



# Escenario urbano 5G en MATLAB, desarrollo y simulación

*Adrian Rodríguez Lau, Francisco R. Marante Rizo, Taimir Alain Morales Roche*

## RESUMEN / ABSTRACT

El presente artículo aborda un estudio comparativo del comportamiento de redes 5G a nivel de sistema mediante la variación de parámetros fundamentales en escenarios desarrollados en MATLAB, traducándose en la optimización de estaciones base para cualquier entorno de despliegue, brindando tasas de datos superiores a 1 Gbit/s a una frecuencia de operación de 30 GHz con un espaciado entre subportadora de 60 KHz, además de ofrecer una buena calidad de servicio para usuarios de alta movilidad (400 km/h) con velocidades de datos de hasta 100 Mbit/s.

**Palabras claves:** 5G, comunicaciones móviles, MATLAB, escenario, simulación.

*This research presents a study of the performance of 5G networks at system level through the variation of fundamental parameters in scenarios developed in MATLAB is carried out. The results obtained translate into the optimization of base stations for any deployment environment, providing data rates above 1 Gbit/s at a carrier frequency of 30 GHz with a 60 KHz of Sub-Carrier Spacing, in addition to provide a good quality of service for high mobility users (400 km/h), with data rates of up to 100 Mbit/s.*

**Key words:** 5G, mobile communications, MATLAB, scenario, simulation.

**5G urban scenario in MATLAB, development and simulation**

## 1.- INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de un despliegue de la 5G con el mejor desempeño posible e incurriendo en mínimos costos, salvaguardando así la economía; se hace necesario revisar y mejorar los enfoques existentes de modelados y simulaciones lo más cercanas posible a la realidad, ya que las mediciones reales llegan a ser muy costosas y de gran complejidad. Por estas razones es de esperar que existan múltiples simuladores de redes 5G a nivel de sistema disponibles. Los simuladores de esta índole se distinguen entre simuladores con fin académico y simuladores industriales. En [1] inicialmente se hace un estudio de los retos que presentarían las simulaciones 5G a nivel de sistema, sirviendo de base para investigaciones posteriores como las desarrolladas en [2–5], las cuales realizan simulaciones a nivel de sistema de redes 5G, sin embargo, en ninguna se dispone de una herramienta académica con escenarios de simulación de una alta precisión geográfica, por lo que se hace imprescindible el desarrollo de los mismos.

Para la realización de esta investigación se hace uso de un simulador académico, pues los mismos incluyen más características de las definidas en el estándar con el objetivo de apoyar investigaciones y por lo general están disponibles libre de costo bajo una licencia de uso académico. Por otro lado, los simuladores industriales se limitan a las características del estándar y tienen un carácter comercial.

Entre los simuladores de carácter académico se encuentran *Vienna 5G SL* (Simulador de Viena para 5G a Nivel de Sistema), *OpenAirInterface* [6] y *ns-3* [7, 8].

Recibido: 27/06/2022

Aceptado: 31/08/2022

Se escogió el simulador *Vienna 5G SL* por sus características favorables para el desarrollo de la investigación respecto al resto, ya que el mismo está condicionado para escenarios y aplicaciones emergentes más allá de la 5G gracias a su estructura modular, además de modelar explícitamente la geometría de la red y permite la combinación de varios modelos con efectos de propagación, permite además simular el rendimiento de la red en función de la intensidad de la señal y la interferencia acumulada, combinada en la SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, Relación Señal-Interferencia más Ruido). Por otra parte, en el simulador *OpenAirInterface* la integración de la red central trae consigo una mayor complejidad que limita el número de nodos de red presentes en una simulación, por lo que se dificulta su realización a nivel de sistema. Similarmente la utilización de ns-3 queda fuera de consideración pues su gran complejidad computacional limita la simulación de redes muy grandes con muchos nodos de red.

El *Vienna 5G SL* tiene sus antecedentes a finales del 2008 por parte de un grupo de investigación en el Instituto de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica de Viena que desarrolló un conjunto completo de simuladores LL (Link Level, Nivel de Enlace) y SL (System Level, Nivel de Sistema) compatibles con LTE, conocidos como simuladores LTE de Viena, los cuales ofrecen grandes prestaciones y constituyen el fundamento de los simuladores de Viena para 5G. En [9] se hace un estudio sobre los sistemas de red LTE-Advanced haciendo uso de estos últimos simuladores, lo cual sienta las bases para la investigación aquí realizada.

Existen otros simuladores con este fin, pero algunos no son libres de pago y otros no son más que derivaciones del simulador *Vienna LTE-A SL* con algunos aspectos nuevos de 5G.

De esta forma, las contribuciones científicas fundamentales de este trabajo se reflejan a través de la construcción de escenarios de simulación personalizados en MATLAB, que mediante valores de THROUGHPUT (medida o cantidad de datos transferidos exitosamente de un dispositivo a otro en un período de tiempo dado) [10] y SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio, Relación Señal Ruido Interferencia) [11] posibilitan un estudio más preciso para el análisis y la correcta puesta en marcha de un sistema 5G. Esto redundaría necesariamente en primer lugar, en la mejoría de la QoS (Quality of Service, Calidad de Servicio) y, en segundo lugar, el impacto económico, ya que sin una herramienta de simulación se imposibilita el despliegue de la red.

