

Las primitivas MLME-SAP de establecimiento definen cómo deben escribirse los atributos PIB.

### 4.2.10.1 MLME-SET.request

Esta primitiva intenta la escritura de los valores dados a los atributos PIB que se indiquen.

### 4.2.10.2 MLME-SET.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado del intento de escritura de un valor al atributo PIB.

## 4.2.11 Primitivas para la actualización de la configuración de supertrama

La primitiva MLME-SAP *start* define cómo puede solicitar el coordinador una nueva configuración de supertrama con el objetivo de iniciar una VPAN o como comienza a transmitir balizas en una VPAN existente, para facilitar la detección de dispositivos o la parada de transmisión de balizas.

### 4.2.11.1 MLME-START.request

Esta primitiva permite al coordinador VLC iniciar una nueva VPAN o el inicio de uso de una nueva configuración de supertrama. Esta primitiva también podrá utilizarse por un dispositivo que ya haya sido asociado a una VPAN existente para el inicio de una nueva configuración de supertrama.

### 4.2.11.2 MLME-START.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado del inicio de uso de una nueva configuración de supertrama. Se genera en la MLME y se emite a la capa superior en respuesta a la primitiva de petición. Si la actualización de configuración se ha realizado de forma exitosa, el parámetro de estado indicará SUCCESS, de otra forma el parámetro indicará el error.

### 4.2.11.3 Secuencia de mensajes para la actualización de la configuración de supertrama

La Figura 4-7 muestra la secuencia de mensajes necesaria para la actualización de supertrama para el caso de inicio transmisiones de baliza como coordinador.



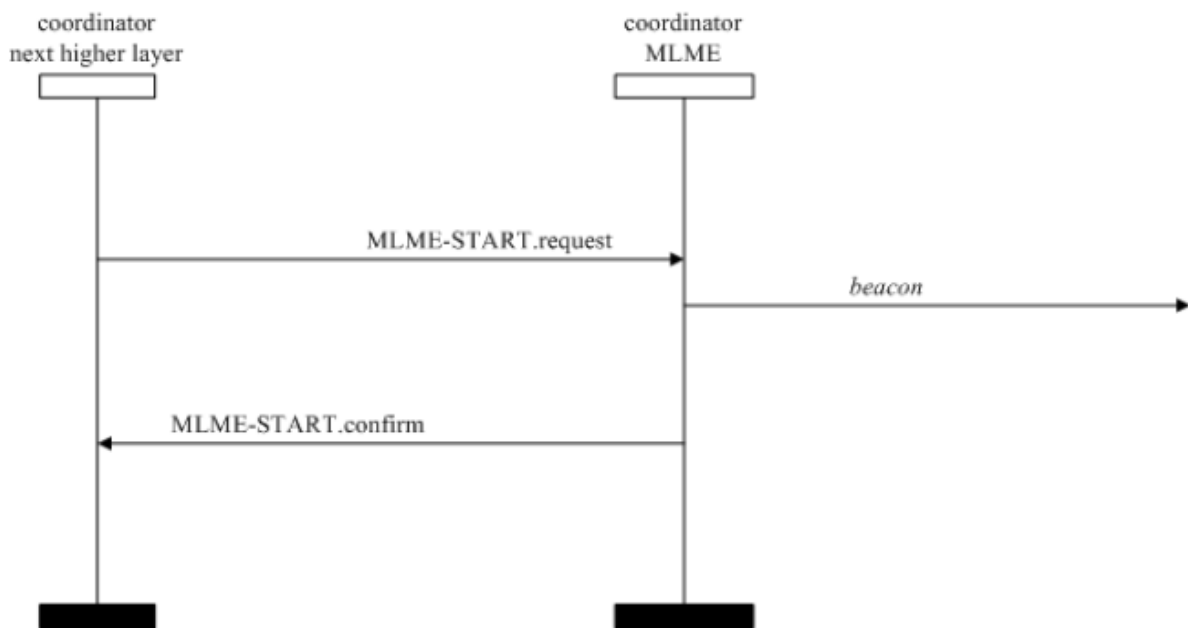


Figura 4-7. Secuencia de mensajes para la actualización de la configuración de supertrama

#### 4.2.12 Primitiva para la sincronización con un coordinador

Las primitivas MLME-SAP de sincronización definen cómo se consigue la sincronización con un coordinador y cómo se comunica la pérdida de sincronización a la capa superior. Todos los dispositivos proporcionarán una interfaz para la primitiva de indicación. La primitiva de petición es opcional.

##### 4.2.12.1 MLME-SYNC.request

Esta primitiva solicita la sincronización con el coordinador mediante la adquisición, si está especificado, y el seguimiento de sus balizas. Se genera en la capa superior del dispositivo en una VPAN que permita el uso de baliza y se emite a su MLME para sincronizar con el coordinador.

#### 4.2.13 Primitiva para la pérdida de sincronización con un coordinador

##### 4.2.13.1 MLME-SYNC-LOSS.indication

Esta primitiva se genera por el MLME del dispositivo y se emite a la capa superior para indicar al coordinador la pérdida de sincronización. También se genera en la MLME del coordinador de VLC y se emite a la capa superior en caso de conflicto de identificador VPAN ID.

##### 4.2.13.2 Secuencia de mensajes para la sincronización con un coordinador

La Figura 4-8 muestra la secuencia de mensajes necesaria para la sincronización del dispositivo con un coordinador. En la Figura 4-8 (a) se emite la solicitud de sincronización única. En la Figura 4-8 (b) se emite la petición de seguimiento de sincronización.

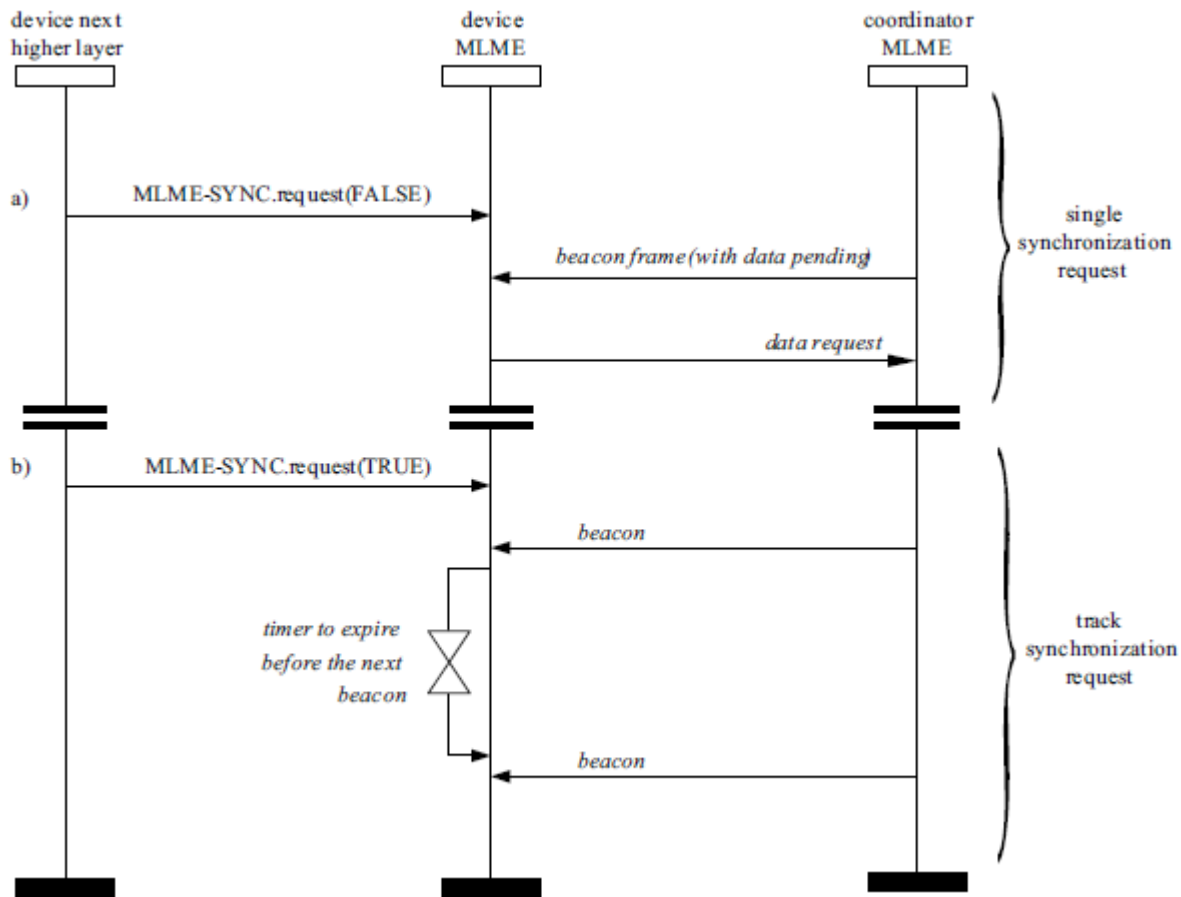


Figura 4-8. Secuencia de mensajes para la sincronización con un coordinador en una VPAN con uso de baliza

#### 4.2.14 Primitivas para la petición de datos de un coordinador

Las primitivas MLME-SAP *polling* definen cómo solicitar datos a un coordinador. Todos los dispositivos proporcionan una interfaz para esas primitivas de sondeo.

##### 4.2.14.1 MLME-POLL.request

Estas primitivas proporcionan al dispositivo la petición de datos para el coordinador. Se genera en la capa superior y se emite a su MLME cuando se le van a solicitar datos al coordinador.

##### 4.2.14.2 MLME-POLL.confirm

Estas primitivas informan sobre los resultados de una petición de sondeo al coordinador para la obtención de datos. Se genera en la MLME y se emite a su capa superior en respuesta a una primitiva MLME-POLL.request. Si la petición se realiza de forma satisfactoria, el parámetro de estado será igual a SUCCESS, en otro caso se indicará el código de error apropiado.

##### 4.2.14.3 Secuencia de mensajes para la petición de datos de un coordinador

La Figura 4-9 muestra la secuencia de mensajes necesaria, incluyendo el comportamiento de la capa del dispositivo y la interfaz, para la petición de datos a un coordinador por parte del dispositivo.

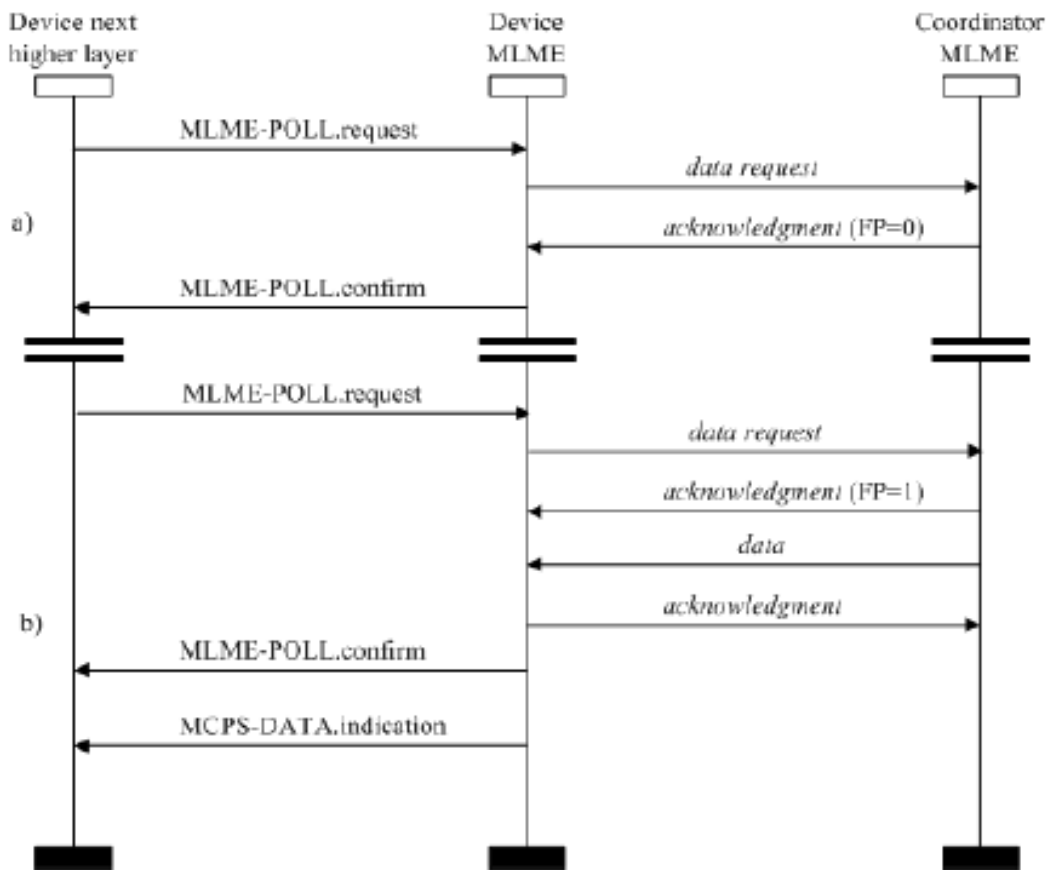


Figura 4-9. Secuencia de mensajes para la petición de datos desde un coordinador

# 5 ESPECIFICACIONES DE SEGURIDAD

---

La subcapa MAC es la responsable de proporcionar los servicios de seguridad en la tramas entrantes y salientes especificadas cuando se requiera por las capas superiores. El estándar soporta los siguientes servicios de seguridad:

- Confidencialidad de datos
- Autenticidad de datos
- Protección contra repetición

## 5.1 Descripción funcional

Un dispositivo podrá implementar de forma opcional requisitos de seguridad. Los dispositivos que implementen seguridad proporcionarán mecanismos a la subcapa MAC para aplicar transformaciones criptográficas en las tramas entrantes y salientes utilizando la información de los atributos PIB asociados con la seguridad, cuando el atributo *macSecurityEnabled* está establecido a TRUE.

Los procedimientos de seguridad que pueden implementarse son los siguientes:

- Procedimiento de seguridad de tramas salientes.
- Procedimiento de recuperación de la clave de trama de salida.
- Procedimiento de seguridad de tramas entrantes.
- Procedimiento de recuperación de la seguridad de la trama entrante.
- Procedimiento de búsqueda del descriptor de clave.
- Procedimiento de control de lista negra.
- Procedimiento de búsqueda del descriptor de dispositivo.
- Procedimiento de control del nivel de seguridad entrante.
- Procedimiento de control de la política de uso de la clave entrante.

Aunque se han enunciado todos los procedimientos de seguridad, en este trabajo solo se describirán los procedimientos de seguridad de tramas entrantes y salientes por ser considerados los más importantes. Por ello, si a la subcapa MAC se le requiere transmitir una trama o recibir una trama entrante, la procesará como se especifica en 5.1.1 y 5.1.2 respectivamente.

### 5.1.1 Procedimiento de seguridad de tramas salientes

La entrada a este procedimiento se compone de la trama que necesita ser asegurada y los parámetros *SecurityLevel*, *KeyIdMode*, *KeySource* y *KeyIndex* de la primitiva originadora o los atributos PIB de petición automáticos. La salida a este procedimiento es el estado del procedimiento y, si el estado es SUCCESS, la trama asegurada. En caso contrario se descarta la trama.

El procedimiento de seguridad para tramas salientes se compone de los siguientes pasos según aplique:

- Si el subcampo *Security Enabled* del campo de control de trama está establecido a cero, el procedimiento dispondrá el nivel de seguridad a cero.
- Si el subcampo *Security Enabled* se ha configurado a uno, el procedimiento establecerá el nivel de seguridad al parámetro de seguridad *SecurityLevel*. Si el nivel de seguridad resultante es cero, el procedimiento devolverá el estado UNSUPPORTED\_SECURITY.
- Si el atributo *macSecurityEnabled* está establecido a FALSE y el nivel de seguridad no es igual a cero,

el procedimiento devolverá el estado UNSUPPORTED\_SECURITY.

- El procedimiento determinará si la trama que va a asegurarse satisface la restricción de longitud máxima de la trama MAC.
- Si el nivel de seguridad es cero, el procedimiento establecerá esta trama como la que va a asegurarse, devolviendo posteriormente la trama asegurada y el estado SUCCESS.
- El procedimiento establecerá el contador de trama al valor del atributo *macFrameCounter*. Si el contador de trama tiene el valor 0xffffffff, el procedimiento devolverá el estado COUNTER\_ERROR y todas las claves asociadas con el dispositivo se reiniciarán y actualizarán.
- El procedimiento obtendrá la clave utilizando el procedimiento de recuperación de la clave de la trama de salida. Si falla, se devolverá el estado UNAVAILABLE\_KEY.
- El procedimiento insertará la cabecera de seguridad auxiliar en la trama, con los campos configurados de la siguiente forma:
  - El subcampo Security Level del campo Control Security contendrá el nivel de seguridad.
  - El subcampo Key Identifier Mode contendrá el parámetro KeyIdMode.
  - El campo Frame Counter contendrá el contador de trama.
  - Si el parámetro KeyIdMode se establece a un valor distinto de cero, los subcampos Key Source y Key Index del campo Key Identifier se configurarán a los parámetros KeySource y KeyIndex, respectivamente.
- El procedimiento utilizará *aExtendedAddress*, el contador de trama, el nivel de seguridad y la clave para producir la trama de seguridad de acuerdo al proceso de transformación conocido como CCM\*, o extensión de CCM, que combina el contador con CBC-MAC (*cipher block chaining message authentication code*).
- El procedimiento incrementará el contador de trama en uno y establecerá el atributo *macFrameCounter* al valor resultante.
- Se devolverá la trama de seguridad y el estado SUCCESS.

