

# Teoría de Comunicación y Procesamiento de Señales - Tecnología WiMax

José Andrés González-Barrantes, Facundo Daniel Mendoza-Solano  
joseagb97@estudiantec.cr, xblcn97@estudiantec.cr  
Área Académica de Ingeniería en Mecatrónica  
Tecnológico de Costa Rica

**Resumen**—En la presente investigación se aborda el tema de WiMax, la cual contiene información que detalla las características técnicas y de operación de esta tecnología, incluyendo qué es, la arquitectura que usa, sus topologías, estándares de operación, elementos de hardware, alcance y velocidades de transmisión de datos, entre otros. Además, se proporciona una sección dedicada a la mención y descripción de algunas de las principales aplicaciones que tiene en ámbitos como la vida cotidiana o la industria. Por último, se proporcionan los detalles y se comentan los resultados de una demostración técnica sobre este tipo de tecnología inalámbrica.

**Palabras clave**—Estándar IEEE 802.16, tecnología inalámbrica, capa física, capa MAC.

## I. INTRODUCCIÓN

La demanda de servicios inalámbricos de banda ancha aumenta día a día. La solución convencional de internet de banda ancha de alta velocidad es de difícil acceso en áreas rurales remotas y no brinda un buen soporte para la movilidad de terminales. Para superar estos problemas, se introduce el acceso inalámbrico de banda ancha móvil (BWA) para proporcionar una solución flexible y rentable. Tiene muchas ventajas, como alta velocidad, mayor flexibilidad y facilidad para escalar [1]. Esta tecnología tiene el potencial de servir a los clientes que no están satisfechos o que no reciben servicios de banda ancha por cable. El estándar IEEE 802.16 para BWA y WiMAX ofrece servicios de alta velocidad y calidad a un gran número de suscriptores donde la banda ancha no es la opción óptima. A continuación se explorará la historia, aspectos técnicos, aplicaciones y demostraciones de esta tecnología.

## II. DETALLES TÉCNICOS Y DE OPERACIÓN

### II-A. Origen de la tecnología WiMax

El grupo de la norma IEEE 802.16 se formó en el año de 1998 con el objetivo de desarrollar un estándar de interfaz aérea de banda ancha inalámbrica. El grupo tenía un enfoque inicial en el que pretendía desarrollar un sistema de banda ancha inalámbrica de tipo punto a multipunto que estaría basado en propagación en la línea de visión (LoS) y así operar en la banda entre los 10 y 66 Hz. Para el final del año 2001 ya se tenía el estándar 802.16 original, este estaba basado en una capa física de un solo portador con una capa de control de acceso al medio multiplexada por división de tiempo en ráfagas (TDM). Muchos conceptos relacionados con la capa

MAC fueron adoptados por la tecnología inalámbrica partiendo del estándar DOCSIS, cuyas siglas significan especificación de interfaz de servicio de datos a través de cable.

Posteriormente el mismo grupo de la IEEE desarrolla la segunda versión del estándar llamada 802.16a, esta incluye aplicaciones sin línea de visión (NLOS) en la banda que va desde los 2 GHz hasta los 11 GHz, utilizando en este caso una capa física basada en multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). A su vez, se le incorporaron mejoras en la capa MAC tales como soporte para acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA). En el año 2004 se introdujo la versión del estándar 802.16 llamada IEEE 802.16-2004 que reemplazó a las versiones anteriores; esta versión tenía como objetivos aplicaciones fijas. Así sucesivamente fueron saliendo otras versiones WiMax tales como la IEEE 802.16e-2005 que incluye aplicaciones fijas, nómadas y móviles.

En concreto WiMax nace como una tecnología alternativa que buscaba aportar una solución sustentable al problema de accesos a internet por medios físicos en zonas donde habitan poblaciones con difícil acceso geográfico. También surge como oportunidad para llevar internet a personas en lugares remotos en donde el cableado resulta ser una opción no viable desde el punto de vista económico para las compañías que proveen el servicio convencional de internet, ya que las poblaciones podrían resultar ser muy pequeñas o dispersas y no justificaría la inversión en la infraestructura pertinente.