## **2.- VIENNA 5G SL (SIMULADOR DE VIENA A NIVEL DE SISTEMA)**

El simulador *Vienna 5G LS* [12] pertenece a la familia VCCS (Vienna Cellular Communications Simulators, Simuladores de Viena para Comunicaciones Celulares) y con él se aborda la necesidad de simulaciones de redes a gran escala, captando el cambio en la disposición de las redes y la transmisión física, como ha ido definiendo el 3GPP en los *Releases*. El simulador, implementado en MATLAB ofrece la facilidad de código abierto, lo que brinda una gran flexibilidad para la configuración de los diferentes escenarios de simulación, así como la posibilidad para los investigadores de seguir sus propias líneas de investigación, ya que es posible la modificación y creación de diferentes escenarios al estar disponible el código fuente, además de estar condicionado para escenarios y aplicaciones emergentes más allá de la 5G gracias a su estructura modular. Se basa en el método Monte-Carlo [13] con el objetivo de lograr un rendimiento promedio de la red, por lo que se promedia sobre muchas constelaciones espaciales y realizaciones de canales y, por lo tanto, se obtienen resultados para el rendimiento promedio por usuario / BS (Base Station, Estación Base) [14], relación señal-ruido-interferencia y tasas de transmisiones exitosas.

Este simulador cuenta con una implementación flexible permitiendo definir cuadrículas de recursos para diferentes espaciados de subportadoras [12]. Admite numerosos modelos de propagación además de manejar nuevos modelos de canal [15]. Permite establecer una cantidad arbitraria de estaciones base y usuarios en dependencia de los requerimientos de la red, además de proporcionar compatibilidad con LTE-A y una implementación eficiente logrando minimizar el tiempo de simulación [12].

### **2.1.- ESTRUCTURA DEL SIMULADOR**

La estructura del simulador *Vienna 5G SL* está diseñada para la flexibilidad y la otorga a través de una arquitectura modular, donde las funciones individuales se pueden intercambiar de forma independiente.

De forma general, el simulador se divide en cuatro partes: inicialización, pregeneración, ciclo de simulación principal y postprocesamiento; tal y como se muestra en la Figura 1, donde se incluyen los pasos más importantes realizados en cada bloque.

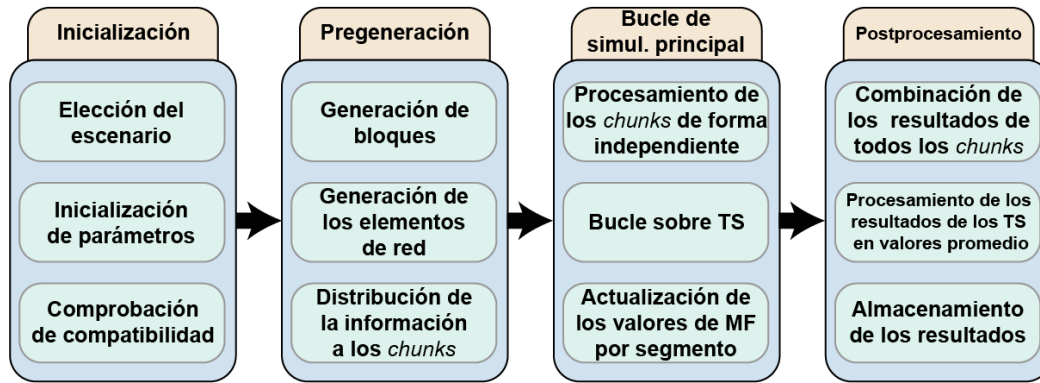


Figura 1

Estructura del simulador *Vienna 5G SL* [12]

### Inicialización

En esta etapa a partir de la elección de uno de los múltiples escenarios, ya sea predefinidos o creados por el usuario, gracias a la posibilidad de modificar el código fuente; se deben definir los parámetros necesarios.

Un aspecto muy importante para comprender la estructura es la línea de tiempo del simulador (ver Figura 2). La misma se divide en TS (Time Slots, Ranuras de Tiempo), segmentos y fragmentos (*Chunks*) [16].

Una TS es la unidad de tiempo en función de la cual se realiza la programación, lo que constituye la unidad de tiempo invertida en una iteración del bucle de simulación interno; es decir, es la base para la programación y el cálculo de retroalimentación.

Un segmento es el intervalo de tiempo donde los valores de desvanecimiento macroscópico se mantienen constantes ya que estos se actualizan una vez por segmento, por lo que tampoco cambia la asignación de BS (basada en la potencia recibida) para la longitud de un segmento. En la fase de inicialización la longitud de un segmento se determina en función de la velocidad y trayectoria de los usuarios y la distancia de decorrelación especificada, por lo que para los usuarios estacionarios solo se crea un segmento y los valores de desvanecimiento macroscópico solo se calculan una vez.

Un fragmento o “*chunk*” está constituido por una secuencia consecutiva de segmentos. Debido a que transcurre una cantidad de tiempo considerable entre fragmentos, la posición de los usuarios móviles cambia en gran medida y también lo hace el entorno de dispersión. Sin embargo, es posible separar estos fragmentos y procesarlos en paralelo ya que la entrada de cada fragmento es suficiente para realizar los cálculos. Por lo que posteriormente los fragmentos podrán procesarse de forma independiente.

