

60 GHz Millimeter-wave Bottom-Layer Solutions: Multiplexing Access, Energy Awareness, and Peak-to-Average-Power Ratio

C. Estevez, Member, IEEE and C. Azurdia Member, IEEE

Abstract— A clear trend shows that cells are smaller, more homogeneously distributed, higher frequency oriented, and more energy conscious. This points toward wireless systems that implement millimeter-wave modulation; therefore, improving its usability is essential for the communication systems evolution. The proposed bottom-layer solutions are (1) a variable slot time multiplexing access technique with an energy-conservation feature that supports self-sustainability, and (2) SC-FDMA as the technology implemented at the physical layer to minimize the peak-to-average-power ratio (PAPR) of the system. It is shown that the multiplexing protocol has advantages over TDMA, self-sustainability is feasible, and SC-FDMA reduces the PAPR of the modulated signal.

Keywords— energy self-sustainability, millimeter-wave, multiplexing, peak-to-average power ratio (PAPR), SC-FDMA.

I. INTRODUCCIÓN

LAS TENDENCIAS históricas retratan que la tecnología inalámbrica está evolucionando, alcanzando la madurez en las frecuencias por debajo de 5 GHz e investigando que frecuencias implementar en la parte superior del espectro. Por ejemplo, en el ámbito de la red de área local inalámbrica (WLAN, *Wireless Local Area Network*), la tecnología dominante actual es WiFi, que utilizando una frecuencia de modulación de 2,4/5 GHz, anchos de banda de 20/40 MHz, redes de antenas MIMO, OFDM, y densas constelaciones QAM puede alcanzar a un máximo de 600 Mbps [1], lo que indica que esta tecnología está llegando a sus etapas maduras y cada vez será más difícil hacer mejoras significativas en períodos de tiempo relativamente cortos. Por esta razón la tecnología de ondas milimétricas (mm-wave) se está convirtiendo rápidamente en la nueva alternativa para WPAN. Sistemas de mm-wave ya han demostrado transmitir a 2,5 Gbps [2], utilizando técnicas sencillas. El rango de frecuencias de 60 GHz es atractivo para aplicaciones exigentes de rendimiento, tales como: WPAN [3][4] e e-Health [5]. También es un buen candidato para la convergencia de los servicios de red de acceso.

Los primeros intentos de estandarizar el rango de frecuencias de 60 GHz ya existe. Entre estas normas están el ECMA-387 [6] e IEEE 802.16 [7]. Un especial interés en nuestro trabajo es la asignación de la banda de ECMA-387. Esta divide el rango de operación espectral (57,24-65,88 GHz) en cuatro bandas, como se ve en la Fig. 1. Existen varios motivos para tener un bajo número de bandas, tales como:

bajo factor Q en el diseño de filtros, menos costoso, bajo número de usuarios por picocélula, etc. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es diseñar una técnica de multiplexión temporal, con capacidades eficientes de asignación en el tiempo.

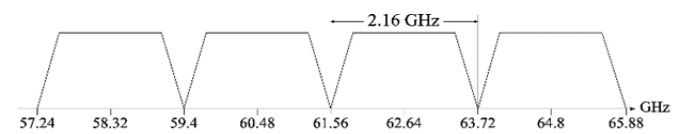


Figura 1. Rango de operación espectral y asignación de bandas especificado por la norma ECMA-387.

En este trabajo una técnica de multiplexión temporal, llamado ranura de tiempo variable – multiplexión de acceso por división temporal (VST-TDMA, *Variable Time Slot - Time Division Multiplexing Access*), que tiene un algoritmo de ranura de tiempo autoajustable con un proceso cíclico que se programa sin alterar el comportamiento del protocolo. Su versatilidad amplía la reserva de tiempo fijo del multiplexión de acceso por división temporal (TDMA, *Time Division Multiplexing Access*) a una ideología de reservas de tiempo flexible y dinámico. VST-TDMA no se limita a reserva de datos, sino que también permite una fácil incorporación de cualquier proceso que necesita reservar acceso al canal. Varios procesos útiles podrían aplicarse sin modificar el algoritmo, algunos ejemplos son: el tiempo de inactividad y calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*). En muchos entornos, sobre todo en los relacionados con e-Health, nodos energéticamente auto-sostenibles son deseables. Un nodo que cuenta con un dispositivo de recolección de energía y su reserva de energía en un momento determinado es baja, puede insertar un proceso de tiempo de inactividad en el ciclo de transmisión de paquetes para permitir que el dispositivo se recargue, pero sacrificando el rendimiento de la tasa de transmisión, como se sugiere en [8] [9]. Otra ventaja de VST-TDMA es que la QoS se puede implementar fácilmente, por ejemplo, si la información es sensible al tiempo, el algoritmo puede cambiar a reservas de proceso más pequeños y más frecuentes, tales que la tasa de transmisión sigue siendo la misma, pero el flujo es más continuo. Además, el tráfico de diferentes niveles de prioridad puede tener diferentes prioridades de reserva y diferentes anchos de ranura de tiempo. Una comparación gráfica entre TDMA y VST-TDMA es retratado en la Fig. 2.

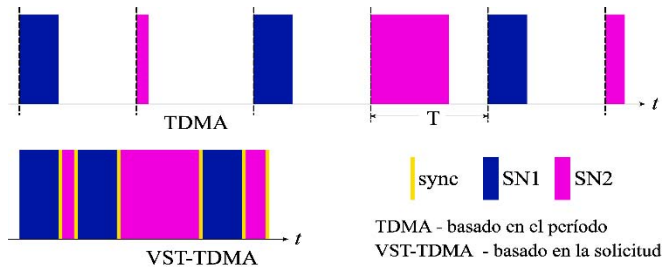


Figura 2. Comparación de multiplexión temporal entre los esquemas de VST-TDMA y TDMA.

