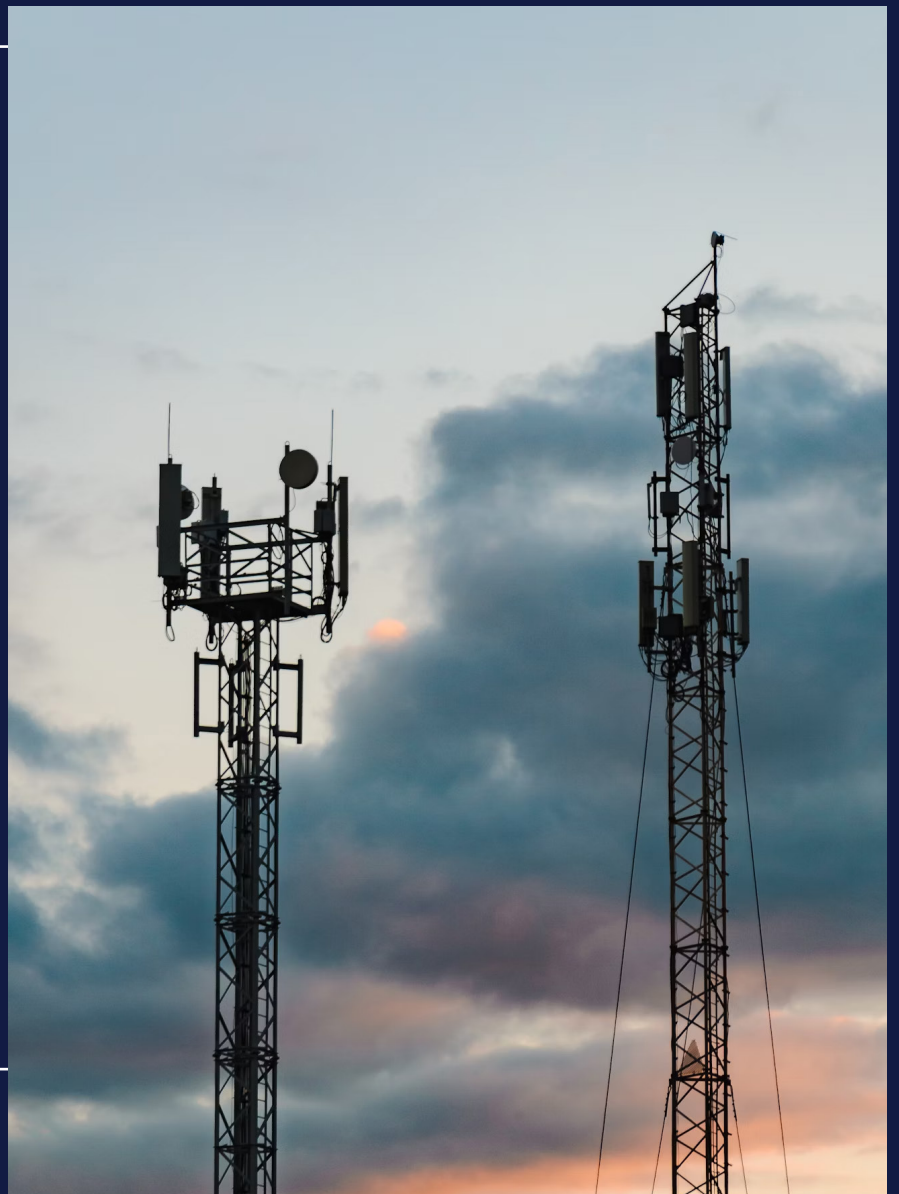


COMUNICACIONES INALÁMBRICAS Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA: HACIA UN FUTURO VERDE

CHRISTIAN SCHMIDT, FERNANDO GREGORIO, JUAN COUSSEAU

DOCENTES E INVESTIGADORES DEL LABORATORIO DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES
Y COMUNICACIONES.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y COMPUTADORAS DE LA UN SUR.



INTRODUCCIÓN

A medida que la tecnología avanza hacia la era de las redes de comunicaciones de 6ta generación (6G) donde conviven elevadas tasas de transmisión de información, bajos tiempos de latencia y un gran número de dispositivos conectados, la eficiencia energética (EE) es uno de los criterios de diseño dominante para garantizar una evolución sostenible.

En una arquitectura celular típica, donde los dispositivos se conectan a una estación base para comunicarse entre sí, existen diversos componentes que deben ser tenidos en consideración para el diseño de un sistema eficiente energéticamente.

Hay dos componentes fundamentales que conforman una red celular: a) estaciones bases: desempeñan un papel fundamental en los sistemas celulares, ya que constan de antenas y equipos relacionados que permiten que los dispositivos móviles se conecten a la red. Se encargan de transmitir y recibir señales hacia y desde dispositivos móviles, así como de regular las señales entre estaciones base. b) Dispositivos móviles/equipamiento de usuario (UE) : es cualquier dispositivo utilizado directamente por un usuario final para comunicarse. En este grupo se puede incluir un teléfono de mano, un ordenador portátil equipado con un adaptador de banda ancha móvil o cualquier otro dispositivo.

A nivel componentes, las estaciones bases aportan una porción muy importante del consumo de energía de toda la red. Particularmente, los amplificadores de potencia (PA) son los componentes que gobiernan el consumo de las estaciones bases, por lo cual mejorar su eficiencia energética es clave. Desde el lado de los usuarios, el consumo de energía de las unidades móviles puede ser reducida mejorando la eficiencia de la etapa de amplificación de potencia (etapa de TX) y utilizando señales con relación de potencia pico a promedio (PAPR) reducida por procesamiento. En este artículo discuti-

remos el camino hacia las telecomunicaciones inalámbricas de eficiencia energética mejorada, con foco en algunas de las técnicas investigadas actualmente que permiten reducir el consumo y/o hacer un uso más provechoso de los recursos. En ese contexto, primero haremos una descripción de las etapas de transmisión/recepción y los elementos que las componen. Luego, identificaremos el consumo de potencia en el procesamiento de señales digital y analógico, haciendo énfasis en los componentes analógicos de mayor consumo: amplificadores y conversores de datos.