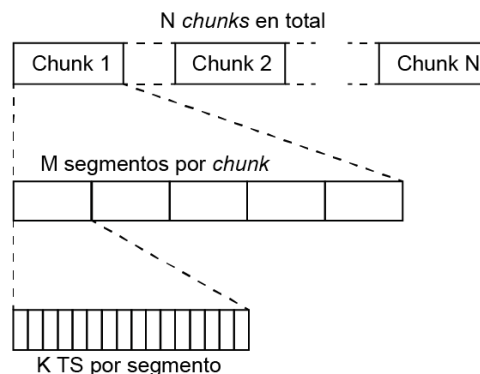


Figura 2

Estructura de la línea de tiempo del simulador *Vienna 5G SL* [12]

### Pregeneración

En esta etapa se crean todos los elementos con ubicación geométrica en dependencia del escenario seleccionado, paredes, edificios. Posteriormente se generan las BS y usuarios con los parámetros definidos previamente en la etapa de inicialización, donde se supone una posición constante en el tiempo para las BS y posiciones variables por segmento para los usuarios en dependencia del tipo de usuario.

Se genera también una región de interferencia desde fuera de la ROI (Region of Interest, Región de Interés) real con el objetivo de lograr un acercamiento más realista al valor de interferencia de las BS y usuarios en el borde de la ROI.

Posteriormente se combina la información necesaria para cada fragmento reduciendo la sobrecarga de datos para entregar al bucle de simulación principal, pero con toda la información necesaria por fragmento, permitiendo hacerlo de forma individual y haciendo posible una simulación paralela.

En este bloque ocurre el procesamiento de los fragmentos individualmente, de forma consecutiva o en paralelo en dependencia de la configuración. Cada fragmento contiene un bucle sobre TS, donde al comienzo del mismo se verifica si el TS actual marca el comienzo de un nuevo segmento y si es el caso se actualizan todas las posiciones de los usuarios, valores de desvanecimiento macroscópico y las interferencias. El bucle interno sobre TS consta de cinco pasos principales como muestra la Figura 3. En [12] se ofrece una explicación más detallada acerca del bucle sobre TS.

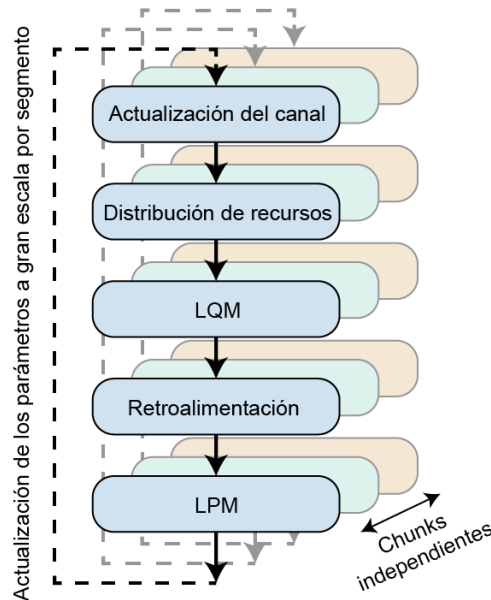


Figura 3

Bucle principal de simulación [12]

El primer paso es la actualización del canal para todos los enlaces, de acuerdo con el modelo de canal. Luego se realiza la programación o distribución de recursos, el simulador ofrece varias opciones y posibilita a los investigadores de incluir sus propias funciones. Posteriormente se llama al LQM (Link Quality Model, Modelo de Calidad del Enlace) donde se lleva a cabo una calificación y un cálculo del SINR. A continuación, se hace el cálculo de la retroalimentación y finalmente el mapeo de SINR a BLER (Block Error Ratio, Razón de Error de Bloque) en el LPM (Link Performance Model, Modelo de Rendimiento del Enlace) [12].

### Post-procesamiento

Aquí se combinan todos los resultados individuales de los fragmentos procesados y en dependencia del modo de post-procesamiento elegido se decide que valores guardar para no crear un archivo final sumamente cargado. A partir de los resultados individuales por TS, BS y usuario como el rendimiento, se calculan valores promedio. Finalmente, los resultados obtenidos se muestran y se almacenan en un archivo para un posterior análisis.

### Parámetros de simulación

El simulador en cuestión ofrece una amplia gama de parámetros de simulación los cuales se explican con mayor profundidad en [12, 17, 18]. Sin embargo, es necesario destacar algunos parámetros en específico ya que constituyen la clave de muchas características de 5G:

- VSCS (Variable Subcarrier Spacing, Espaciado entre Subportadoras Variable). A diferencia de LTE-A, en 5G el espaciado entre subportadoras no es un valor fijo de 15 KHz, puede tomar valores múltiples de 15 KHz (hasta 240 KHz). Como consecuencia la duración de símbolo se reduce ya que el recíproco del SCS, se reduce en 2, 4, 8 o 16 [19]. La Tabla 1 muestra la configuración de los slots para diferentes valores de SCS.

**Tabla 1**  
**Configuración del slot para diferentes valores de SCS [Elaboración propia]**

Espaciado entre subportadoras (KHz)	Configuración del slot				
	15	30	60	120	240
Duración de símbolo (sin Prefijo Cíclico) (μs)	66,7	33,3	16,6	8,33	4,17
BW máximo nominal (MHz)	49,5	99	198	396	397,4
Intervalo mínimo de planificación (ms)	1	0,5	0,25	0,125	0,0625

Esta característica tiene como ventaja un incremento de ancho de banda ocupado a medida que se incrementa el espaciado entre subportadoras siendo el máximo valor admitido 400 MHz, se reduce el tiempo de transmisión para símbolos OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales) pues la duración de los mismos disminuye, lo que resulta en tiempos de modulación y codificación menores y en consecuencia en latencias más cortas en la capa física, inferiores a 1 milisegundo facilitando la operación en frecuencias de la banda milimétrica y ofreciendo velocidades de datos sin precedente.