### 5.1.2 Procedimiento de seguridad de tramas entrantes

La entrada de este procedimiento va a ser la trama a insegurizar. La salida de este procedimiento es la trama insegurizada, el nivel de seguridad, el modo de identificador de clave, la fuente de clave, el índice de clave y el estado del procedimiento. Se asume que se habrán establecido los atributos PIB que asocian KeyDescriptors en el atributo *macKeyTable* con un dispositivo único o un número de dispositivos. El procedimiento de seguridad de trama entrante incluirá los siguientes pasos:

- Si el campo Security Enabled del campo de control de trama se ha establecido a cero, el procedimiento configurará el nivel de seguridad a cero.
- Si el campo Security Enabled del campo de control de trama está a uno, el procedimiento establecerá que la trama es la que se va a insegurizar y se devolverá el estado de UNSUPPORTED\_LEGACY.
- Si el subcampo Security Enabled del campo de control de trama se ha configurado a uno, el procedimiento asignará el nivel de seguridad y el modo de identificador de clave a los campos correspondientes de la cabecera de seguridad auxiliar de la trama que va a ser insegurizada, y la fuente de clave y el índice de clave a los campos correspondientes en el campo de Key Identifier. Si el nivel de seguridad resultante es cero, el procedimiento devolverá el estado UNSUPPORTED\_SECURITY.
- Si el atributo *macSecurityEnabled* está establecido a FALSE, se establecerá esta trama como la trama a insegurizar y se devolverá el estado de SUCCESS si el nivel de seguridad es igual a cero, y el estado UNSUPPORTED\_SECURITY en otro caso.
- Se determinará si la trama que va a ser insegurizada cumple con los niveles de seguridad mínimos pasando al procedimiento de control del nivel de seguridad entrante los siguientes valores: nivel de

seguridad, tipo de trama, y dependiendo de si la trama es de instrucción, el primer octeto de la MSDU.

- El procedimiento obtendrá los parámetros KeyDescriptor, DeviceDescriptor y KeyDeviceDescriptor utilizando el procedimiento de recuperación de clave de la trama entrante. Si el procedimiento falla, se devolverá el estado UNAVAILABLE\_KEY.
- Se determinará si la trama que va a ser insegurizada cumple con la norma de uso de claves pasando los parámetros (nivel de seguridad, tipo de trama, y dependiendo de si la trama es de instrucción, el primer octeto de la MSDU) al procedimiento de control de uso de la clave entrante. Si el procedimiento falla se devolverá el estado de IMPROPER\_SECURITY\_LEVEL.
- El procedimiento establecerá el contador de trama al valor del campo Frame Counter. Si el contador de trama tiene el valor 0xffffffff, el procedimiento devolverá el estado COUNTER\_ERROR.
- El procedimiento utilizará el elemento ExtAddress del DeviceDescriptor, el contador de trama y el elemento de clave para producir la trama insegurizada de acuerdo al proceso de transformación inversa CCM\*.
- Si este proceso falla, el procedimiento devolverá el estado SECURITY\_ERROR.
- El procedimiento incrementará el contador de trama en uno y establecerá el elemento FrameCounter al valor resultante.
- Si el elemento FrameCounter es igual a 0xffffffff, se establecerá el elemento Blacklisted del KeyDeviceDescriptor.
- El procedimiento devolverá la trama insegurizada y el estado SUCCESS.

# 6 ESPECIFICACIÓN DE LA CAPA PHY

---

Este capítulo especifica las tres opciones de capa PHY para el estándar IEEE 802.15.7.

La capa PHY es responsable de las siguientes tareas:

- Activación y desactivación del transceptor VLC.
- WQI para tramas recibidas.
- Selección de canal.
- Transmisión y recepción de datos.
- Corrección de errores.
- Sincronización.

Las constantes y atributos que gestiona la capa PHY tienen un prefijo general de “a” y “phy” respectivamente.

## 6.1 Modos de operación

Para el cumplimiento del estándar objeto de estudio en este trabajo, la capa PHY implementará al menos uno de los modos obligatorios PHY I o PHY II. Un dispositivo que implemente el modo PHY III también implementará el modo PHY II para realizar las funciones necesarias. Los modos de modulación de capa PHY podrán operar en presencia de atenuación. La modulación OOK bajo condiciones de atenuación proporciona un rango constante y una tasa de datos variable mediante la inserción de un tiempo de compensación, mientras que la modulación VPPM bajo atenuación proporciona una tasa de datos constante y un rango variable mediante el ajuste de la anchura de pulso.

Como se muestra en las Tablas 6-1, 6-2, 6-3, el estándar proporciona codificación de canal para la corrección de errores. PHY I es compatible con la codificación concatenada de Reed-Solomon (RS) y la codificación convolucional (CC) ya que ha sido diseñado para el uso en exteriores con tramas cortas. PHY II y PHY III solo son compatibles con codificación RS. PHY I y PHY II también son compatibles con código RLL (Run-Length Limited)<sup>2</sup> para proporcionar equilibrio DC, recuperación de reloj y mitigación de parpadeo.

Además de modulación y codificación, se proporcionan múltiples tasas ópticas para todos los tipos PHY con vistas a ser compatible con un mayor número de transmisores ópticos (LEDs) para varias aplicaciones. La elección de la tasa óptica utilizada para la comunicación se decide por la subcapa MAC durante la detección de dispositivos. El preámbulo es una secuencia en el dominio del tiempo y no tiene ninguna modulación, codificación de canal o línea de codificación y se enviará a la tasa de reloj elegida por el TX y soportada por el RX. La cabecera PHY se enviará a la menor tasa de datos de la tasa de reloj elegida. La tasa de datos no cambiará a través de la trama entre el preámbulo, cabecera y carga útil.

---

<sup>2</sup> La Codificación Run-Length Limited es una técnica de codificación en línea que se utiliza para enviar datos sobre un canal de comunicación con ancho de banda limitado. El RLL limita la longitud de los bits repetidos durante los cuales la señal no cambia. Si el número de bits repetidos es muy grande la recuperación de reloj es muy difícil, y si es muy corto las frecuencias elevadas se atenuarán por el canal de comunicación.

Tabla 6–1 Modos de operación PHY I

Modulación	Código RLL	Tasa de reloj óptico	FEC		Tasa de datos
			Código Externo (RS)	Código interno (CC)	
OOK	Manchester	200 kHz	(15,7)	1/4	11.67 kb/s
			(15,11)	1/3	22.44 kb/s
			(15,11)	2/3	48.89 kb/s
			(15,11)	ninguno	73.3 kb/s
			ninguno	ninguno	100 kb/s
VPPM	4B6B	400 kHz	(15,2)	ninguno	35.56 kb/s
			(15,2)	ninguno	71.11 kb/s
			ninguno	ninguno	124.4 kb/s
			ninguno	ninguno	266.6 kb/s

Tabla 6–2 Modos de operación PHY II

Modulación	Código RLL	Tasa de reloj óptico	FEC	Tasa de datos
VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS(64,32)	1.25 Mb/s
			RS(160,128)	2 Mb/s
		7.5 MHz	RS(64,32)	2.5 Mb/s
			RS(160,128)	4 Mb/s
		15 MHz	ninguno	5 Mb/s
			RS(64,32)	6 Mb/s
OOK	8B10B	30 MHz	RS(160,128)	9.6 Mb/s
			RS(64,32)	12 Mb/s
		60 MHz	RS(160,128)	19.2 Mb/s
			RS(64,32)	24 Mb/s
		120 MHz	RS(160,128)	38.4 Mb/s
			RS(64,32)	48 Mb/s
		RS(160,128)	76.8 Mb/s	
		ninguno	96 Mb/s	



Tabla 6–3 Modos de operación PHY III

Modulación	Tasa de reloj óptico	FEC	Tasa de datos
4-CSK	12 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	18 Mb/s
4-CSK	24 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	36 Mb/s
16-CSK		RS(64,32)	48 Mb/s
8-CSK		ninguno	72 Mb/s
16-CSK		ninguno	96 Mb/s

## 6.2 Requerimientos generales

### 6.2.1 Plan de bandas

Un dispositivo compatible operará con picos de potencia dentro del espectro de luz visible definido entre 380 nm y 780 nm.

Tabla 6–4 Plan de bandas de longitud de onda de luz visible

Longitud de onda (nm)	Ancho espectral (nm)	Código
380	478	98
		000
478	540	62
		001
540	588	48
		010
588	633	45
		011
633	679	46
		100
679	726	47
		101
726	780	54
		110
	Reservado	
		111

Los códigos que aparecen en la Tabla 6-4 se utilizan para indicar las longitudes de onda que contienen el pico espectral para la trama transmitida y que se indican en la cabecera PHY. Esta información podrá utilizarse por el receptor para optimizar su actividad. Este estándar también soporta el uso de transmisores ópticos de banda ancha (como LEDs) que pueden transmitir en múltiples bandas o tienen interferencia en otras bandas utilizando los conceptos de agregación de canal o canales de guarda.

### 6.2.2 Tolerancia de error máxima para múltiples fuentes ópticas

Si se utilizan múltiples fuentes ópticas para la comunicación, se recomienda que tengan respuestas en frecuencia similares para permitir la comunicación. La entrada digital a todas las fuentes ópticas desde la capa PHY deberá estar sincronizada. La Figura 6-1 muestra la variación permitida de la salida de la fuente óptica asumiendo que la entrada digital está sincronizada. La variación máxima con respecto al nivel de intensidad medio de señal durante el tiempo de subida y el de bajada en la salida de la fuente óptica no variará más del 12.5% del periodo de reloj.

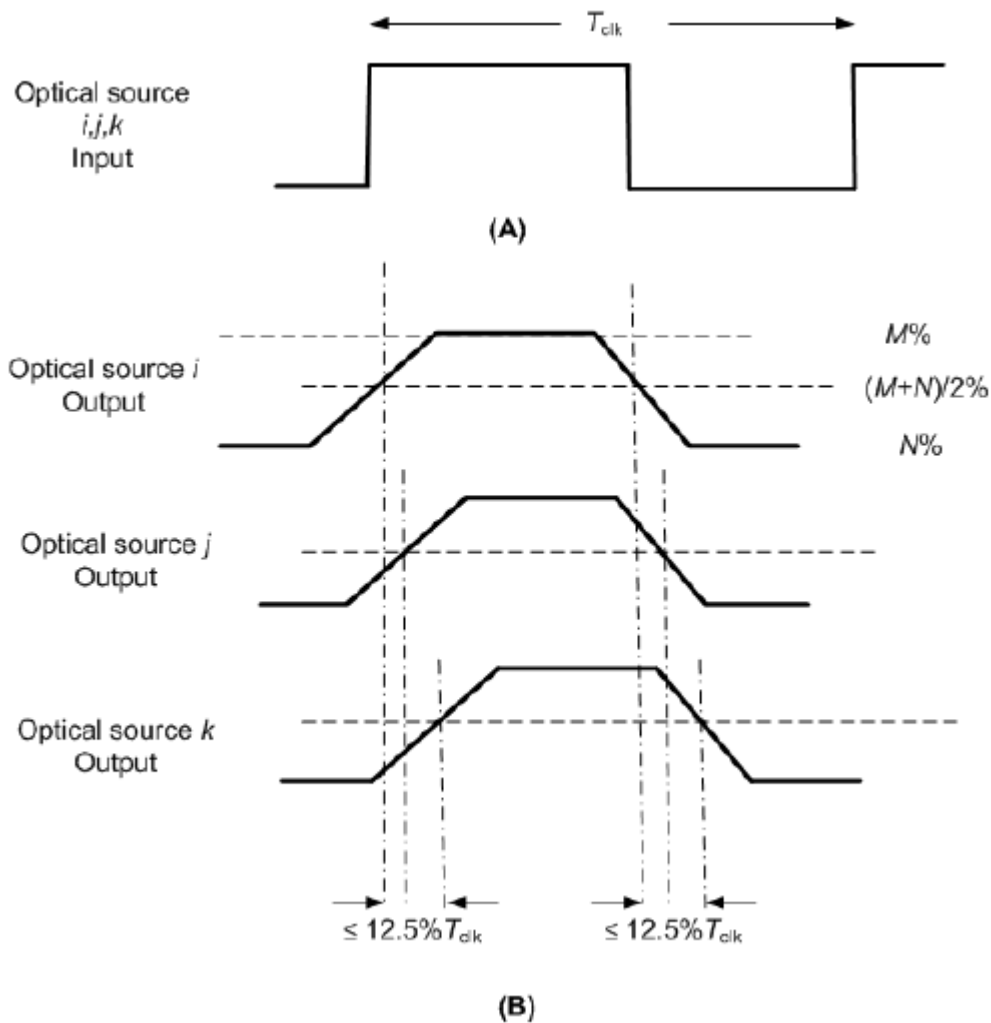


Figura 6-1. Variación máxima permitida en la salida de las fuentes ópticas

### 6.2.3 Periodos LIFS, SIFS y RIFS mínimos

El espaciado entre tramas (IFS) se utiliza para proporcionar espacio entre tramas adyacentes. El espacio entre tramas mínimo depende de los modos de operación MAC. El estándar proporciona tres tipos: largo (LIFS), corto (SIFS) y reducido (RIFS). En las topologías punto a punto y en estrella, los periodos SIFS, LIFS y RIFS se basan en la tasa de reloj óptico negociada por la capa MAC antes del inicio de la comunicación de datos. Cuando se ha seleccionado la tasa de reloj óptico, los periodos SIFS, LIFS y RIFS se fijan a los valores mostrados en la Tabla 6-5. En la topología en estrella, la baliza y los periodos CAP se definen a la tasa de reloj óptico más baja para asegurar acceso al medio. En la topología de difusión, el IFS se define basándose en la tasa de reloj óptico elegida para la difusión de datos a otros dispositivos. Los periodos LIFS, SIFS y RIFS mínimos para cada tipo PHY se muestran en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5 Periodos LIFS, SIFS y RIFS mínimos

PHY	<i>macMinLIFSPeriod</i>	<i>macMinSIFSPeriod</i>	<i>macMinRIFSPeriod</i>	Unidades
PHY I	400	120	40	relojes ópticos
PHY II	400	120	40	relojes ópticos
PHY III	400	120	40	relojes ópticos

#### 6.2.4 Tiempo de respuesta TX-RX

El tiempo de respuesta TX-RX se medirá en la interfaz aire desde el instante de tiempo de la salida de la última transmisión hasta que el receptor está preparado para la recepción de la siguiente trama PHY.

#### 6.2.5 Tiempo de respuesta RX-TX

El tiempo de respuesta RX-TX se medirá en la interfaz aire desde el instante de tiempo de la llegada de la última trama recibida hasta que el transmisor está preparado para la transmisión del asentimiento resultante. El tiempo de comienzo de la transmisión actual se especifica por la subcapa MAC.

#### 6.2.6 Tolerancia de la frecuencia de reloj en la transmisión de datos

La tolerancia de la frecuencia de reloj en la transmisión de datos será como máximo de  $\pm 20$  ppm.

#### 6.2.7 Indicador de la calidad de la longitud de onda (WQI)

##### 6.2.7.1 Soporte WQI en OOK y VPPM

Las medidas de WQI son una caracterización de la fortaleza y/o la calidad de la trama recibida. La medida se podrá realizar utilizando detección de energía en el receptor (ED, *Energy Detection*), una estimación del índice señal-ruido o una combinación de los dos métodos anteriores. Las medidas WQI se realizarán en el rango completo comprendido entre 0x00 a 0xff para cada trama recibida, y se informará del resultado a la subcapa MAC utilizando PD-DATA.indication. Los valores WQI mínimo y máximo (0x00 y 0xff) se asociarán con la menor y mayor señal detectable por el receptor, y deben situarse de forma uniformemente distribuida entre esos dos límites. Como mínimo se utilizarán siete valores únicos de WQI. El valor WQI contendrá el ID del plan de banda (dado en la cabecera PHY de la trama recibida) y el valor correspondiente.

##### 6.2.7.2 Soporte para la indicación de la calidad de longitud de onda en CSK

Un dispositivo será capaz de estimar la calidad del canal de color recibido, donde la calidad del color se definirá como una estimación de la SNR disponible después del CDR, que incluirá todas las pérdidas de implementación asociadas con una arquitectura particular del receptor (cuantización del ruido, errores en la estimación del canal, etc.). Es importante apuntar que las estimaciones podrán mostrar comportamientos de saturación en aquellos valores superiores a los requeridos para la operación en la tasa de datos más alta. Las estimaciones de calidad del enlace se realizarán según la base *frame-by-frame* (trama por trama).