II. ANTECEDENTES

A. Diseño de la Capa Física

La red de área metropolitana (*WMAN*) IEEE 802.16 especifica cuatro diferentes tecnologías de capa física (*PHYs*), incluyendo dos sistemas con una portadora (*SC* y *SCa*), *OFDM*, y un sistema basado en *OFDMA* (IEEE, 2004^a) [7]. Una técnica de portadora simple (*SC*), que ha sido especificado para las bandas de frecuencia entre los 10 y 66 GHz, tiene como objetivo principal comunicaciones con línea de visión directa (*LOS*), mientras que el resto de las técnicas son diseñadas para bandas de frecuencia menores a los 11 GHz que debe cubrir enlaces sin línea de visión directa (*NLOS*). La versión inicial del estándar IEEE 802.16-2001 especificaba únicamente tecnologías de capa física con una portadora. Dichas tecnologías fueron propuestas para operar entre los 10 y 66 GHz, frecuencias en las cuales enlaces de comunicación *LOS* son necesarios debido a las características de propagación de las ondas [7]. Bajo condiciones de *LOS*, los efectos de propagación por trayectos múltiples pueden ser despreciados; por lo tanto, el retardo de propagación del sistema puede ser ignorado.

Nuevos estándares de comunicación inalámbricos, como 3GPP LTE, hacen uso de técnicas basadas en *OFDM* debido a la eficiencia espectral. A pesar de los beneficios ofrecidos por los nuevos estándares, los amplificadores de potencia de la terminal móvil tienen que lidiar con valores más altos del pico en relación a la potencia media (*PAPR*, *Peak-to-Average Power Ratio*) en comparación a estándares anteriores, como lo son *WCDMA*, *CDMA* y *EDGE* [10]. Por lo tanto, *PAPR* juega un papel importante en el diseño de sistemas inalámbricos debido a que los amplificadores de potencia generalmente operan en la zona lineal en lugar de la zona de saturación. Una señal con un ancho de banda limitado y con *PAPR* alto requiere una reducción de la potencia de salida al reducir la potencia de entrada para garantizar que el amplificador de potencia opere adentro de la región lineal y no generar distorsiones en las señales transmitidas [11], [12], [13]. Adicionalmente, señales con *PAPR* altos requieren convertidores digitales-a-analógicos (*DAC*) con rangos dinámicos mayores en el amplificador de potencia. En el estándar 3GPP LTE, las tecnologías propuestas son *SC-FDMA* y *OFDMA*. Ambas tecnologías están basadas en *OFDM*, pero *SC-FDMA* ha sido propuesta como la tecnología a emplear en el enlace ascendente (*uplink*) debido a que produce valores menores de *PAPR* [11], [12], [13]. Para cumplir con la versión inicial del estándar IEEE 802.16-2001, el cual especifica el

uso de un sistema con portadora simple para las bandas de frecuencia entre los 10 y 66 GHz, en este trabajo se propone el uso de *SC-FDMA* en los nodos de la red (*SNs*) para los enlaces ascendentes. Adicionalmente, un sistema caracterizado por un *PAPR* bajo es beneficioso para los *SNs*, los cuales operan con baterías y por lo tanto tienen limitaciones en potencia. En la siguiente sub-sección se describirá con más detalles las características de *SC-FDMA*.

1) *Modelo General de un Sistema SC-FDMA*: El transmisor en un sistema *SC-FDMA* convierte la señal binaria en una secuencia de subportadoras moduladas. Un modulador banda base transforma la secuencia de datos binarios a una secuencia de símbolos, y luego los símbolos son agrupados en bloques de N símbolos. Una *DFT* con N puntos es realizada para generar la representación de los símbolos en el dominio de la frecuencia. Luego se lleva a cabo el mapeo de las subportadoras, cada dato proveniente de la *DFT* es mapeado a una de las portadoras ortogonales a transmitir $M(>N)$. El mapeo de las subportadoras se realiza mediante una de varias técnicas existentes [11], [12], [13], [14]. Luego se lleva a cabo una transformada inversa de Fourier (*IDFT*) con M puntos para transformar las amplitudes de las subportadoras en una señal compleja en el dominio del tiempo. Cada señal es modulada a una portadora con frecuencia única y los símbolos son transmitidos secuencialmente. El transmisor realiza dos operaciones adicionales. A la secuencia de salida de la *IDFT* se le agrega un prefijo cíclico (*CP*). De acuerdo a [7] y [15], *pulse shaping (PS)* es requerido para limitar el ancho de banda de la señal a transmitir y reducir la energía de la señal fuera de la banda principal. En el presente trabajo, el sistema propuesto es evaluado con el filtro tradicional *root raised cosine (RRC)*, el cual es el filtro que ha sido propuesto por el estándar 3GPP para ser implementado en el transmisor del dispositivo móvil (*UE*) [16]. Por lo tanto, se produce la convolución entre las subportadoras moduladas y la respuesta al impulso del filtro.