No todos los valores de SCS son aplicables a todas las frecuencias. Los valores aplicables a distintas frecuencias se dan en la Tabla 2.

**Tabla 2**  
**Distribución de SCS para rangos de frecuencia [Elaboración propia]**

Espaciado entre subportadoras (KHz)	Frecuencia	Comentarios
15	FR1	FR1: frecuencias inferiores a 6 GHz
30	FR1	
60	FR1, FR2	FR2: frecuencias en la banda milimétrica
120	FR2	
240	Reservado para SSB	

- Slots por subtramas: A medida que la duración de un slot se reduce a la mitad, la cantidad de slots por subtramas se duplica como se ilustra en la Figura 4.

## 2.2.- ESCENARIO DE SIMULACIÓN

A pesar de que los escenarios predefinidos ofrecen un amplio espectro de entornos y condiciones de los sistemas de redes inalámbricas ninguno tiene un gran acercamiento a las condiciones de nuestro país:

*OpenAirInterface* hace posible la simulación y análisis de múltiples escenarios a nivel de sistema como Comunicaciones D2D (Device to Device), Redes Celulares Heterogéneas (HetNet) y SDN (Software Defined Mobile Networks) que pueden ser utilizadas para investigar interferencia entre niveles y entre celdas en células pequeñas y cuantificar el beneficio de las celdas pequeñas mejoradas [6]. Para las simulaciones a nivel de sistema hace una abstracción del enlace de manera similar al simulador *Vienna 5G SL* con parámetros de ensombrecimiento, pérdidas por trayecto, interface y desvanecimiento, sin embargo, las pérdidas por trayecto constituyen una estimación general, es decir, a diferencia del simulador de Viena no

tiene en cuenta las pérdidas por trayecto para una geometría de escenario específico debido a edificaciones y altura de los mismos.

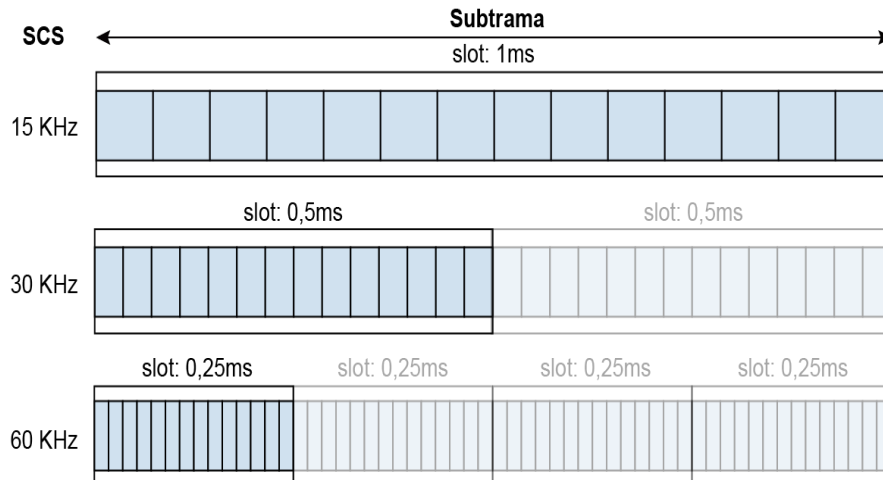


Figura 4

Duplicación de slots por subtrama con aumento de SCS [Elaboración propia]

*ns-3* ofrece un núcleo de simulación sólido que facilita la investigación en ambas redes, IP y no-IP, no obstante, este no ofrece un escenario en el cual se pueda realizar una simulación a nivel de sistema con parámetros geográficos específicos, si no que efectúa de manera general una estimación del canal [7].

A diferencia de los simuladores anteriores, *Vienna 5G SL* posee un escenario de simulación predefinido geográficamente mediante el cual se calculan los parámetros de interés de la simulación y se hace una estimación del canal tomando en cuenta las características del terreno, dígame altura de las edificaciones, espesor de paredes, calles y carreteras. Desafortunadamente la geometría de este escenario no coincide con la del territorio nacional, ya que el mismo está definido para espacios urbanos ultra densos, de ahí su nombre: Escenario Manhattan [12].

De esta forma, para cumplir o poder realizar las simulaciones necesarias con el objetivo de medir el desempeño de las futuras redes 5G en el territorio nacional o al menos tener un valor lo más real posible, se hizo necesario la construcción de un nuevo escenario urbano. Este escenario combina, en su mayoría, todas las características de los predefinidos en el simulador, lo que posibilita el análisis de una red mucho más compleja y heterogénea. Se grafica completamente el escenario, edificios, calles, BSs (macro, pico y femto), diferentes tipos de usuarios (peatones, vehículos de mediana y alta velocidad, usuarios IoT agrupados), enlace LOS (Line of Sight, Línea de Visión) / NLOS (Non Line of Sight, Sin Línea de Visión) [20, 21]. Los edificios y calles son completamente personalizables mediante una matriz que incluye los datos necesarios para su construcción.