Finalmente, analizaremos algunas estrategias para optimizar el uso energético en estos componentes, el impacto de aplicar.

COMPONENTES DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS Y CONSUMO

En la Figura 1 puede verse el diagrama en bloques funcional de un sistema de telecomunicaciones inalámbricas moderno con los elementos que lo componen. En la parte superior se muestra el flujo de información (de izquierda a derecha) de la etapa de transmisión, mientras que en la parte inferior vemos el flujo en sentido inverso para recepción. Tanto la señal transmitida como la recibida son digitales (discretas en tiempo y amplitud) y se ubican en bajas frecuencias (banda base), mientras que las ondas electromagnéticas enviadas y recibidas mediante las antenas son analógicas y se encuentran centradas en altas frecuencias. Una señal analógica puede tomar cualquier valor de tensión o voltaje dentro de los límites impuestos por diseño en los circuitos y son continuas en tiempo, mientras que las digitales están definidas en instantes de tiempo periódicos y pueden tomar su valor dentro de un conjunto predeterminado de niveles. Sería como la diferencia de alturas posibles en una rampa o una escalera. La Figura 2 muestra una señal analógica y las señales

que se obtienen al convertirla a formato digital usando ADCs de distintas resoluciones (o cantidades de niveles posibles). También se muestra el error o diferencia entre la señal original y la señal digital, que se reduce a medida que la resolución aumenta. El cambio de analógico a digital y viceversa puede hacerse con conversores de datos: digital a analógico (DAC) para transmisión, y analógico a digital (ADC) para recepción.

Siguiendo el flujo de datos para transmisión en la parte superior de la figura, la señal digital es transformada al dominio analógico mediante el DAC, y desplazada hacia la frecuencia central (o portadora) generada en el oscilador local. Esta frecuencia central depende de las convenciones establecidas por el estándar de comunicaciones que se utilice, por ejemplo 5G para telefonía celular, wifi para internet inalámbrico doméstico, etc. Luego, la potencia de la señal es aumentada por un amplificador de alta potencia e irradiada al espacio a través de una antena. La etapa de amplificación es clave, ya que el alcance de la señal transmitida, es decir la distancia a la cual puede ser detectada y decodificada correctamente por un receptor distante, depende en gran medida de la potencia con la que es emitida. Esta es la razón principal por la cual el amplificador de potencia utilizado para transmisión es uno de los componentes de mayor consumo. Por eso mismo es muy importante mejorar lo más posible su eficiencia energética, es decir la relación entre la potencia consumida y la potencia irradiada. Más adelante veremos algunas formas de lograrlo.

Pasando al flujo de datos en el receptor, vemos que la antena recibe la señal analógica transmitida, cuyo nivel de potencia es aumentado por un amplificador de bajo ruido. En este caso, el objetivo del amplificador no es obtener una señal de alta potencia a la salida, sino una señal de un nivel adecuado para su procesamiento con el menor nivel de ruido posible. Como la señal deseada está en la banda de frecuencias alrededor de la portadora, se multiplica por un oscilador local de la misma frecuencia central

para desplazar el contenido frecuencial nuevamente a banda base. Luego, se digitaliza la señal y se procesa para su detección. En este caso, el ADC domina el consumo de potencia en el receptor. Esto se debe a que para obtener una buena representación de la señal en sistemas de comunicaciones modernos, se necesitan en general altas velocidades de conversión (gran cantidad de muestras por unidad de tiempo) y con alta resolución (gran cantidad de posibles niveles de representación). Ambos requerimientos elevan exponencialmente el consumo del ADC necesario para lograrlos. La buena noticia es que también es posible mejorar su eficiencia energética y lograr un mejor uso de la potencia consumida en este caso. El procesamiento digital de señales necesario tanto para codificar y modular la señal a transmitir como para demodular y detectar la señal recibida, también debe ser tenido en cuenta a la hora de analizar el consumo de energía del sistema.

Si bien generalmente se asume que la mayor parte del consumo de energía ocurre en los circuitos analógicos, es decir a la derecha de los conversores de datos en la Figura 1, no siempre es el caso. Un ejemplo son las redes de datos ultra densas de bajo consumo, donde la distancia entre transmisor y receptor es muy corta, y por lo tanto la potencia de transmisión requerida es baja en comparación con el consumo de los procesadores. En este contexto, el compromiso entre el consumo de energía necesario para agregar procesamiento digital (por ejemplo para codificación de canal) y el ahorro de energía que este procesamiento implica debe ser evaluado cuidadosamente, ya que tal vez no se justifique [1].