B. Esquemas de Acceso Temporal

La mayoría de las tecnologías celulares dependen de técnicas de multiplexión basadas en el tiempo, principalmente *TDMA* y *TDMA* dinámico (*D-TDMA*). Algunos ejemplos de estos son *GSM* [17], *D-AMPS* [18], *PDC*, *iDEN*, *PHS*, IEEE 802.16a (*WiMax*) [19], *Bluetooth* [20], *TD-SCDMA*, el *UIT-T G.hn*, *Avanzada LTE (OFDMA y SC-FDMA)*, y muchos otros. El funcionamiento básico de *TDMA* es el de dividir el dominio del tiempo en ranuras de tiempo de igual longitud. Cada ranura se asigna a un usuario para toda la duración de la ranura. En el caso de duplexión por división de tiempo (*TDD*, *Time Division Duplexing*), la división de tiempo se utiliza para emular una transmisión dúplex completa sobre un enlace de medio dúplex, esto se hace mediante la asignación de ranura de tiempo para las transmisiones ascendentes y descendentes (usando la misma frecuencia). *D-TDMA* es muy similar a *TDMA*, con la excepción de que los intervalos de tiempo se asignan dinámicamente y varias ranuras de tiempo en una fila se pueden asignar a un único usuario, si el sistema determina que esta es la opción óptima. *OFDMA* es una técnica de acceso similar a *D-TDMA*, en el sentido que las ranuras no necesariamente se asignan en un orden en particular, donde los intervalos de tiempo y los canales de frecuencias ortogonales están optimizados para proporcionar un mejor servicio

(global) a los usuarios. En todos estos casos, las ranuras de tiempo son de longitud fija, esto simplifica la sincronización, aunque hay técnicas que permiten comprimir aún más las ranuras de tiempo, por lo que no hay pérdida de tiempo y la sincronización se mantiene. Las técnicas utilizadas para sincronizar y recursos de reserva se describen en la sección III-B.

III. SOLUCIONES PARA LAS CAPAS INFERIORES

A. Consideraciones de Capa Física

Para cumplir con los requerimientos iniciales el estándar IEEE 802.16-2001, el cual especifica el uso de un sistema con portadora simple para las bandas de frecuencia entre los 10 y 66 GHz, en este trabajo se propone el uso de *SC-FDMA* para los enlaces ascendentes. *SC-FDMA* se caracteriza por ser un sistema eficiente a nivel energético debido a sus bajos niveles de *PAPR* en comparación a *OFDM*. Un sistema con un *PAPR* bajo es de mucho beneficio para los *SNs* usados en la topología propuesta en este trabajo, los cuales operan con baterías y por lo tanto tienen limitaciones en potencia. El sistema *SC-FDMA* será analizado en términos de *PAPR* usando mapeo localizado y de intercalación, diferentes esquemas de modulación, y *roll-off factors*. El desempeño del sistema propuesto será comparado con el sistema *OFDM* en términos de *PAPR*. El sistema *OFDM* ha sido propuesto por otros investigadores como la tecnología a usar en las bandas de frecuencia entre los 60 y 70 GHz [21], [22], [23].

B. TDMA con Ranura de Tiempo Variable

VST-TDMA, como TDMA, realiza la multiplexión de acceso en el dominio del tiempo. VST-TDMA agenda procesos; esto significa que el tiempo está reservado cuando se le solicite y por el tiempo solicitado. Para organizar transmisiones se utiliza un puntero temporal global. En el caso de que un proceso o nodo solicita el uso de la antena, este proceso está programado en el momento almacenado en el puntero global y el puntero se desplaza por la cantidad de tiempo solicitado, en la práctica también se inserta un tiempo de búfer. Si la hora actual alcanza el tiempo del puntero global, el nodo cambia al modo de escuchar (no hay procesos encolados). La topología de la red consiste en un punto de acceso inalámbrico (WAP, *Wireless Access Point*) y cuatro nodos con servicio (*SNs*, *Serviced Nodes*), como se muestra en la Fig. 3. Todos los nodos operan a la misma frecuencia en ambas direcciones (ascendentes y descendentes), para multiplexar se utiliza TDD en este esquema bidireccional.



Figura 3. Topología de la red modelada, cuatro nodos y un punto de acceso.

1) *Encapsulación de Paquete*: El encapsulador de paquetes tiene un papel crucial en el esquema VST-TDMA. Recoge los paquetes de capa de red (IP) normalmente procedentes de la cola y encapsula estos en un jumbo paquete. Una vez que se construye el jumbo paquete, su tamaño (bits) se traduce a un

tiempo de sincronización (segundos) utilizando la tasa de transmisión (b/s). El tiempo calculado, que se utiliza para sincronizar este paquete, se inserta en un paquete previamente almacenado. El paquete anterior se envía al WAP, mientras que el paquete recientemente encapsulado se almacena temporalmente. Puesto que el paquete reciente construido desencadena la transmisión del paquete previamente almacenado, este proceso se conoce como un empuje (es decir, el paquete recién arribado empuja al paquete almacenado). Esto continúa hasta que la cola está vacía. Para ilustrar mejor este proceso ver Fig. 4.

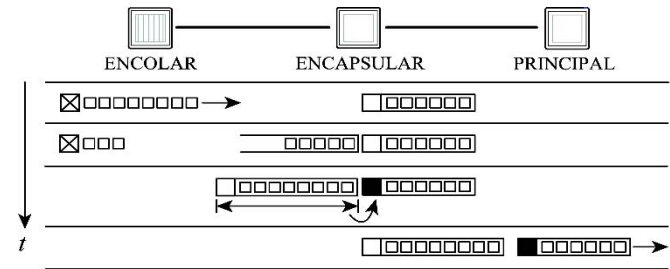


Figura 4. Comunicación entre procesos en el nodo servido.