La Figura 5 muestra la composición de bloques y calles del escenario creado con las características de un entorno urbano del territorio nacional correspondiente a cuatro bloques de viviendas similares al municipio Plaza de la Revolución, Vedado por constituir la zona más densa y edificada del país, siendo este el escenario más desafiante. La geometría del mismo ha sido confeccionada acorde a lo establecido en [22] donde se establece la altura promedio de las edificaciones, el área máxima cubierta y una extensión de 100 metros tanto de largo como de ancho por bloque. De tal manera, la figura se divide en dos sistemas: sistema de edificios y sistema de calles, ambos distribuidos sobre el plano x-y en un área de 200 metros sobre cada eje. La altura máxima de los edificios es de 60 metros y se representa por la variable height (altura) para el sistema de edificios y homológicamente como 'z' para el sistema de calles. Ambos constituyen el mismo escenario con estaciones base tipo macro distribuidas aleatoriamente.

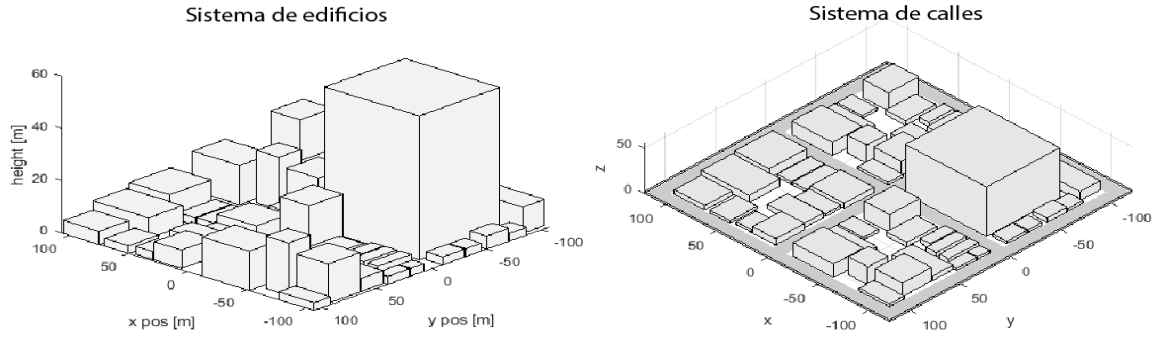


Figura 5

Geometría del escenario Urbano [Elaboración propia]

### Composición de la cuadrícula de recursos

En esta primera simulación se realiza un análisis de los resultados obtenidos de los parámetros SINR y *throughput* en el escenario Urbano a partir de las diferentes configuraciones de la cuadrícula de recursos producto de la variación de valores de SCS. La Tabla 3; Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra los principales parámetros a tener en cuenta en la simulación y que a su vez son resultados de un SCS variable.

Tabla 3  
 Composición de la cuadrícula de recursos

Parámetros	Espaciado entre subportadoras (SCS)		
	15 KHz	30 KHz	60 KHz
Duración de símbolo ( $\mu$ s)	71,4	35,7	17,8
Duración del slot (ms)	1	0,5	0,25
n Símbolos / Bloque de Recurso	7	7	7
n Símbolos / Slot	14	14	14
n Subportadoras / Bloque de Recurso	12	12	12
Tamaño del Bloque de Recurso en el tiempo ( $\mu$ s)	500	250	125
Tamaño del Bloque de Recurso en la frecuencia (KHz)	180	360	720
Slots por chunk	10	20	40
BW máximo (MHz)	50	100	200

A continuación, se muestra de manera comparativa la SINR para el escenario en cuestión atendiendo a los tres casos especificados.

- SINR

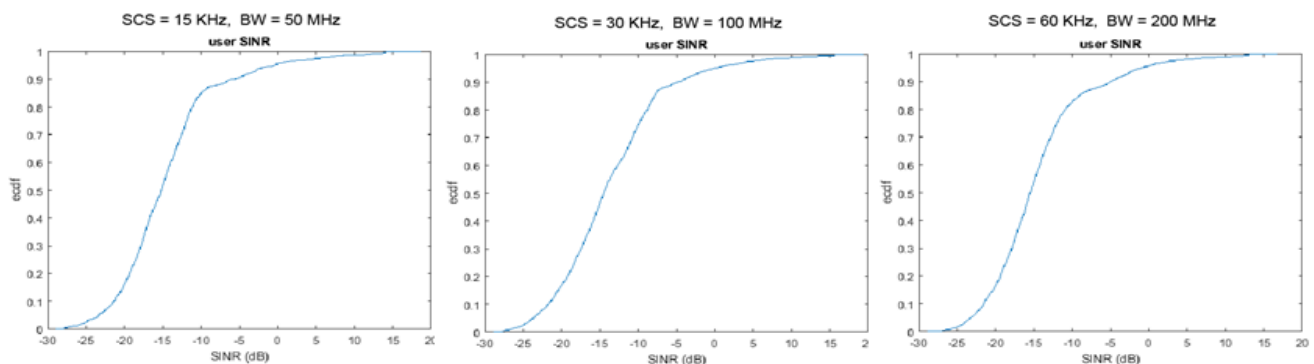
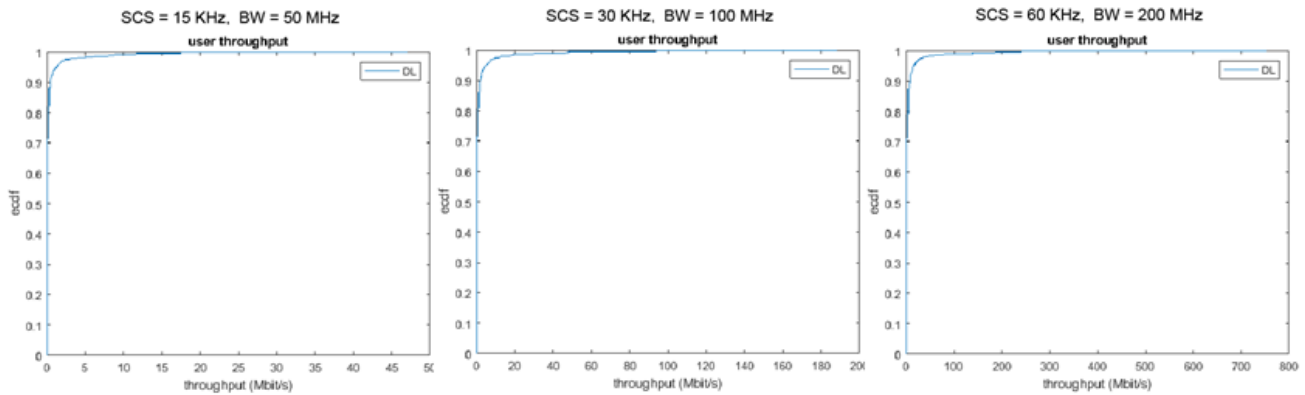


