

## **ANEXO A. NIVEL FÍSICO DE UWB**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Este capítulo especifica el nivel físico para un sistema UWB que utiliza la banda no licenciada de 3,1 – 10,6 GHz, la cual está regulada en los Estados Unidos por el CFR Título 47, Sección 15. El sistema UWB permite establecer una WPAN con capacidades de comunicación de datos de 53.3, 80, 110, 160, 200, 320, 400 y 480 Mbps. Este sistema soportará velocidades de transmisión y recepción de 53.3, 110 y 200 Mbps de forma obligatoria. El sistema emplea OFDM utilizando un total de 122 subportadoras piloto moduladas de un total de 128 subportadoras. El sistema utiliza Codificación para Corrección de Errores en el Destino (FEC, Forward Error Correction) con tasas de codificación de 1/3, 11/32, 1/2, 5/8 y 3/4.

El sistema UWB también utiliza TFC para entrelazar los datos codificados en un grupo de tres bandas de frecuencias. Se han definido cuatro grupos cada uno con tres bandas de frecuencia, así como un grupo con dos bandas, de la misma manera se han definido también cuatro TFCs de 3 bandas y 2 TFCs de 2 bandas. Estos grupos de bandas y los TFC proveen la capacidad para definir 18 canales lógicos separados o picoredes independientes. Los dispositivos que operan en el grupo de bandas número uno (compuesto por las tres bandas de frecuencias más bajas) son clasificados como dispositivos Modo 1, es obligatorio para todos los dispositivos soportar el Modo 1 y el soporte para otros grupos de bandas es opcional para ser implementado en el futuro.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MULTIBANDA OFDM PROPUESTO

### 1.2.1 Descripción matemática de la señal

La señal transmitida en RF está relacionada con la señal de banda base por medio de la ecuación 1.

$$r_{RF} = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} r_k(t - kT_{SYM}) \exp(j2\pi f_{(k \bmod 6)} t) \right\} \quad (1)$$

Donde  $\text{Re}$  representa la parte real de la variable compleja,  $r_k(t)$  es la señal de banda base compleja que representa el  $k$ -ésimo símbolo OFDM que ocupa un intervalo de longitud de símbolo  $T_{SYM}$  y  $N$  es el número de símbolos OFDM transmitidos. La frecuencia portadora de la banda en la que el símbolo OFDM es transmitido se denota como  $f_k$ . Los valores de  $f_k$  están en el rango de frecuencias asignado al grupo de bandas en que opera el sistema. Estas frecuencias están organizadas en secuencias de longitud 6, llamadas TFCs. La estructura exacta del  $k$ -ésimo símbolo OFDM depende de su localización dentro del paquete, como se indica en la ecuación 2.

$$r_k(t) = \begin{cases} r_{\text{preambulo},k}(t) & 0 \leq k < N_{\text{preambulo}} \\ r_{\text{encabezado},k-N_{\text{preambulo}}}(t) & N_{\text{preambulo}} \leq k < N_{\text{encabezado}} \\ r_{\text{datos},k-N_{\text{preambulo}}-N_{\text{encabezado}}}(t) & N_{\text{encabezado}} \leq k < N_{\text{datos}} \end{cases} \quad (2)$$

La estructura de cada componente de  $r_k(t)$ , así como el desplazamiento del  $N_{\text{preambulo}}$ ,  $N_{\text{encabezado}}$  y  $N_{\text{datos}}$  será descrito en detalle más adelante en este capítulo.

Todos los símbolos OFDM de  $r_k(t)$  pueden ser construidos utilizando la IFFT con un conjunto definido de coeficientes  $C_n$ , donde los coeficientes están definidos como datos, pilotos ó símbolos de instrucción. La ecuación 3 muestra este resultado.

$$r_k(t) = \begin{cases} \sum_{n=-N_{ST}/2}^{N_{ST}/2} C_n \exp(j2\pi n \Delta_f t) & t \in [0, T_{FFT}] \\ 0 & t \in [T_{FFT}, T_{FFT} + T_{ZP}] \end{cases} \quad (3)$$

Los parámetros  $\Delta_f$  y  $N_{ST}$  son definidos como el espaciamiento de frecuencia de subportadora y el número total de subportadoras utilizado, respectivamente. La forma de onda resultante tiene un periodo de  $T_{FFT} = 1/\Delta_f$ . El parámetro de tiempo  $T_{ZP}$  especifica el periodo de relleno con ceros para el símbolo OFDM que será utilizado para mitigar los efectos de la multitrayectoria, así como también para proveer un periodo de guarda que permita el cambio entre diferentes bandas.

### 1.3 LISTA DE PARÁMETROS ESPECÍFICOS DE SERVICIO DE LA CAPA FÍSICA DEL SISTEMA MULTIBANDA OFDM

Algunas implementaciones de la capa física requieren de máquinas de estado de gestión del medio ejecutándose en la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, Medium Access Control) para cumplir con los requerimientos de la subcapa Dependiente del Medio Físico (PMD, Physical Media Dependent). Estas máquinas de estado de la capa MAC se encuentran en una subcapa definida como la Entidad de Gestión de la Capa MAC (MLME, MAC Layer Management Entity). En algunas implementaciones del PMD, la MLME necesita interactuar con la Entidad de Gestión de la capa Física (PLME, PHY Layer Management Entity) como parte de las primitivas del Punto de Acceso al

Servicio (SAP, Service Access Point) de la capa física. Estas interacciones están definidas en la lista de parámetros de la PLME, como las primitivas de servicio de la capa física *TXVECTOR* y *RXVECTOR*. La lista de esos parámetros y los valores que puedan representar, están definidos a continuación.

### 1.3.1 Parámetros del *TXVECTOR*

Los parámetros de la tabla 1 definen una parte de la lista de parámetros de la primitiva de requerimiento de servicio *PHY.TXSTART.request*.

Tabla 1 Parámetros del *TXVECTOR*

<b>Parámetro</b>	<b>Primitiva asociada</b>	<b>Valor</b>
Longitud	<i>PHY-TXSTART.request(TXVECTOR)</i>	0 – 4095 (1 – 4095 en modo <i>Streaming</i> )
Tasa de datos	<i>PHY-TXSTART.request(TXVECTOR)</i>	53.3, 80, 110, 160, 200, 320, 400 y 480 (el soporte para las tasas de datos de 53.3, 110 y 200 es obligatorio)
<i>SCRAMBLER_INIT</i>	<i>PHY-TXSTART.request(TXVECTOR)</i>	2 bits nulos para la inicialización del <i>Scrambler</i>

### **1.3.1.1 Longitud del *TXVECTOR***

Los valores permitidos para el parámetro de longitud del vector están en el rango de 0 – 4095 Bytes (1 – 4095 Bytes en modo de transferencia por demanda (*Streaming*)). Este parámetro es utilizado para indicar el número de Bytes en la carga útil de la trama (sin incluir la Secuencia de Chequeo de Trama (FCS, Frame Check Sequence)), que la subcapa MAC requiere sean transmitidos por la capa física. Este valor es utilizado por la capa física para determinar la cantidad de transferencias que ocurren entre la subcapa MAC y la capa física después de recibir un requerimiento de inicio de transmisión.

### **1.3.1.2 Tasa de datos del *TXVECTOR***

Este parámetro describe la tasa de bits a la cual el PLCP debe transmitir la Unidad de Datos de Servicio del PLCP (PSDU, PLCP Service Data Unit). Este valor puede ser cualquiera de las tasas definidas en la tabla 1. Las tasas de transferencia de datos obligatorias siempre deben ser soportadas, mientras que otras tasas de transferencia de datos son opcionales.

### **1.3.1.3 *SCRAMBLER\_INIT* del *TXVECTOR***

Este parámetro consiste en 2 bits nulos que serán utilizados para la inicialización del *Scrambler*.

## **1.3.2 Parámetros del *RXVECTOR***

Los parámetros de la tabla 2 están definen una parte de la lista de parámetros de la primitiva de requerimiento de servicio *PHY.RXSTART.indicate*.

Tabla 2 Parámetros del *RXVECTOR*

Parámetro	Primitiva Asociada	Valor
Longitud	<i>PHY-</i> <i>RXSTART.indicate(RXVECTOR)</i>	0 – 4095 (1 – 4095 en modo <i>Streaming</i> )
Tasa de transferencia de datos	<i>PHY-</i> <i>RXSTART.indicate(RXVECTOR)</i>	53.3, 80, 110, 160, 200, 320, 400 y 480 (el soporte para las tasas de datos de 53.3, 110 y 200 es obligatorio)
<i>RSSI</i>	<i>PHY-</i> <i>RXSTART.indicate(RXVECTOR)</i>	0 - <i>RSSI</i>

### 1.3.2.1 Longitud del *RXVECTOR*

Los valores permitidos para el parámetro de longitud del vector están en el rango de 0 – 4095 Bytes (de 1 – 4095 en modos de transferencia por demanda (*Streaming*) o modo ráfaga (*burst*)). Este parámetro será utilizado para indicar el valor contenido en el campo de longitud que el PLCP ha recibido en la cabecera PLCP. La subcapa MAC y el PLCP utilizarán este valor para determinar el número de Bytes transmitidos que podrán existir entre éstas dos capas durante la transferencia de la PSDU recibida.

### 1.3.2.2 Tasa de transferencia de datos del *RXVECTOR*

La tasa de transferencia de datos representa la tasa de datos de la Unidad de Datos del PLCP (PPDU, PLCP Data Unit) recibida. Los valores permitidos de este parámetro son 53.3, 80, 110, 160, 200, 320, 400 y 480 Mbps.

### **1.3.2.3 RSSI del RXVECTOR**

Los valores permitidos para el Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI, Receive Signal Strength Indicator) están en el rango desde 0 hasta el máximo RSSI. Este parámetro es una medida realizada en la capa física de la energía observada en la antena utilizada para recibir la PSDU actual. La RSSI debe ser medida durante la recepción del preámbulo PLCP.