### II-B. Arquitectura

La organización WiMax Forum determinó que la arquitectura de red de WiMax estuviese basada en una plataforma IP (Protocolo de Internet). Lo concerniente a servicios de extremo a extremo se entregan a través de una arquitectura IP que está basada en protocolos para transporte de extremo a extremo, calidad de servicio (QoS), gestión de sesiones, seguridad y movilidad. El uso de una arquitectura IP le dota de ciertas ventajas a la tecnología WiMax y le permite facilitar la convergencia con otras redes y explorar un gran ecosistema para el desarrollo de aplicaciones que existen para IP.

### II-C. Modelo de capas

El estándar IEEE 802.16 describe dos capas principales para la tecnología WiMAX, estas dos capas son la física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC); estando

esta última subdividida en tres subcapas llamadas: subcapa de convergencia, subcapa de seguridad y subcapa de parte común. A continuación se describen cada una de estas capas:

- **Capa Física (PHY):** La capa física establece la conexión física entre ambos lados (emisor y receptor de la señal WiMax) y generalmente en ambos sentidos (enlace ascendente y enlace descendente). La capa física es responsable de la transmisión de las secuencias de bits. En esta capa se define el tipo de señal utilizada, el tipo de modulación y demodulación, potencia de transmisión, entre otras características físicas más. El estándar IEEE 802.16 establece que se pueden encontrar cinco interfaces físicas, estas se pueden apreciar en la Figura 1 en donde también se encuentra la banda de frecuencia a la que pertenece cada capa, su respectiva versión de estándar y tipo de duplexación (TDD o FDD). Los mencionados tipos de duplexación se abordarán con más detalle más adelante en este documento.

Designación	Banda de frecuencia	Sección en el estándar	Duplexación
Wireless MANS (conocido como SC)	10–66 GHz (LOS)	8.1	TDD y FDD
Wireless MANSa (conocido como SCa)	Menor a 11 GHz (NLOS); licenciada	8.2	TDD y FDD
Wireless MAN OFDM (conocido como OFDM)	Menor a 11 GHz; licenciada	8.3	TDD y FDD
Wireless MAN OFDMA (conocido como OFDMA)	Menor a 11 GHz; licenciada	8.4	TDD y FDD
WirelessHUMAN	Menor a 11 GHz; no licenciada	8.5 (además de 8.2, 8.3 or 8.4)	TDD solamente

Figura 1: Interfaces físicas especificadas en el estándar 802.16. [2]

- **Capa de Control de Acceso al Medio (MAC):** dividida en tres subcapas. Según Pignataro, la capa MAC soporta principalmente una arquitectura punto a multipunto (PMP), con la opción de soportar también una topología de malla. La capa MAC está estructurada para soportar varias capas físicas (PHY) especificadas en el mismo estándar [2]. De hecho, sólo dos de ellas son usadas en WiMAX.
  - **Subcapa de Convergencia (CS):** esta capa se encuentra sobre la subcapa de parte común y usa los servicios que provee dicha capa mediante el punto de acceso a servicios MAC. Dentro de las funciones que tiene esta subcapa están:
    1. Aceptar las unidades de datos de protocolo (PDU) de capas superiores. Se especifica la capa CS para soportar dos tipos de capas superiores: modo CS de transferencia de datos asíncrona (ATM) y modo CS de paquetes. Para el modo de paquetes CS, los protocolos de capa superior pueden ser, Ethernet, IPv4 o IPv6.
    2. Clasificación y mapeo de unidades de datos de servicio MAC (MSDU) en los identificadores de conexión (CID) apropiados. Esta es una función básica del mecanismo de manejo de QoS del estándar 802.16 BWA.
    3. Procesamiento de los PDU de las capas superiores basado en la clasificación.