Figura 6

SINR promedio por usuario para las tres configuraciones de la cuadrícula de recursos

La figura previa define el comportamiento de la función ECDF (Empirical Cumulative Distribution Function, Función de Distribución Acumulativa Empírica) [23] de la variable SINR promedio por usuario ubicada en el eje de las abscisas. Se puede observar que no existe una diferencia notable, lo que permite afirmar que una variación del SCS y consecuentemente del BW, cantidad de slots por subtrama y su duración en el tiempo, no alteran de manera significativa los valores de SINR. Esto es debido a la independencia que tienen los valores de potencia recibida por usuarios y BSs, potencia de ruido e interferencia de la estructura de la trama, pues los valores de potencia de recepción son calculados mediante la potencia de transmisión y las pérdidas totales del trayecto [24]. Como consecuencia la asociación de los usuarios por BS o celda, determinada por la máxima recepción de potencia, así como la calidad de recepción no se ven afectados por los parámetros en cuestión.

- Throughput



**Figura 7**

**Throughput promedio por usuario para las tres configuraciones de la cuadrícula de recursos.**

Los valores de *throughput* obtenidos permiten afirmar que un aumento de SCS y sus consecuencias en la conformación de la cuadrícula de recursos se traducen en un incremento significativo de *throughput* promedio por usuario, ya que la probabilidad de obtener valores más altos de esta variable es mayor a medida que aumenta el SCS, obteniendo valores pico de hasta 700 Mbit/s.

### Alta movilidad de usuarios

Los escenarios de alta movilidad, dígame trenes y autopistas de gran velocidad que interconectan ciudades, han representado sin lugar a dudas grandes desafíos para todos los sistemas de redes inalámbricas ya que se necesitan estimaciones precisas para las variaciones muy rápidas del canal, formas de onda, técnicas de modulación y codificación, una arquitectura de red con soporte para la movilidad y técnicas anti Doppler [25] que logren evitar el desplazamiento de frecuencia de portadora y los desvanecimientos rápidos. Un estudio previo logró identificar que para una distribución de Poisson de pico BS en la región de interés la SINR y el THROUGHPUT se degradan a medida que aumenta la velocidad del usuario [26]. Mejores resultados fueron obtenidos haciendo uso de los parámetros establecidos en la Tabla 4.

**Tabla 4**  
**Parámetros para escenario de alta movilidad**

Parámetro	Valor
Frecuencia de portadora (GHz)	30
Ancho de banda (MHz)	100
Tipo de usuario	Móvil
Número de usuarios	700
Distribución de las BS macro	Predefinido en la ROI
Distribución de las BS pico	Distribución sobre el área descrita por el movimiento



- SINR

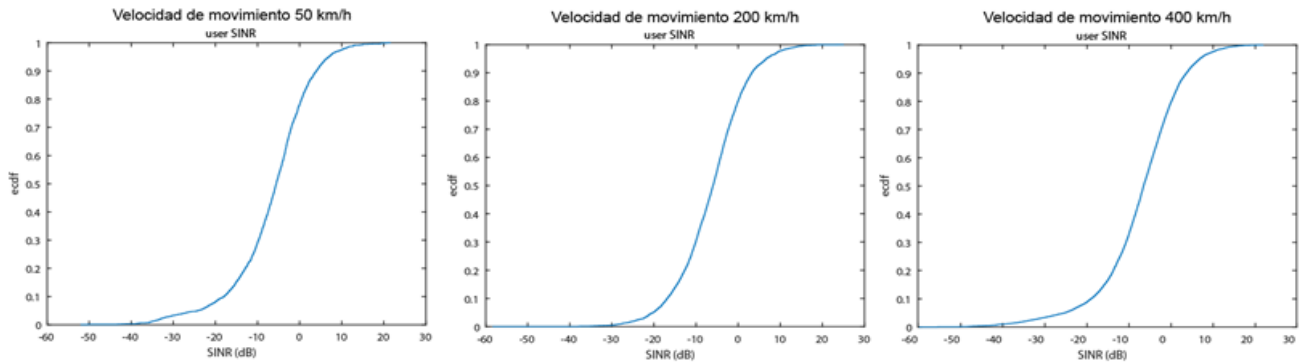


Figura 8

**SINR para pico BS posicionadas sobre la región de movilidad.**

Es de destacar que esta estructura del escenario ha logrado prácticamente igualar los valores SINR para los diferentes valores de velocidad, lo que permite ofrecer una aceptable QoS en cualquier situación.