##### 6.2.7.3 Evaluación del canal libre (CCA, *Clear Channel Assessment*)

La capa PHY podrá proporcionar la capacidad de realizar una CCA de acuerdo, al menos, a uno de los siguientes tres métodos:

- CCA Modo 1: Potencia por encima del umbral. La CCA podrá informar sobre un canal ocupado al detectar una potencia por encima del umbral de potencia para la detección.
- CCA Modo 2: Detección de portadora. La CCA podrá informar sobre un medio ocupado en la detección de una señal con las características de modulación del estándar IEEE 802.15.7. Esta señal podrá estar por encima o debajo del umbral de detección.
- CCA Modo 3: Detección de portadora con potencia por encima de la umbral. La CCA podrá informar sobre un medio ocupado solamente en la detección de una señal con las características de modulación referidas en el punto anterior y con una potencia por encima del umbral de detección.

Para cualquier modo CCA, si durante la recepción de una PPDU se recibe la primitiva PLME-CCA.request en la capa PHY, la CCA establecerá que el medio está ocupado. Se considera que la PPDU está en proceso de recepción cuando se produzca la detección del preámbulo, y permanecerá en progreso hasta que se hayan recibido el número de octetos especificados en el PHR.

Se indicará que un canal está ocupado mediante la emisión de la primitiva PLME-CCA.confirm con el estado BUSY.

Se indicará que un canal está libre mediante la emisión de la primitiva PLME-CCA.confirm con el estado IDLE.

El atributo PHY PIB *phyCCAMode* podrá indicar el modo de operación apropiado.

### 6.3 Modos de datos

La capa PHY soportará los modos de transmisión de datos siguientes, como se muestra en la Figura 6-2:

- Modo único
- Modo paquete
- Modo de ráfaga

Además, hay un cuarto modo para la transmisión de datos denominado “*dimmed OOK*” (atenuación OOK), que se utiliza para la transmisión de datos mientras se hace uso del control de atenuación en combinación con la modulación OOK.

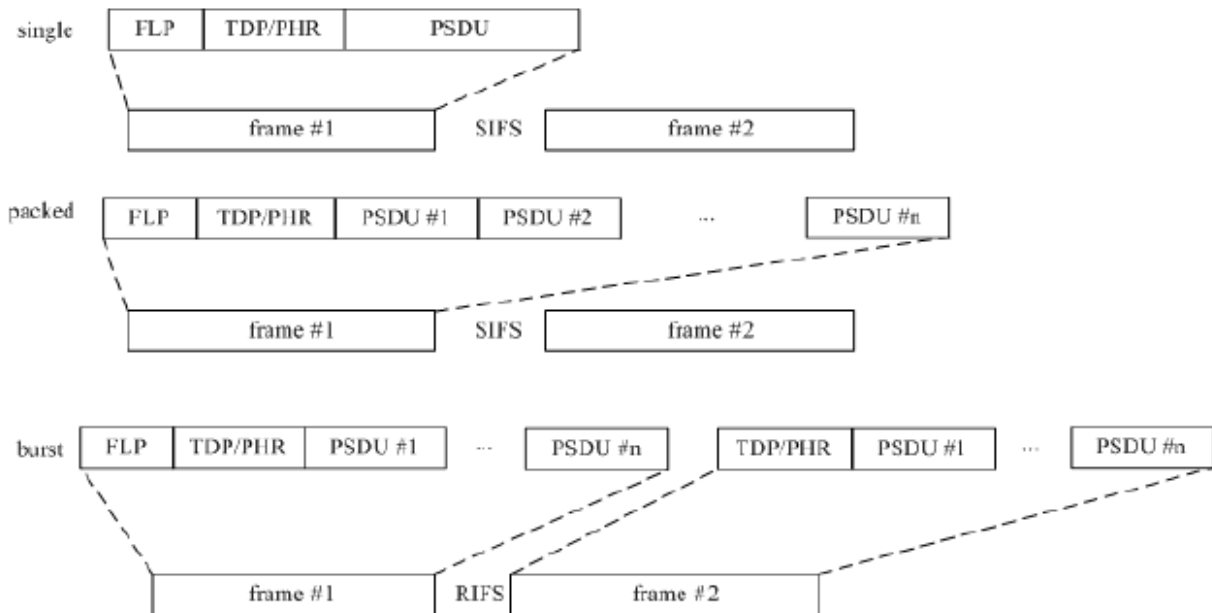


Figura 6-2. Modos de datos soportados por la subcapa MAC (único, paquete y ráfaga)

El modo único transfiere una PPDU por trama y por eso se utiliza para comunicaciones de datos cortas como tramas de asentimiento, asociación, baliza, o modos de información en difusión.

El modo paquete contiene múltiples PPDUs por trama y se utiliza para enviar múltiples PPDUs de forma consecutiva al mismo destino dentro de la trama, de esta forma se consigue un mayor rendimiento. Por consiguiente, en este modo, se elimina la sobrecarga que supone el envío de múltiples cabeceras MAC y PHY proporcionando mayor eficiencia a la capa MAC.

El modo de datos en ráfaga utiliza una longitud de preámbulo PHY reducida después de la primera trama de la ráfaga. Además, se utiliza el RIFS entre tramas en lugar del SIFS. Esto junto con el uso de un preámbulo más corto, incrementa la eficiencia y el rendimiento en este modo.

## 6.4 Mitigación de atenuación y parpadeo

El dispositivo deberá atender todas las peticiones de control de atenuación procedentes de las capas superiores que se indicarán utilizando el atributo PIB *phyDim*. La capa PHY realizará un control de atenuación, utilizando una de las técnicas especificadas en este apartado, cuando el atributo PIB *phyDim* esté establecido.

### 6.4.1 Control de atenuación durante el tiempo de inactividad

#### 6.4.1.1 Patrón de inactividad y compensación de tiempo de atenuación

El patrón de atenuación en banda o fuera de banda se podrá insertar entre tramas de datos. La variación del ciclo de trabajo del patrón podrá resultar en una variación del brillo para el control de atenuación de la luz. También se puede insertar un tiempo de compensación (tiempo de “ON” “OFF” de una fuente de luz) tanto en el patrón de inactividad como en la trama de datos (si se está utilizando modo OOK) para reducir el brillo medio de una fuente de luz.

#### 6.4.1.2 Control de atenuación utilizando el patrón de visibilidad

El patrón de visibilidad es un patrón de inactividad en banda y se envía como parte de la carga útil de una trama CVD. Para realizar el control de atenuación mediante patrones de visibilidad se utilizará un conjunto de patrones de baja resolución con un tamaño de paso del 10 %. Se podrá utilizar cualquier patrón de visibilidad de baja resolución y de cualquier tamaño mientras no haya conflicto entre el patrón de visibilidad y el código RLL válido. Los patrones de baja resolución se utilizarán para desarrollar patrones de visibilidad de alta resolución mediante su promedio a través del tiempo. De esta forma se garantiza que todos los patrones de visibilidad se proporcionarán con el uso de patrones de baja resolución y se repetirán el número de veces necesarias para satisfacer la longitud de trama.

Tabla 6–6 Ejemplos de patrones de visibilidad para códigos 8B10B

Patrón de visibilidad	Porcentaje de visibilidad
11111 11111	100%
11110 11111	90%
11110 11110	80%
11101 11100	70%
11001 11100	60%
10001 11100	50%
00001 11100	40%
00001 11000	30%
00001 10000	20%
00001 00000	10%
00000 00000	0%

### 6.4.2 Control de atenuación durante el tiempo de transmisión de datos

Las tecnologías de control de atenuación durante el tiempo de transmisión de datos dependen de los esquemas de modulación PHY y están establecidas para evitar el parpadeo. Todos los dispositivos deberán cumplir los requerimientos de control de atenuación, pero a un dispositivo no se le requerirá el soporte de comunicaciones para cualquier requisito de atenuación. Debido a la respuesta no lineal del ojo humano a la luz, se deben soportar niveles de atenuación del 0.1%.

### 6.4.2.1 Atenuación para el modo CSK

En el modo CSK, la potencia media total de diferentes fuentes de luz es constante. Para el control de atenuación, la potencia instantánea de una fuente de luz se cambia para ajustarse a la intensidad media del nivel requerido. Por esto, CSK mantiene el centro del color de la constelación de color con la intensidad requerida.

### 6.4.2.2 Atenuación para el modo OOK

La atenuación del modo OOK se apoya en el uso del campo de bit de atenuación OOK establecido en la cabecera PHY. Se puede conseguir precisión en el nivel de atenuación mediante la combinación del uso de la longitud de compensación, el mapeo óptico y la relación de extinción. Si el control de atenuación solicitado tiene como resultado un rendimiento no satisfactorio (generación de parpadeo o desplazamiento de color) mientras se intenta mantener el cumplimiento con este estándar, el dispositivo se des-asociará de la red.

### 6.4.2.3 Atenuación para el modo VPPM

La modulación implementada aquí (ver 8.3.2.1), soporta una resolución de nivel de atenuación del 10 %. Para mantener una resolución de atenuación del 0.1% la capa VPPM PHY utilizará el algoritmo proporcionado en este apartado.

El algoritmo depende de los siguientes símbolos:  $VS_0$ ,  $VS_1$ ,  $VS_2$ , ...,  $VS_{10}$ . El símbolo  $VS_0$  se corresponde con la fuente de luz apagada ( $macDim=0$ ) y  $VS_{10}$  se corresponde con la fuente de luz completamente encendida ( $macDim = 1000$ ). Los símbolos  $VS_1$  hasta  $VS_9$  se corresponden con los símbolos VPPM para  $d = 0.1$  hasta 0.9.

El algoritmo se compondría de las siguientes etapas:

- Se elige el nivel de atenuación  $macDim$ .
- Primero se determina el tipo de símbolo correspondiente.  $k_1 = \lfloor macDim/100 \rfloor$  y  $k_2 = \lceil macDim/100 \rceil$  donde  $\lfloor \bullet \rfloor$  redondea el valor contenido al siguiente número entero menor y  $\lceil \bullet \rceil$  al siguiente número entero mayor.
- Ahora se calcula el número de veces que va a enviarse cada símbolo:  $rep\_2 = macDim - 100 \times k_1$  y  $rep\_1 = 100 - rep\_2$ .
- Seguidamente, para conseguir el nivel de atenuación  $macDim$  deseado:
  - Se asigna un tiempo  $VS_{k_1} rep\_1$  y después
  - Se asigna el tiempo  $VS_{k_2} rep\_2$
  - Si el número de símbolos de datos VPPM que va a enviarse no es un módulo de 100, entonces se añaden los símbolos *idle-pattern* para que el número de símbolos VPPM que va a enviarse se corresponda con un múltiplo de 100. La configuración de los datos VPPM y los símbolos del patrón de inactividad se muestra en la Figura 6-3.

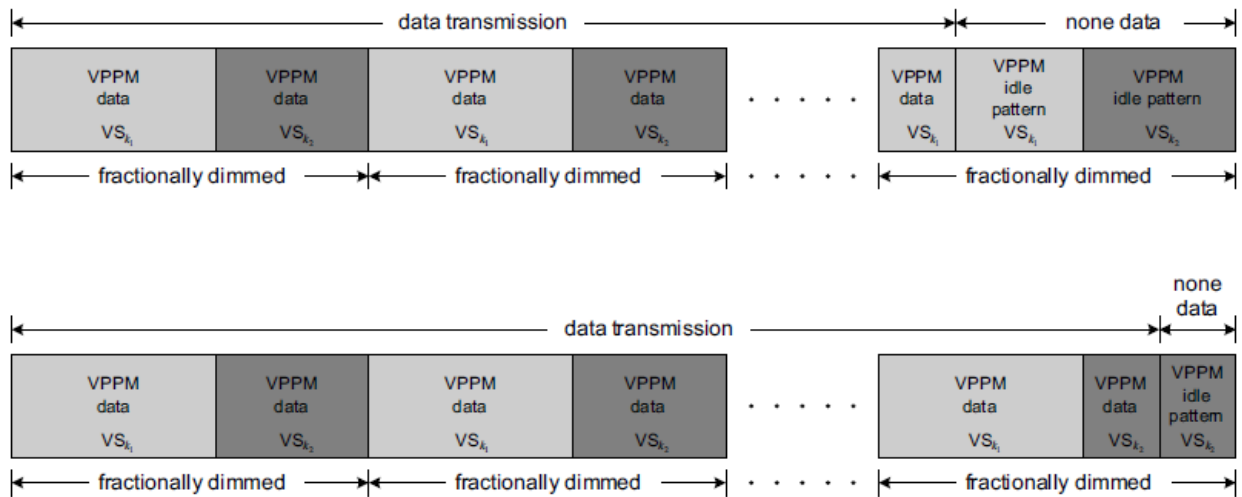


Figura 6-3. Ciclo proporcional entre dos símbolos de trabajo para conseguir la atenuación fraccional con una precisión del 0.1% en el modo VPPM

El panel superior muestra el relleno con los patrones de inactividad  $VS_{k1}$  y  $VS_{k2}$  mientras que el panel inferior muestra el relleno con patrones de inactividad  $VS_{k2}$ .

Hay que resaltar que, durante el tiempo de transmisión de datos, solo los símbolos entre  $VS_1$  y  $VS_9$  pueden transportar datos de información.  $VS_0$  y  $VS_{10}$  no pueden transmitir datos porque no presentan transiciones durante estos dos símbolos. Por tanto, cuando se requiere que el valor *macDim* sea menor que 100, los datos de información se transportan solo en los símbolos  $VS_1$ . De forma similar, la información de datos se transporta solo en los símbolos  $VS_9$  cuando se requiere que el valor *macDim* sea mayor a 900. Se debe cumplir con todos los requerimientos de atenuación aun cuando no sea posible la transmisión de datos.

Por defecto se deberá utilizar un ciclo de trabajo del 50 % para VPPM. Si la atenuación se respalda mediante el uso de modulación VPPM, la subcapa MAC deberá enviar una instrucción de notificación de atenuación. Tanto el TX como el RX deberán utilizar el algoritmo para control de atenuación VPPM. El transmisor debe cumplir con los requerimientos de atenuación impuestos por la capa superior y, además, es recomendable que utilice la información sobre las capacidades del receptor para la gestión del control de atenuación.

### 6.4.3 Mitigación del parpadeo

Tal y como se ha explicado, la mitigación del parpadeo puede dividirse en mitigación intratrama y mitigación intertrama.

La mitigación del parpadeo intratrama se refiere a la mitigación del parpadeo dentro de la transmisión de una trama de datos. Con el uso del modo de atenuación OOK y el código RRL se evita el parpadeo intratrama en la modulación OOK. La modulación VPPM no causa parpadeo intratrama de forma interna y también utiliza código RLL. En la modulación CSK se evita el parpadeo intratrama asegurando que la potencia media de múltiples fuentes de luz es constante junto con la codificación y el uso de tasas ópticas altas (MHz).

La mitigación del parpadeo intertrama se aplica tanto a la transmisión de datos (modo RX) como a los periodos de inactividad. Los patrones de visibilidad y los patrones de inactividad podrán ser utilizados por los transmisores VLC para asegurar que las emisiones de luz tienen el mismo brillo a lo largo de los MFTPs adyacentes que durante la transmisión de datos. Esos patrones podrán modularse en banda o fuera de banda.

Cuando se cambian los ajustes de atenuación, las capas MAC y PHY ajustan la transmisión de datos y la transmisión en el tiempo de inactividad para establecer los nuevos ajustes de atenuación. En la Tabla 6-7 se proporcionan las diferentes técnicas de mitigación para el parpadeo intertrama o intratrama.

Tabla 6-7 Mitigación del parpadeo para diferentes modos de modulación

Mitigación del parpadeo	Transmisión de datos	Periodos de inactividad o recepción (parpadeo intertrama)
Modulación OOK	Modo de atenuación OOK, código RLL	
Modulación VPPM	VPPM garantiza inexistencia del parpadeo intratrama, código RLL	Patrones de inactividad/visibilidad
Modulación CSK	Potencia media constante a través de múltiples fuentes de luz, codificación y altas tasas ópticas de reloj (MHz)	

#### 6.4.4 Estabilización del color en CSK en el transmisor

Este modo es opcional y se utiliza por dispositivos PHY III. El modelo de control en bucle para el esquema de estabilización del color se muestra en la Figura 6-4. El objetivo de este mecanismo de control es estabilizar el centro de gravedad del diagrama de constelación CSK. Los patrones de visibilidad se envían desde el TX tribanda de la PHY III al RX tribanda. Se utiliza un enlace adicional de vuelta para retransmitir las señales al transmisor tribanda, donde se corregirán las corrientes de conducción de los LEDs de forma que el centro de gravedad del diagrama de constelación vuelva a su posición inicial.