## **1.4 DESCRIPCIÓN DE LA SUBCAPA PLCP PARA SISTEMAS MULTIBANDA OFDM**

A continuación se explica el método para convertir el PSDU en PPDU. Durante la transmisión, al PSDU se le agrega un preámbulo y una cabecera PLCP para formar un PPDU. En el receptor, el preámbulo y la cabecera PLCP se procesan para extraer de nuevo el PSDU.

### **1.4.1 Formato de la trama PLCP**

La figura 1 muestra el formato de la trama PLCP que incluye el preámbulo PLCP, la cabecera PLCP (cabecera PHY, cabecera MAC, bits de cola, Cabecera de Chequeo de Secuencia (HCS, Header Check Sequence), bits de paridad *Reed Solomon* y bits de cola), la trama MAC (carga útil de la trama más FCS), bits de cola y bits de relleno. En la capa física se añade la cabecera PHY a la cabecera MAC para luego calcular el HCS de la combinación de cabeceras.

La primera secuencia de bits de cola se inserta después de la cabecera PHY para retornar el codificador convolucional a “Estado Cero” (*zero state* (este proceso será explicado mas adelante en la sección 1.4.9)). El HCS resultante, es agregado al final de la cabecera MAC con la segunda secuencia de bits de

cola. Los bits de paridad *Reed Solomon*<sup>1</sup> se agregan entre la segunda y tercera secuencia de bits de cola y antes de la carga útil de la trama PLCP.

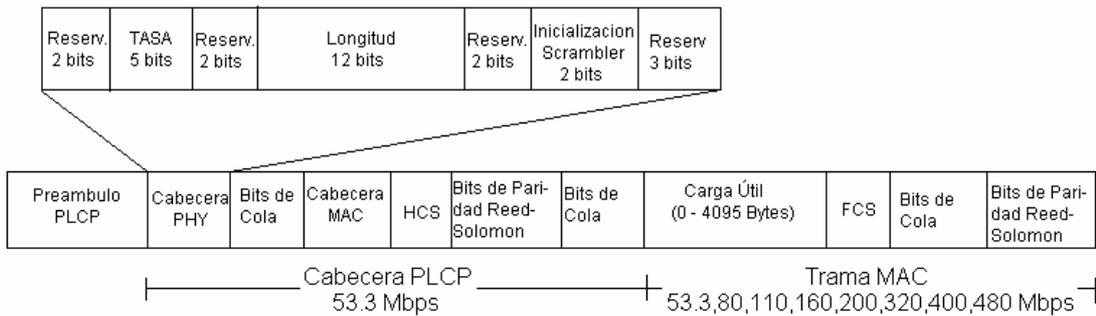


Figura 1 Formato de la trama PLCP

Se envía primero el preámbulo PLCP, luego la cabecera PLCP, seguido por una secuencia de la extensión de banda que es opcional (no se muestra), la carga útil de la trama, el FCS, los bits de cola, y finalmente los bits de paridad *Reed Solomon*. Como se puede observar en la figura 1, la cabecera PLCP siempre se envía con una tasa de transferencia de datos de 53.3 Mbps. El resto de la trama PLCP (carga útil de la trama, FCS, bits de cola y bits de paridad *Reed Solomon*) se envían dependiendo de la tasa de transferencia de datos que se esté utilizando ya sea 53.3, 80, 110, 160, 200, 320, 400 o 480 Mbps.

#### 1.4.1.1 Parámetros que dependen de la tasa de transferencia de datos

Los parámetros que dependen de la tasa de transferencia de datos se muestran en la tabla 3.

<sup>1</sup> Los bits de paridad Reed-Solomon se calculan utilizando un código sistemático Reed-Solomon (23,17) y se añaden para incrementar la robustez de la trama PLCP

Tabla 3 Parámetros que dependen de la tasa de transferencia de datos

<b>TTD</b> <b>[Mbps]</b>	<b>MOD</b>	<b>TCod</b>	<b>ESC</b>	<b>TSF<sup>2</sup></b>	<b>GEG</b>	<b>N<sub>CBPS</sub></b>
53,3	QPSK	1/3	SI	2	4	100
80	QPSK	1/2	SI	2	4	100
110	QPSK	11/32	NO	2	2	200
160	QPSK	1/2	NO	2	2	200
200	QPSK	5/8	NO	2	2	200
320	QPSK	1/2	NO	1*	1	200
400	QPSK	5/8	NO	1*	1	200
480	QPSK	3/4	NO	1*	1	200

**TTD:** Tasa de Transferencia de Datos

**TCod:** Tasa de Codificación

**GEG:** Ganancia de Ensanchamiento General

**MOD:** Modulación

**ESC:** Entrada Simétrica Conjugada para la IFFT

**N<sub>CBPS</sub>:** Bits codificados por símbolo OFDM

**TSF:** Factor de ensanchamiento en el tiempo

\* Sin ensanchamiento en el tiempo.

#### 1.4.1.2 Parámetros relacionados con la sincronización

Los parámetros de sincronización asociados con la OFDM PHY se muestran en la tabla 4

<sup>2</sup> TSF: Time Spreading Factor. Factor de Ensanchamiento en el Tiempo, aplicado a los datos en el dominio del tiempo.

Tabla 4 Parámetros relacionados con la sincronización

Parámetro	Valor
<b>N<sub>SD</sub> : Número de subportadoras de datos</b>	100
<b>N<sub>SDP</sub>: Número de subportadoras piloto definidas</b>	12
<b>N<sub>SG</sub> : Número de subportadoras de guarda</b>	10
<b>N<sub>ST</sub> :Número total de subportadoras utilizadas</b>	$122 = (N_{SD} + N_{SDP} + N_{SG})$
<b><math>\Delta F</math>: Espaciamiento de frecuencia entre subportadoras</b>	$4,125 \text{ MHz} = 528 \text{ MHz}/128$
<b>T<sub>FFT</sub>: Periodo IFFT/FFT</b>	$242,42 \text{ ns} (1/\Delta F)$
<b>T<sub>CP</sub>: Duración del prefijo cíclico</b>	$60,61 \text{ ns} = 32/528 \text{ MHz}$
<b>T<sub>G</sub>: Duración del intervalo de guarda</b>	$9,47 \text{ ns} = 5/528 \text{ MHz}$
<b>T<sub>ZP</sub> : Duración del relleno cero</b>	$70,08 \text{ ns} = 37/528 \text{ MHz}$
<b>T<sub>SYM</sub> : Intervalo de símbolo</b>	$312,5 \text{ ns} (T_{CP}+T_{FFT}+T_{G})$

#### 1.4.2 Preámbulo PLCP

El preámbulo PLCP se agrega antes de la cabecera PLCP para ayudar (mediante las secuencias CE, FS y PS que se definirán mas adelante) a los algoritmos de recepción relacionados con la sincronización y estimaciones del canal. En esta sección se definirán tanto el preámbulo PLCP estándar como el preámbulo PLCP simplificado. Estos tipos de preámbulo PLCP se asocian con un TFC como se muestra en la tabla 1.4 del capítulo 1 de este trabajo de grado.

Las señales de preámbulo se definen como señales reales en banda base. La señal de banda base para las tasas transferencia de datos de menor velocidad de transmisión por definición es una señal real y esto hace que el preámbulo sea compatible con esos modos. Para los modos con tasas de transferencia de datos de más de 110 Mbps, donde la señal transmitida en banda base es compleja, el preámbulo PLCP debe ser insertado en la parte real de la señal compleja de banda base.

El preámbulo PLCP estándar consta de dos partes:

La Secuencia de Sincronización de Paquetes (PS, Packet Synchronization Sequence) y la Secuencia de Sincronización de Tramas (FS, Frame Synchronization Sequence) en el dominio del tiempo y la Secuencia de Estimación del Canal (CE, Channel Estimation Sequence) en el dominio la frecuencia. La figura 2 muestra la estructura del preámbulo PLCP para diferentes TFC.

Las secuencias PS y FS son definidas con base en las secuencias de sincronización en el dominio del tiempo mostradas en la tabla 5 y la secuencia de cubierta del preámbulo mostrado en la tabla 6. Las secuencias PS y FS se construyen de la siguiente manera:

1. Se elige la secuencia apropiada de sincronización en el dominio del tiempo dependiendo del TFC en consideración a partir de la tabla 5.
2. Un periodo de la secuencia de sincronización en el dominio del tiempo,  $p_t(n)$ , es una secuencia de 165 muestras construidas a partir de la adición de intervalos de 37 muestras de relleno a las 128 de la secuencia de sincronización en el dominio del tiempo elegida en el paso 1.
3. A continuación, se elige la secuencia apropiada de cubierta del preámbulo  $p_c(n)$  dependiendo del TFC del cual se esté haciendo uso. La sincronización combinada de paquetes y tramas que hace parte del preámbulo PLCP se genera a partir el producto Kronecker<sup>3</sup> de las dos secuencias, de aquí se obtiene la ecuación 4.

$$p(n) = p_c(n) \otimes p_t(n) \quad (4)$$

---

<sup>3</sup> El producto Kronecker se define como una operación entre matrices  $A_{m \times n}$  y  $B_{p \times q}$  en donde todos los elementos de la matriz A se multiplican por toda la matriz B, obteniéndose una matriz de orden superior ((m.p)x(n.q)) al de las dos anteriores. El producto Kronecker entre matrices se denota por:  $\otimes$

Esto es equivalente a tomar cada elemento de la secuencia de cubierta y multiplicarlo por la secuencia de sincronización; y concatenando las 24 secuencias resultantes es posible formar la secuencia de sincronización combinada de paquetes y tramas.