El procesador principal se compone de varios estados. Los estados de inicialización, temporizador del saludo, saludo, y el estado de identificación sólo se utilizan cuando se crea el enlace entre el SN y el WAP. Una vez vinculado el SN permanece dentro de los estados de reposo, sincronización, solicitud de paquetes y transmisión a menos que se hayan atendido todos sus paquetes, en cuyo caso se entra en un estado de espera y permanece allí hasta más paquetes llegan a la cola. Durante el funcionamiento normal de intercambio de paquetes el SN se implementa como sigue. La SN, en estado de reposo, espera a una interrupción. Si la interrupción se debe a la llegada de un paquete entonces se mueve al estado de sincronización y extrae la información de sincronización de la cabecera. Con este tiempo establece un temporizador de activación y vuelve al estado de reposo. Si la interrupción es un temporizador automático luego se mueve al estado de solicitud de paquetes donde el procesador principal indica al procesador de encolamiento que libere los paquetes y espera por el jumbo paquete. Una vez llega el paquete que se mueve al estado de transmisión. En el estado de transmisión la información de cabecera se añade al paquete, que ya contiene la información de sincronización y de datos. Posteriormente, se envía (al puerto de la antena).

2) *Dinámica de la Comunicación de VST-TDMA*: Para sincronizar los paquetes se aplican las siguientes reglas, ver Fig. 5. La tarea de la inserción del primer SN es trivial, ya que no hay transmisiones activas. Si varios nodos comparten el canal y un nodo inactivo cambia a activo, de tal manera que se debe entrar en el ciclo de intercambio, se enviará un paquete de 'hola' (o saludo). Los procesos se apilan de tal manera que no hay tiempo suficiente para transmitir en entre procesos; esto causará colisiones. Cuando se produce una colisión, el WAP envía un nuevo tiempo de transmisión para el SN que transmitía en el momento de la colisión usando el tiempo de asignación máxima (suponiendo que el campo de sincronización no pudo ser recuperado). Después del último

evento agendado se envía una señal de baliza que permite suficiente tiempo para retransmitir un paquete de ‘hola’.

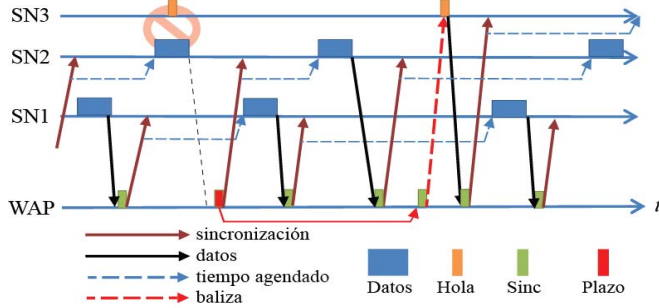


Figura 5. Intercambio de paquetes entre los SNs y el WAP.

Porque hay (potencialmente) otros SN programados el SN desvinculado tiene que esperar la señal de baliza para establecer un enlace. Una vez que el WAP le ha prestado servicios y reprogramado a los SNs vinculadas, envía la señal de baliza. El SN desvinculado detecta que se trata de un mensaje de difusión (no una respuesta al paquete de ‘hola’) y retransmite el paquete de ‘hola’ y se aferra a los datos hasta el siguiente ciclo. El WAP vincula la SN y de ahí en adelante el intercambio de paquetes vuelve a su rutina, pero con un SN adicional.

C. Soporte de Energía Auto-sostenible en VST-TDMA

La eficiencia energética es una propiedad esencial de cualquier sistema inalámbrico. Auto-sostenibilidad es una cualidad atractiva que libera a los nodos de una fuente de alimentación fija. Para soportar la auto-sostenibilidad, un nodo debe estar equipado con un dispositivo de recolección de energía (*energy harvesting*) y este dispositivo debe generar energía a una velocidad mayor que la velocidad de descarga del estado de reposo. Usando VST-TDMA un proceso de inactividad se puede insertar de manera cíclica para ayudar a restaurar la pérdida de la batería. El siguiente conjunto de ecuaciones describen cómo calcular el tiempo necesario para alcanzar la auto-sostenibilidad. La condición de auto-sostenibilidad está dado por:

$$E_{\oplus} \geq \sum_{\otimes \in \text{Estado}} E_{\otimes} + E_{\text{reposo}} \quad (1)$$

La energía recolectada está dado por E_{\oplus} y todos los estados de descarga se denotan con E_{\otimes} , a excepción de la energía consumida por el estado de reposo, que se llama aquí E_{reposo} . Debido a que $E = Pt$, (1) puede ser resuelto por el tiempo de reposo. Suponiendo que la tasa de descarga de todos los estados, a excepción de estado de reposo, es mayor que la tasa de recolección de energía entonces tenemos:

$$t_{\text{reposo}} \geq \frac{\sum_{\otimes \in \text{Estado}} (P_{\otimes} - P_{\oplus}) t_{\otimes}}{P_{\oplus} - P_{\text{reposo}}} \quad (2)$$

IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

A. Análisis del PAPR del Sistema Propuesto

En esta sección se analiza el *PAPR* del sistema propuesto usando diferentes métodos de mapeo de la subportadora y modulación con índices altos de modulación. Para los diferentes sistemas evaluados se generaron 10^5 símbolos. Aplicando el criterio empleado en [12] y [24], el *PAPR* fue medido y analizado en el espectro del filtro *RRC*. Luego de calcular el *PAPR* de cada bloque, la información es presentada empleando una función de distribución acumulativa complementaria (*CCDF*) [25]. En forma diferente a *OFDM*, las propiedades estadísticas de *PAPR* de los sistemas con portadora simple no son fácil de obtener analíticamente [12], por lo tanto, en este trabajo se emplea análisis numérico para determinar el *PAPR* del sistema propuesto. El *PAPR* en el lado del transmisor es determinado por la tecnología y filtro empleado. Los parámetros implementados en la simulación se muestran en la Tabla I, dichos parámetros concuerdan con los usados en [21]. Esto fue hecho para comparar el *PAPR* del sistema propuesto con el *PAPR* del sistema *OFDM*, tecnología propuesta por varios académicos para las bandas entre los 60 y 70 GHz [21], [22], [23]. El sistema propuesto es evaluado empleando usando mapeo localizado y de intercalación en las subportadoras. Técnicas de modulación digital, con índices de modulación altos, son empleadas, tales como *QPSK* y *16QAM*, para evaluar el *PAPR* en los sistemas *SC-FDMA* y *OFDMA*.

TABLA I. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA.

Parámetros	Valor
Tecnología	SC-FDMA/OFDM
Modulación	QPSK/16QAM
Número de subportadoras	512
Tamaño del bloque de datos de entrada	64
Factor de ensanchamiento Q	8
Ancho de banda de la transmisión	400 MHz
Asignación de las subportadoras	Intercalación/Localizado
Símbolos a transmitir	10^5
Filtro implementado	Root Raised Cosine (RRC)

En la Fig. 6 se analiza el *PAPR* de los sistemas *SC-IFDMA* (intercalación), *SC-LFDMA* (localizado) y el sistema tradicional *OFDM*. Fue utilizado el pulso *RRC* en el lado del transmisor empleando un *roll-off factor*, α , igual a 0,35. El *roll-off factor* utilizado en la simulación es un valor típico empleado en varias referencias. El sistema fue evaluado empleando modulación digital *16QAM*. Puede verse que el sistema *SC-IFDMA* tiene el menor *PAPR* en comparación a los otros sistemas evaluados. Adicionalmente, el sistema propuesto tiene un desempeño muy superior en comparación al sistema tradicional *OFDM* en términos de *PAPR*. Para una probabilidad de 10^{-4} , el sistema propuesto *SC-IFDMA* tiene un $PAPR_0$ de aproximadamente 6,5 dB, mientras que el sistema *OFDM* tiene un $PAPR_0$ de 11.2dB. En forma general, un *PAPR* bajo es deseable para terminales que operan con baterías.

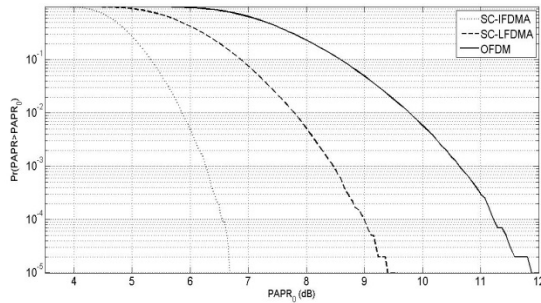


Figura 6. Función de distribución acumulativa complementaria (CCDF) de PAPR para el sistema propuesto y OFDM con $\alpha = 0.35$ y 16QAM.

En la Fig. 7 se evalúa el sistema propuesto usando diferentes técnicas de modulación y diferentes técnicas de mapeo en las subportadoras. Se emplea un *roll-off factor* de 0,35 y el tradicional filtro RRC en el lado del transmisor. De forma esperada, el sistema SC-IFDMA con modulación digital QPSK posee el menor PAPR₀, mientras que el sistema SC-LFDMA con modulación digital 16QAM tiene el mayor PAPR₀. En forma general, el mapeo por intercalación es más deseable que el mapeo localizado en términos de PAPR y eficiencia energética. Por lo tanto, el sistema SC-IFDMA es una opción viable para el enlace ascendente en los nodos de la topología propuesta.

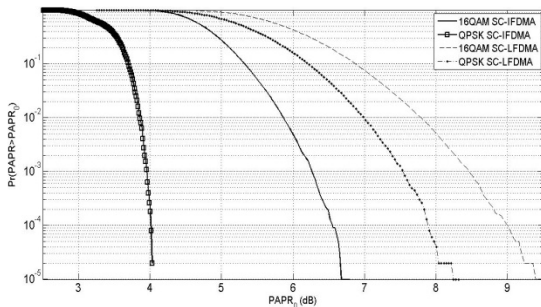


Figura 7. Función de distribución acumulativa complementaria (CCDF) de PAPR para el sistema propuesto y $\alpha = 0.35$.

En la Fig. 8 se analiza el efecto que tiene el *roll-off factor* en el PAPR. El sistema fue analizado empleando el esquema SC-IFDMA, el filtro RRC y modulación digital 16QAM. En general, la tendencia presentada en la Fig. 8 es la misma para los demás sistemas. En forma general, un valor bajo de PAPR₀ es obtenido al implementar un *roll-off factor* bajo, pero a expensas de permitir una mayor radiación externa a la banda de la señal. Como resultado, existe una compensación entre reducir el PAPR y el ancho de banda en los sistemas convenciones con portadora simple. En general, la mayoría de los sistemas que utilizan filtros para limitar el ancho de banda de la señal emplean *roll-off factors* entre 0,2 y 0,5, $0,2 \leq \alpha \leq 0,5$.