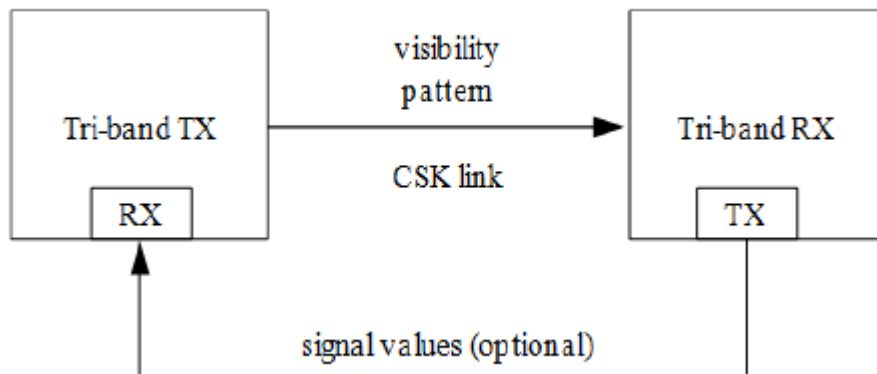


Figura 6-4. Bucle de control para la estabilización del color

La Figura 6-5 muestra con detalle el mecanismo de estabilización del color. Después de la transmisión de los patrones de visibilidad, las señales recibidas pasan por los bloques D/A y después se retransmiten al transmisor CSK. En el módulo de estabilización del color se calculan los factores de compensación  $c$  para cada banda. A partir de ahí, todos los valores de la señal que salen del convertidor  $xy-to-(i,j,k)$  se multiplican por los respectivos factores de compensación.

En el modo de estabilización del color, los patrones de visibilidad que van a utilizarse son patrones de inactividad en banda con un 100% de visibilidad. Los valores  $xy$  de la luz emitida coinciden con el color elegido para la fase del patrón de visibilidad. La longitud del patrón de visibilidad en la trama CVD se elige para que se alcance el equilibrio térmico del color en todas las bandas emitidas antes del envío de la siguiente trama CVD.



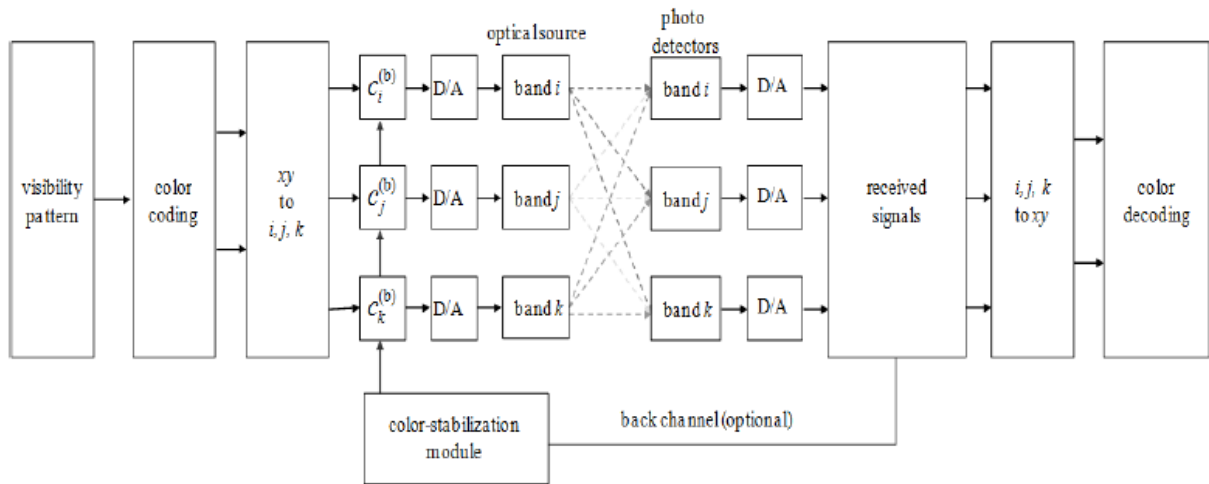


Figura 6-5. Implementación del enlace de estabilización del color

### 6.5 Formato de PPDU

Por conveniencia, la estructura de la trama PPDU se presenta de forma que el campo situado en el extremo izquierdo se transmitirá y recibirá en primer lugar. En todos los campos de múltiples octetos se transmitirá y recibirá primero el octeto menos significativo, y en cada uno de los octetos se transmitirá y recibirá primero el bit menos significativo (LSB). El mismo orden de transmisión se deberá aplicar al campo de datos transmitido entre la capa PHY y la subcapa MAC. En la Figura 6-6 se muestra la estructura de la trama PPDU.

<b>Preamble</b>	<b>PHY header</b>	<b>HCS</b>	<b>Optional fields</b>	<b>PSDU</b>
SHR	PHR			PHY payload

Figura 6-6. Formato de la PPDU

#### 6.5.1 Preámbulo

Este campo se utiliza por el transceptor para obtener la sincronización mediante la llegada de un mensaje. El estándar define un patrón de bloqueo rápido (FLP, *Fast Locking Pattern*) seguido de la elección de cuatro patrones dependientes de la topología (TDPs, *Topology Dependent Patterns*) con el propósito de distinguir entre diferentes topologías PHY. La subcapa MAC seleccionará la tasa de reloj óptico para la comunicación durante el proceso de selección de tasa de reloj. Así mismo, el preámbulo se enviará a una tasa de reloj elegida por el TX y soportada por el RX. El preámbulo es una secuencia en el dominio del tiempo y no tiene codificación de canal o codificación de línea.



Figura 6-7. Transmisión de preámbulo

El preámbulo deberá transmitirse utilizando una modulación OOK. El campo preámbulo para el modo de datos único y para el modo de datos en paquete se establecerá como se muestra en la Figura 6-7. Para PHY III las tres fuentes de luz transmitirán el mismo preámbulo de forma simultánea en las bandas de frecuencia soportadas dentro de la tolerancia de error.

Para el modo de transmisión en difusión, el FLP se incluirá solo en la primera trama, en las tramas siguientes no será necesario ya que el receptor está sincronizado con el transmisor. Esto reduce la longitud del preámbulo a la mitad proporcionando un mejor rendimiento de la capa MAC

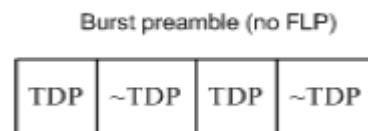


Figura 6-8. Transmisión de preámbulo de difusión

En la Tabla 6-8 se define el uso de TDP para una topología específica.

Tabla 6-8 Asignación de TPD para varias topologías

TDP	Topología
P1	Topología independiente (visibilidad)
P2	Punto a punto
P3	Estrella
P4	Difusión

Se utilizará el mismo preámbulo para todos los tipos PHY. El número de repeticiones del FLP puede ser extendido por la subcapa MAC durante el tiempo de inactividad o para diferentes modos de operación con el objetivo de conseguir una mejor sincronización.

## 6.5.2 Cabecera PHY

La cabecera PHY, como se muestra en la Tabla 6-9, se transmitirá mediante una modulación OOK. Para PHY III, todas las fuentes de luz transmitirán la misma cabecera de forma simultánea dentro de la tolerancia de error y se establecerá el campo de identificación del plan de banda a la mínima longitud de onda. La cabecera PHY se enviará a la menor tasa de datos según la tasa de reloj óptico elegida. Si el bit de extensión de atenuación OOK está establecido para el soporte de atenuación en la cabecera PHY, se transmiten otros campos después de la cabecera PHY como se muestra en la Tabla 6-10.

Tabla 6–9 Cabecera PHY

Campos de cabecera PHY	Ancho de bit	Explicación de uso
Modo en difusión	1	Reduce el preámbulo y el IFS
Número de canal	3	ID del plan de banda
MCS ID	6	Proporciona información sobre el tipo PHY y la tasa de datos
Tamaño PSDU	16	Tamaño superior a $aMaxPHYFrameSize$
Extensión de atenuación OOK	1	Información sobre el tiempo de compensación, resincronización y tamaño de la subtrama
Campos reservados	5	Uso futuro

Tabla 6–10 Extensión de atenuación OOK

Campos de extensión	Ancho de bit	Explicación de uso
Longitud de compensación	10	Longitud de compensación en relojes ópticos
Longitud de resincronización	4	Número de relojes ópticos de sincronización
Longitud de subtrama	10	Longitud de subtrama en relojes ópticos
OFCS	8	Campo de control de secuencia opcional

### 6.5.3 Cabecera de control de secuencia (HCS)

La cabecera PHY se protegerá con 2 octetos CRC-16 HCS. Los bits HCS se procesarán en el orden de transmisión y los registros se iniciarán a unos.

### 6.5.4 Campos opcionales

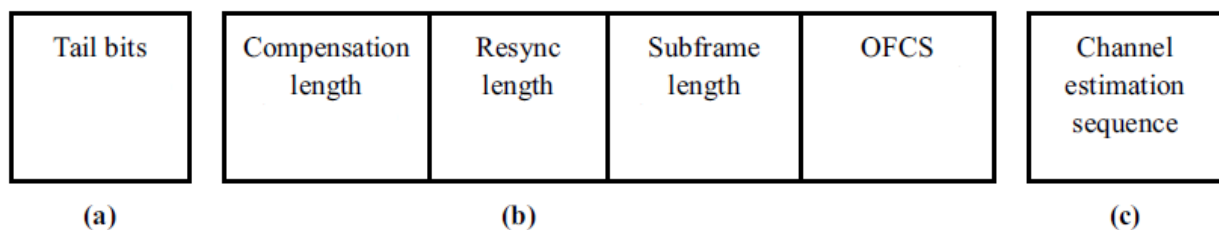


Figura 6-9. Campos opcionales de PPDU

Los campos opcionales mostrados en la Figura 6-9 (a) se transmitirán solo cuando se utilice PHY I con un reloj óptico de 200 kHz basado en el MCS ID elegido en el PHR. Los campos opcionales en la Figura 6-9 (b) se transmitirán después de los bits de cola solo si el bit de atenuación OOK se ha establecido en el PHR. El campo opcional en la Figura 6-9 (c) se transmitirá solo si se ha seleccionado PHY III basándose en el MCS ID elegido en el PHR. El modo de atenuación OOK no se utilizará con PHY III, es decir los campos opcionales (b) y (c) nunca se utilizarán simultáneamente. Los campos (a) y (c) tampoco se transmitirán simultáneamente ya que corresponden a diferentes tipos PHY. A continuación, se da una breve explicación sobre los campos opcionales que se han mencionado:

- **Bits de cola (Tail bits):** se añadirán seis bits de cola de ceros después del HCS cuando se utilice PHY I con una tasa de reloj óptico de 200 kHz.

- **Longitud de compensación** (*Compensation length*): contiene un valor de 10 bits que indica el número de símbolos de compensación definidos por el usuario. Cuando se haya utilizado, este campo se establecerá a un valor entre 0 y 1023.
- **Longitud de resincronización** (*Resync length*): tiene un valor de 4 bits que indica el número de símbolos de resincronización a la tasa de reloj óptica. El patrón de resincronización se define de forma que coincida con el FLP. Cuando se haya utilizado se establecerá un valor de 0 a 15 con un valor por defecto de 15.
- **Generación y longitud de subtrama** (*Subframe length and generation*): tiene un valor de 10 bits que indica el número de bits de datos no codificados en la subtrama. La subtrama se generará en el transmisor después de que se haya determinado el FCS y se haya aplicado el FEC teniendo en cuenta que estos valores no incluirán los símbolos de compensación y de resincronización. Todas las subtramas deberán tener la misma longitud excepto la última subtrama que deberá truncarse para cumplir con la longitud de trama.
- **Generación de secuencia de control de campo opcional** (*Optional field check sequence generation*): el valor la secuencia de control de campo opcional de la PPDU se calcula a través de la longitud de compensación, la longitud de resincronización y el campo de longitud de subtrama.
- **Secuencia de estimación de canal** (*Channel estimation sequence*): las secuencias de estimación de canal son tres secuencias de 8 bits y se utilizan solo para la operación en PHY III. La información sobre PHY III se obtiene después de decodificar la cabecera PHY.

### 6.5.5 Campo PSDU

El campo PSDU tiene longitud variable y transporta los datos de la trama PHY. El FCS se adjuntará si la PSDU tiene una carga útil distinta de cero bytes. Se añaden al final de la PSDU seis bits de cola de ceros si se utiliza PHY I con tasas de datos de 11.67 kb/s, 24.44 kb/s o 48.89 kb/s. La estructura del campo PSDU se muestra en la Figura 6-10.

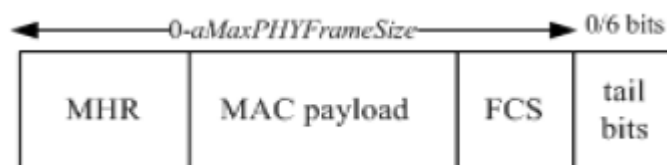


Figura 6-10. Estructura del campo PSDU

La estructura completa de la PPDU de la capa PHY se muestra en la Figura 6-11

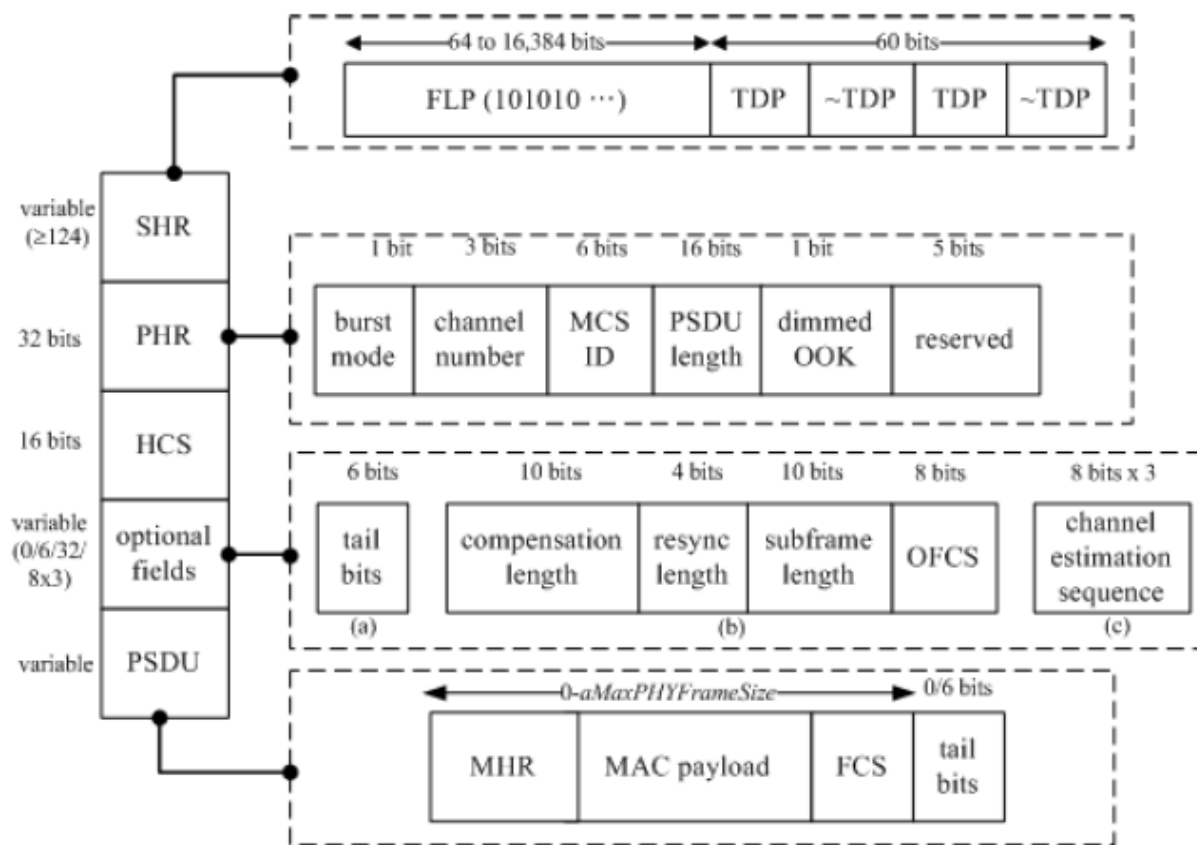


Figura 6-11. Estructura de PPDU



# 7 ESPECIFICACIONES DEL SERVICIO PHY

La capa PHY proporciona una interfaz entre la subcapa MAC y el canal óptico físico. La capa PHY incluye de forma conceptual una entidad de gestión llamada PLME que proporciona las interfaces de servicio de gestión de capas cuyas funciones de gestión pueden ser invocadas. La PLME es también responsable del mantenimiento de la base de datos de los objetos gestionados que pertenezcan a la capa PHY. La base de datos se conoce como PHY PAN *information base* (PIB).

La Figura 7-1 representa los componentes e interfaces de la capa PHY.

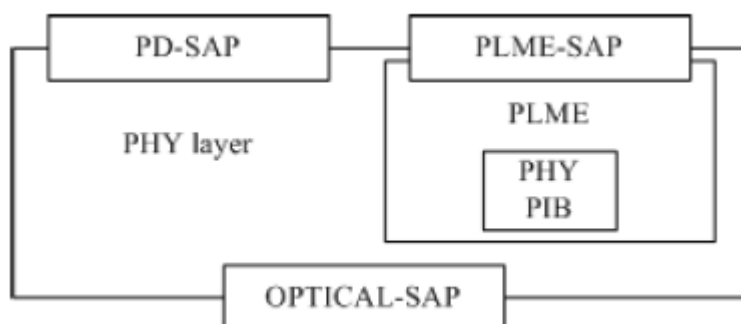


Figura 7-1. Puntos de acceso al servicio de la capa PHY

La capa PHY proporciona dos servicios, a los que se accede a través de dos SAPs: el servicio de datos PHY, accesible a través del SAP de datos PHY (PD-SAP), y el servicio de gestión PHY, accesible a través del SAP PLME (PLMESAP). El SAP óptico proporciona una interfaz entre la capa PHY y el canal óptico. Cualquier controlador de fuente de luz requerido se considera como parte del canal óptico.