- Throughput

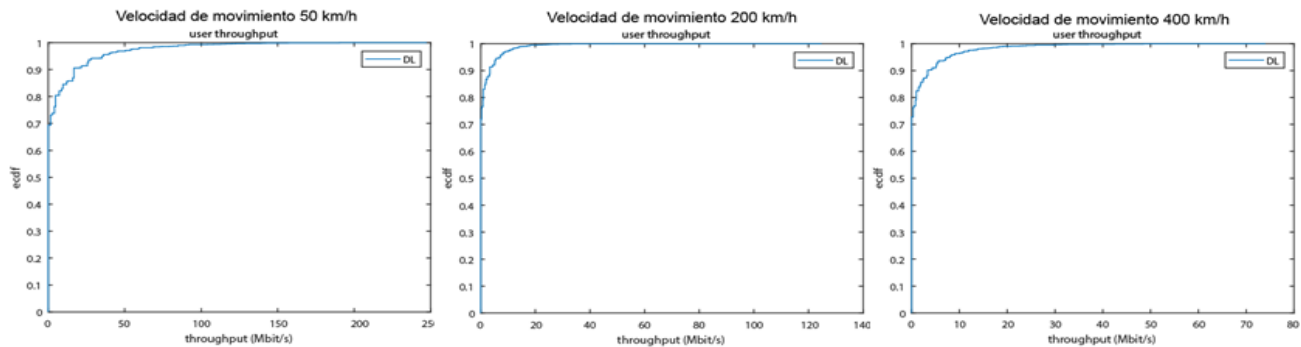


Figura 9

**Throughput para pico BS posicionadas sobre la región de movilidad.**

En esta ocasión se logra una mejora de SINR acompañada de valores de *throughput* más elevados, hasta 80 Mbit/s para las velocidades de movimiento más altas, lo cual es bastante cercano a lo que prometen los estándares actuales [27].

### Variación de la frecuencia de portadora

Para esta simulación se analiza uno de los factores más importantes de la tecnología 5G, las altas frecuencias de portadora. Para ello se utilizan valores de frecuencia de 4 y 30 GHz definidos en [28, 29] para un escenario urbano denso de gran heterogeneidad, tanto en estaciones base como en tipos de usuarios.

Tabla 5

**Parámetros para la simulación de variación de frecuencia**

Parámetro	Valor	
Frecuencia de portadora (GHz)	4	30
Espaciado entre subportadoras (KHz)	60	120
Ancho de banda (MHz)	40	80
Tipo de estaciones base	Macro, pico, femto	Macro, pico, femto
Tipo de usuario	Peatón, vehicular	Peatón, vehicular
Modo de transmisión	MIMO 8x8	MIMO 8X8

- SINR

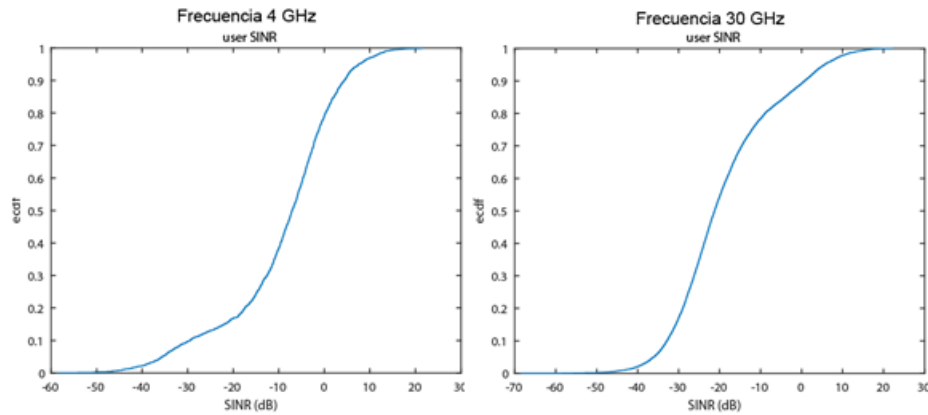


Figura 10

Comportamiento de SINR debido a variaciones en la frecuencia.

Acorde a lo esperado, se aprecia una disminución de SINR para un aumento de la frecuencia, pues a estos valores de frecuencia las atenuaciones se acentúan producto del multitrayecto y las pérdidas de propagación tan elevadas en la banda milimétrica (3-300 GHz).

La Figura 11 representa gráficamente mediante la estrategia de asociación de celdas o estaciones base cómo influyen las atenuaciones que sufren las ondas a altas frecuencias, donde para 30 GHz la cobertura que ofrecen las estaciones base tipo macro (de mayor potencia de transmisión) se ve afectada, por lo que la estrategia de asociación cambia ya que se basa en la máxima recepción de potencia, y gran parte de los usuarios son enlazados con otras estaciones base de menores prestaciones.