4. Ofrece una función opcional llamada supresión de encabezado de carga útil (PHS), la cual ejecuta el proceso de supresión de partes repetitivas de los encabezados en el transmisor y el agregado de los mismos encabezados en el receptor.
  5. El envío de los PDU de la CS al MAC al punto de acceso de servicio (SAP) apropiado y la recepción de los PDU desde la entidad par.
- **Subcapa de Seguridad:** La capa de seguridad provee autenticación, intercambio de clave segura, encriptación y control de integridad a través del sistema de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA). Dentro de las funciones de seguridad se encuentran:
    1. Protocolo de privacidad y manejo de claves. (PKMv1 802.162004 y PKMv2 para 802.16e). Utiliza mecanismos de autenticación, control de encriptación del tráfico, clave de intercambio para handover y mensajes de seguridad Multicast/Broadcast, todos basados en este protocolo.
    2. Autenticación de dispositivo/usuario: WiMAX móvil soporta autenticación de dispositivo y usuario usando el protocolo IETF EAP proveyendo soporte de credenciales que están en la SIM, USIM, o certificado digital o usuario/password.
    3. Encriptación del tráfico: Las claves usadas para cifrar son generadas desde la autenticación EAP. La máquina de estados de encriptación tiene una clave periódica (TEK) que permite la transición de claves para mejorar la protección.
    4. Protección de mensajes de control: Los datos de control se protegen usando mecanismos basados en AES o esquemas basados en MD5.
    5. Soporte de entrega rápida: Es usado para optimizar los mecanismos de autenticación para soportar entregas rápidas, se utiliza en WiMAX móvil un esquema de tres vías de handshake. Este mecanismo es también útil para prevenir cualquier ataque.
  - **Subcapa de Parte Común (CPS):** Su nombre completo es Parte Común de Control de Acceso al Medio, esta capa se encuentra en medio de la capa MAC y representa la parte central del protocolo MAC. Dentro de sus tareas se encuentran:
    1. Reserva de ancho de banda.
    2. Establecimiento de conexión.
    3. Mantenimiento de la conexión entre los dos lados.

Pignataro nos dice que: “El estándar 802.16-2004 define un grupo de mensajes de control y transferencia. Los mensajes de control son intercambiados entre el SS y la BS antes y durante el establecimiento de la conexión. Cuando la conexión se establece, los mensajes de transferencia pueden intercambiarse de forma tal que permita la transmisión de los datos. La capa CPS recibe datos de varios CSs, a través del MAC SAP, clasificándolos en diferentes conexiones MAC” [2].

## II-D. Protocolo de funcionamiento

Como parte de los protocolos que incluye WiMax tenemos los que ofrecen soporte para la transmisión de datos dúplex por división de tiempo (TDD) y la transmisión de datos dúplex por división de frecuencia (FDD). Los anteriores protocolos están contemplados en los estándares IEEE 802.16-2004 e IEEE 802.16e-2005 que son capaces de admitir ambos protocolos de transmisión de datos, agregando una variante a la transmisión de datos de tipo FDD que se caracteriza por ser de tipo semidúplex en vez de dúplex (HDD), lo cual trae como ventaja una implementación del sistema en cuestión a un costo más reducido en comparación al dúplex.

WiMax también emplea el Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) como una técnica que permite asignar a distintos usuarios diferentes subconjuntos de los tonos OFDM. Se emplea la Codificación y Modulación Adaptativa (AMC) para poder realizar cambios en los esquemas por usuario y por tramas, según así lo ameriten las condiciones del canal. La herramienta AMC es efectiva para incrementar el rendimiento en los canales variables en el tiempo.

## II-E. Frecuencias de operación

La tecnología WiMax opera principalmente en dos rangos de frecuencia: Un rango de alta frecuencia y otro rango de baja frecuencia.

- Rango de alta frecuencia: Este rango se extiende desde los 11 GHz hasta los 66 GHz.
- Rango de baja frecuencia: El rango de las bajas frecuencias se extiende desde los 2 GHz hasta los 10 GHz.

## II-F. Evolución de la tecnología (Versiones)

La tecnología WiMax esta basada en el estándar IEEE 802.06. El estándar IEEE sirve como base para las especificaciones de la interfaz aérea WiMAX del WiMAX Forum en las capas PHY y MAC. El estándar evolucionó el tiempo para admitir nuevas capacidades y mejorar el rendimiento. Hay tres versiones del estándar IEEE 802.16 que son relevantes para el programa WiMAX Forum Certified:

1. IEEE 802.16-2004 (802.16d): Esta versión está basada en multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), el cual permite acceso fijo y nómada. Los equipo que fueron certificados con esta versión del estándar los pudieron hacer hasta el 2008.
2. IEEE 802.16e-2005 (802.16e): En cuanto a esta versión se tiene un acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA). Al igual que en la versión 802.16d esta versión admite acceso fijo y nómada; sin embargo, incluye una actualización que tiene que ver con la capacidad de brindar acceso móvil. La primera certificaciones de esta versión fueron emitidas por la WiMax Forum en abril y junio del año 2008, para las bandas de 2.3 GHz y 2.5 GHz respectivamente.
3. IEEE 802.16m: Esta es la versión más reciente del estándar 802.16, estando aún en fase de desarrollo. Esta nueva versión promete incluir servicios de voz mejorados y acceso móvil. Según Muller WiMAX Forum se compromete a preservar la compatibilidad con

el estándar IEEE 802.16e-2005, que permitirá a los operadores implementar equipos basados en 802.16m dentro de sus redes existentes [3].

WiMAX Forum desarrolla perfiles de sistema en donde seleccionan un conjunto de características incluidas en el estándar para definir las capacidades que todos los productos WiMAX deben soportar. En la actualidad se cuenta dos perfiles de sistema: uno para WiMAX fijo (IEEE 802.16d) y otro para WiMAX móvil (IEEE 802.16e-2005). Cabe la posibilidad de que se agreguen capacidades adicionales a los perfiles del sistema cuando se apruebe una nueva versión del estándar.

## II-G. Estandarización de la tecnología WiMax

Tal y como se menciona en la sección anterior la tecnología WiMax se rige para el estándar de la IEEE 802.6 que está relacionado con la interfaz aérea de WiMax. El grupo encargado del desarrollo del estándar WiMax del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) esta enfocado en desarrollar estándares y prácticas recomendadas para apoyar el desarrollo y despliegue de redes inalámbricas de área metropolitana de banda ancha (Wireless MAN).

Algunas otras instituciones que están involucradas en el desarrollo de la tecnología WiMax son: Comunidad WiMax, WiMAX Spectrum Owners Alliance (WiSOA), WiMax Forum; siendo esta última la que se menciona en la sección anterior y que además cumple un papel importante en promover y regular la certificación de interoperabilidad de los productos WiMax.

## II-H. Terminales físicos

Esta es una tecnología de tipo inalámbrica por lo cual sus principales componentes son las antenas que permiten emitir y recibir las señales, y dichas señales tiene como medio de transmisión el aire. No es una tecnología alámbrica en la cual se puedan interconectar todos sus componentes mediante diversos tipos de cables y de esta manera poder hablar con facilidad sobre los terminales físicos que incorporan dichos componentes.

## II-I. Dispositivos finales e intermedios

La tecnología WiMax está compuesta de pocos equipos y dispositivos, entre ellos se pueden mencionar: Estaciones base, receptores, antenas y una red de retorno; esta última mejor conocida como backhaul en inglés.

- Estación base de WiMax: Una estación base WiMax consiste en dos principales partes: el equipo de interior y la torre. Teóricamente el alcance de una estación base es aproximadamente de un radio de cincuenta kilómetros (50 Km); sin embargo en la práctica solamente son capaces de cubrir un radio de diez kilómetros (10 Km), de esta manera cualquier dispositivo (nodo) dentro del área de cobertura es capaz de acceder a internet. La función principal de la estación WiMax es la de servir como capa de control de acceso, asignándole a los dispositivos conectados un ancho de banda de carga y descarga que depende del paquete contratado por el subscriber del servicio.

- **Receptor WiMax:** El receptor WiMax es un dispositivo que cuenta con una tarjeta PCMCIA que está ubicada en la computadora del usuario. A este dispositivo también se le llama equipo de promesa de cliente.
- **Antena WiMax:** Las antenas WiMax pueden ser colocadas en forma de caja como dispositivo externo a las computadoras que reciben la señal de la estación base, así como dispositivo que se coloca en la estación base para hacer la señal más fuerte, en este último caso la antena se conecta al equipo interior de la estación base mediante un cable. Las antenas que se colocan en los ordenadores se suelen usar para mejorar la intensidad de la señal de los usuarios en áreas en donde hay densa vegetación o zonas de alta montaña
- **Red de retorno WiMax (backhaul):** Una red de retorno es un sistema de enlace desde un punto de acceso, esta red se encarga de permitirle a los usuarios conectarse y desconectarse de una estación base a otra con facilidad, de la misma manera como lo hacen los teléfonos celulares con las antenas telefónicas. La red de retorno tiene como objetivo conectar numerosas estaciones base entre sí mediante los enlaces de microondas de alta velocidad, dicha interconexión entre bases también se le llama red troncal.