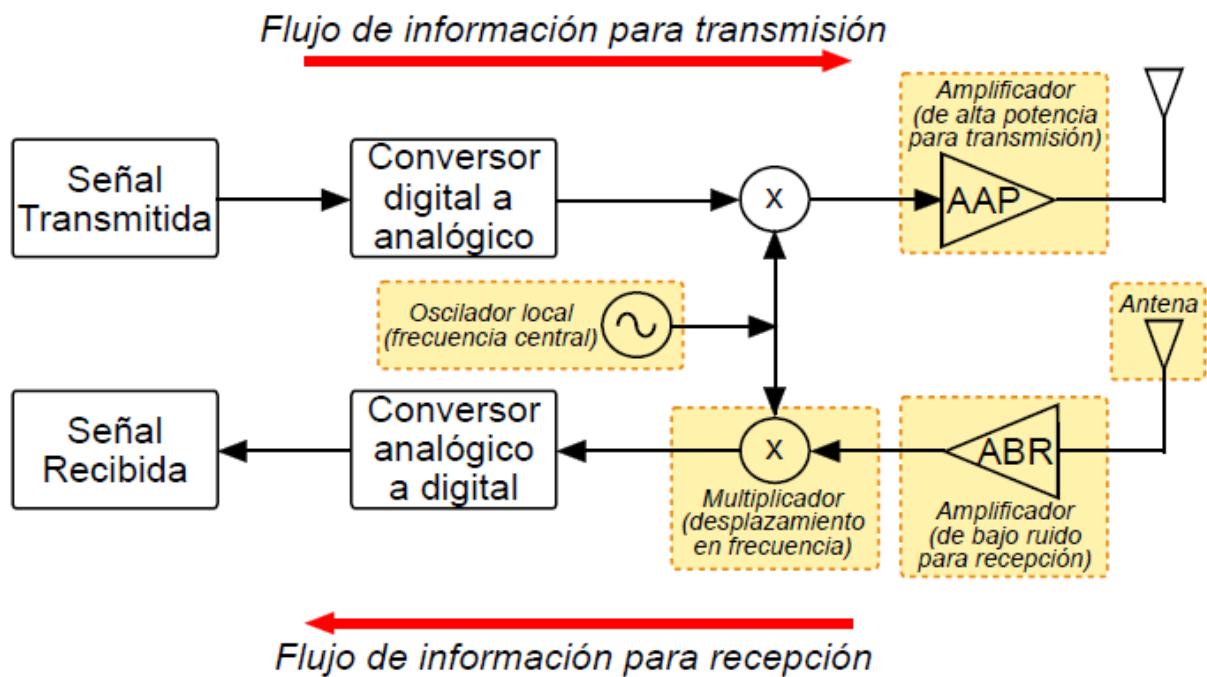


Figure 1: Diagrama en bloques de un sistema de telecomunicaciones para transmisión-recepción de información.

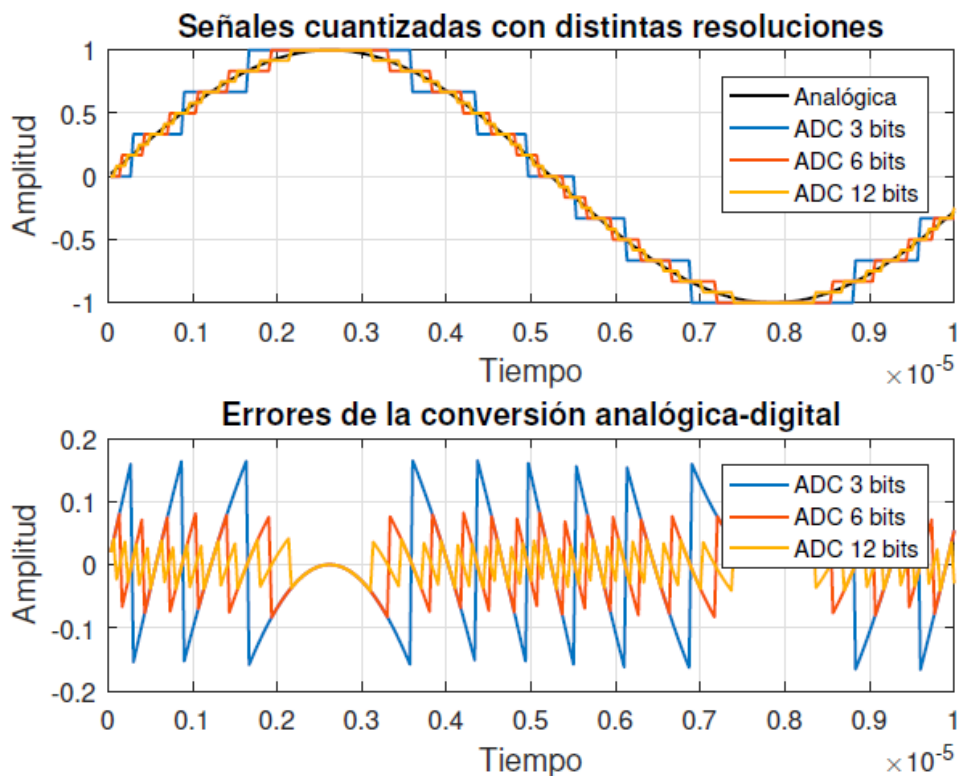


Figure 2: Conversión de una señal analógica a digital.
 a) Señales cuantizadas con distintas resoluciones en el ADC.
 b) Errores de los ADCs según la resolución (cantidad de niveles = $2^{\text{bits}} - 1$).

LINEALIZACIÓN DE COMPONENTES: AMPLIFICADORES Y CONVERTORES DE DATOS

En este artículo vamos a considerar el caso más común, donde la estación base de un sistema de telecomunicaciones inalámbrico de red celular debe proveer el servicio a múltiples usuarios que se encuentran dentro de su radio de cobertura.

Es decir, se necesita transmitir señales de alta potencia para que lleguen a destino y puedan ser detectadas allí sin errores.

Este escenario se ilustra en la Figura 3, donde se muestra un ejemplo de división del área de cobertura en celdas.

Dentro de cada celda, una estación base se encarga de proveer el servicio a los usuarios o dispositivos que se encuentran más cerca de cada una. En general, cada dispositivo se conectará a la estación base cuya señal reciba con mejores niveles de potencia, de manera que la forma de cada celda no será necesariamente hexagonal.