La porción del preámbulo para sincronización de paquetes puede ser utilizada para detección y adquisición de los mismos. La porción del preámbulo para sincronización de trama puede ser utilizada para sincronizar el algoritmo de recepción con el preámbulo. La porción de sincronización de trama proporciona una secuencia de periodo por banda en la que se invierte la polaridad con respecto a la porción de sincronización de paquetes del preámbulo.

Finalmente, la porción del preámbulo que corresponde a la estimación del canal, CE, denotada como  $\{CE_0, CE_1, \dots, CE_5\}$ , será construida sucesivamente añadiendo 6 períodos de la secuencia de prueba OFDM. Esta secuencia de prueba es generada al pasar la secuencia en el dominio de la frecuencia definida en la tabla 8 más las 37 muestras de relleno, al dominio del tiempo. Ésta porción del preámbulo puede ser utilizada para hacer estimaciones con respecto a la respuesta del canal en frecuencia.

Además del preámbulo PLCP estándar, se ha definido un preámbulo PLCP simplificado, para ser utilizado cuando se presentan grandes flujos de paquetes, separados por un tiempo MIFS. Para tasas de transferencia de datos iguales o menores a 200 Mbps todos los paquetes deben utilizar el preámbulo PLCP estándar. Sin embargo, para tasas de transferencia de datos superiores a 200 Mbps, el primer paquete utilizará el preámbulo PLCP estándar, mientras los demás utilizarán el preámbulo PLCP simplificado. El bit del Tipo de Preámbulo (TP) en la cabecera PHY (descrito la sección 1.4.4.5), describe el tipo de preámbulo utilizado en el siguiente paquete. El preámbulo PLCP simplificado, que se muestra en la figura 2a, es muy similar al Preámbulo PLCP estándar, que se muestra en la figura 2b y consta de tres partes distintas: sincronización de paquetes, sincronización de tramas y estimación del canal.

Estas partes tienen las mismas funciones que sus correspondientes, en el preámbulo PLCP estándar.

La parte concerniente a la sincronización de trama proporciona un periodo de secuencia por banda en el que se invierte la polaridad con respecto a la parte de sincronización de paquete del preámbulo. La parte concerniente a la estimación del canal del preámbulo PLCP simplificado será construida sucesivamente añadiendo 6 periodos de secuencia de prueba OFDM denotados como  $\{CE_0, CE_1, \dots, CE_5\}$  de manera idéntica como se procedió para definir el preámbulo PLCP estándar.

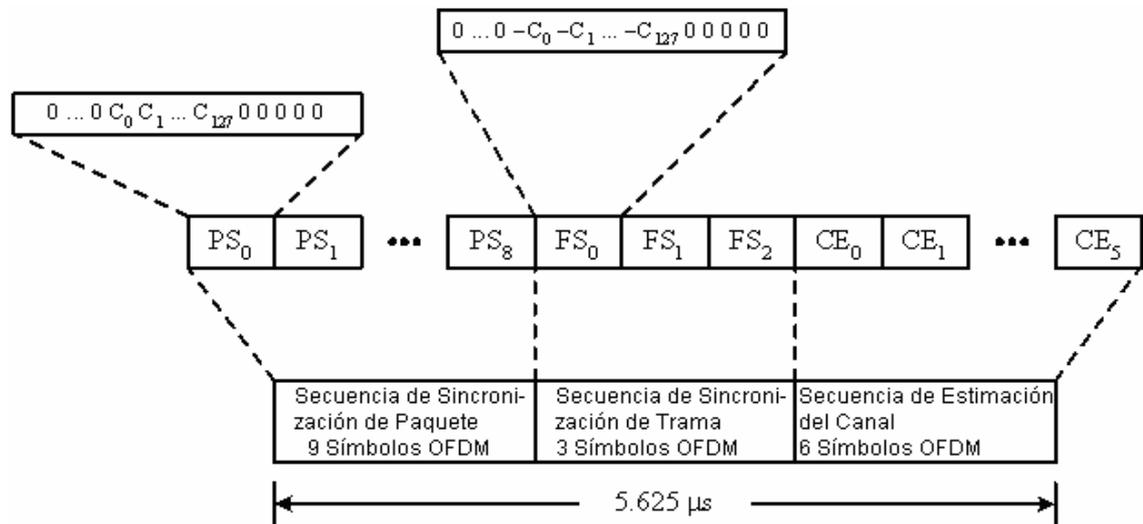


Figura 2a Formato del preámbulo PLCP simplificado

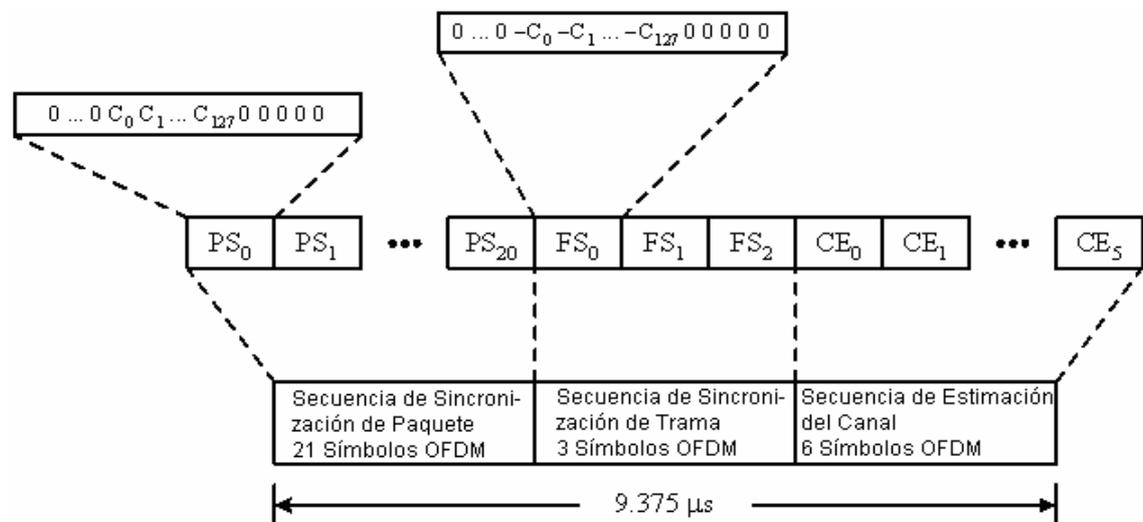


Figura 2b Formato del preámbulo PLCP estándar

Tabla 5 Secuencia de sincronización de paquetes en el dominio del tiempo

Elemento de secuencia	Valor						
C <sub>0</sub>	0,6564	C <sub>32</sub>	-0,0844	C <sub>64</sub>	-0,2095	C <sub>96</sub>	0,4232
C <sub>1</sub>	-1,3671	C <sub>33</sub>	1,1974	C <sub>65</sub>	1,1640	C <sub>97</sub>	-1,2684
C <sub>2</sub>	-0,9958	C <sub>34</sub>	1,2261	C <sub>66</sub>	1,2334	C <sub>98</sub>	-1,8151
C <sub>3</sub>	-1,3981	C <sub>35</sub>	1,4401	C <sub>67</sub>	1,5338	C <sub>99</sub>	-1,4829
C <sub>4</sub>	0,8481	C <sub>36</sub>	-0,5988	C <sub>68</sub>	-0,8844	C <sub>100</sub>	1,0302
C <sub>5</sub>	1,0892	C <sub>37</sub>	-0,4675	C <sub>69</sub>	-0,3857	C <sub>101</sub>	0,9419
C <sub>6</sub>	-0,8621	C <sub>38</sub>	0,8520	C <sub>70</sub>	0,7730	C <sub>102</sub>	-1,1472
C <sub>7</sub>	1,1512	C <sub>39</sub>	-0,8922	C <sub>71</sub>	-0,9754	C <sub>103</sub>	1,4858
C <sub>8</sub>	0,9602	C <sub>40</sub>	-0,5603	C <sub>72</sub>	-0,2315	C <sub>104</sub>	-0,6794
C <sub>9</sub>	-1,3581	C <sub>41</sub>	1,1886	C <sub>73</sub>	0,5579	C <sub>105</sub>	0,9573
C <sub>10</sub>	-0,8354	C <sub>42</sub>	1,1128	C <sub>74</sub>	0,4035	C <sub>106</sub>	1,0807
C <sub>11</sub>	-1,3249	C <sub>43</sub>	1,0833	C <sub>75</sub>	0,4248	C <sub>107</sub>	1,1445
C <sub>12</sub>	1,0964	C <sub>44</sub>	-0,9073	C <sub>76</sub>	-0,3359	C <sub>108</sub>	-1,2312
C <sub>13</sub>	1,3334	C <sub>45</sub>	-1,6227	C <sub>77</sub>	-0,9914	C <sub>109</sub>	-0,6643
C <sub>14</sub>	-0,7378	C <sub>46</sub>	1,0013	C <sub>78</sub>	0,5975	C <sub>110</sub>	0,3836
C <sub>15</sub>	1,3565	C <sub>47</sub>	-1,6067	C <sub>79</sub>	-0,8408	C <sub>111</sub>	-1,1482
C <sub>16</sub>	0,9361	C <sub>48</sub>	0,3360	C <sub>80</sub>	0,3587	C <sub>112</sub>	-0,0353
C <sub>17</sub>	-0,8212	C <sub>49</sub>	-1,3136	C <sub>81</sub>	-0,9604	C <sub>113</sub>	-0,6747
C <sub>18</sub>	-0,2662	C <sub>50</sub>	-1,4447	C <sub>82</sub>	-1,0002	C <sub>114</sub>	-1,1653
C <sub>19</sub>	-0,6866	C <sub>51</sub>	-1,7238	C <sub>83</sub>	-1,1636	C <sub>115</sub>	-0,8896
C <sub>20</sub>	0,8437	C <sub>52</sub>	1,0287	C <sub>84</sub>	0,9590	C <sub>116</sub>	0,2414
C <sub>21</sub>	1,1237	C <sub>53</sub>	0,6100	C <sub>85</sub>	0,7137	C <sub>117</sub>	0,1160
C <sub>22</sub>	-0,3265	C <sub>54</sub>	-0,9237	C <sub>86</sub>	-0,6776	C <sub>118</sub>	-0,6987
C <sub>23</sub>	1,0511	C <sub>55</sub>	1,2618	C <sub>87</sub>	0,9824	C <sub>119</sub>	0,4781
C <sub>24</sub>	0,7927	C <sub>56</sub>	0,5974	C <sub>88</sub>	-0,5454	C <sub>120</sub>	0,1821