#### II-J. Alcance y potencia de la tecnología WiMax

La red WiMax puede operar en dos modalidades dependiendo de las características físicas de la zona de operación:

- **Con línea de visión (LOS):** Significa que las señales de radiofrecuencia emitidas entre emisor y receptor cuentan con una trayectoria limpia y sin obstáculos u obstrucciones. Para estos casos WiMax opera en el rango de frecuencias que va desde los 11 GHz hasta los 66 GHz. Su rango de alcance se extiende hasta un radio de 50 km.
- **Sin línea de visión (NLOS):** Esto significa que las señales de radiofrecuencia tienen un trayecto parcialmente obstruido entre la posición de emisión hasta la posición de recepción. Para este caso en concreto las señales emitidas mediante WiMax operan en un rango de frecuencia menor a los 10 GHz y tienen un rango de alcance que va desde un radio de 6 km hasta los 10 km, para equipos que se encuentran fijos en las instalaciones del cliente.

#### II-K. Topologías

El estándar IEEE 802.16 establece dos posibles topologías de red en WiMax: Topología punto a multipunto (PMP) y la topología de malla (también conocida como modo de malla). La principal diferencia entre ambas es que la topología de punto a multipunto el tráfico de información puede tener lugar solo entre una estación base y sus SS's; mientras que en la topología de malla el tráfico de información puede enrutarse a través de otras SS's hasta llegar la estación base, o inclusive la información solo puede enrutarse a través de SS. Las topologías de tipo PMP son de tipo centralizada, ya que la estación base funge como único medio de paso de información y es el centro del sistema. Por otro lado, en la topología de malla cada una de las SS es un nodo y el conjunto de nodos

conforman una malla donde no hay un elemento central. Un ejemplo de topología punto a multipunto se puede observar en la Figura 2.

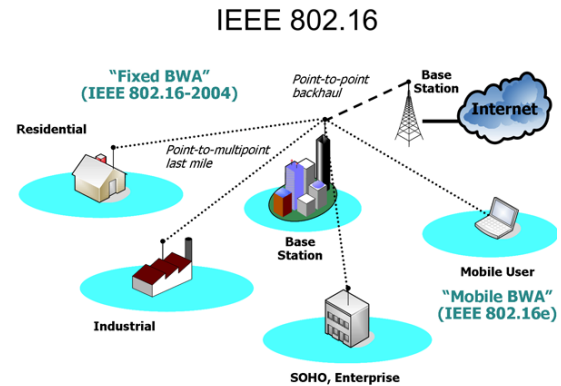


Figura 2: Topología de punto a multipunto (PMP). [6]

La topología de malla se caracteriza porque cada estación puede crear su propia comunicación con otras estaciones y no está restringida a comunicarse únicamente con la estación base. El alcance es una ventaja significativa que tiene la topología de malla con respecto a la PMP; en la topologías de malla también existe una estación base, sin embargo esta no se desempeña como elemento central de comunicación y es otro nodo más, entonces la capacidad de alcance de la estación base se puede ver aumentada en función de la cantidad de saltos entre las SS (nodos) que hay en la red.

#### II-L. Velocidades de transmisión.

Las velocidades de transmisión de datos que nos puede ofrecer WiMax pueden ascender hasta los setenta y cinco megabits por segundo (75 Mbps) en condiciones óptimas de funcionamiento. Si esto lo comparamos con tecnologías con conexión muy básica de cable módem o DSL, se tiene que WiMax si ofrece una mejora en cuanto a velocidad. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que el ancho de banda debe ser repartido entre todos los usuarios o dispositivos que se conecten a la red y por ello en la práctica se aprecian velocidades más recortadas con respecto a la mencionada al inicio.