Los nuevos estándares de telecomunicaciones modernos, en particular 5G y próximamente 6G, han generado una gran demanda de sistemas de transmisión y recepción inalámbricos capaces de proveer tasas de transmisión de datos cada vez más altas, con mayor confiabilidad, y para un número de dispositivos conectados que crece exponencialmente [2]. Para lograr satisfacer esta demanda, es necesario contar con una alta relación señal a ruido en el receptor y baja distorsión fuera de la banda de frecuencias utilizada [3]. En este sentido, la linealidad sigue siendo un aspecto clave para lograrlo, independientemente de las mejoras adicionales que pueden introducirse mediante nuevas técnicas de modulación, codificación, o beamforming, entre otras [4]. En este contexto, las técnicas de linealización digital de componentes de radiofrecuencia son desde hace años un aspecto fundamental para obtener sistemas que cumplan con estos requerimientos y sean además eficientes y de bajo costo [5]. Esto se debe a que permiten el uso de componentes de menor

costo y consumo, permitiendo ciertos niveles de distorsión que son compensados por procesamiento, extendiendo el rango útil del amplificador y mejorando el rango dinámico (niveles de amplitud detectables) en los convertidores de datos.

AMPLIFICADORES DE POTENCIA

En la Figura 4 se muestra la relación entre la entrada y salida de un amplificador ideal (trazo azul) y uno más realista (no-lineal, trazo rojo). En este caso consideramos un amplificador clase A, donde los niveles de tensión tanto de la entrada como de la salida toman valores de tensión positivos. Como puede verse en la figura, la relación lineal entre la entrada y la salida implica que un aumento en la amplitud de la señal de entrada conduce a un aumento proporcional en la amplitud de la señal de salida. Sin embargo, en los amplificadores realizables físicamente, ocurre que cuando la señal de entrada supera determinado nivel (umbral) de amplitud, la amplitud de la salida aumenta pero en menor medida a como ocurriría para niveles de señal menores. Esto introduce lo que llamamos distorsión no lineal en la señal de salida que produce diversos errores que pueden deteriorar la calidad de la comunicación y causar errores en los datos enviados. En la práctica, este efecto reduce el rango útil de uso del amplificador a niveles de amplitud para los cuales se mantiene el comportamiento lineal.

Veamos ahora cómo se relaciona esto con la eficiencia energética y por qué es conveniente linealizar para mejorarla.

La eficiencia energética es la relación entre la potencia que consume un dispositivo y el porcentaje de esa potencia que es aprovechado de manera útil: $EE = P_{\text{util}}/P_{\text{consumida}}$. En este caso, la potencia consumida puede aproximarse como $P = V_{\text{max}} \times I_{\text{max}}$, donde V_{max} es el valor de tensión máxima de salida e I_{max} la corriente consumida para esa tensión. Por otro lado, la potencia útil en promedio es el valor promedio de tensión por el valor promedio de corriente.

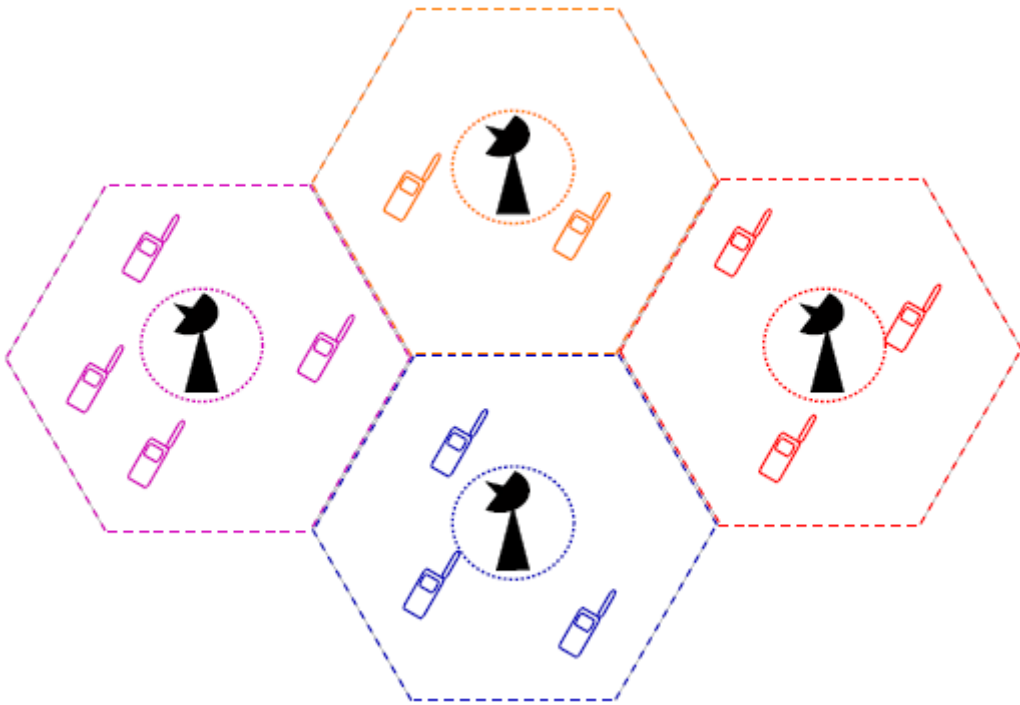


Figure 3: Esquema de telefonía celular, donde el área de cobertura se divide en celdas con estaciones base en el centro que proveen el servicio a los usuarios que se encuentran más próximos a ellas.