C <sub>25</sub>	-0,3363	C <sub>57</sub>	-1,0976	C <sub>89</sub>	1,1022	C <sub>121</sub>	-1,0672
C <sub>26</sub>	-0,1342	C <sub>58</sub>	-0,9776	C <sub>90</sub>	1,6485	C <sub>122</sub>	-0,9676
C <sub>27</sub>	-0,1546	C <sub>59</sub>	-0,9982	C <sub>91</sub>	1,3307	C <sub>123</sub>	-1,2321
C <sub>28</sub>	0,6955	C <sub>60</sub>	0,8967	C <sub>92</sub>	-1,2852	C <sub>124</sub>	0,5003
C <sub>29</sub>	1,0608	C <sub>61</sub>	1,7640	C <sub>93</sub>	-1,2659	C <sub>125</sub>	0,7419
C <sub>30</sub>	-0,1600	C <sub>62</sub>	-1,0211	C <sub>94</sub>	0,9435	C <sub>126</sub>	-0,8934
C <sub>31</sub>	0,9442	C <sub>63</sub>	1,6913	C <sub>95</sub>	-1,6809	C <sub>127</sub>	0,8391

Tabla 6 Secuencias de cubierta para el preámbulo estándar dominio del tiempo

Índice de muestras	Secuencia de índices	
	1 (TFCs 1,2)	2 (TFCs 3,4)
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	1
8	1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	1
12	1	1
13	1	1
14	1	1
15	1	1
16	1	1
17	1	1
18	1	1
19	1	-1
20	1	1
21	-1	-1
22	-1	-1
23	-1	-1

Tabla 7 Secuencias de cubierta para el preámbulo simplificado en el dominio del tiempo

Índice de muestras	Secuencia de índices	
	1(TFCs 1,2)	2(TFCs 3,4)
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	-1
8	1	1
9	-1	-1
10	-1	-1
11	-1	-1

Tabla 8 Secuencia de prueba OFDM en el dominio de la frecuencia

Número de tono	Valor						
-61	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-30	$(-1+j)/\sqrt{2}$	1	$(-1+j)/\sqrt{2}$	32	$(1-j)/\sqrt{2}$
-60	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-29	$(1-j)/\sqrt{2}$	2	$(-1+j)/\sqrt{2}$	33	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-59	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-28	$(-1+j)/\sqrt{2}$	3	$(1-j)/\sqrt{2}$	34	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-58	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-27	$(1-j)/\sqrt{2}$	4	$(1-j)/\sqrt{2}$	35	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-57	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-26	$(-1+j)/\sqrt{2}$	5	$(-1+j)/\sqrt{2}$	36	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-56	$(1-j)/\sqrt{2}$	-25	$(-1+j)/\sqrt{2}$	6	$(1-j)/\sqrt{2}$	37	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-55	$(1-j)/\sqrt{2}$	-24	$(-1+j)/\sqrt{2}$	7	$(1-j)/\sqrt{2}$	38	$(1-j)/\sqrt{2}$
-54	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-23	$(-1+j)/\sqrt{2}$	8	$(1-j)/\sqrt{2}$	39	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-53	$(1-j)/\sqrt{2}$	-22	$(-1+j)/\sqrt{2}$	9	$(-1+j)/\sqrt{2}$	40	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-52	$(1-j)/\sqrt{2}$	-21	$(1-j)/\sqrt{2}$	10	$(-1+j)/\sqrt{2}$	41	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-51	$(1-j)/\sqrt{2}$	-20	$(1-j)/\sqrt{2}$	11	$(1-j)/\sqrt{2}$	42	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-50	$(1-j)/\sqrt{2}$	-19	$(-1+j)/\sqrt{2}$	12	$(1-j)/\sqrt{2}$	43	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-49	$(1-j)/\sqrt{2}$	-18	$(1-j)/\sqrt{2}$	13	$(1-j)/\sqrt{2}$	44	$(-1+j)/\sqrt{2}$

-48	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-17	$(-1+j)/\sqrt{2}$	14	$(-1+j)/\sqrt{2}$	45	$(1-j)/\sqrt{2}$
-47	$(1-j)/\sqrt{2}$	-16	$(1-j)/\sqrt{2}$	15	$(-1+j)/\sqrt{2}$	46	$(1-j)/\sqrt{2}$
-46	$(1-j)/\sqrt{2}$	-15	$(1-j)/\sqrt{2}$	16	$(-1+j)/\sqrt{2}$	47	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-45	$(1-j)/\sqrt{2}$	-14	$(1-j)/\sqrt{2}$	17	$(-1+j)/\sqrt{2}$	48	$(1-j)/\sqrt{2}$
-44	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-13	$(-1+j)/\sqrt{2}$	18	$(-1+j)/\sqrt{2}$	49	$(1-j)/\sqrt{2}$
-43	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-12	$(-1+j)/\sqrt{2}$	19	$(1-j)/\sqrt{2}$	50	$(1-j)/\sqrt{2}$
-42	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-11	$(-1+j)/\sqrt{2}$	20	$(-1+j)/\sqrt{2}$	51	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-41	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-10	$(-1+j)/\sqrt{2}$	21	$(-1+j)/\sqrt{2}$	52	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-40	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-9	$(-1+j)/\sqrt{2}$	22	$(-1+j)/\sqrt{2}$	53	$(1-j)/\sqrt{2}$
-39	$(1-j)/\sqrt{2}$	-8	$(1-j)/\sqrt{2}$	23	$(-1+j)/\sqrt{2}$	54	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-38	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-7	$(-1+j)/\sqrt{2}$	24	$(-1+j)/\sqrt{2}$	55	$(1-j)/\sqrt{2}$
-37	$(1-j)/\sqrt{2}$	-6	$(-1+j)/\sqrt{2}$	25	$(-1+j)/\sqrt{2}$	56	$(1-j)/\sqrt{2}$
-36	$(1-j)/\sqrt{2}$	-5	$(-1+j)/\sqrt{2}$	26	$(1-j)/\sqrt{2}$	57	$(1-j)/\sqrt{2}$
-35	$(1-j)/\sqrt{2}$	-4	$(-1+j)/\sqrt{2}$	27	$(1-j)/\sqrt{2}$	58	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-34	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-3	$(-1+j)/\sqrt{2}$	28	$(-1+j)/\sqrt{2}$	59	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-33	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-2	$(-1+j)/\sqrt{2}$	29	$(1-j)/\sqrt{2}$	60	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-32	$(-1+j)/\sqrt{2}$	-1	$(1-j)/\sqrt{2}$	30	$(1-j)/\sqrt{2}$	61	$(-1+j)/\sqrt{2}$
-31	$(-1+j)/\sqrt{2}$			31	$(1-j)/\sqrt{2}$		

### 1.4.3 Cabecera PLCP

La cabecera PLCP se formará de la siguiente manera:

1. Se realiza el cálculo del respectivo HCS a partir de la combinación de las cabeceras PHY y MAC como se explicará en la sección 1.4.5.
2. Se adicionan el HCS a la cabecera MAC

3. *Scrambling*<sup>4</sup> de la cabecera MAC y el HCS como se explicará en la sección 1.4.8

4. Se insertan 6 bits de cola después de la cabecera de PHY, 6 bits de cola a continuación del HCS, luego, 52 bits de paridad *Reed Solomon* y finalmente 6 bits de cola para completar así la cabecera PLCP.

### 1.4.4 Cabecera PHY

Los campos que conforman la cabecera PHY se muestran en la figura 3.

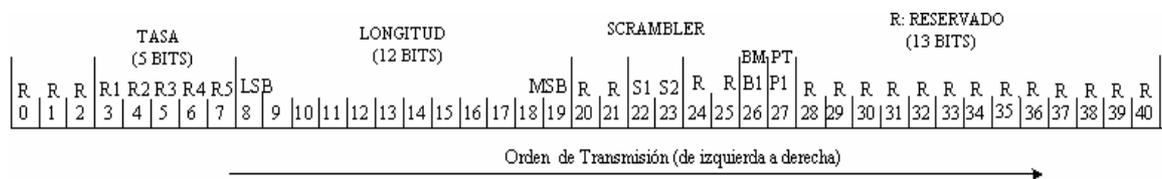


Figura 3 Asignación de bits para la cabecera PHY

Después de los símbolos de prueba OFDM se pondrá la cabecera PHY, que contiene la tasa de transferencia de datos de la carga útil de la trama MAC, la longitud de dicha carga útil (la cual no incluye al FCS), el identificador de inicio para los datos del *Scrambler* e información acerca del siguiente paquete (si esta siendo enviado en modo de transferencia por demanda (*Streaming mode*) y además si emplea el preámbulo simplificado o no).