B. Análisis de la Multiplexión de Acceso

Para demostrar las capacidades de rendimiento de VST-TDMA se compara con el rendimiento de TDMA. En este escenario SN1 transmite 34.950 paquetes, SN2 69.900 paquetes (SN1x2), SN3 139.800 paquetes (SN1x4), y SN4 279.600 paquetes (SN1x8), y los resultados se muestran en la

Fig. 9. La aplicación de TDMA reserva un intervalo de tiempo para cada nodo y no tiene conocimiento acerca de la cantidad de paquetes que necesitan ser atendidos. En este escenario TDMA tarda aproximadamente 13,4 segundos para completar todas las transmisiones. Debido VST-TDMA apila todos los eventos pendientes, logra transmitir la misma carga en aproximadamente 6,3 segundos, aproximadamente la mitad del tiempo consumido por TDMA.

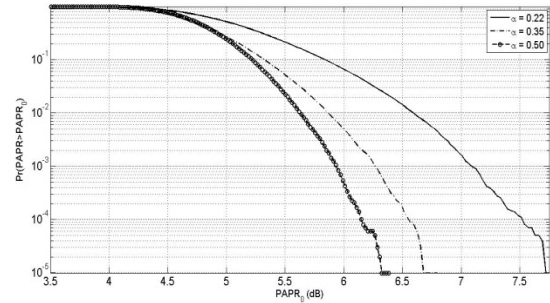


Figura 8. Función de distribución acumulativa complementaria (CCDF) de PAPR para el sistema propuesto con 16QAM y diferentes valores de α .

1) *Implementación de la Multiplexión de Acceso Consciente de la Batería*: Otra ventaja de VST-TDMA es que puede ser programado para ser consciente de la batería. Utilizando los mismos parámetros que en [8], podemos calcular el tiempo mínimo antes del agotamiento de la carga (sin tiempo de reposo) y el tiempo de reposo auto-sostenible, que es el máximo necesario, más tiempo implicaría una demora innecesaria. Como se puede observar en la Fig. 10 el tiempo más rápido de agotamiento se produce cuando se reduce el tiempo de reposo. Las asíntotas corresponden a los tiempos de reposo auto-sostenible, es decir, la batería se agotará en el tiempo igual a infinito (nunca). Suponiendo que los dispositivos son relativamente inactivo durante un cierto período de un día (y el dispositivo reconoce esto como un patrón recurrente) que puede utilizar la batería más libremente durante la parte restante del día. El uso de un esquema de 20 horas activo, 4 horas inactivo (cargando la batería) los resultados obtenidos se presentan en la Tabla III. Se puede observar que el rendimiento de descarga, usando este esquema, incrementa por 8x con respecto al rendimiento de descarga en modo auto-sostenible. Si la relación activo/inactivo se modifica, la mejora variará, por lo que el factor de mejora exacto dependerá de la aplicación específica. Una reducción en la proporción activo/inactivo corresponde a una menor tasa de transmisión, pero mayor eficiencia energética.

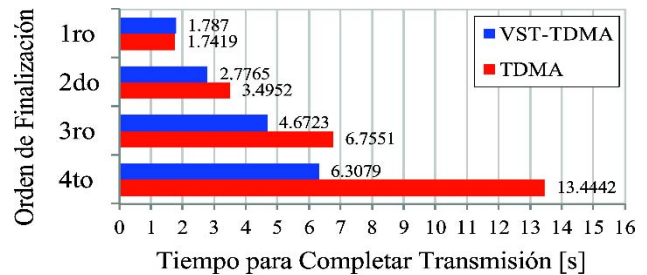


Figura 9. Tiempo para completar transmisión usando VST-TDMA y TDMA.

TABLA II. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DE LA BATERÍA.

Descripción	Valor
Tiempo de reposo	0-100 ms
Tasa de recolección de energía	100 μ J/s
Capacidad de carga de la batería	5 J

(a) Setup

Modo de Operación	Potencia
Reposo	0,09 mW
Sincronización	6 mW
Transmisión	9,9 mW
Recepción	9,3 mW

(b) Potencia

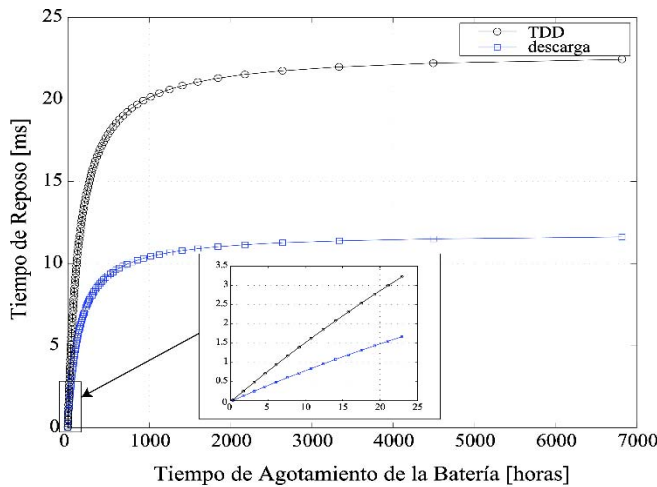


Figura 10. Tiempo de reposo versus el tiempo de agotamiento de la batería para los casos de TDD y solo descarga.