## 7.1 Servicio de gestión PHY

El PLME-SAP permite el transporte de las instrucciones de gestión entre el MLME o el DME y la PLME.

### 7.1.1 PLME-CCA.request

Esta primitiva solicita que la PLME realice una CCA. Es generada por la MLME y emitida a su PLME si el algoritmo de acceso requiere una evaluación del canal.

### 7.1.2 PLME-CCA.confirm

Esta primitiva informa sobre los resultados del CCA. Se genera en la PLME y se emite a sus MLME en respuesta a una primitiva de petición PLME-CCA.request. Cuando la PHY haya completado el CCA, la PLME emitirá la primitiva de confirmación con el estado BUSY o IDLE, dependiendo del resultado del CCA. Si la primitiva de petición se recibe mientras que el transceptor está deshabilitado o el transmisor habilitado, la PLME emitirá la primitiva con el estado de TRX\_OFF o TX\_ON, respectivamente.

### 7.1.3 PLME-GET.request

Esta primitiva solicita información sobre un atributo PHY PIB dado. Se genera en la MLME y se emite a su PLME para obtener información del PHY PIB.

### 7.1.4 PLME-GET.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado de una petición de información del PHY PIB. Se genera en la PLME y se emite a la MLME en respuesta a la primitiva de petición explicada anteriormente. Si el identificador del atributo PIB no se encuentra en la base de datos, el PLME emitirá la primitiva con el estado de UNSUPPORTED\_ATTRIBUTE. Si el atributo PHY PIB se recupera con éxito se emitirá con el estado SUCCESS.

### 7.1.5 PLME-SET.request

Esta primitiva intenta establecer el valor dado en el atributo PHY PIB indicado. Se genera en la MLME y es emitida a su PLME para escribir al atributo PHY PIB indicado.

### 7.1.6 PLME-SET.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado del intento de configuración del atributo PIB. Se genera por la PLME y se emite a su MLME en respuesta a la primitiva de petición anterior. La primitiva contendrá el estado UNSUPPORTED\_ATTRIBUTE si el atributo especificado en el parámetro PIBAttribute no se encuentra en la base de datos. En caso de que el valor especificado en el parámetro PIBAttributeValue no esté dentro del rango establecido la PLME emitirá la primitiva con el estado INVALID\_PARAMETER. Si el atributo PHY PIB se escribe con éxito, la primitiva tendrá el valor SUCCESS.

### 7.1.7 PLME-SET-TRX-STATE.request

Esta primitiva solicita que la entidad PHY cambie el estado interno de operación del transceptor. El receptor tendrá los siguientes tres estados:

- Transceptor deshabilitado (TRX\_OFF).
- Transmisor habilitado (TX\_ON).
- Receptor habilitado (RX\_ON).

Se genera por la MLME y se emite a su PLME cuando el estado operacional actual del receptor necesita cambiarse.

### 7.1.8 PLME-SET-TRX-STATE.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado de la petición de cambio del estado operativo interno del transceptor. Se genera por la PLME y se emite a su MLME después de intentar el cambio del estado de operación interno del transceptor.

### 7.1.9 PLME-SWITCH.request

Esta primitiva es utilizada por la DME para solicitar que la entidad PHY seleccione el cambio para permitir las células apropiadas en el SW-BIT-MAP. Se genera en la DME y se emite a su PLME cuando la selección de célula actual necesita cambiarse.

### 7.1.10 PLME-SWITCH.confirm

Esta primitiva informa sobre el resultado de la petición de cambio de la célula de operación actual. Se genera en la PLME y se emite a su DME después del intento de cambio de célula.

## 7.2 Servicio de datos PHY

El PD-SAP soporta el transporte de MPDUs entre la subcapa MAC local y la entidad de capa PHY local.



### 7.2.1 PD-DATA.request

Esta primitiva solicita la transferencia de datos desde la subcapa MAC para formar una PSDU en la entidad PHY local. Se genera por la entidad de subcapa MAC local y se emite a su entidad PHY para la petición de transmisión de una PPDU.

### 7.2.2 PD-DATA.confirm

Esta primitiva confirma el final de la transmisión de los datos desde una entidad de subcapa MAC local. Es generada por la entidad PHY y se emite a su entidad de subcapa MAC en respuesta a la primitiva de petición anterior. Siempre y cuando el transmisor esté activado (TX\_ON), la capa PHY construirá primero una PPDU que contenga la PSDU suministrada y, a continuación, transmitirá la PPDU. Cuando la entidad PHY haya completado la transmisión, emitirá una primitiva PD-DATA.confirm con el estado SUCCESS.

Si la primitiva de petición se recibe mientras que el receptor está habilitado (RX\_ON) o si el transceptor está deshabilitado (TRX\_OFF), la entidad PHY emitirá la primitiva de confirmación con el estado RX\_ON o TRX\_OFF, respectivamente.

### 7.2.3 PD-DATA.indication

Esta primitiva indica la transferencia de datos desde la capa PHY a la entidad de subcapa MAC local. Se genera por la entidad PHY y se emite a su entidad de subcapa MAC para transferir una PSDU recibida. La primitiva no se generará si el campo psduLength recibido es cero o mayor que *aMaxPHYFrameSize*.



# 8 ESPECIFICACIONES DE PHY I

El modo PHY I se dirige a aplicaciones que requieran bajas tasas de datos. Para PHY I, la cabecera PHY se enviará a 11.67 kb/s si se selecciona la tasa de reloj óptico 200 kHz o a 35.56 kb/s si se selecciona la tasa de reloj óptico de 400 kHz. Es obligatorio el soporte para 11.67 kb/s a 200 kHz como mínimo.

La implementación de referencia del modulador se muestra en la Figura 8-1.

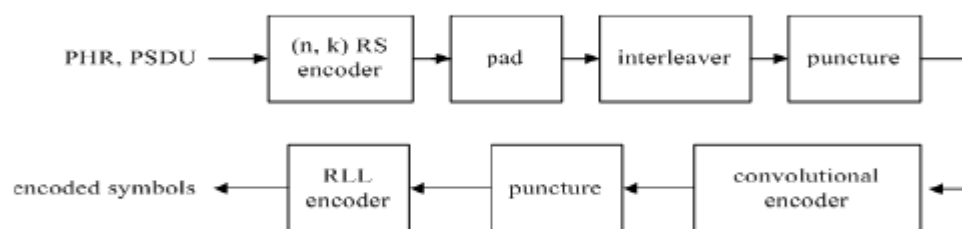


Figura 8-1. Modulador de referencia para PHY I

Para PHY I, se utiliza código concatenado con la combinación de un código convolucional exterior y un código RS interno. La salida del codificador RS (Reed-Solomon) se rellena con ceros para formar un límite de intercalado. El relleno de ceros se descarta y los resultados se envían al codificador convolucional interno. Los campos PHR y PSDU de la trama están sujetos al FEC para la protección contra errores. El PHR se codifica utilizando parámetros que se corresponden con la tasa de datos más baja de la tasa de reloj negociada.

## 8.1 Codificador externo de corrección de errores hacia adelante

Los códigos RS sistemáticos son utilizados por el FEC PHY I externo con  $GF^3(16)$ , generados por el polinomio  $x^4 + x + 1$ . Los generadores de códigos RS(n,k) para PHY I se proporcionan en la Tabla 8-1, donde  $\alpha$  es un elemento de la primitiva en  $GF(16)$ .

Tabla 8-1 Polinomios generadores

(n,k)	g(x)
(15,11)	$x^4 + \alpha^{13}x^3 + \alpha^6x^2 + \alpha^3x + \alpha^{10}$
(15,7)	$x^8 + \alpha^{14}x^7 + \alpha^2x^6 + \alpha^4x^5 + \alpha^2x^4 + \alpha^{13}x^3 + \alpha^5x^2 + \alpha^{11}x + \alpha^6$
(15,4)	$x^{11} + \alpha^9x^{10} + \alpha^8x^9 + \alpha^4x^8 + \alpha^9x^7 + \alpha^{13}x^6 + \alpha^4x^5 + \alpha^{12}x^4 + \alpha^4x^3 + \alpha^5x^2 + \alpha^3x + \alpha^6$
(15,2)	$x^{13} + \alpha^3x^{12} + \alpha^8x^{11} + \alpha^9x^{10} + \alpha^2x^9 + \alpha^4x^8 + \alpha^{14}x^7 + \alpha^6x^6 + \alpha^{10}x^5 + \alpha^7x^4 + \alpha^{13}x^3 + \alpha^{11}x^2 + \alpha^5x + \alpha$

El código Reed-Solomon puede acortarse en el último bloque si no cumple con los requerimientos de tamaño de bloque establecidos. En este caso no se requiere relleno con ceros para el código RS. El código RS reducido

<sup>3</sup> GF (Galois Field), **cuerpo finito, campo finito, campo de Galois**: es un cuerpo definido sobre un conjunto finito de elementos. Un campo finito se establece de forma que se definen las operaciones de multiplicación, suma, resta y división y se satisfacen reglas básicas. Todos los cuerpos finitos tienen un número de elementos  $q=p^n$ , para algún número primo  $p$  y algún entero positivo  $n$ . Para todo primo  $p$ , los enteros módulo  $p$  forman un cuerpo de  $p$  elementos  $GF(p)$

se utiliza para tramas cuyo tamaño no coincide con los límites de palabra de código a través de las siguientes operaciones de minimización del relleno.

Comenzando con un código RS(n,k), se puede conseguir un código recortado RS(n-s,k-s) de la siguiente forma:

- Rellenar los k-s símbolos RS con s símbolos RS de cero.
- Codificar utilizando el codificador RS(n,k).
- Borrar el relleno de ceros (no transmitirlos).
- En el decodificador, añadir ceros y después decodificar.

## 8.2 Codificador interno de corrección de error hacia adelante

El código interno se basa en un código convolucional madre de tasa 1/3 de longitud limitada K=7 y con el polinomio generador establecido con los valores:  $g_0=133_8$ ,  $g_1=171_8$ ,  $g_2=165_8$  como se muestra en la Figura 8-2.

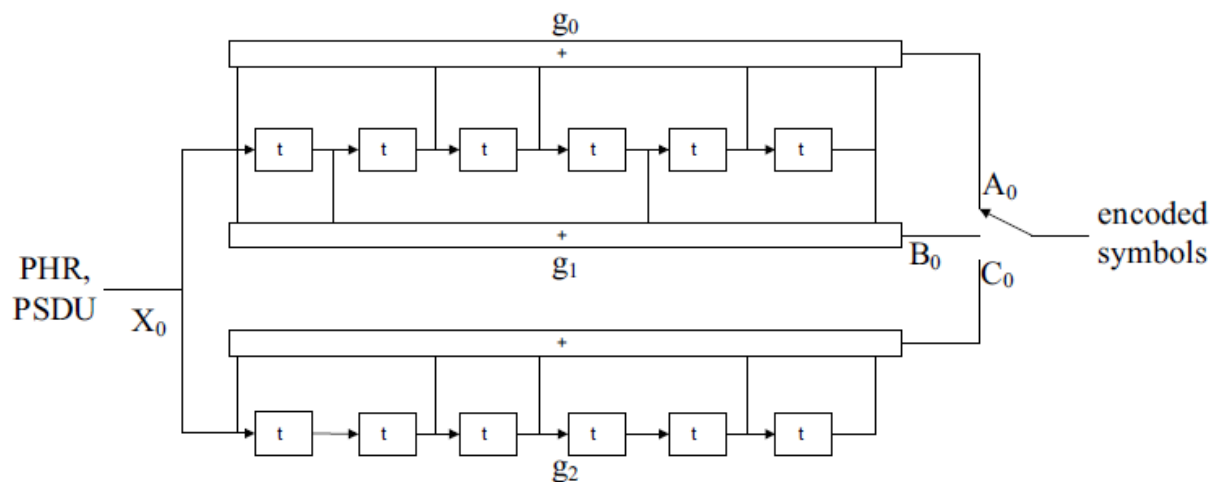


Figura 8-2. Código convolucional madre de tasa 1/3 con longitud limitada 7

Se añadirán seis ceros como bits de cola al final de la codificación para terminar el codificador convolucional con un estado de todos los bits finales a cero. El bit de cola de ceros se aplicará tanto a la cabecera como a la carga útil cuando se utilice el código convolucional interno.

### 8.2.1 Código de tasa 1/4

El código de tasa 1/4 se obtiene mediante la realización de una perforación o *puncturing* (eliminación de bits redundantes) del código madre de tasa 1/3 con uno de tasa 1/2 como se muestra en la Figura 8-3, utilizando después una simple repetición de código como se muestra en la Figura 8-4.

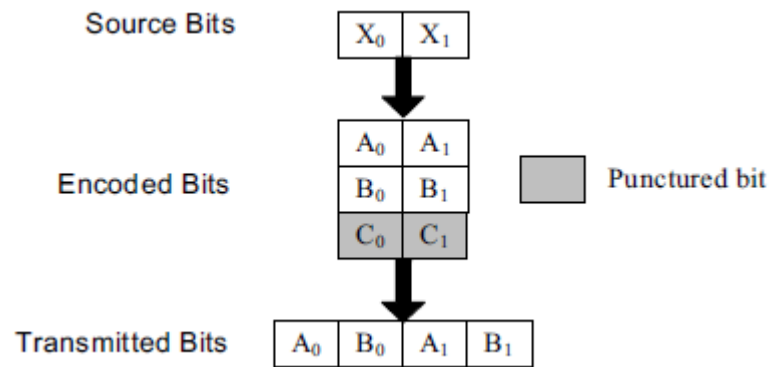


Figura 8-3. Patrón de *puncturing*/perforado para obtener un código de tasa 1/2

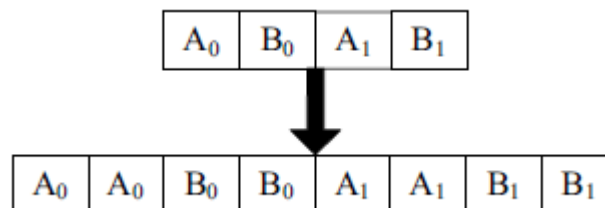


Figura 8-4. Patrón de repetición utilizado para obtener un código efectivo de tasa 1/4

## 8.2.2 Código de tasa 1/3

El código de tasa 1/3 se obtiene mediante el uso de las salidas del código madre de tasa 1/3 de la Figura 8-2.

## 8.2.3 Código de tasa 2/3

El código de tasa 2/3 se obtiene mediante la perforación del código madre de tasa 1/3 como se muestra en la Figura 8-5.

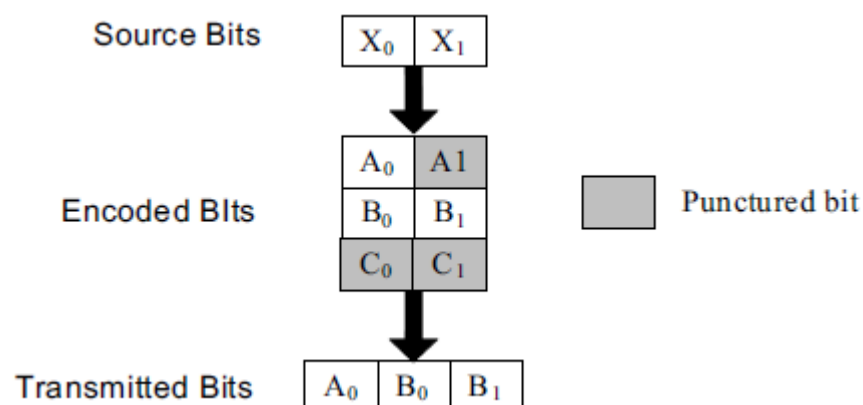


Figura 8-5. Patrón de perforado/puncturing para obtener el código de tasa 2/3

## 8.3 Codificador run-length limiting

### 8.3.1 Codificación 4B6B para modos VPPM

Todos los modos VPPM PHY I utilizan codificación 4B6B. La codificación 4B6B expande los símbolos

codificados de 4 bits a 6 bits. El número de 1 y 0 en cada símbolo VPPM codificado es siempre igual a 3. La Tabla 8-2 define el código 4B6B.

Tabla 8–2 Mapeo de la entrada 4B con la salida 6B

4B (entrada)	6B (salida)	Hex
0000	001110	0
0001	001101	1
0010	010011	2
0011	010110	3
0100	010101	4
0101	100011	5
0110	100110	6
0111	100101	7
1000	011001	8
1001	011010	9
1010	011100	A
1011	110001	B
1100	110010	C
1101	101001	D
1110	101010	E
1111	101100	F

Las características del código 4B6B son las siguientes:

- Siempre al 50% del ciclo de trabajo durante un símbolo codificado.
- Código limitado en longitud con equilibrio DC.
- Capacidad de detección de errores.
- La longitud del código está limitada a cuatro.
- Permite la recuperación de reloj.