La cabecera PHY se compone de 40 bits. Los bits 3 al 7 determinarán la TASA. Los bits 8 a 19 determinarán el campo "LONGITUD", transmitiéndose a partir del Bit Menos Significativo (LSB, Least Significant Bit). Los bits 22 y 23 determinarán al valor inicial de estado del *Scrambler*, el cual es utilizado para sincronizar el *Descrambler* en el receptor. El bit 26 determinará si el paquete está siendo transmitido en modo de transferencia por demanda o Modo Ráfaga

<sup>4</sup> El proceso de *Scrambling* es ejecutado por el *Scrambler* que es un dispositivo que transpone o invierte las señales en el transmisor para hacerlas indescifrables para receptores que no posean un dispositivo de *Descrambling* apropiado (*Descrambler*). Esta operación se asemeja al cifrado de datos pero si diferencia en que es realizada analógicamente mientras que el cifrado es realizado digitalmente.

(BM, *Burst Mode*). El bit 27 determinará el tipo de preámbulo utilizado (estándar ó simplificado) para el siguiente paquete. Los demás bits que no se han definido para esta sección serán reservados para usos futuros.

#### 1.4.4.1 Tasa de transferencia de datos (TASA)

El campo TASA contiene información acerca del tipo de modulación, tasa de codificación y el factor de ensanchamiento utilizado para transmitir la carga útil de la trama MAC. Dependiendo de la tasa de transferencia de datos (TASA), los bits R1–R5 serán fijados de acuerdo los valores que se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9 Valor binario de identificación para la tasa de transferencia de datos

TASA (Mbps)	R1-R5
53.3	00000
80	00001
110	00010
160	00011
200	00100
320	00101
400	00110
480	00111
Reservado	01000-01111

#### 1.4.4.2 Campo de longitud PLCP (LONGITUD)

El campo de longitud PLCP esta compuesto por 12 bits que indican el número de Bytes en la carga útil de la trama (este valor no incluye el FCS, los bits de cola y los bits de paridad *Reed Solomon*).

#### 1.4.4.3 Campo para el *Scrambler* PLCP (SCRAMBLER)

La MAC fijará los bits S1–S2 de acuerdo con el valor de identificación de inicio del *Scrambler*. El valor para estos dos bits corresponde al valor de origen elegido para los datos del *Scrambler*.

#### 1.4.4.4 Campo para el modo ráfaga

La MAC fijará el bit para el modo ráfaga, que será utilizado para indicar si el siguiente paquete hace parte de un paquete ráfaga. En este modo el espaciado intertrama debe ser igual al MIFS (ver tabla 1.7 del capítulo 1 de este trabajo de grado). En modo ráfaga, el tamaño de un paquete será mínimo de 1 Byte, y en modo de transferencia por demanda, el tamaño de un paquete puede ser mínimo de cero Bytes. Los valores se indican en la tabla 10.

Tabla 10. Campo Modo *Ráfaga*

Bit para modo ráfaga	Estado del siguiente paquete
0	El siguiente paquete no es parte de la ráfaga
1	El siguiente paquete es parte de la Ráfaga

#### 1.4.4.5 Bit de Tipo de Preámbulo (PT, Preamble Type bit)

La MAC fijará el bit correspondiente al tipo de preámbulo únicamente en modo de transferencia por demanda para indicar el tipo de preámbulo PLCP (estándar o simplificado) utilizado en la transmisión del siguiente paquete. Para tasas de transferencia de datos inferiores a 200 Mbps, este bit permanecerá en cero (como se indica en la sección 1.4.3). Los valores se dan en la tabla 11

Tabla 11 Bit para el tipo de preámbulo

Bit tipo de preámbulo (PT)	Tipo de preámbulo utilizado en el siguiente paquete
0	Preámbulo estándar
1	Preámbulo simplificado

#### 1.4.5 Secuencia de Chequeo de Cabecera (HCS)

La combinación de la cabecera PHY y la cabecera MAC serán verificados mediante una Secuencia Chequeo de Cabecera (HCS, Header Check Sequence) CCITT CRC-16. El CCITT CRC-16 HCS debe ser el complemento a 1 del residuo generado por la división en módulo 2 entre la combinación verificada de las cabeceras MAC y PHY dada por el polinomio de la ecuación 5.

$$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (5)$$

Todos los cálculos HCS deben ser hechos antes del *Scrambling* de datos.

#### 1.4.6 Bits de cola

El campo para bits de cola es necesario para retornar de nuevo el codificador convolucional al “estado cero”. Este proceso disminuye la probabilidad de que el decodificador convolucional cometa errores, lo cual hace más confiable la decodificación del mensaje transmitido. El campo de bits de cola que se encuentra después de la cabecera PHY y del HCS constará de 6 ceros que no serán procesados por el *Scrambler* y de bits de cola ubicados después de la HCS y al final de la cabecera PLCP que serán procesados por el *Scrambler* y tomarán el valor de 0.

#### 1.4.7 Bits de paridad *Reed Solomon*

La corrección de errores *Reed Solomon* es un esquema de codificación en bloque que trabaja primero construyendo un polinomio de datos que serán transmitidos y en seguida enviando un diagrama sobremuestreado del polinomio en vez de los datos originales. Debido a la información redundante contenida en los datos sobremuestreados, es posible reconstruir el polinomio original y así mismo los datos para evitar el envío de datos erróneos desde el transmisor.

En la cabecera PLCP será agregado un código *Reed Solomon* para aumentar la robustez de esta y específicamente de la cabecera PHY, la cabecera MAC y el HCS. Lo que implica que la cabecera PLCP no será un factor limitante en la tasa de corrección de paquetes.

#### 1.4.8 Scrambler de datos

El *Scrambler* será utilizado en la cabecera PLCP y en general, en la trama PLCP. En la cabecera PLCP, solamente la combinación de la cabecera MAC, el HCS, los bits de cola que están a continuación del HCS y los bits de paridad *Reed Solomon* serán procesados por el *Scrambler* (el preámbulo PLCP, la cabecera PHY, y los bits de cola que están a continuación de la cabecera PLCP no serán procesados por el *Scrambler*). El generador polinómico,  $g(D)$ , para el generador de Secuencias Binarias Pseudo Aleatorias (PRBS, Pseudo Random Binary Sequence) será  $g(D) = 1 + D^{14} + D^{15}$ , donde  $D$  denota el retardo de un bit.

Utilizando el polinomio generador, el PRBS,  $x_n$ , será el mostrado en la ecuación 6

$$x_n = x_{n-14} \oplus x_{n-15}, \text{ con } n=0,1,2,3\dots \quad (6)$$

Donde “ $\oplus$ ” denota adición en modulo 2. La siguiente secuencia define el vector de inicialización,  $x_{init}$ , el cual es especificado por el parámetro valor inicial en la tabla 12 y se muestra en la ecuación 7.

$$x_{init} = [ x_{n-1}^i \quad x_{n-2}^i \quad \wedge \quad x_{n-14}^i \quad x_{n-15}^i ] \quad (7)$$

Donde  $x_k^i$ , representa el valor binario inicial a la salida del k-ésimo elemento de retardo.

Los bits de datos procesador por el *Scrambler*,  $s_m$ , se obtienen como se muestra en la ecuación 8.

$$s_m = d_m \oplus x_m, \quad \text{donde } m = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Donde  $d_m$  representa los bits de datos no procesados por el *Scrambler*. El *Descrambler*, será inicializado con el mismo vector de inicialización utilizado en el *Scrambler* del transmisor ( $x_{init}$ ). El vector de inicialización está determinado por el identificador de inicio de la cabecera PLCP en la trama recibida.

El Bit 15 del vector de inicialización o valor inicial corresponderá al identificador inicial como se muestra en la tabla 12. La MAC fijará el valor de identificación inicial en 00, cuando se inicializa la PHY y se incrementará un contador de 2 bits por cada trama enviada. El valor del identificador inicial enviado en la cabecera PLCP será utilizado para inicializar el *Scrambler* en la cabecera PLCP y el cuerpo de la trama.

Tabla 12 Valores iniciales para el *Scrambler*

<b>Identificador inicial (S1 , S2)</b>	<b>Valor inicial</b>	<b>Primeros 16 bits a la salida del <i>Scrambler</i></b>
0 , 0	0011 1111 1111 111	0000000000001000
0 , 1	0111 1111 1111 111	0000000000000100
1 , 0	1011 1111 1111 111	0000000000001110
1 , 1	1111 1111 1111 111	0000000000000010

#### 1.4.9 Codificador Convolutacional

El codificador convolutacional utilizará un código de tasa convolutacional  $R=1/3$ , con generadores polinómicos,  $g_0 = 133_8$ ,  $g_1 = 165_8$  y  $g_2 = 171_8$ , como se muestra en la figura 4. El bit "A" será el primero que genere el codificador, seguido por el bit "B", y finalmente el bit "C". Los diversos códigos convolutacionales se derivan del código convolutacional con tasa  $R=1/3$  empleando "perforación". La perforación es un proceso para omitir algunos de los bits codificados en el transmisor (de esa manera se reduce el número de bits trasmitidos y se incrementa la tasa de codificación) e insertando un "falso cero métrico" dentro del decodificador convolutacional del lado del receptor en lugar de los bits omitidos. Los patrones de perforación se ilustran en las figuras 5, 6 y 7. En cada uno de estos casos las tablas deben ser llenadas con los bits que salen del codificador de izquierda a derecha. Para el último bloque de bits, el proceso deberá ser detenido en el momento que los bits que salen del codificador se agoten (se recomienda la decodificación por medio del algoritmo de Viterbi).