### III. APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA WIMAX

#### III-A. Usos típicos

Tal y como se mencionó en la primera sección de este documento la tecnología WiMax surgió con el objetivo de dotar de internet inalámbrico de alta velocidad a zonas con geografías complicadas donde es difícil dotar del servicio convencional a los usuarios. Sin embargo este tipo de tecnología no solo es capaz de transmitir y recibir datos de internet, sino que también cuenta con la capacidad de admitir datos de voz y de vídeo. Otro uso un poco menos conocido que se ha dado a la redes WiMax es la opción de interconectar redes de edificios vecinos, ofreciendo así una alternativa inalámbrica de conexión, la cual entra a competir con las compañías que

ofrecen servicios de internet mas tradicionales. A su vez una con red WiMax también se tiene la capacidad de conectar puntos de acceso de tipo WLAN a internet.

### III-B. Aplicación real de WiMax

El caso de aplicación real de tecnología WiMax del que se va a exponer en este documento tiene que ver con la implementación de esta tecnología en un entorno submarino. El caso en cuestión corresponde a un experimento realizado por investigadores del Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Cádiz, el experimento realizado con fines investigativos tenía como objetivo evaluar el desempeño de una red WiMax implementada en entornos submarinos.

En general el objetivo consistió en recabar información proveniente de boyas ubicadas a lo largo de la costa de la ciudad de Cádiz, y con ello determinar si la tecnología WiMax resultaba ser una acertada y fiable en la recolección de los datos oceanográficos. La tecnología WiMax fue tomada en cuenta por los investigadores para realizar el experimento ya que esta resulta ser más accesible económicamente en comparación con las opciones que tenían en ese momento que eran comunicaciones satelitales (las cuales resultaban ser bastante costosas) y por otra parte las comunicaciones móviles terrestres que no era una opción viable ya que el entorno en el que debía realizar la toma de mediciones se encontraba en el mar.

El experimento realizado por los investigadores también tenía dentro de sus objetivos recabar datos para que luego estos puedan servir de referencia para un futuro desarrollo de la tecnología WiMax implementada en este tipo de entornos acuáticos, ya que la información que existía en ese momento que realizaron la investigación era casi nula.

En palabras de Reyes: “Estas medidas son de especial interés para determinar el balance de potencias requerido para conseguir el alcance deseado entre una boya y su estación de control a bordo de un buque. Además, este estudio es útil para desplegar sistemas basados en la tecnología WiMAX en escenarios marítimos, así como para obtener especificaciones de diseño de subsistemas de comunicaciones en esta tecnología” [7].

En resumen, el experimento consistió en colocar antenas en dos buques y en una boya situada en una posición fija, la idea era recabar datos de la boya estando situados en el buque mientras este último seguía una ruta a lo largo de la bahía de Cádiz y el otro buque se mantenía anclado en una posición fija, tal y como se puede observar en la Figura 3. Una vez que se realizó el experimento llegaron a varias conclusiones, de ellas la más relevante fue que la señal de las antenas se veía afectada por el oleaje; ¿por qué? Explican que el oleaje hace que la boya se mueva hacia los lados, hacia arriba y hacia abajo, afectando el direccionamiento correcto de las antenas constantemente, ya que el oleaje tiene movimientos aleatorios y constantes. Este comportamiento produce pérdidas temporales de conexión y hace se determinó que también la tasa de atenuación de la señal se incrementó con el aumento de la distancia.



Figura 3: Trayectoria de toma de mediciones submarinas en bahía de Cádiz. [7]

### IV. DEMOSTRACIÓN TÉCNICA

En WiMax, al igual que en otras tecnologías de comunicación inalámbrica como WiFi, resulta vital ejecutar la corrección de errores de transmisión a través de canales ruidosos. Una de las técnicas utilizadas para solucionar este problema son los códigos de verificación de paridad de baja densidad (códigos LDPC), los cuales son códigos de codificación de canal eficientes que permiten corregir errores de transmisión. Fueron descritos por primera vez en 1960 por Gallager. Sin embargo, estos códigos no obtuvieron una aceptación general en su momento debido a la potencia computacional requerido para calcularlos [8]. Con la actualización de la capacidad de procesamiento de las computadoras y el desarrollo de teorías relevantes, como el algoritmo de propagación de creencias y los turbo códigos, los códigos LDPC llamaron nuevamente la atención académica [9].