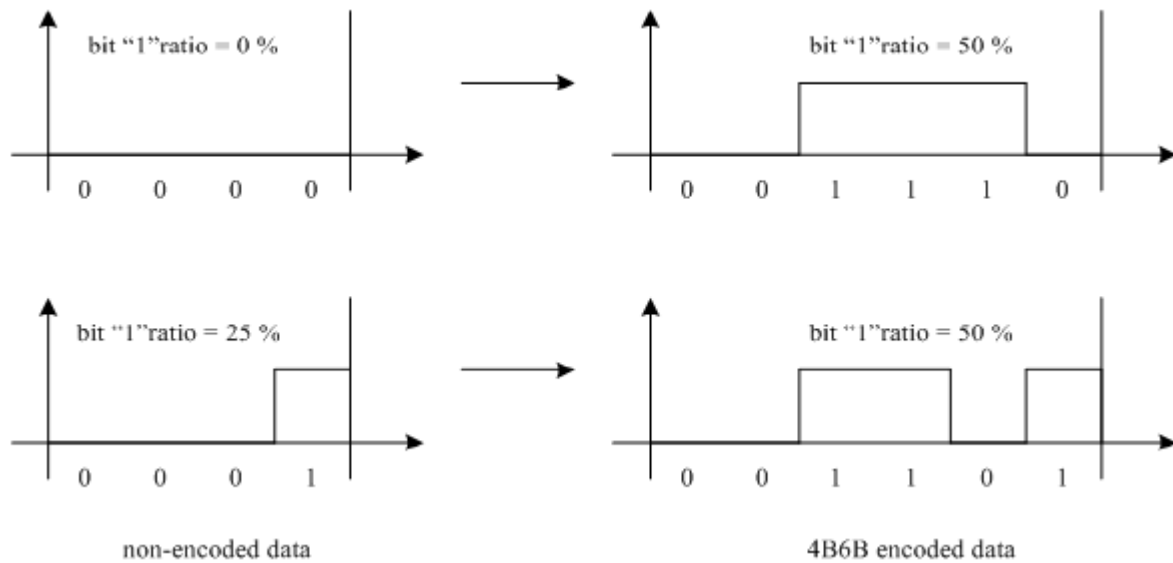


Figura 8-6. Comparación entre símbolos no codificados y codificados con 4B6B

### 8.3.2 Codificación Manchester para el modo OOK

Todos los modos OOK PHY I utilizarán la codificación Manchester. El código Manchester expande cada bit dentro de un símbolo de 2 bits codificado como se muestra en la Tabla 8-3.

Tabla 8-3 Codificación Manchester

bit	Símbolo Manchester
0	01
1	10

#### 8.3.2.1 Mapeo de datos para VPPM

El mapeo de datos para VPPM se define en la Tabla 8-4. El valor físico mapeado del dato '0' lógico tiene una transición desde 'high' (alto) a 'low' (bajo) y el valor físico mapeado del dato '1' lógico tiene una transición de 'low' a 'high' como se muestra en la tabla. La variable  $d$  en la Tabla 8-4 se corresponde con el ciclo de trabajo VPPM y se asigna por el mecanismo del control de atenuación visto anteriormente. Se puede variar en pasos de 0.1.

Tabla 8-4 Definición del mapeo de datos para el modo VPPM

Valor lógico	Valor físico	
	$d$ es el ciclo de trabajo del modo VPPM ( $0.1 \leq d \leq 0.9$ )	
0	High	$0 \leq t < dT$
	Low	$dT \leq t < T$
1	Low	$0 \leq t < (1 - d)T$
	High	$(1 - d)T \leq t < T$





# 9 ESPECIFICACIONES DE PHY II

PHY II está enfocada a aplicaciones que requieran altas tasas de datos como se muestra en la Tabla 6-2. Para PHY II, la cabecera PHY se enviará a una de las siguientes tasas de datos: 1.25 Mb/s, 2.5 Mb/s, 6 Mb/s, 12 Mb/s, 24 Mb/s o 48 Mb/s, dependiendo de la tasa de reloj óptico seleccionada. Es obligatorio el soporte para 1.25 Mb/s y una tasa de reloj de 3.75 MHz.

En la Figura 9-1 se ilustra una implementación de referencia para PHY II. Las partes de la trama PHR y PSDU están sujetas a FEC para la protección contra errores. El PHR se codifica utilizando los parámetros correspondientes a la tasa de datos más baja para la tasa de reloj negociada.



Figura 9-1. Modulador de referencia para PHY II

## 9.1 Codificador para la corrección de errores hacia adelante

Para PHY II se utilizará un código Reed-Solomon sistemático en GF(256) para corregir errores e incrementar la fiabilidad del sistema. El código Reed-Solomon será reducido en el último bloque si no cumple con los requerimientos de tamaño de bloque, como se especifica para PHY I. No se requiere relleno con ceros para el código RS.

Como ya se ha dicho, el código Reed-Solomon se define sobre GF(256) con un polinomio primitivo  $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ . Se proporciona el generador para el código RS(160,128) y el RS(64,32).

$$\begin{aligned}
 g(x) = & x^{32} + \alpha^{11}x^{31} + \alpha^8x^{30} + \alpha^{109}x^{29} + \alpha^{194}x^{28} + \alpha^{254}x^{27} + \alpha^{173}x^{26} + \alpha^{11}x^{25} + \alpha^{75}x^{24} \\
 & + \alpha^{218}x^{23} + \alpha^{148}x^{22} + \alpha^{149}x^{21} + \alpha^{44}x^{20} + \alpha^0x^{19} + \alpha^{137}x^{18} + \alpha^{104}x^{17} + \alpha^{43}x^{16} \\
 & + \alpha^{137}x^{15} + \alpha^{203}x^{14} + \alpha^{99}x^{13} + \alpha^{176}x^{12} + \alpha^{59}x^{11} + \alpha^{91}x^{10} + \alpha^{19}x^9 + \alpha^{84}x^8 \\
 & + \alpha^{53}x^7 + \alpha^{248}x^6 + \alpha^{107}x^5 + \alpha^{80}x^4 + \alpha^{28}x^3 + \alpha^{215}x^2 + \alpha^{251}x + \alpha^{18}
 \end{aligned}$$

donde  $\alpha$  es un elemento primitivo en GF(256).

Para los modos VPPM que utilicen codificación 4B6B, la palabra de código RS (d1, ..., d8) del código RS GF(256) se divide en 2 trozos (*nibbles*) (d1, ..., d4) y (d5, ..., d8). En la transmisión de esos trozos se envía primero el LSB al codificador 4B6B como se muestra en la Figura 9-2.

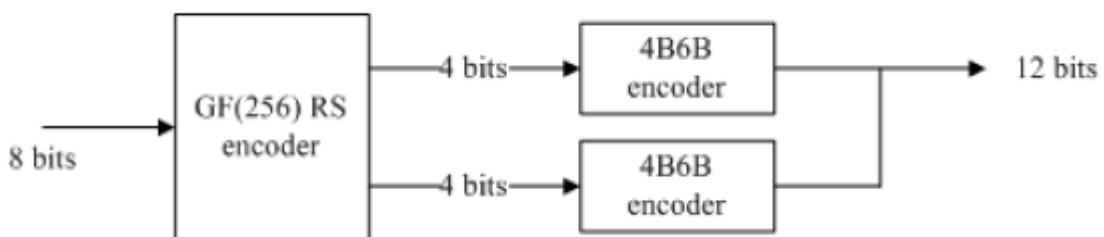


Figura 9-2. Uso del código RS GF(256) con codificador 4B6B



# 10 ESPECIFICACIONES DE PHY III

Las tasas de datos soportadas por PHY III se muestran en la Tabla 6-3. Para PHY III, la cabecera PHY se enviará a 12 Mb/s si se selecciona la tasa de reloj óptico de 12 MHz o de 24 Mb/s si se selecciona 24 MHz. Es obligatorio que se soporten los 12 Mb/s a 12 MHz. Los dispositivos PHY III utilizarán dispositivos PHY II para la detección de dispositivos. Después de que se hayan detectado todos los dispositivos de la red, y si todos ellos soportan PHY III, el coordinador podrá cambiar al modo de operación PHY III. Además, los dispositivos PHY III intercambiarán las bandas soportadas para la operación en CSK con el coordinador y este verificará que las bandas de frecuencia soportadas por todos los dispositivos PHY III en la red son compatibles para una comunicación CSK fiable. Este intercambio se realiza para asegurar que las transmisiones en dos bandas de frecuencia óptica del dispositivo transmisor no están comprendidas dentro de la banda de un filtro óptico del dispositivo receptor para la operación CSK, dando lugar a errores de comunicación durante la operación CSK.

La Figura 10-1 muestra la configuración del sistema CSK para PHY III con fuentes de luz de tres colores (bandas i, j, k). Después de la codificación del canal, los datos se transforman en valores  $xy$ , de acuerdo con la regla de mapeo de coordenadas  $xy$  establecida por el bloque de codificación del color. Las partes PHR y PSDU de la trama están sujetas al bloque FEC para la protección contra errores. El PHR se codifica utilizando los parámetros correspondientes a la tasa de datos más baja de la tasa de reloj negociada. La secuencia de estimación del canal se transmite después del PHR como se muestra en la Figura 6-9.

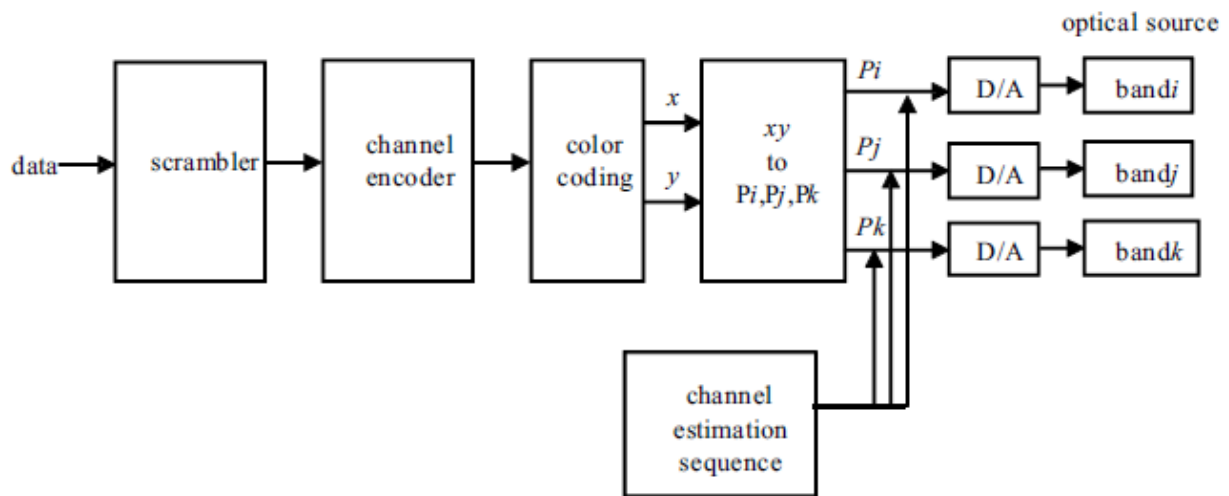


Figura 10-1. Sistema CSK para PHY III

## 10.1 Scrambler

Se utilizará un codificador (*scrambler*) para asegurar los datos pseudo-aleatorios de PHY III. El codificador se aplicará a la PSDU entera y se establecerá, al inicio de la PSDU, a un valor inicial dependiente del patrón de la topología. El polinomio generador,  $g(D)$ , para la secuencia binaria pseudo-aleatoria (PRBS) será:  $g(D) = 1 + D^{14} + D^{15}$  donde  $D$  es un elemento de retardo. Utilizando este polinomio generador, la correspondiente secuencia PRBS,  $x[n]$ , se genera como en la siguiente ecuación:

$$x[n] = x[n - 14] \oplus x[n - 15], n = 0, 1, 2, \dots$$

Donde “ $\oplus$ ” denota adición de módulo 2. La siguiente secuencia define el vector de inicialización,  $x_{ini}$ , que se

especifica por el parámetro “seed value” (valor inicial) en la Tabla 10-1:

$$x_{init} = [x_i[-1]x_i[-2] \dots x_i[-14]x_i[-15]], \dots$$

donde  $x_i[-k]$  representa el valor inicial binario a la salida del elemento de retardo  $k^{th}$ . Los bits de datos codificados,  $v_m$  se definen en la Figura 10-2 y se calcularán de la siguiente forma:

$$v[m] = s[m] \oplus x[m], m = 0, 1, 2, \dots$$

donde  $s[m]$  representa los bits de datos no codificados. El vector de inicialización se determina desde el TDP.

El vector de inicialización de 15 bits se corresponderá con el identificador inicial (de semilla) definido en la Tabla 10-1, correspondiente con el patrón TDP. Los valores iniciales se incrementarán de una forma específica explicada en el siguiente ejemplo: si el valor inicial utilizado es el correspondiente al P3 en la primera trama, el valor correspondiente a P4 se utiliza en la segunda trama, el valor correspondiente a P1 se utiliza en la tercera trama, etc. Todas las tramas consecutivas, incluyendo las retransmisiones, se enviarán con un valor de semilla inicial diferente.

Tabla 10–1 Selección de semilla de codificación

TDP	Valor de semilla $x_{init} = [x_i[-1]x_i[-2] \dots x_i[-14]x_i[-15]]$	Salida PRBS Primeros 16 bits $x_i[0]x_i[1] \dots x_i[15]$
P1	0011 1111 1111 1111	0000 0000 0000 1000
P2	0111 1111 1111 1111	0000 0000 0000 0100
P3	1011 1111 1111 1111	0000 0000 0000 1110
P4	1111 1111 1111 1111	0000 0000 0000 0010

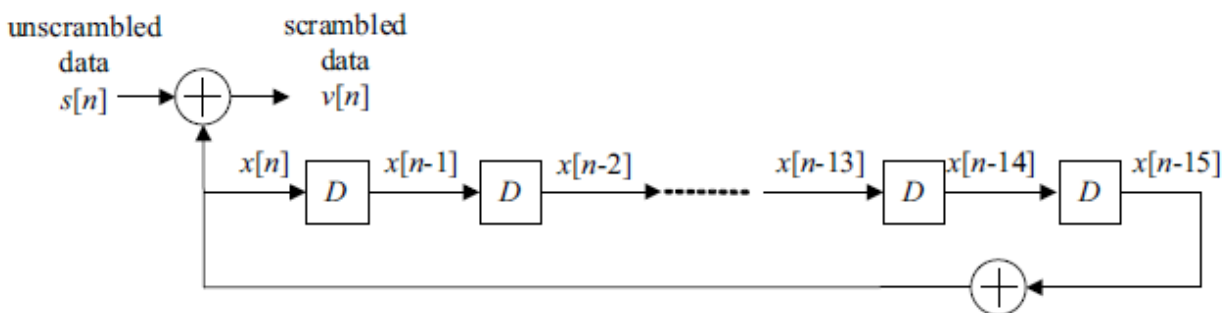


Figura 10-2. Sistema CSK para PHY III

## 10.2 Codificador de canal

Cuando se utilice, el codificador de canal para PHY III se obtiene utilizando el código 1/2 RS(64,32) como se definió en 9.1.

## 10.3 Constelación CSK

La señal CSK se genera utilizando tres fuentes de luz de color de las siete bandas de color que se han definido. Los tres vértices del triángulo de constelación CSK se deciden por la longitud de onda central de las tres

bandas de color y se representan según las coordenadas de color  $xy$ . Es posible que alguna de las fuentes ópticas tenga un pico espectral en una frecuencia diferente a la del centro del plan de banda. También es posible que el espectro de la fuente de luz se distribuya sobre múltiples bandas de frecuencia. La Tabla 10-2 muestra los valores de las coordenadas de color  $xy$  asumiendo que la fuente óptica se elige de forma que el pico espectral se sitúe en el centro de cada una de las siete bandas de color. La función de calibración del color, que se verá más adelante, puede compensar los errores de las coordenadas de color causados por las variaciones de las características de la fuente óptica y cancelar cualquier interferencia entre los tres colores.

La Figura 10-3 muestra el centro de las bandas de color de la Tabla 10-2 en las coordenadas de color  $xy$ <sup>4</sup>.

Tabla 10–2 Coordenadas de color  $xy$

Banda (nm)	Código	Centro (nm)	$(x,y)$
380-478	000	429	(0.169, 0.007)
478-540	001	509	(0.011, 0.733)
540-588	010	564	(0.402, 0.597)
588-633	011	611	(0.669, 0.331)
633-679	100	656	(0.729, 0.271)
679-726	101	703	(0.734, 0.265)
726-780	110	753	(0.734, 0.265)

<sup>4</sup> Las coordenadas  $xy$  se utilizan para formar el diagrama de cromaticidad que podemos ver en la Figura 10-3. El matiz o tono del color, relacionado con la longitud de onda, está representado en todos los puntos alrededor del perímetro del diagrama de cromaticidad. El croma o saturación, que se basa en la pureza del color y está determinada por su intensidad luminosa (un color muy saturado es vivo e intenso mientras que un color menos saturado parecerá más descolorido o gris), se representa por un movimiento del área central blanca (neutra) hacia el perímetro del diagrama, donde la saturación es más elevada. A cada color le corresponderá un valor  $x$  e  $y$ .