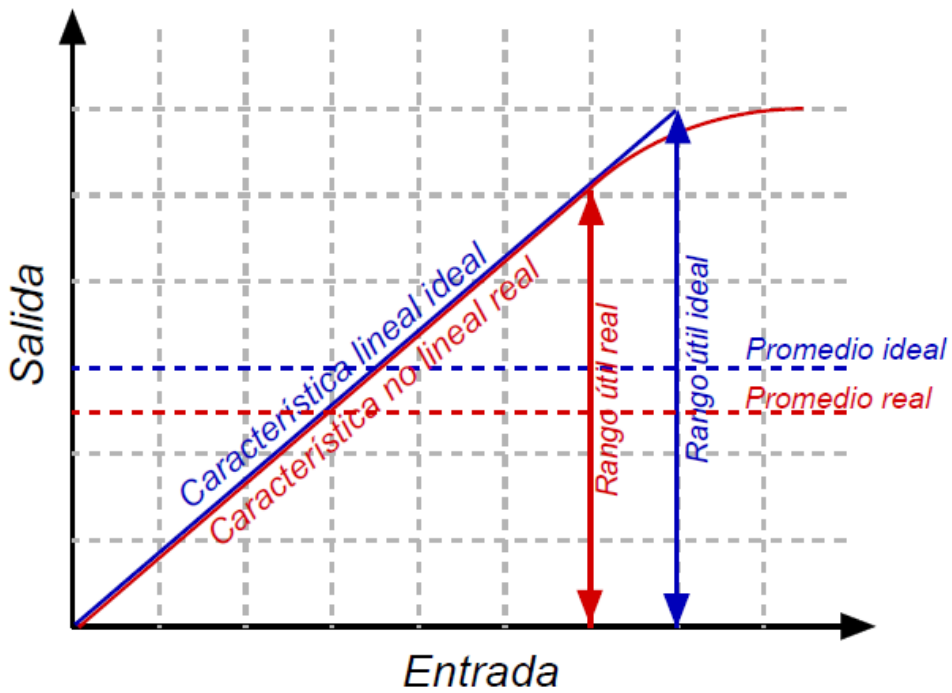


Figure 4: Características real e ideal de entrada-salida de un amplificador de potencia, rangos útiles de uso, y puntos medios de operación.

Suponiendo que la señal tiene grandes variaciones de amplitud (como ocurre con las señales de portadoras múltiples utilizadas por los estándares de comunicaciones modernos) pero similares tanto por encima como por debajo del valor promedio, normalmente se polariza el amplificador en la mitad del rango útil de funcionamiento. Es decir, se configura el amplificador de manera tal que para variaciones nulas de la señal de entrada, el valor de salida se ubique en el punto medio de la zona de funcionamiento lineal para evitar la zona en la que ocurre distorsión cuando la señal llegue a su nivel máximo. Como se ve en la Figura 4, linealizando el amplificador, el valor promedio utilizable es mayor, con lo cual la potencia útil crece y (dado que la potencia consumida es la misma) mejora la eficiencia energética. Teniendo en cuenta que el consumo de un amplificador de potencia puede superar los cientos de Watts en una estación base de telefonía celular, cualquier ahorro de energía o mejora en la EE es muy relevante.

Para linealizar el amplificador, se aplica una distorsión a la señal de entrada que sea la inversa de la del amplificador, de manera tal que el efecto conjunto sea lineal. Por ejemplo, si el efecto no lineal del amplificador es una raíz cuadrada, se eleva al cuadrado la entrada y el resultado a la salida es la entrada amplificada pero sin modificar: salida = $G \times p(\text{entrada})^2 = G \times \text{entrada}$, donde G es la ganancia del amplificador. Este proceso se llama linealización por pre-distorsión digital (PDD), y se realiza modificando la señal de entrada ya que ésta es digital y de baja potencia, lo que hace más sencilla y eficiente la linealización. En la práctica, este proceso implica obtener datos de entrada y salida del amplificador que se puedan usar para modelar su comportamiento y estimar el modelo inverso para PDD. Tanto el desarrollo e identificación de modelos que describan fielmente el comportamiento de los distintos tipos de amplificadores, como el desarrollo de pre-distorsionadores que funcionen correctamente con la menor complejidad

posible es un tema de investigación actual muy demandado [6, 7, 8, 9].

CONVERSORES DE DATOS: ADC Y DAC

La Figura 5 muestra las características ideal (en línea de puntos) y real (trazo lleno) de un ADC de 3 bits. Dependiendo de la amplitud en la señal de entrada analógica, se asigna un nivel digital diferente, y cada nivel digital se mantiene mientras el valor de la señal analógica permanezca entre los umbrales de tensión inferior y superior que corresponden a ese nivel. Idealmente, todos los escalones definidos de esta manera debieran tener el mismo ancho, y los umbrales o niveles de tensión de entrada que determinan cada transición y los delimitan deberían tener el valor ideal. Se llama no linealidad integral a la diferencia entre el valor de la señal analógica que idealmente debería ocasionar una transición de nivel digital y el valor que realmente ocasiona esa transición. Por otro lado, la no linealidad diferencial es la diferencia entre el ancho ideal de cada escalón y el ancho real que éste tiene. Estos errores, independientemente de su nombre y cómo se originan, tienen como consecuencia errores en la señal digital, ya que eventualmente se asignan niveles digitales equivocados para cierto nivel de amplitud de la señal de entrada. Además, estos errores pueden variar en el tiempo y depender de las características de la señal que se quiere convertir, por ejemplo qué tan rápido cambia su amplitud a medida que pasa el tiempo.