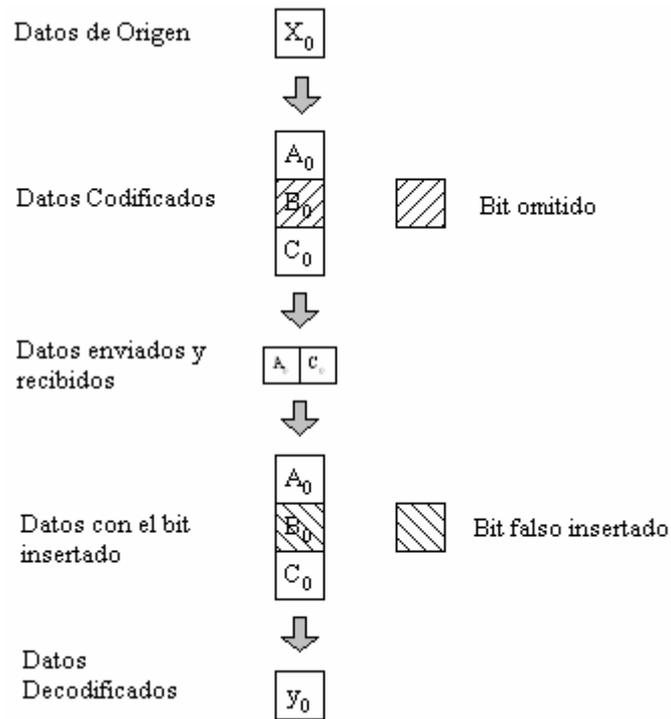


Figura 6 Ejemplo del proceso de perforación ( $R = 1/2$ )

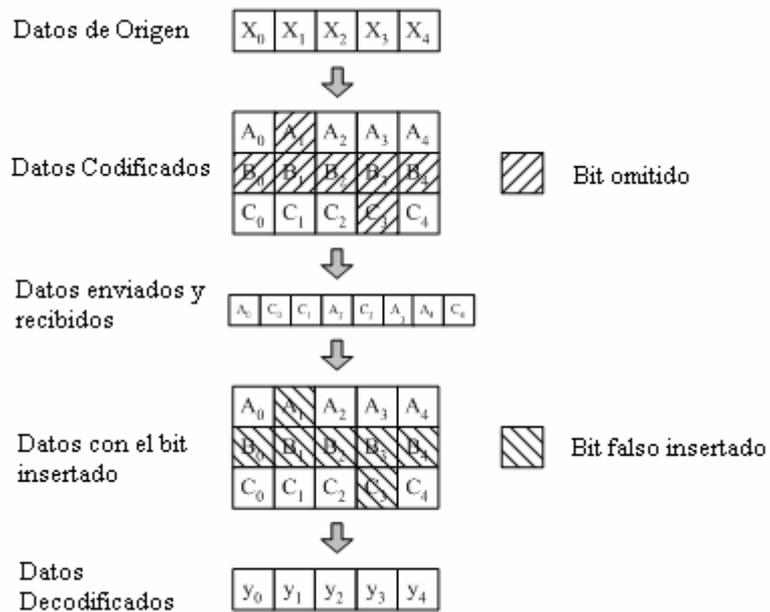


Figura 7 Ejemplo del proceso de perforación ( $R = 5/8$ )

### 1.4.10 Intercalación de Bits

El flujo de bits codificados debe ser intercalado antes de la modulación. El intercalación de bits provee robustez contra posibles ráfagas de errores. El proceso de intercalación de bits se desarrolla en tres etapas: (i) intercalación de símbolos a través de los símbolos OFDM, (ii) intercalación de tono intersimbólico y (iii) cambios cíclicos intersimbólicos. El intercalador de símbolos permuta los bits a través de los símbolos OFDM para sacar provecho de la diversidad de frecuencias a través de las subbandas, mientras que el intercalador de tono permuta los bits a través de los tonos de datos dentro de un símbolo OFDM para aprovechar la diversidad de frecuencia de tonos y proveer robustez contra las interferencias de banda estrecha.

La longitud del intercalador de símbolos esta determinada por el TSF definido en la tabla 3. El intercalador de símbolos deberá intercalar alrededor de  $(6/TSF)*N_{CBPS}$  bits codificados, donde  $N_{CBPS}$  es el número de bits codificados por símbolo OFDM. Después de esto, los símbolos deben ser cambiados cada ciclo por una cantidad que será descrita más adelante en esta sección. Esto se hace para aprovechar la diversidad en frecuencia, especialmente en los modos que no emplean ensanchamiento de tiempo.

Para el proceso de intercalación de bits, los bits codificados primero serán agrupados en un bloque de  $(6/TSF)*N_{CBPS}$  bits codificados (correspondientes a seis símbolos OFDM transmitidos). Cada grupo de bits codificados será permutado utilizando un bloque intercalador de  $(6/TSF)*N_{CBPS}$ . Las secuencias  $\{U(i)\}$  y  $\{S(i)\}$ , donde  $i = 0, \dots, (6/TSF)*N_{CBPS}-1$ , representan los bits de entrada y salida del bloque intercalador de símbolos respectivamente. La relación de entrada salida de este intercalador está dada por la ecuación 9.

$$S(i) = U \left\{ \text{Floor} \left( \frac{i}{N_{CBPS}} \right) + (6/TSF) * \text{Mod}(i, N_{CBPS}) \right\} \quad (9)$$

Donde la función  $Floor(\cdot)$  retorna el valor entero más grande menor o igual a su valor argumento y la función  $Mod(\cdot)$  retorna el residuo de la división de  $i$  entre  $N_{CBPS}$ .

El valor de salida del bloque intercalador de símbolos es pasado través del bloque intercalador de tonos. Las salidas del bloque intercalador de símbolos se agrupan en bloques de  $N_{CBPS}$  bits y luego son permutadas utilizando un bloque regular intercalador de  $N_{Tint} \times 10$ , donde  $N_{Tint} = N_{CBPS}/10$ . La secuencias  $\{S(i)\}$  y  $\{T(i)\}$ , donde  $i = 0, \dots, N_{CBPS}-1$ , representan los bits de entrada y salida del bloque intercalador de tonos respectivamente.

La relación entrada salida del bloque intercalador de tonos está dada por la ecuación 10.

$$T(i) = S \left\{ Floor \left( \frac{i}{N_{Tint}} \right) + 10 Mod(i, N_{Tint}) \right\} \quad (10)$$

Donde la función  $Mod(\cdot)$  retorna el residuo después de la división  $i$  entre  $N_{Tint}$  y la función  $Floor(\cdot)$  retorna el valor entero más grande menor o igual a su valor argumento

La salida del Intercalador de tono se pasa entonces a la última etapa, que consiste en el cambio a un ciclo distinto de cada bloque de  $N_{CBPS}$  bits con el intervalo del intercalador de símbolos definido.  $\{T(b,i)\}$  y  $\{V(b,i)\}$ , donde  $i=0,1,\dots,N_{CBPS}-1$ , representa las secuencias de entrada y salida respectivamente del cambio de ciclo para el b-ésimo bloque. De esto se obtiene la ecuación 11

$$V(b,i) = T(b, \text{mod}(i + A(b), N_{CBPS})) \quad (11)$$

Para modos simétricos conjugados,  $N_{CBPS}=100$ :  $A(b) = b*33$ ,  $b=0,1,2$ .

Para modos simétricos no conjugados con  $TSF=2$ ,  $N_{CBPS}=200$ :  $A(b) = b*66$ ,  $b=0,1,2$ .

Para modos simétricos no conjugados con  $TSF=1$ ,  $N_{CBPS}=200$ :  $A(b) = b*33$ ,  $b=0,1,2,\dots,5$ .

#### 1.4.11 QPSK

Los datos seriales codificados e intercalados de entrada deben ser divididos en grupos de dos bits y convertidos en números complejos para representar los puntos de la constelación QPSK. La conversión deberá ser presentada de acuerdo al mapeo de la constelación del código gray, como se muestra en la figura 8, con el bit de entrada,  $b_0$ , siendo el primero del flujo de bits. Los valores de salida,  $d$ , se forman multiplicando el valor resultante  $(I + jQ)$  por un factor de normalización de  $K_{MOD}$ , como se describe en la ecuación 12

$$d = (I + jQ) \times K_{MOD} \quad (12)$$

El factor de normalización,  $K_{MOD}$ , depende del modo de modulación base, como se muestra en la tabla 13. En implementaciones prácticas, un valor aproximado del factor de normalización puede ser utilizado siempre y cuando el dispositivo reúna los requerimientos necesarios.

Para QPSK,  $b_0$  determina el valor de I, y  $b_1$  determina el valor de Q, como se muestra en la tabla 14.

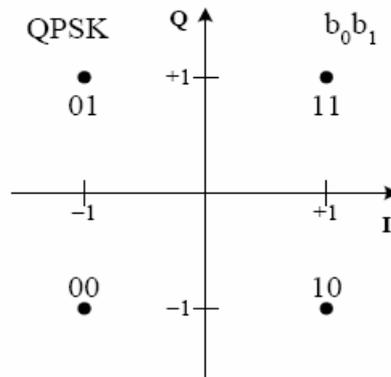


Figura 8 Codificación de bits para la constelación QPSK

Tabla 13. Relación entre la modulación QPSK y el factor  $K_{MOD}$

Modulación	$K_{MOD}$
QPSK	$1/\sqrt{2}$

Tabla 14. Codificación QPSK

Bits de entrada (b0 b1)	I - salida	Q - salida
00	-1	-1
01	-1	1
10	1	-1
11	1	1

#### 1.4.12 Multiplexación OFDM

Para tasas de transferencia de datos de 53.3 y 80 Mbps, el flujo de símbolos complejos es dividido en grupos de 50 números complejos. Si denotamos los números complejos como  $c_{n,k}$ , que corresponde a la subportadora  $n$  del  $k$ -ésimo símbolo OFDM. Tal como se muestra en la ecuación 13.

$$c_{n,k} = d_{n+50 \times k} \quad n = 0,1, K, 49 \quad k = 0,1, K, N_{SYM} - 1$$

$$c_{(n+50),k} = d_{(49-n)+50 \times k}^* \quad (13)$$

Donde  $N_{SYM}$  denota el número de símbolos OFDM en la carga útil de la trama MAC, bits de cola y bits de paridad *Reed Solomon*.