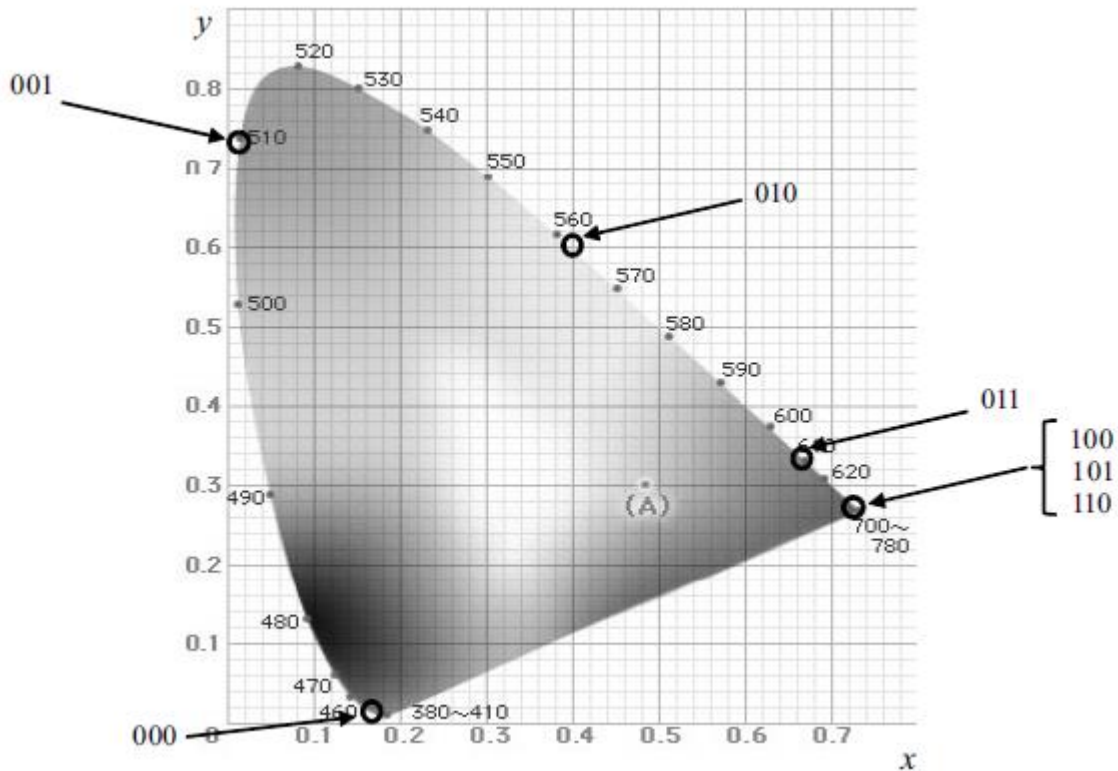


Figura 10-3. Centro de las bandas de color en las coordenadas  $xy$

### 10.4 Reglas de diseño de la constelación CSK

#### 10.4.1 Regla de diseño para 4-CSK

Los símbolos 4-CSK se definen mediante la regla de diseño que muestra la Figura 10-4. Los puntos I, J y K muestran el centro de las tres bandas de color según las coordenadas de color  $xy$  incluidas la Tabla 10-2. En la Figura 10-4, los ejes  $x$  e  $y$  son los valores relativos;  $S_0, \dots, S_3$  son los cuatro puntos de símbolo de la 4-CSK;  $S_1, S_2$  y  $S_3$  son los tres vértices del triángulo IJK y  $S_0$  es el centroide del triángulo IJK.

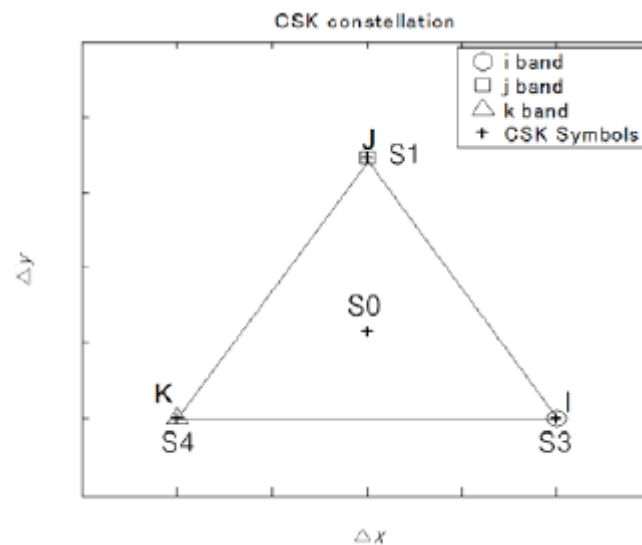


Figura 10-4. Reglas de diseño de la constelación 4-CSK

### 10.4.2 Reglas de diseño para 8-CSK

Los símbolos 8-CSK se definen mediante la regla de diseño mostrada en la Figura 10-5. Los puntos I, J y K muestran el centro de las tres bandas de color según las coordenadas de color  $xy$  en la Tabla 10-2. S0, ..., S7 son los 8 puntos de símbolo de la 8-CSK. S0, S4 y S7 son los tres vértices del triángulo IJK; S1 y S2 son los puntos que dividen la parte JK y la JI según el índice 1:2; Los puntos B y C son puntos medios de las líneas JI y JK; S6 es el punto medio de la línea KI. El punto A es el centroide del triángulo B-S6-I; El punto D es el centroide del triángulo C-K-S6. S3 es el punto que divide la línea AB según el índice 1:2; S5 es el punto que divide la línea DC según el índice 1:2.

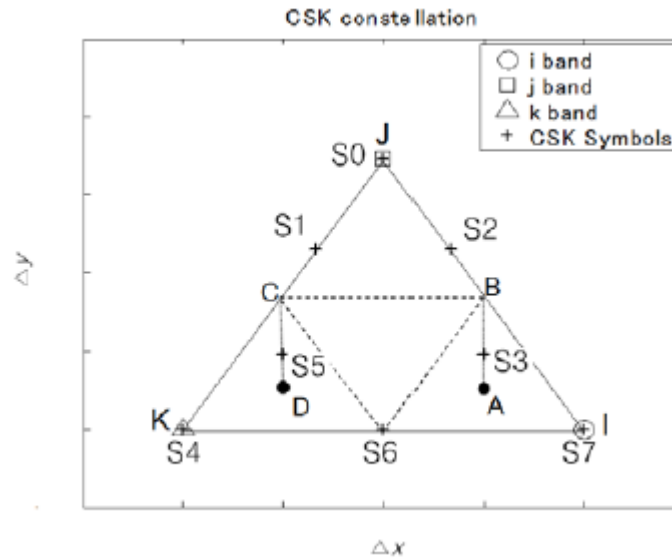


Figura 10-5. Reglas de diseño de la constelación 8-CSK

### 10.4.3 Reglas de diseño para 16-CSK

Los puntos de símbolos de 16-CSK se definen según las reglas de diseño de la Figura 10-6. Los puntos I, J, y K muestran el centro de las tres bandas de color según las coordenadas  $xy$  de la Tabla 10-2. S0, ..., S15 son los 16 puntos de símbolo de la 16-CSK; S5, S10 y S15 son los tres vértices del triángulo IJK; S2 y S8 son los puntos que dividen la línea JK en tres; S3 y S12 son los puntos que dividen la línea JI en tres; S11 y S14 son los puntos que dividen la línea KI en tres; S0 es el centroide del triángulo IJK y S1, S4, S6, S7, S9 y S13 son los centroides de cada uno de los triángulos pequeños.

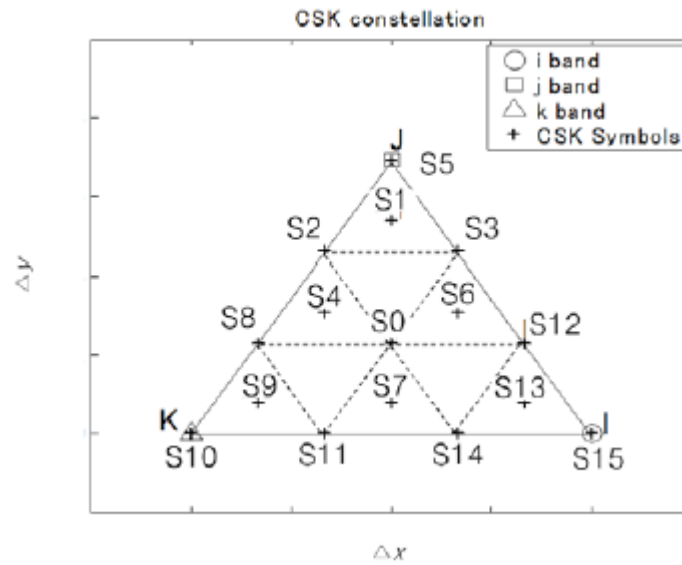


Figura 10-6. Reglas de diseño de la constelación 16-CSK

### 10.5 Mapeo de datos para CSK

El mapeo de datos para 4-CSK se muestra en la Figura 10-7. Se asignan dos bits por símbolo.

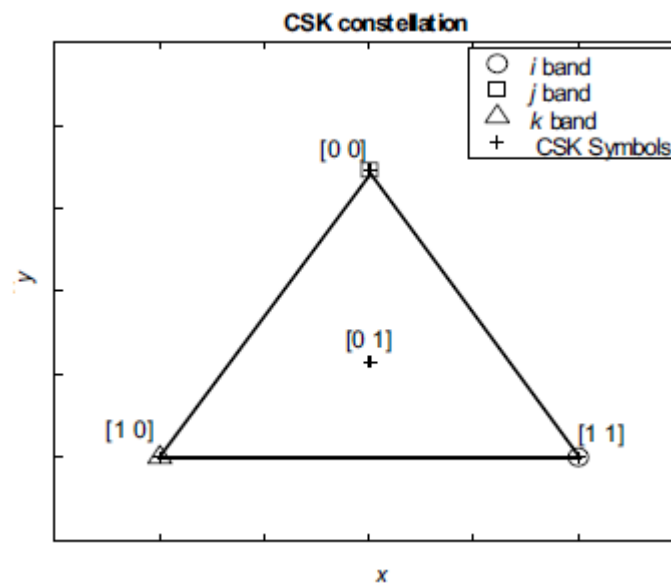


Figura 10-7. Mapeo de datos 4-CSK

El mapeo de datos para 8-CSK se muestra en la Figura 10-8. Se asignan tres bits por símbolo.



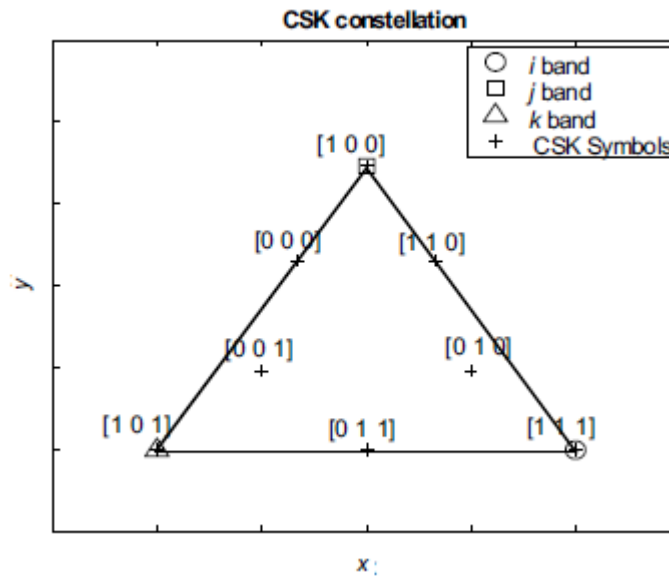


Figura 10-8. Mapeo de datos 8-CSK

El mapeo de datos para 16-CSK se muestra en la Figura 10-9. Se asignan cuatro bits por símbolo.

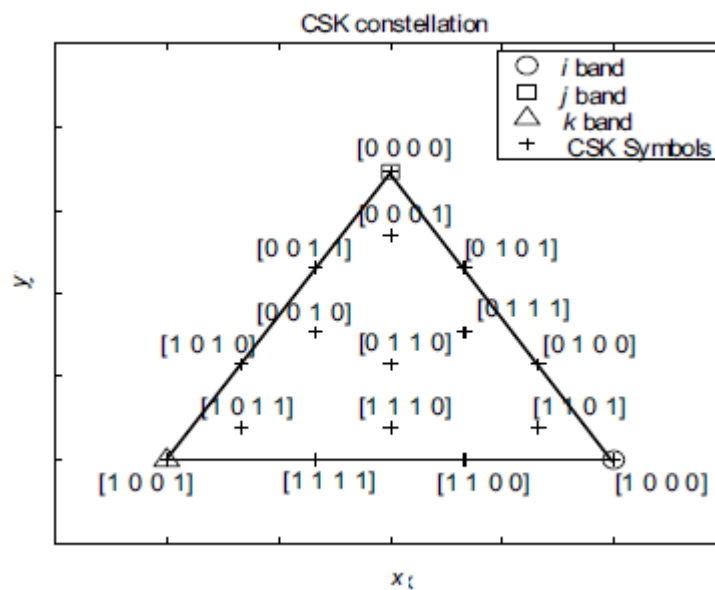


Figura 10-9. Mapeo de datos 16-CSK

### 10.6 Combinaciones de bandas de color válidas

La constelación CSK se decide por la combinación de tres bandas de colores. Se excluyen algunas combinaciones que no pueden formar un triángulo en las coordenadas de color  $xy$ , como  $(110-101-100)$  o  $(100-011-010)$ . La Tabla 10-3 muestra las combinaciones de bandas de color válidas que pueden formar triángulos para constelaciones CSK.

Tabla 10-3 Combinaciones de bandas de color para CSK

	Banda <i>i</i>	Banda <i>j</i>	Banda <i>k</i>
1	110	010	000
2	110	001	000
3	101	010	000
4	101	001	000
5	100	010	000
6	100	001	000
7	011	010	000
8	011	001	000
9	010	001	000

La Figura 10-10 muestra un ejemplo del triángulo de constelación CSK cuando se utilizan los códigos de color (110, 010, 000).

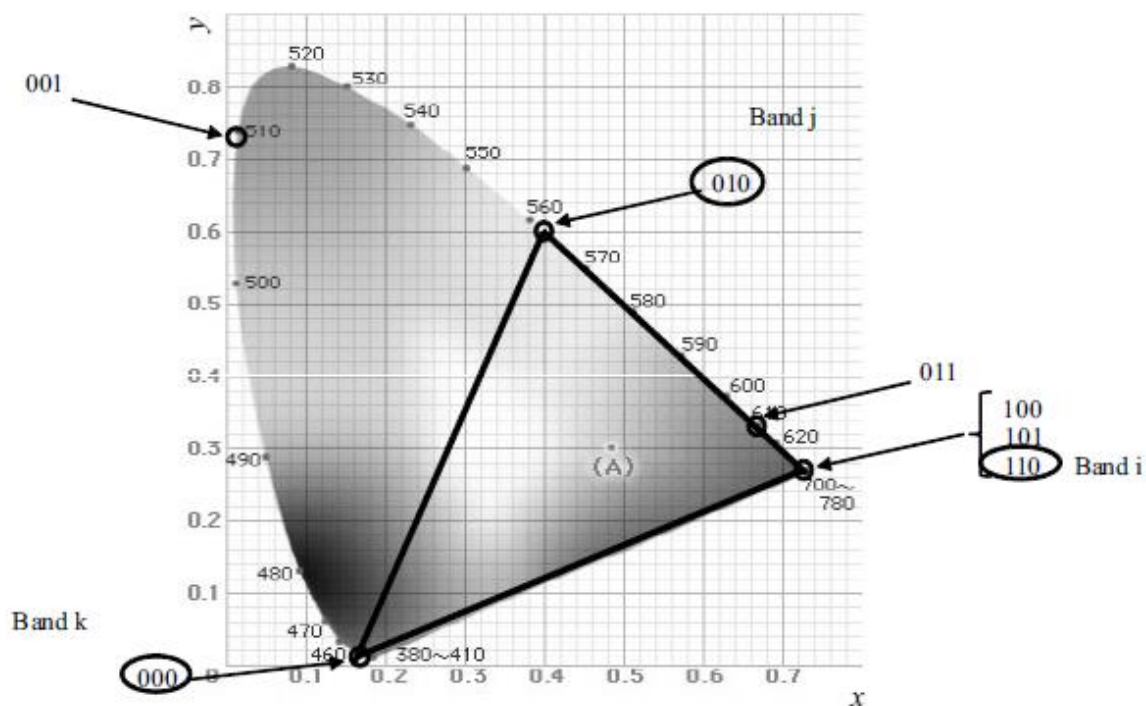


Figura 10-10. Ejemplo de constelación CSK para códigos (110, 010, 000)

La Tabla 10-3 muestra la combinación de bandas de color y los valores de las coordenadas  $xy$  cuando se utilizan los códigos de color (110, 010, 000). La Figura 10-11 muestra los puntos de la constelación CSK cuando se utilizan los códigos de color (110, 010, 000).