Estos errores en el ADC producen errores en la señal recibida, y por lo tanto en la comunicación entre el transmisor y el receptor. Existen dos formas de evitarlos o reducirlos: aumentando la potencia que consume el ADC para que su comportamiento sea más parecido al ideal, o corregir estos errores por procesamiento digital sobre la señal de salida del ADC. Por lo general, pensando en la eficiencia energética del sistema, se prefiere la segunda opción. En este caso, también es necesario medir de alguna forma el compor-

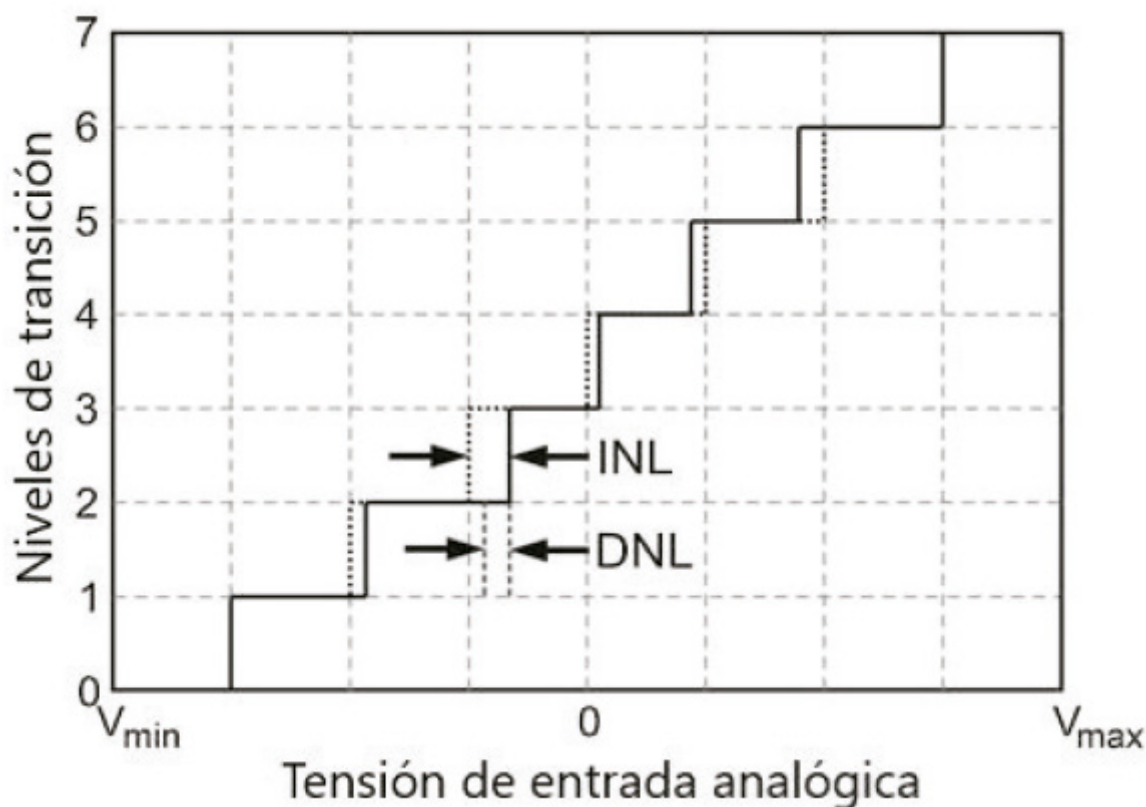


Figure 5: Características real e ideal de entrada-salida de un ADC, y los tipos de no-linealidad que causan errores en la conversión de datos: integral (INL) y diferencial (DNL).

tamiento del conversor, de manera tal que sea posible detectar los errores y corregirlos. Una forma de hacerlo es mediante calibración. Es decir, antes de usar el ADC, se le aplica a la entrada una señal conocida, y se mide la salida comparando el valor entregado por el ADC con el valor digital ideal (conocido para esa señal). Con esta información, se puede obtener un modelo del comportamiento del conversor, y diseñar un algoritmo de procesamiento digital de señales que corrija los errores de manera automática cuando se produzcan. De esta manera, se pueden usar conversores de datos de menor consumo de energía, con el costo de un procesamiento digital de señales adicional. En este sentido, es importante que el procesamiento adicional necesario para corregir los errores sea lo más simple posible, de manera que no añada retrasos significativos en el proceso de decodificación y detección de la señal recibida.

Tanto el diseño de modelos que describan correctamente el comportamiento del ADC como el desarrollo de algoritmos y métodos de corrección de baja complejidad computacional son igualmente importantes y tema activo de investigación en la actualidad [10, 11, 12]. También se estudia qué impacto tienen los errores de conversión en el funcionamiento de los sistemas de comunicaciones modernos [13]. En el caso de conversión digital a analógica para transmisión, un factor importante es determinar cómo afecta a la eficiencia energética la resolución del DAC y qué valor permite maximizarla [14].

PROCESAMIENTO DE SEÑALES PARA MEJORAR LA EFICIENCIA: REDUCCIÓN DE PAPR

Los sistemas de telecomunicaciones modernos utilizan casi en su totalidad un tipo de modulación multi-portadora que implementa un multiplexado por división en frecuencias ortonormales (OFDM, por sus siglas en inglés Orthogonal Frequency Division Multiplexing). La idea detrás de OFDM se basa en que, como el canal de comunicaciones inalámbrico varía fuertemente sus características (básicamente atenuación y retardo-desfasaje) dependiendo de la frecuencia a la cual se transmite, se divide un canal ancho en frecuencia en muchos canales angostos adyacentes. Entonces, volviendo a la Figura 1, distintas partes de la señal a transmitir se multiplican por frecuencias centrales diferentes. La ventaja de dividir el canal en términos de frecuencia de esta manera es que cada canal angosto se puede considerar constante, lo que facilita la recuperación de la porción de la señal ubicada en esa frecuencia. En la Figura 6 se muestran las principales características de este tipo de señales. En la parte superior se muestran las portadoras en frecuencia y tiempo, que consisten y tonos o señales senoidales que oscilan a distintas velocidades. Cada uno de estos tonos se multiplica por un dato o símbolo, que luego se suman y transmiten. Como se ve en la parte inferior de la figura, el resultado es una señal con grandes picos de amplitud con respecto a la amplitud promedio de la señal. Esto ocurre porque al sumar los tonos de distintas frecuencias, eventualmente pueden superponerse los picos de varios de ellos, ocasionando grandes variaciones de amplitud en la señal temporal resultante. Ahora veamos cómo se relaciona esto con la eficiencia energética y por qué es conveniente reducir la relación entre la potencia máxima de la señal y su promedio (PAPR) para mejorarla. La figura 7 muestra de nuevo la relación entrada salida del amplificador de potencia como se muestra en la Figura 4, pero en este caso suponemos que