TABLA III. RESULTADOS DE TASA DE TRANSMISIÓN DE DESCARGA

Técnica	Tasa de Transmisión [Mb/s]		
	Sin Reposo	20-horas/día (activo)	Auto-sostenible
TDD	496,7	4,196	0,5241
descarga	986,8	8,108	1,012

V. CONCLUSIONES

Se propone un conjunto de atributos para los sistemas mm-wave de 60 GHz. Los atributos incluyen un protocolo de multiplexión de acceso, una técnica consciente de la energía que está embebido en el protocolo de acceso, y SC-FDMA se propone como la tecnología para implementar en la capa física.

SC-FDMA se propuso como la tecnología que se aplicará en la capa física para cumplir con la versión inicial del estándar IEEE 802.16-2001. El sistema propuesto se evaluó en términos de PAPR mediante el filtro de conformación de impulsos tradicional RRC. A través de simulaciones se encontró que el modo de entrelazado de SC-FDMA logra el PAPR más bajo en comparación con el PAPR de los SC-FDMA en modo localizado y sistemas OFDM. Una baja PAPR se desea para los dispositivos operados con baterías, como las implementadas en la topología de la red propuesta.

El protocolo de acceso multiplexado llamado VST-TDMA es una técnica de multiplexión basada en el tiempo. Esto toma ventaja de la reducción del tamaño de la célula (que inherentemente poseen las redes de 60 GHz) bajo el supuesto de que el número de usuarios se reduce significativamente.

Teniendo en cuenta que no todos los usuarios están ocupando el WAP de la célula al mismo tiempo, el ancho de banda disponible es mejor utilizado por una técnica de multiplexión de acceso temporal en lugar de multiplexión en el dominio de la frecuencia, donde se desperdician las bandas no utilizadas. VST-TDMA mostró una reducción significativa en el tiempo de transmisión (es decir, aumento en el rendimiento global) en un escenario compuesto por múltiples usuarios, y cada usuario tenía un patrón de uso diferente. El único escenario en el que VST-TDMA no demuestra un aumento significativo en el rendimiento (es aproximadamente igual) es en el caso en que todos los usuarios están ocupando el canal sin hacer una pausa. Para la prueba específica de simulación, donde 4 usuarios están transmitiendo diferentes cantidades de datos (primer usuario x, segundo 2x, tercero 4x y cuarto 8x), el tiempo de finalización del último nodo utilizando VST-TDMA era aproximadamente la mitad del tiempo del nodo utilizando TDMA, o sea que duplica el rendimiento global, es decir, la misma cantidad de información se transmite en la mitad del tiempo.

Otra característica importante de VST-TDMA es su capacidad de encontrar un estado de auto-sostenibilidad bajo la presencia de un dispositivo de recolección de energía. Los resultados prueban que al equilibrar el tiempo de carga con el tiempo de descarga, la auto-sostenibilidad es factible, pero a costa de la tasa de transmisión. Disminuir la tasa de transmisión permite que el sistema reduzca el consumo de energía, si el consumo se reduce lo suficiente el equilibrio se puede encontrar. Usando valores típicos de consumo de energía en las pruebas se demuestra que un sistema capaz de transmitir a 1 Gbps se puede desacelerar a unos pocos Mbps. Aunque, si el usuario no está transmitiendo durante un marco de tiempo grande, por ejemplo, usuario está dormido (inactivo), el dispositivo puede detectar este patrón y transmitir a una velocidad mayor, dado que en el futuro es capaz de cargar sin parar durante varias horas. Una simulación que se basa en un plan de uso de 20 horas mostró un aumento de rendimiento de 8 veces (700%) sobre el caso de auto-sostenibilidad, tanto para el escenario de TDD como para el de solo descarga.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está parcialmente financiado por el Proyecto FONDECYT N° 11121655, Fondo Nacional de Desarrollo Tecnológico y Científico, y por el Programa U-INICIA VID 2014, subvención no. UI-02/2014, de la Universidad de Chile.

REFERENCIAS

[1] H. Kano, S. Yoshizawa, T. Gunji, T. Saito, and Y. Miyanaga, "Development of 600 mbps 2 x 2 MIMO-OFDM baseband and rf transceiver at 5 GHz band," in *2010 IEEE International Symposium on IEEE Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2010, pp. 891-894.

[2] H. C. Chien, Y.T. Hsueh, A. Chowdhury, J. Yu, and G. K. Chang, "Optical millimeter-wave generation and transmission without carrier suppression for single-and multi-band wireless over fiber applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, pp. 2230-2237, 2010.

[3] S. Singh, F. Ziliotto, U. Madhow, E. M. Belding, and M. J. Rodwell, "Millimeter wave WPAN: cross-layer modeling and multi-hop