Finalmente, en 1996, Mackay y Neal reinventaron los códigos LDPC, observando su rendimiento cercano al límite de Shannon, el cual se refiere a la tasa máxima de datos sin errores que teóricamente se pueden transferir a través del canal si el enlace está sujeto a errores de transmisión de datos aleatorios, para un nivel de ruido particular [10].

Los códigos LDPC se caracterizan por las siguientes características: mejor rendimiento en comparación con los códigos turbo cuando la longitud del bloque es grande; gran flexibilidad; descripción simple que facilita la verificabilidad teórica; menor complejidad de decodificación en comparación con los códigos turbo; capacidad paralela, que facilita la implementación del hardware; y alto throughput, que resulta en una decodificación de alta velocidad [9].

Algunos conceptos importantes que se deben mencionar previamente son:

- Código de bloque lineal: es un tipo de código de corrección de errores en el que los bits de información reales se combinan linealmente con los bits de verificación de paridad para generar una palabra clave lineal que se transmite a través del canal. Los bits de paridad en las



palabras clave transmitidas a través de un canal ruidoso ayudan en el lado del receptor detectando, corrigiendo y localizando los errores con la ayuda de algoritmos de decodificación. [11].

- Tasa de Código: es el número de bits del mensaje dividido por el número de bits transmitidos ( $k/n$ ). A medida que disminuye la tasa de código y aumenta el número de bits codificados transmitidos, también aumenta la seguridad o protección del mensaje. Pero a medida que disminuye la tasa de código, aumenta el ancho de banda y también aumenta el costo por bit a medida que aumenta el número total de bits transmitidos [11].

Un código LDPC es un código de bloque lineal definido por una matriz de control de paridad  $H = C \times B$ , caracterizada por una baja densidad de unos:  $B$  es el número de bits en el código (longitud del bloque), mientras que  $C$  es el número de controles de paridad. Un uno en una determinada celda de la matriz  $H$  indica que el bit correspondiente a la columna de la celda se utiliza para el cálculo del control de paridad asociado a la fila. Una descripción popular de un código LDPC es el gráfico bipartito (o Tanner) que se muestra en la Figura 4 como un pequeño ejemplo, donde los nodos variables  $B$  están conectados a los nodos de verificación  $C$  a través de los bordes correspondientes a las posiciones de los que están en  $H$  [12].

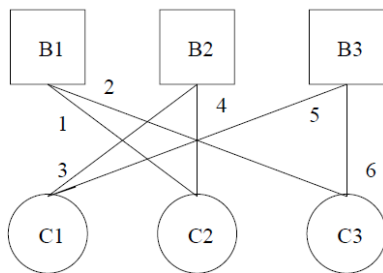


Figura 4: Ejemplo de gráfico de Tanner. [12]

Los códigos LDPC generalmente se decodifican por medio de un algoritmo iterativo conocido como suma-producto, propagación de creencias o paso de mensajes, y se reformulan en una versión que procesa proporciones de verosimilitud logarítmica en lugar de probabilidades. En la primera iteración, la mitad de los nodos variables reciben datos de los nodos de control adyacentes y del canal y los utilizan para obtener información actualizada enviada a los nodos de control; en la segunda mitad, los nodos de verificación toman la información actualizada recibida de los nodos de bits conectados y generan nuevos mensajes para enviarlos a los nodos variables. En los decodificadores de paso de mensajes, los mensajes se intercambian a lo largo de los bordes del gráfico de Tanner y los cálculos se realizan en los nodos. Para evitar multiplicaciones y divisiones, el decodificador suele trabajar en el dominio logarítmico [12].