Para tasas de transferencia de datos de 160, 200, 320, 400 y 480 Mbps, el flujo de números complejos es dividido en grupos de 100 números complejos. Si se utiliza la misma notación de la ecuación 13, se obtiene la ecuación 14 que representa lo anterior.

$$c_{n,k} = d_{n+100 \times k} \quad n = 0,1, K,99 \quad k = 0,1, K, N_{SYM} - 1 \quad (14)$$

Donde  $N_{SYM}$  denota el número de símbolos OFDM en la carga útil de la trama MAC, bits de cola y bits de paridad *Reed Solomon*.

El símbolo OFDM  $r_{datos,k}(t)$  esta definido por la ecuación 15 que se muestra a continuación.

$$r_{datos,k}(t) = \sum_{n=0}^{N_{SD}} C_{n,k} \exp(j2\pi M(n)\Delta(t - T_{CP})) + p_{\text{mod}(k,127)} \sum_{n=-N_{SR}/2}^{N_{SR}/2} P_n \exp(j2\pi m\Delta_F(t - T_{CP})) \quad (15)$$

Donde  $N_{SD}$  es el número de subportadoras de datos,  $N_{ST}$  es el número total de subportadoras y  $p_n$  y  $P_n$  en conjunto describen la contribución de la subportadora piloto y la subportadora de guarda. La función define un mapeo a los índices 0 a 99 desde los índices de corrimiento de frecuencia lógica de -56 a 56, excluyendo los espacios reservados para las subportadoras piloto, subportadoras de guarda y la subportadora de DC que se muestran a continuación en la ecuación 16.

$$M(n) = \begin{cases} n - 56 & n = 0 \\ n - 55 & 1 \leq n \leq 9 \\ n - 54 & 10 \leq n \leq 18 \\ n - 53 & 19 \leq n \leq 27 \\ n - 52 & 28 \leq n \leq 36 \\ n - 51 & 37 \leq n \leq 45 \\ n - 50 & 46 \leq n \leq 49 \\ n - 49 & 50 \leq n \leq 53 \\ n - 48 & 54 \leq n \leq 62 \\ n - 47 & 63 \leq n \leq 71 \\ n - 46 & 72 \leq n \leq 80 \\ n - 45 & 81 \leq n \leq 89 \\ n - 44 & 90 \leq n \leq 98 \\ n - 43 & n = 99 \end{cases} \quad (16)$$

La asignación de frecuencias de subportadora se muestra en la figura 9. Para evitar dificultades en corrimientos del DAC y del ADC y las portadoras en el sistema de RF, la portadora número 0 o portadora de DC no se utiliza.

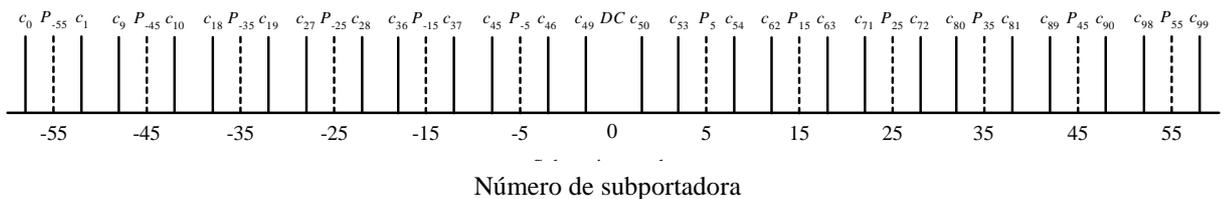


Figura 9 Asignación de frecuencias de subportadora

#### 1.4.12.1 Subportadoras Piloto

En cada símbolo OFDM que sigue al preámbulo PLCP, doce de las subportadoras son utilizadas como señales piloto para hacer la detección

coherente más robusta contra fenómenos de corrimiento de frecuencia y ruido de fase. Estas señales piloto deben ser asignadas a las subportadoras con los números -55, -45, -35, -25, -15, -5, 5, 15, 25, 35, 45 y 55. La contribución debida a las subportadoras piloto para el k-ésimo símbolo OFDM está dada por la IFFT de la secuencia  $P_{n,k}$  mostrada en la ecuación 17, esta secuencia incluye una modulación BPSK por medio de una PRBS ( $p_i$ ), para prevenir la generación de líneas espectrales.

$$P_{n,k} = P_{\text{mod}(k,127)} \times \begin{cases} \frac{1+j}{\sqrt{2}} & n = 25,55 \\ \frac{-1-j}{\sqrt{2}} & n = 5,15,35,45 \\ 0 & n = \pm 1, \dots, \pm 4, \pm 6, \dots, \pm 54, \pm 56 \end{cases} \quad (17)$$

Para modos con tasa de transferencia de datos menores a 106,7 Mbps:

$$P_{n,k} = P_{-n,k}^* \quad n = -5, -15, -25, -35, -45, -55$$

Para modos con tasa de transferencia de datos mayores a 106,7 Mbps:

$$P_{n,k} = P_{-n,k} \quad n = -5, -15, -25, -35, -45, -55$$

En esta numeración, k=0 debe corresponder con el primer símbolo OFDM que sigue al preámbulo PLCP. La longitud de la PRBS de 127 dígitos que modula las subportadoras piloto se define en la ecuación 18.

$$P_{0..126} = \left\{ \begin{array}{l} 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, \\ 1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, \\ -1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, \\ -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, \\ -1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, \\ 1, -1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1 \end{array} \right\} \quad (18)$$

Solamente un elemento de la secuencia anterior debería ser utilizado como símbolo OFDM.

#### 1.4.12.2 Subportadoras de guarda

En cada símbolo OFDM, diez de las subportadoras en los extremos están ocupadas por bandas de frecuencias que deben ser subportadoras de guarda. Las implementaciones utilizarán las subportadoras de guarda para varios propósitos, estos incluyen la posibilidad de disminuir algunos requerimientos de transmisión y recepción de los filtros, así como también posibles mejoras en el desempeño. La relación del nivel de potencia en las subportadoras de guarda con el nivel de las subportadoras que transportan datos debería ser independiente de la implementación, excepto que la misma relación debería ser empleada por todos los símbolos OFDM para definir las subportadoras de guarda. Nótese que esto incluye tanto la secuencia CE como la carga útil (*payload*). Sin embargo, algunas implementaciones pueden utilizar niveles de potencia reducidos para las subportadoras de guarda mientras que la señal transmitida resultante cumpla con los requerimientos de la regulación local de mínimo ancho de banda ocupado.

Existen cinco subportadoras de guarda en cualquiera de los extremos de la banda ocupada por el símbolo OFDM y están localizadas en las subportadoras con índices -61, -60, -59, -58 y -57, así como en las subportadoras con índices 57, 58, 59, 60 y 61. Dichas subportadoras de guarda deben ser creadas

mediante la copia de las cinco subportadoras de datos más próximas a las de guarda, es decir las que tienen índices desde -56 a -52 y de 52 a 56. Tal como se muestra en la figura 10.

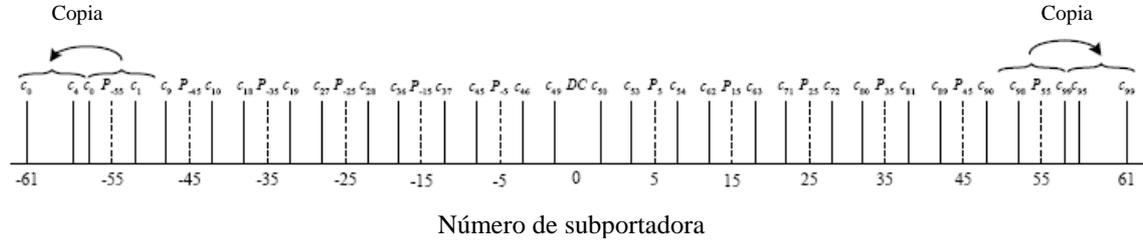


Figura 10 Creación de las subportadoras de guarda a partir de subportadoras de datos

En la ecuación 19 se define matemáticamente la subportadora de guarda para la n-ésima subportadora del k-ésimo símbolo OFDM.

$$\begin{aligned}
 P_{n,k} &= c_{m,k} \quad l = 0,1,2,3,4; \quad n = 57 + l \quad m = 95 + l \\
 P_{n,k} &= c_{m,k} \quad l = 0,1,2,3,4; \quad n = -61 + l \quad m = l
 \end{aligned} \tag{19}$$

En esta ecuación,  $k=0$  corresponde al primer símbolo OFDM que sigue al preámbulo PLCP.

#### 1.4.13 Ensanchamiento en el dominio del tiempo

Para tasas de transferencia de datos de 53.3, 80, 110, 160 y 200 Mbps se debe realizar una operación de ensanchamiento en el dominio del tiempo, con un factor de ensanchamiento  $TSF=2$ , esto para mejorar la diversidad en frecuencia y el desempeño. El ensanchamiento en el dominio del tiempo consiste en transmitir la misma información en dos símbolos OFDM. El k-ésimo símbolo OFDM original, representado como  $S_k(l)$  debe ser generado como se especifica en secciones pasadas de este capítulo. La versión repetida de este símbolo OFDM, representada como  $S'_k(l)$ , debe ser obtenida en el dominio del tiempo como se indica en la ecuación 20.

$$S'_k(l) = \begin{cases} \{\text{Im}\{S_k(l)\}j + \text{Re}\{S_k(l)\}\}p_{\text{mod}(k+6,127)} & \text{Sin\_Simetría\_Conjugada} \\ S_k(l)p_{\text{mod}(k+6,127)} & \text{Con\_Simetría\_Conjugada} \end{cases} \quad (20)$$

Donde  $k=0$  corresponde al primer símbolo OFDM que sigue al preámbulo PLCP y los valores de los índices de  $k$  son los números de los símbolos OFDM antes del ensanchamiento. También, los valores para  $p_k$  son seleccionados de la misma PRBS utilizada en las subportadoras piloto. Mediante la definición del ensanchamiento del símbolo OFDM en el dominio del tiempo, como se indicó anteriormente, se asegura que pueda evitarse la realización de una segunda operación de IFFT en el transmisor para el símbolo repetido. Al mismo tiempo, la secuencia del Registro Realimentado Lineal de Cambio (LFSR, Linear Feedback Shift Register) asegura una Densidad Espectral de Potencia (PSD, Power Spectral Density) plana en el dominio la frecuencia.