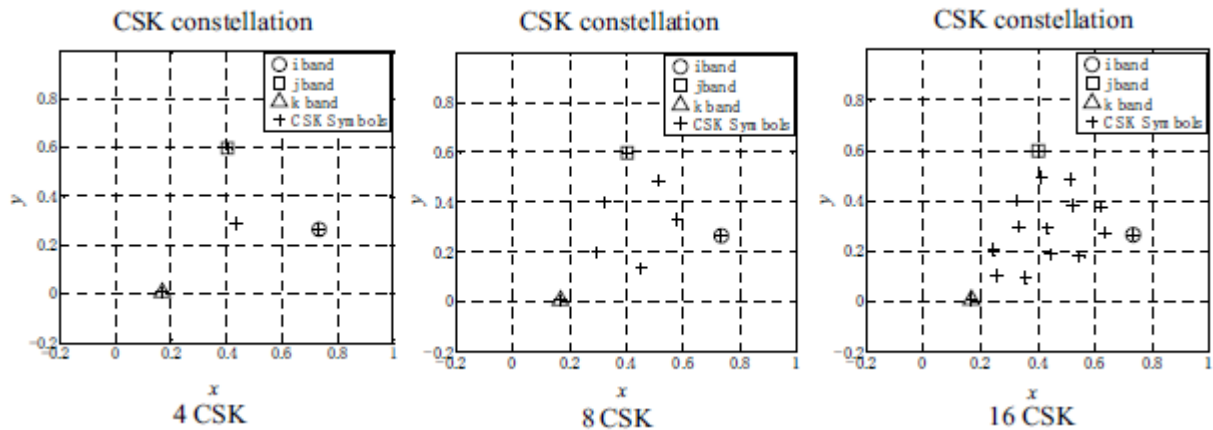


Figura 10-11. Constelación CSK hecha para combinaciones de bandas de color

Tabla 10-4 Ejemplo de combinaciones de bandas de color para (110, 010, 000)

Centro de la banda (x,y)	Valores de coordenadas xy de símbolos		
	4-CSK	8-CSK	16-CSK
(0.734 0.265)	[0 0] – (0.402 0.597)	[0 0 0] – (0.324 0.400)	[0 0 0 0] – (0.402 0.597)
(0.402 0.597)	[0 1] – (0.435 0.290)	[0 0 1] – (0.297 0.200)	[0 0 0 1] – (0.413 0.495)
(0.169 0.007)	[1 0] – (0.169 0.007)	[0 1 0] – (0.579 0.329)	[0 0 1 0] – (0.335 0.298)
	[1 1] – (0.734 0.265)	[0 1 1] – (0.452 0.136)	[0 0 1 1] – (0.324 0.400)
		[1 0 0] – (0.402 0.597)	[0 1 0 0] – (0.623 0.376)
		[1 0 1] – (0.169 0.007)	[0 1 0 1] – (0.513 0.486)
		[1 1 0] – (0.513 0.486)	[0 1 1 0] – (0.435 0.290)
		[1 1 1] – (0.734 0.265)	[0 1 1 1] – (0.524 0.384)
			[1 0 0 0] – (0.734 0.265)
			[1 0 0 1] – (0.169 0.007)
			[1 0 1 0] – (0.247 0.204)
			[1 0 1 1] – (0.258 0.101)
			[1 1 0 0] – (0.546 0.179)
			[1 1 0 1] – (0.634 0.273)
			[1 1 1 0] – (0.546 0.179)
			[1 1 1 1] – (0.357 0.093)

### 10.7 Calibración CSK en el receptor

El sistema VLC podrá presentar los siguientes tipos de degradación: desequilibrio multicolor, interferencia multicolor o cualquier otro error en las coordenadas de color xy causadas por luz ambiental o las características del dispositivo de luz. Por tanto, en este estándar se proporciona un método de compensación CSK en el receptor utilizando la calibración de color para la mejora del rendimiento. La Figura 10-12 muestra el sistema CSK con calibración de color.

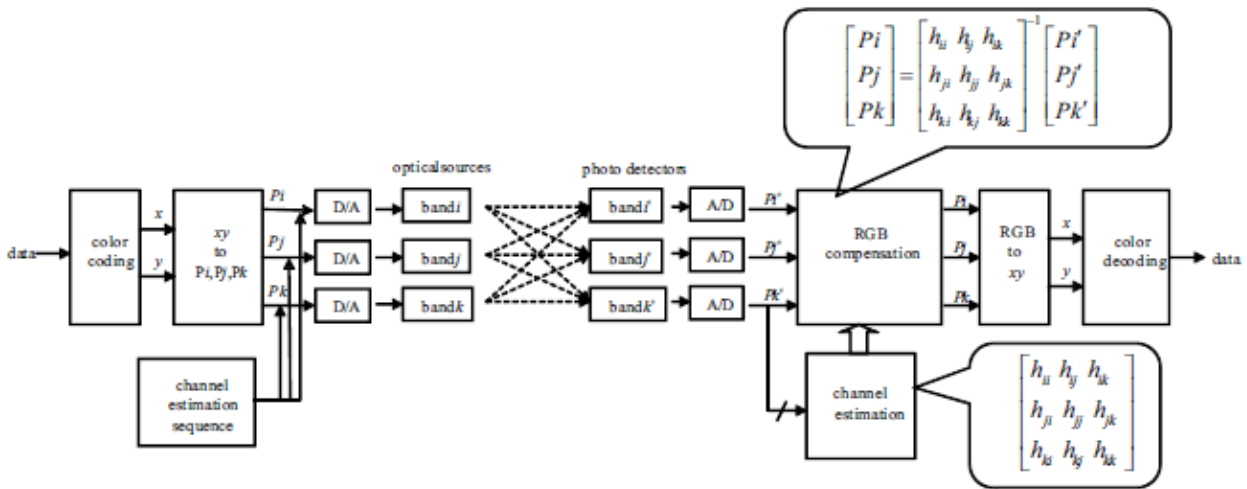


Figura 10-12. Sistema CSK con calibración de color

Antes de la comunicación de datos, el sistema estima la matriz de propagación del canal utilizando secuencias ortogonales incluidas en la secuencia de estimación del canal. La matriz de propagación del canal es una matriz cuadrada de dimensión 3x3 como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} h_{ii} & h_{ij} & h_{ik} \\ h_{ji} & h_{jj} & h_{jk} \\ h_{ki} & h_{kj} & h_{kk} \end{bmatrix}$$

La desviación de propagación puede compensarse multiplicando la señal recibida por la matriz de canal invertida como se muestra en esta ecuación.

$$\begin{bmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ii} & h_{ij} & h_{ik} \\ h_{ji} & h_{jj} & h_{jk} \\ h_{ki} & h_{kj} & h_{kk} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_i' \\ P_j' \\ P_k' \end{bmatrix}$$

Se utilizarán códigos de Walsh para la estimación del canal como se muestra en la Figura 10-12. Durante la transmisión de la secuencia de estimación del canal, las fuentes de luz se modulan con OOK de acuerdo a los códigos de Walsh. Se proporcionan tres secuencias de código Walsh de longitud 4 para las tres bandas utilizadas en CSK:  $W(1,4) = \{1, -1, 1, -1\}$ ,  $W(2,4) = \{1, 1, -1, -1\}$ ,  $W(3,4) = \{1, -1, -1, 1\}$  son los tres códigos Walsh que se deberán utilizar para la estimación.  $W(1,4)$ ,  $W(2,4)$ ,  $W(3,4)$  se utilizarán para las bandas i, j, k respectivamente. Cada bit del código Walsh se transmitirá dos veces para obtener una estimación del canal precisa mediante el promedio de dos bits.

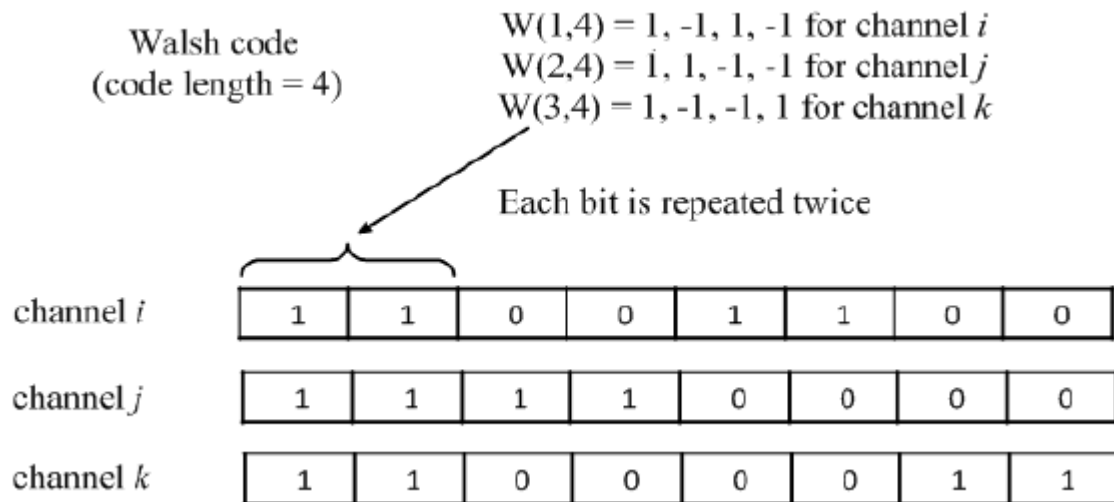


Figura 10-13. Códigos Walsh para calibración del color



# 11 CONCLUSIÓN

---

Como punto final a este trabajo se exponen las conclusiones derivadas del contenido tratado así como las líneas de actuación en trabajos futuros.

## 11.1 Conclusión

Al principio de este trabajo se enumeró una serie de objetivos que se pretendían conseguir con el desarrollo del mismo, los principales son el conocimiento de VLC y el estudio del estándar del IEEE 802.15.7. En este documento se ha explicado con detalle la estructura de VLC, definiendo cada una de las partes que la componen y la función que desempeña.

Como conclusión podemos decir que el uso de VLC permite una mejora de las comunicaciones en redes de área personal (PAN). Esto se consigue gracias al amplio ancho de banda que proporciona la banda de luz visible, ya que opera en una parte del espectro electromagnético con longitudes de onda entre los 380 y 780 nm. Al tener un ancho de banda tan grande se soportan transmisiones con tasas de datos muy elevadas lo que permite mayor efectividad en las comunicaciones y la aparición de numerosas aplicaciones.

Se ha explicado el proceso de creación de una VPAN gracias al cual los dispositivos VLC quedan conectados, especificando los pasos y los elementos de la estructura VLC que intervienen. Esta es la base sobre la que se establecen las aplicaciones de VLC.

Así mismo, con el uso de los diferentes tipos de PHY (PHY I, PHY II y PHY III) conseguimos la adaptación del sistema a diferentes requisitos según la aplicación, como por ejemplo uso exterior o interior, o la necesidad de tasa de datos más elevadas.

Con este tipo de comunicaciones también se da uso a una parte del espectro que hasta ahora había estado inutilizada para la transmisión de información. Gracias a esto se consigue no interferir con otros sistemas de comunicaciones inalámbricas como WiFi o los sistemas de comunicaciones móviles, que están muy extendidos en el mundo actual.

Los sistemas VLC presentan gran versatilidad ya que se proporcionan diferentes aplicaciones tradicionales, como la iluminación de estancias, carteles luminosos, etc., junto con el uso de las comunicaciones.

Tal y como se ha visto en este trabajo, el uso de estas comunicaciones presenta unos requerimientos para que la transmisión de información se realice de forma efectiva.

- Necesidad de tener una visión directa entre transmisor y receptor, imprescindible para no causar interrupciones en la transmisión.
- Mitigar el parpadeo, se requiere que la luz no supere unos límites de parpadeo para no causar problemas en las personas.
- Proporcionar iluminación continua, utilizando para ello patrones de visibilidad e inactividad.
- Realizar controles de atenuación para que la intensidad de la luz permanezca constante y no perjudique la iluminación.

Todos estos requisitos se presentan a lo largo del documento además de las soluciones que deben implementarse en el sistema para cumplirlos.

Estos sistemas también presentan una serie de inconvenientes. Debido a la necesidad de visibilidad directa, no puede sustituir a otros sistemas inalámbricos utilizados tradicionalmente, como se mencionó anteriormente, WiFi o comunicaciones móviles. Por esto no se pretende la sustitución de esos sistemas, sino que su principal utilidad es complementarlos de forma que se haga uso de aquel que presente más ventajas en cada aplicación.

Otro punto en contra sería la poca experiencia de estos sistemas. Al estar todavía en desarrollo no se ha conseguido una implantación mayoritaria aunque la aparición de nuevas aplicaciones es continua.

## 11.2 Líneas futuras de trabajo

Como se ha dicho, este trabajo trata sobre una tecnología que todavía está en desarrollo, por ello surgirán otros estándares en los que se mejoren los aspectos que se han tratado aquí. Como trabajos en el futuro se podría indicar el estudio de los nuevos estándares y aplicaciones, prestando atención a las novedades introducidas en cada uno de ellos con respecto a versiones anteriores.

También sería adecuado poner en práctica los conceptos que se han explicado aquí de forma teórica, por ejemplo, mediante la simulación con cualquier programa que haya en el mercado de un sistema de comunicaciones VLC y realizar un estudio de los resultados obtenidos. En este caso se prestaría especial atención a los procesos que se realizan en la capa MAC (puede ser lo más complicado) y sobre todo a la capa PHY de forma que se consigan alcanzar las tasas de datos requeridas. Como punto final de esta simulación, se podría implementar un sistema con los componentes electrónicos necesarios, de esta forma se comprobaría que los cálculos teóricos y la simulación coinciden con el uso real.

Como se ha comentado son numerosas las aplicaciones de VLC disponibles y en desarrollo que también podrían ser caso de estudio. Entre algunas de ellas podrían mencionarse las siguientes:

- Uso de VLC en vehículos y señales. Consistiría en el uso de los faros de los coches para transmitir y recibir señales de información, por ejemplo, transmitir mediante señales la velocidad máxima y adaptar la del coche para no superarla, recibir información sobre el tráfico al pasar por paneles luminosos, informar al resto de vehículos sobre problemas técnicos o mantener la distancia de seguridad entre dos coches. En cuanto a la recepción de información de paneles luminosos, podría implementarse un sistema que indique una ruta alternativa y se transmita mediante señales luminosas. El uso de estos sistemas favorece una conducción más autónoma y supondría evitar atascos en las grandes ciudades ya que la inmensa mayoría de ellos vienen causados por el factor humano.
- Otra aplicación consistiría en la transmisión de datos mediante alumbrado público. Se proporcionaría conexión a través de las farolas de las calles y mejoraría el acceso a Internet.
- En cuanto a las conexiones en el hogar, ya mencionado en este trabajo, la transmisión de audio y vídeo. Se realizaría una conexión entre el coordinador (iluminación mediante dispositivos LED en el techo) y un dispositivo reproductor de imagen y sonido (televisión). De esta forma se conseguirá ver películas y programas de televisión con una calidad muy alta y sin retardos, gracias al gran ancho de banda que ofrece el sistema.



# REFERENCIAS

---

- [1] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*, 2011.
- [2] Cambridge University Press, *Visible Light Communications*, 2015
- [3] Wikipedia, *Visible Light Communication* : [https://es.wikipedia.org/wiki/Comunicaci%C3%B3n\\_con\\_luz\\_visible](https://es.wikipedia.org/wiki/Comunicaci%C3%B3n_con_luz_visible).
- [4] Wikipedia, *Puncturing* : <https://en.wikipedia.org/wiki/Puncturing>
- [5] Wikipedia, *Galois Field* : [https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo\\_finito](https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo_finito)
- [6] Alvaro Riva y Omar Ormachea, *TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE SEÑALES MEDIANTE EL ESPECTRO DE LUZ VISIBLE*, [http://www.upb.edu/sites/default/files/I%26DVINI5-3Art-OOrmachea-Web\\_0.pdf](http://www.upb.edu/sites/default/files/I%26DVINI5-3Art-OOrmachea-Web_0.pdf)
- [7] Bernard Llanos Flores, *Visible Light Communications*, <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/85653/memoria.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [8] Carlos Ley Bosch, *El Problema del nodo oculto en VLC*, [http://www.idetic.ulpgc.es/idetic/images/ESTRUCTURA\\_IDETIC/IDeTIC/I\\_plus\\_D/Seminarios/12-07-17/El\\_Problema\\_del\\_nodo\\_oculto\\_en\\_VLC-PRESENTACION.pdf](http://www.idetic.ulpgc.es/idetic/images/ESTRUCTURA_IDETIC/IDeTIC/I_plus_D/Seminarios/12-07-17/El_Problema_del_nodo_oculto_en_VLC-PRESENTACION.pdf)
- [9] Sergio Gonzalo San José, *Implementación del Mecanismo de Acceso al Medio (MAC) IEEE 802.15.4e CSL sobre OpenWSN y Plataforma OpenMote*, <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/85653/memoria.pdf?sequence=4&isAllowed=y>, 2015
- [10] Wikipedia, *Run-length limited* : [https://en.wikipedia.org/wiki/Run-length\\_limited](https://en.wikipedia.org/wiki/Run-length_limited)
- [11] X-Rite, *Guía para entender la comunicación del color* : [http://www.mcolorcontrol.com/archivos/L10-001\\_Understand\\_Color\\_es.pdf](http://www.mcolorcontrol.com/archivos/L10-001_Understand_Color_es.pdf)