Para realizar una demostración del funcionamiento de un codificador LDPC, se tomó como referencia el material facilitado en el curso virtual *LDPC and Polar Codes in 5G Standard* [13], impartido por el Dr. Andrew Thangaraj del Programa Nacional de Aprendizaje Mejorado por Tecnología (NPTEL) de la India. Para esto se incorporó una función que se

encarga de multiplicar cada bloque de la matriz base por una matriz identidad desplazada, otra función para verificar que una codeword producto de una codificación sea válida para la matriz base en cuestión a partir de un mensaje aleatorio que se desea transmitir, y finalmente la función principal que se encarga de generar la codeword para la transmisión del mensaje codificado. El código de verificación de funcionamiento es de tipo booleano, es decir, si la codificación fue exitosa su salida es un 1 y en caso contrario es un 0.

Para más detalles sobre esta demostración técnica, dirigirse al siguiente enlace de YouTube: <https://youtu.be/3-jPmLRNUxs>. Asimismo, se pueden descargar los scripts utilizados y el documento utilizado para la presentación oral del proyecto en el siguiente repositorio: <https://github.com/facundo097/WiMax-MT8001>

## V. CONCLUSIONES

- La tecnología WiMax resulta ser una buena opción para dotar de servicios de internet inalámbricos a zonas suburbanas y rurales en donde los servicios más tradicionales no se encuentran presentes debido al costo que significa llevar la conexiones físicas hasta esos lugares.
- Es una tecnología que surge a finales de siglo pasado y le ha costado despegar, queda evidenciado que sus actuales y futuras aplicaciones aún tienen mejoras importantes que implementar en pro de perfeccionar la estabilidad de la señales que la tecnología.
- La implementación de redes WiMax basada en una topología de malla resulta ser más eficiente que una topología punto a multipunto, en cuanto a tráfico de datos dentro de la red, ya que permite establecer protocolos de enrutamiento de datos, mejorando la velocidad, el alcance y aprovechando de mejor manera los recursos que ofrece una red inalámbrica.
- Las velocidades de transmisión de las redes WiMax se encuentran muy relacionadas con su alcance y su potencia, y a su vez, su alcance y potencia siempre están limitados por las características geográficas de las zonas de operación.

## REFERENCIAS

- [1] A. Garhwal y P. P. Bhattacharya, «A review on WiMAX Technology», *International Journal of Advances in Computing and Information Technology (IJACIT)*, 2012.
- [2] N. Pignataro, "WiMAX IEEE 802.16". Comisión Interamericana de Telecomunicaciones. <https://n9.cl/6h0f8> (accedido el 30 de octubre de 2022).
- [3] M. Muller, "IEEE 802.16m Technology Introduction, White Paper". ROH-DESCHWARZ. <https://n9.cl/pin0w> (accedido el 27 de octubre de 2022).
- [4] J. G. Andrews, A. Ghosh y R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX. Understanding Broadband Wireless Networking*, 2a ed. Westford, Massachusetts.: Prentice Hall, 2007.
- [5] F. Ohrman, *WiMax Handbook. Building 802-16 Wireless Network*, 2a ed. McGraw-Hill Communications, 2005.
- [6] A. F. Hidalgo, "WIMAX INTEROPERABILIDAD MUNDIAL POR ACCESO INALÁMBRICO.", Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2005. Accedido el 29 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://n9.cl/1e4sf>
- [7] J. C. Reyes, M. B. Mejías, A. Medouri, R. El Messari y L. A. Mariscal. "Aplicación de la tecnología WiMAX a entornos marinos". Handle Proxy. <http://hdl.handle.net/10498/15533> (accedido el 30 de octubre de 2022).
- [8] T. Strutz, «Low-Density Parity-Check codes - An introduction», 2016.

- [9] Z. Tu y S. Zhang, «Overview of LDPC Codes», en 7th IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT 2007), 2007, pp. 469-474.
- [10] Mathuranathan, «Shannon limit on power efficiency - demystified», GaussianWaves, 20-nov-2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.gaussianwaves.com/2019/11/shannons-limit-on-power-efficiency/>. [Accedido: 01-nov-2022].
- [11] S. Borwankar y D. Shah, «Low Density Parity check code (LDPC codes) overview», 2020.
- [12] U. Dalal, Y. Kosta, WIMAX New Developments. London, United Kingdom, IntechOpen, 2009.
- [13] D. A. Thangaraj, «NOC:LDPC and Polar Codes in 5G Standard, IIT Madras», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://nptel.ac.in/courses/108106137>. [Accedido: 28-oct-2022].