La operación de ensanchamiento del dominio del tiempo también puede ser implementada en el dominio la frecuencia, en el transmisor. Esto se logra mediante la inversión del orden de los bits en el vector de bits obtenido después de las operaciones de intercalación y utilizando esto como dato de entrada para las ecuaciones de la sección 1.4.11 y 1.4.12. Las subportadoras piloto del símbolo repetido deben definirse apropiadamente de la misma forma después de ser procesadas por la IFFT; el resultado obtenido se debe ajustar a la definición dada anteriormente para el dominio del tiempo.

#### 1.4.14 Consideraciones de implementación en tiempo discreto

Para la implementación de la IFFT se utilizan 128 puntos (subportadoras OFDM), las subportadoras con índices 1 a 61 a las entradas de la IFFT numeradas con el mismo valor, mientras que los coeficientes -61 a -1 se copian a las entradas 67 a 127 de la IFFT. Las demás subportadoras, las de índices 62 a 66 y la subportadora DC, se fijan en cero. Este mapeo se muestra en la figura 11. Después de realizada la IFFT un prefijo cíclico cuya longitud equivale

a 32 subportadoras, se añade a la salida de la IFFT y un intervalo de guarda se añade al final de las salidas de la IFFT para completar así la longitud requerida de 165 subportadoras para cada símbolo OFDM.

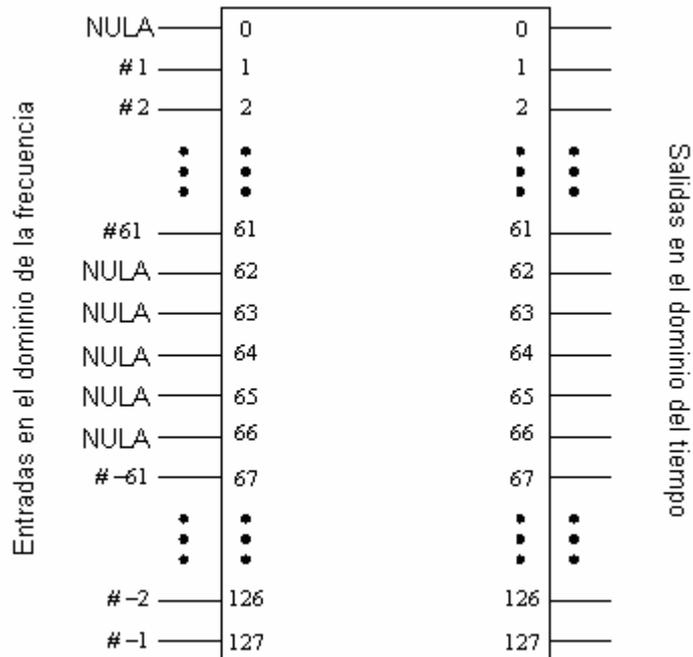


Figura 11 Implementación de la IFFT

## 1.5 TASA DE BITS DE LA CARGA ÚTIL Y *THROUGHPUT* DE LA CAPA FÍSICA

### 1.5.1 Encabezado del Paquete

El preámbulo inicial está compuesto de 30 símbolos OFDM, donde la duración de cada símbolo OFDM es de 312,5 ns. Así, el preámbulo inicial tiene una longitud de 9,375  $\mu$ s. Este valor es independiente de la tasa de transferencia de datos. El Encabezado PLCP corresponde a exactamente doce símbolos OFDM y tiene una duración de transmisión de 3,75  $\mu$ s.

Debido a que la Unidad de Datos de Mensaje del Protocolo (MPDU, Message Protocol Data Unit) será codificada con la tasa de transferencia de datos, la longitud en el tiempo para la MPDU puede variar de acuerdo a esta tasa.

La tabla 14 muestra la duración en el tiempo de cada componente del paquete en función de la tasa de transferencia de datos.

Tabla 14 Duración en el tiempo de cada componente del paquete para cada tasa de datos

Tiempo (µs)	53.3 Mbps	80 Mbps	110 Mbps	160 Mbps	200 Mbps	320 Mbps	400 Mbps	480 Mbps
T_PA_INIT	9,375	9,375	9,375	9,375	9,375	9,375	9,375	9,375
T_PLCPHDR	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
T_DATA	155,625	103,125	78,75	52,50	41,25	26,25	20,625	18,75
T_MIFS	1,875	1,875	1,875	1,875	1,875	1,875	1,875	1,875
T_PA_CONT	5,625	5,625	5,625	5,625	5,625	5,625	5,625	5,625
T_SIFS	10	10	10	10	10	10	10	10
T_RIFS	24,6875	24,6875	24,6875	24,6875	24,6875	24,6875	24,6875	24,6875
T_BIFS	14,6875	14,6875	14,6875	14,6875	14,6875	14,6875	14,6875	14,6875

### 1.5.2 Throughput de la PHY SAP

El *throughput* para la transmisión de una trama o de una multitrama (cinco tramas) con una MPDU de 1024 Bytes, como una función de la tasa de transferencia de datos, se muestra en la tabla 15.

Tabla 15 Desempeño de una MPDU de 1024 Bytes para cada tasa de datos

Número Trama	A 53.3 Mbps	A 80 Mbps	A 110 Mbps	A 160 Mbps	A 200 Mbps	A 320 Mbps	A 400 Mbps	A 480 Mbps
1	45,8	64,9	80,4	108,3	127,3	165,9	187,2	195,6
	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps
5	48,4	70,2	88,7	123,9	149,3	205,4	239,2	253
	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps

## 1.6 VALORES ESPERADOS EN LAS MEDIDAS DE UN ENLACE PARA UN DISPOSITIVO MODO 1

Los valores esperados en medidas prácticas para un enlace en el que opera un dispositivo Modo 1 se muestran en la tabla 16

Tabla 16. Valores esperados para un enlace de un dispositivo Modo 1

Parámetro	Valor	Valor	Valor
Tasa de datos de información ( $R_b$ )	110 Mbps	200 Mbps	480 Mbps
Potencia promedio de TX ( $P_T$ )	-9,9 dBm	-9,9 dBm	-9,9 dBm
Ganancia de antena en TX ( $G_T$ )	0 dBi	0 dBi	0 dBi
$f_c' = \sqrt{f_{\min} f_{\max}}$ : Frecuencia central de la forma de onda, $f_{\min}$ y $f_{\max}$ son las frecuencias de los extremos de -10dB del espectro	3882 MHz	3882 MHz	3882 MHz
Pérdidas del trayecto a 1 metro ( $L_1 = 20 \log_{10}(4\pi f_c' / c)$ ), $c = 3 \times 10^8$ m/s	44,2 dB	44,2 dB	44,2 dB
Pérdidas del trayecto a d metros ( $L_2 = 20 \log_{10}(d)$ )	20 dB (d = 10 m)	12 dB (d = 10 m)	6 dB (d = 10 m)
Ganancia de la antena RX ( $G_R$ )	0 dBi	0 dBi	0 dBi
Potencia de RX ( $P_R = P_T + G_T + G_R - L_1 - L_2$ (dB))	-74,1 dBm	-66,1 dBm	-60,1 dBm
Ruido promedio por bit ( $P_N = N + N_F$ )	-87,0 dBm	-84,4 dBm	-80,6 dBm
$E_b / N_0$ requerida (S)	3,6 dB	4,3 dB	4,6 dB
Pérdidas de implementación (I)	2,9 dB	2,9 dB	3,4 dB
Nivel mínimo de sensibilidad del RX Propuesto	-80,5 dBm	-77,2 dBm	-72,6 dBm

Las fuentes principales para la figura de ruido son el Amplificador de Bajo Ruido (LNA, Low Noise Amplifier) y el mezclador. La ganancia de voltaje del LNA es aproximadamente 15 dB, mientras que la ganancia de conversión de voltaje en el mezclador es aproximadamente 10 dB. El ruido total a la salida del LNA es  $0,722 \times 10^{-16} \text{ V}^2/\text{Hz}$ . Este valor incluye el ruido del LNA y el de la resistencia de entrada. El ruido total a la salida del mezclador es  $0,722 \times 10^{-16} \text{ V}^2/\text{Hz} + 0,1(8 \times 10^{-9})^2 \text{ V}^2/\text{Hz} = 0,786 \times 10^{-16} \text{ V}^2/\text{Hz}$ , donde el segundo término de la suma es generado por las fuentes de ruido dentro el mezclador. Así, la figura de ruido total de la interfaz analógica es  $10\log_{10}(7,86/2,56) = 4,9 \text{ dB}$ . Incluyendo los pérdidas asociadas con el filtro de preselección (1,1 dB) y las del conmutador de transmisión/recepción (0,6 dB), así la figura ruido total es 6,6 dB.

En las pérdidas de implementación se incluyen las pérdidas debidas al encabezado de prefijo cíclico, al filtrado de la interfaz, al recorte del DAC, a la degradación del ADC, a la estimación del canal, a las desviaciones en la frecuencia el reloj, a la recuperación del corrimiento de portadora, al seguimiento de portadora, etc.