la relación entre las amplitudes máxima y promedio de la señal es menor. El resultado es que el rango útil de la señal ya no ocupa el rango completo de uso del amplificador, y por lo tanto se puede mover hacia arriba el punto de operación (dentro de la zona lineal del amplificador real para evitar distorsión y errores en la señal amplificada). Lo que se logra de esta manera es que el promedio de potencia útil sea mayor, y como el consumo sigue siendo el mismo, aumenta la eficiencia. Por otro lado, combinando técnicas de procesamiento para reducir la PAPR con linealización del amplificador por PDD, se podría mover el punto de operación aún más arriba, utilizando el máximo del rango útil ideal del amplificador. En este caso, el promedio de potencia útil sería mayor que si sólo se reduce la PAPR, y también la mejora en la eficiencia energética.

Existen muchos métodos que, aplicando procesamiento digital de señales, permiten codificar la señal introduciendo cambios reversibles que permitan obtener una reducción de PAPR sin perder información ni añadir distorsión. Uno de estos métodos se llama reducción de PAPR por tonos reservados, y consiste en dejar libre un pequeño porcentaje de portadoras de la señal OFDM de manera de colocar una señal en esos tonos que reduzca la PAPR de la señal útil resultante con el resto de las portadoras. En este caso, los tiempos de procesamiento necesarios para calcular la señal óptima en los tonos reservados puede llegar a ser bastante alto, y la forma de lograr buenos resultados con la menor complejidad posible es un tema de investigación muy demandado [15]. Otra alternativa consiste en cambiar el orden de los símbolos que se multiplican por las distintas portadoras, y utilizar la variante que resulte con menor PAPR. En ese caso, es necesario enviar información adicional para conocer en el receptor el orden original en que van los datos. Hacer ambas cosas de manera eficiente es un desafío interesante y un problema cuya resolución también genera mucho interés. Otro tema que se investiga mucho es cómo se pueden combinar

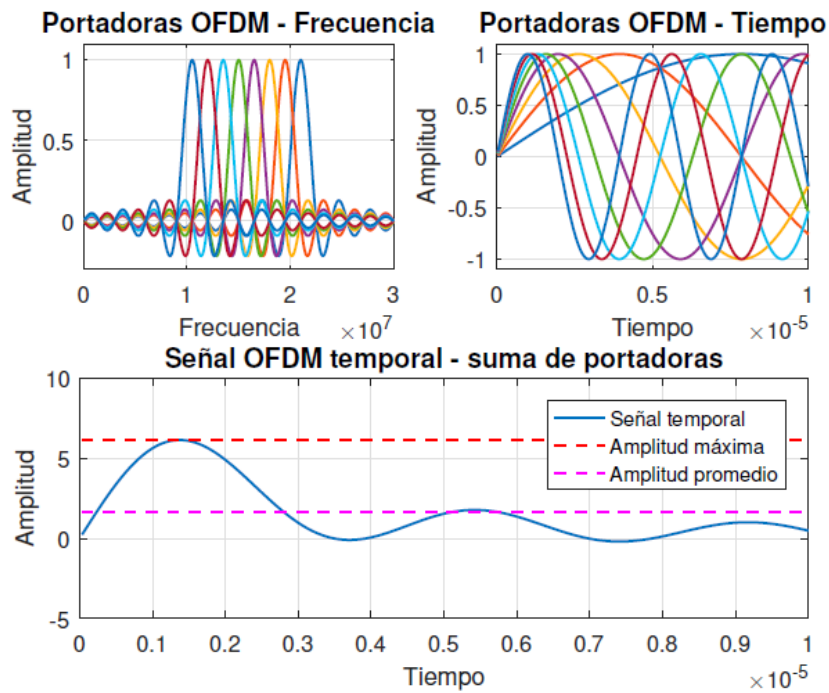


Figure 6: El origen de la alta relación entre potencias pico y promedio en señales multiportadoras (OFDM).
 a) Forma y posición de las portadoras en frecuencia. b) Forma temporal de las señales portadoras.
 c) Señal temporal modulada OFDM, es la suma de las portadoras ponderadas por los datos.

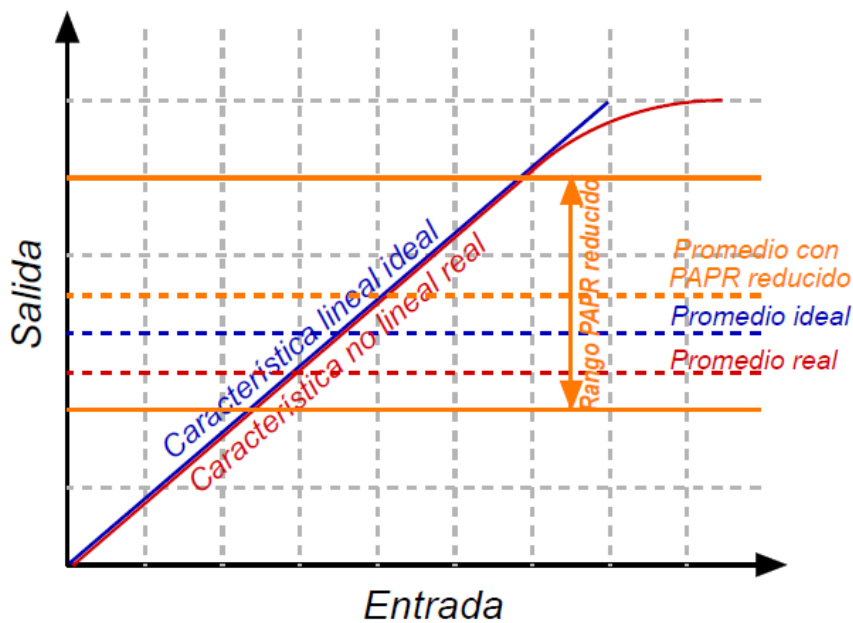


Figure 7: Uso más eficiente del amplificador de potencia cuando la señal tiene menor PAPR.