- architecture," in *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, 2007, pp. 2336–2340.
- [4] C. S. Sum, R. Funada, J. Wang, T. Baykas, M. A. Rahman, and H. Harada, "Error performance and throughput evaluation of a multigbps millimeter-wave WPAN system in the presence of adjacent and cochannel interference," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 8, pp. 1433–1442, 2009.
- [5] C. I. Estevez, J. Wei, A. Kailas, D. Fuentealba, and G. K. Chang, "Veryhigh-throughput millimeter-wave system oriented for health monitoring applications," in *IEEE 13th IEEE International Conference on e-Health Networking Applications and Services (Healthcom)*, 2011 pp. 229–232.
- [6] E. International, "Standard ecma-387: High rate 60 GHz phy, mac and hdmi pals, 2nd edition," Status: Standard, 2010.
- [7] B. H. Walke, S. Mangold, and L. Berlemann, *IEEE 802 wireless systems: protocols, multi-hop mesh/relaying, performance and spectrum coexistence*. John Wiley & Sons, 2007.
- [8] W. Jian, A. Chowdhury, Z. Jia, C. I. Estevez, and G. K. Chang, "Energy efficient multi-access technologies for very-high-throughput avionic millimeter wave, wireless sensor communication networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, pp. 2398–2405, 2010.
- [9] W. Jian, C. Estevez, A. Chowdhury, Z. Jia, J. Wang, J. Yu, and G. K. Chang, "A hybrid mac protocol design for energy-efficient very-high-throughput millimeter wave, wireless sensor communication networks," in *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [10] J. Choi, D. Kang, D. Kim, J. Park, B. Jin, and B. Kim, "Power amplifiers and transmitters for next generation mobile handset," *J. Semicond. Technol. Sci.*, vol. 9, no. 4, pp. 249–256, 2009.
- [11] H. G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Single carrier fdma for uplink wireless transmission," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 1, no. 3, pp. 30–38, 2006.
- [12] C. A. Azurdia-Meza, K. J. Lee, and K. S. Lee, "PAPR reduction in SCFDMA by pulse shaping using parametric linear combination pulses," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 2008–2011, 2012.
- [13] H. G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Peak-to-average power ratio of single carrier fdma signals with pulse shaping," in *IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2006, pp. 1–5.
- [14] H. G. Myung and D. J. Goodman. *Introduction to single carrier FDMA*. Wiley, 2008.
- [15] G. Huang, A. Nix, and S. Armour, "Impact of radio resource allocation and pulse shaping on papr of sc-fdma signals," in *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2007, pp. 1–5.
- [16] E. U. T. R. Access, "User equipment (UE) radio transmission and reception," 3GPP TS, vol. 36, p. V10, 2010.
- [17] A. Viterbi, "Wireless digital communication: A view based on three lessons learned," *IEEE Communications Magazine*, p. 33, 1991.
- [18] M. Andersin, N. B. Mandayam, and R. D. Yates, "Subspace based estimation of the signal to interference ratio for TDMA cellular systems," *Wireless Networks*, vol. 4, no. 3, pp. 241–247, 1998.
- [19] H. Y. Wei, S. Ganguly, R. Izmailov, and Z. J. Haas, "Interferenceaware ieee 802.16 wimax mesh networks," in *IEEE 61st Spring Vehicular Technology Conference*, 2005, pp. 3102–3106.
- [20] H. Su and X. Zhang, "Battery-dynamics driven TDMA mac protocols for wireless body-area monitoring networks in healthcare applications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 4, pp. 424–434, 2009.
- [21] F. Winkler, E. Fischer, E. Graß, and G. Fischer, "A 60 GHz OFDM indoor localization system based on DTDOA," in *14th Information Society Technologies Mobile and Wireless Communications Summit*, 2005.
- [22] Y. Shoji, C. S. Choi, and H. Ogawa, "70-GHz-band OFDM transceivers based on self-heterodyne scheme for millimeter-wave wireless personal area network," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 10, pp. 3664–3674, 2006.
- [23] Y. Shao, Y. Wang, and N. Chi, "60-GHz ROF system with low PAPR 16QAM-OFDM downlink using PTS segmentation," *IEEE Photonics Technology*, vol. 25, no. 9, 2013.
- [24] C. A. Azurdia-Meza, K. J. Lee, and K. S. Lee, "PAPR reduction by pulse shaping using Nyquist linear combination pulses," *IEICE Electronics Express*, vol. 9, no. 19, pp. 1534–1541, 2012.
- [25] R.V. Nee and R. Prasad, *OFDM for wireless multimedia communications*. Artech House, Inc., 2000.

- [26] C. Azurdia-Meza, K. Lee, and K. Lee, "ISI-Free linear combination with better performance," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E96-B, no. 2, pp. 635–638, 2013.



Claudio Estevez received his B. S. degree in electrical and computer engineering from the University of Puerto Rico, Mayaguez, PR, USA, 2001; his M.S. degree in electrical and computer engineering with a minor in optical engineering from the University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL, USA, 2003; and his Ph.D. degree in electrical and computer engineering and with a minor in computer science from the Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2010. In 2011, he was hired as an assistant professor by the electrical engineering department at Universidad de Chile. In 2012, he obtained a [Chilean] national research grant (FONDECYT) to study MAC protocols in WPAN using 60 GHz. In the same year he was appointed coordinator of the Communication Networks M.Eng. Program. In 2013, he obtained a [Chilean] national research grant (FONDEF) to study remote polysomnographic monitoring. His research interests include: Connection-oriented transport protocols, network fairness study, MAC-layer protocols in WPAN, 60-GHz WPAN applications, cloud computing with data mining/warehousing, wireless body area networks, remote healthcare. Please contact at the email address: cestevez@ing.uchile.cl



Cesar A. Azurdia-Meza received the B.Sc. degree in electrical engineering from Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala in 2005, and the M.Sc. degree in electrical engineering from Linnaeus University, Sweden in 2009. In 2013 he obtained the Ph.D degree in Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University, Republic of Korea. He joined the Department of Electrical Engineering, Universidad de Chile as an Assistant Professor in August 2013. He has served as Technical Program Committee (TPC) member for multiple conferences, as well as a reviewer in journals such as IEEE Communications Letters, IEEE Transactions on Wireless Communications, Wireless Personal Communications, Telecommunication Systems, and EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. Dr. Azurdia is an IEEE and IEICE Communications Society Member. His research interests include topics such as Nyquist's ISI criterion, OFDM-based systems, SC-FDMA, visible light communication systems, 5G & beyond enabling technologies, and signal processing techniques for communication systems.