estas técnicas con los sistemas de comunicaciones modernos y en qué medida se puede mejorar la EE de manera eficiente. Por ejemplo, en MIMO masivo, donde se usa una gran cantidad de antenas para mejorar la velocidad de transmisión y la calidad de los enlaces, realizar el procesamiento en tiempo o en frecuencia puede tener un impacto alto en la complejidad [16] [17].

Teniendo en cuenta las tendencias actuales, donde la cantidad de dispositivos conectados (mediante internet de las cosas o tecnologías similares) dentro y fuera del hogar se cuentan por millones en áreas relativamente pequeñas, o donde se utilizan estaciones base con tecnologías de MIMO masivo (que cuentan con decenas de antenas cada una alimentada por su propio amplificador de potencia), cualquier mejora en la EE, por más pequeña que parezca, se ve multiplicada enormemente por los grandes factores de escala involucrados. En este contexto, el uso de estas técnicas, otras similares, o las que sigan desarrollándose en el futuro resultan vitales para acompañar el desarrollo y la evolución de las conexiones inalámbricas de alto desempeño de manera sustentable.

REFERENCIAS

- [1] F. Gregorio, G. González, C. A. Schmidt, and J. Cousseau, *Signal Processing Techniques for Power Efficient Wireless Communication Systems: Practical Approaches for RF Impairments Reduction*. Signals and Communication.
- [2] B. D. R. Li, A. Barros, Y. P. Fang, and Z. Zeng, "Estimating 5G network service resilience against short timescale traffic variation," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, April 2023.
- [3] M. A. Montazerolghaem, L. C. N. de Vree de, and M. Babaie, "A highly linear receiver using parallel preselect filter for 5G microcell base station applications," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 58, pp. 2157–2172, August 2023.
- [4] Q. Chen and J. Wang, "Aligntrack: Push the SNR limit of LoRa collision decoding," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Jan 2023.
- [5] R. Michev, Y. Shu, D. Werbunat, J. Hasch, and C. Waldschmidt, "Adaptive compensation of hardware impairments in digitally modulated radars using ML-based behavioral models," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, June 2023.
- [6] M. Y. Cheong, S. Werner, M. J. Bruno, J. L. Figueroa, J. E. Cousseau, and R. Wichman, "Adaptive piecewise linear predistorters for nonlinear power amplifiers with memory," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, no. 7, pp. 1519–1532, 2012.
- [7] C. Bocciarelli, F. Centurelli, P. Monsurrò, G. Scotti, V. Spinogatti, P. Tommasino, and A. Trifiletti, "High-accuracy low-cost generalized complex pruned volterra models for nonlinear calibration," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 70, no. 9, pp. 3534–3544, 2023.
- [8] J. Wang, R. Su, J. Lv, G. Xu, and T. Liu, "Signal reconstruction deep residual neural network-based bandwidth augmented methods for dpd linearization," *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, vol. 33, no. 3, pp. 243–246, 2023.

- [9] W. Li, Y. Guo, G. Montoro, and P. L. Gilabert, "A scalable bandwidth and frequency-dependent dpd linearizer for user equipment power amplifiers with nonflat frequency response," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, pp. 1–13, 2023.
- [10] C. A. Schmidt, O. Lifschitz, J. E. Cousseau, J. L. Figueroa, and P. Julián, "Methodology and measurement setup for analog-to-digital converter postcompensation," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 3, pp. 658–666, 2014.
- [11] C. A. Schmidt, J. E. Cousseau, J. L. Figueroa, B. T. Reyes, and M. R. Hueda, "Efficient estimation and correction of mismatch errors in time-interleaved ADCs," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 2, pp. 243–254, 2016.
- [12] C. A. Schmidt, J. L. Figueroa, J. E. Cousseau, and A. M. Tonello, "Pilot-based TI-ADC mismatch error calibration for ir-uwv receivers," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 74340–74350, 2019.
- [13] C. A. Schmidt, G. González, F. Gregorio, J. E. Cousseau, T. Riihonen, and R. Wichman, "Compensation of ADC-induced distortion in broadband full-duplex transceivers," in *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pp. 1147–1152, 2017.
- [14] C. A. Schmidt, J. F. Schmidt, J. L. Figueroa, and M. Crussière, "Achievable energy efficiency in massive MIMO: Impact of DAC resolution and PAPR reduction for practical network topologies at mm-waves," *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 11, pp. 2784–2788, 2022.
- [15] S. S. K. C. Bulusu, M. Crussière, J.-F. Hélar, R. Mounzer, Y. Nasser, O. Rousset, and A. Untersee, "Quasi-optimal tone reservation PAPR reduction algorithm for next generation broadcasting systems: A performance/complexity/latency tradeoff with testbed implementation," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 64, no. 4, pp. 883–899, 2018.
- [16] C. A. Schmidt, M. Crussière, and J. F. Hélar, "Digital beamforming with PAPR reduction: An approach for energy efficient massive mimo," in *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, pp. 1–6, 2020.
- [17] C. Schmidt, M. Crussière, J. F. Hélar, and A. Tonello, "Improving energy efficiency in massive MIMO: Joint digital beam-steering and TR-PAPR reduction," *IET Communications*, May 2020.