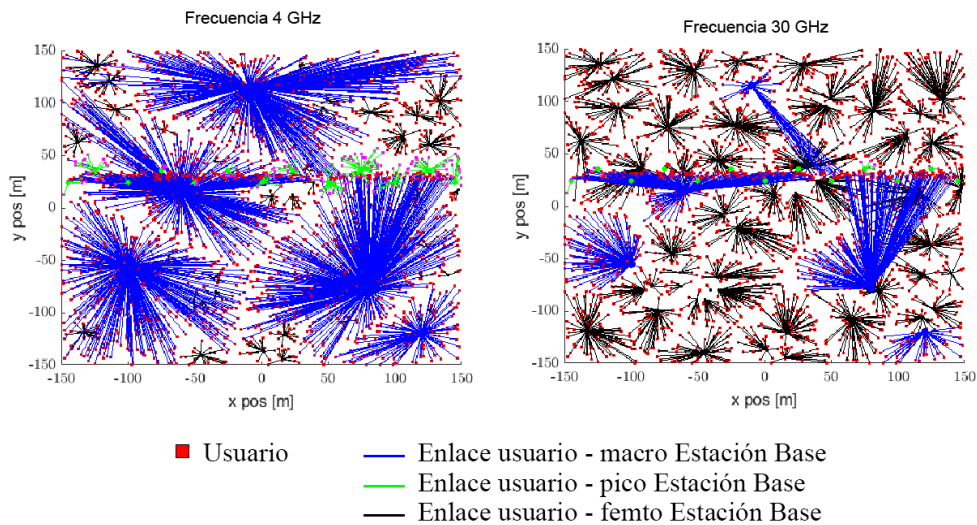


Figura 11

Cambio en la estrategia de asociación de celdas por variación en la frecuencia.

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, Entrada Múltiple Salida Múltiple) masivo brinda una solución a este problema para un escenario urbano denso y heterogéneo empleando como modo de transmisión MIMO 256x256, lo que genera un alto volumen de trazas a procesar que requieren de enormes recursos de cómputo como se especifica en [30].

- Throughput

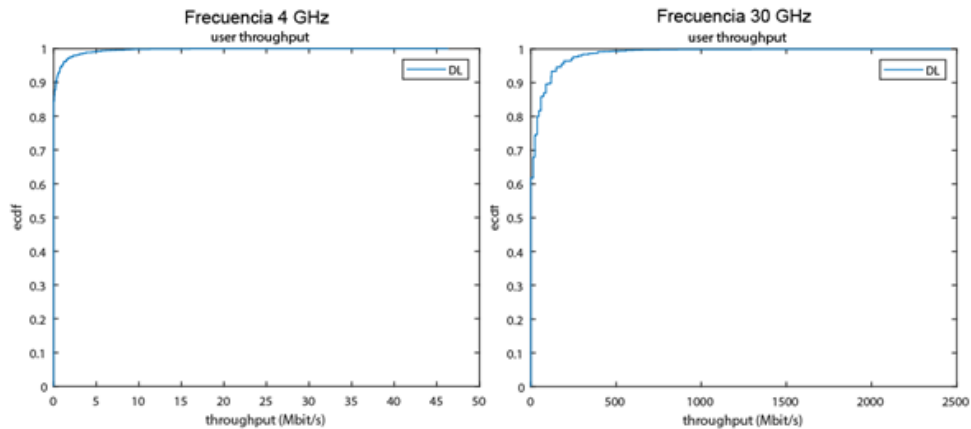


Figura 12

**Throughput debido a variaciones en la frecuencia.**

Contrario a los resultados de SINR, se observa un aumento considerable de la variable *throughput* (Mbit/s) para las altas frecuencias, donde los valores máximos alcanzados superan 1 Gbit/s. Esto se debe a las ventajas que ofrecen las frecuencias de la banda milimétrica que permiten a 5G aumentar el SCS y el ancho de banda para la transmisión, brindando velocidades de datos a los usuarios realmente elevadas.

### 3.- CONCLUSIONES

Acorde a la investigación realizada los mejores resultados para un escenario urbano denso y heterogéneo en correspondencia con nuestro país, garantizando una buena QoS y QoE (Quality of Experience, Calidad de Experiencia), se obtienen para:

- SCS de 60KHz con ancho de banda de 200 MHz, conformando una cuadrícula de recursos con *slots* (ranuras) de menor duración y por consecuencia una mayor cantidad, utilizando los mismos recursos. Los valores máximos de *throughput* alcanzados fueron de hasta 700 Mbit/s. Esto posibilita el despliegue de una red 5G en áreas más críticas del territorio nacional sin necesidad de utilizar valores más elevados de SCS como 120 MHz y 240 MHz, siendo posible la utilización de frecuencias más bajas con un mayor alcance de propagación y penetración debido a su mayor longitud de onda y por lo tanto una optimización en el equipamiento a instalar.
- Para los escenarios de muy alta velocidad los mejores resultados se alcanzaron mediante la disposición de pico estaciones base a lo largo de la región de movilidad, obteniéndose una SINR con pocas diferencias para cualquier velocidad de movimiento de los usuarios inferior a 400 km/h, además de una muy buena calidad de servicio con valores de *throughput* de hasta 80 Mbit/s para este tipo de usuario. De esta forma en lugar de instalar estaciones base tipo macro, se utilizarían pico, ofreciendo una excelente QoS e incurriendo en mínimos costos.
- En el caso de la frecuencia de portadora, los valores más altos de velocidades de datos se alcanzaron para 30 GHz, con valores pico que superan 1 Gbit/s. Sin embargo, los valores de SINR disminuyeron notablemente para esta frecuencia de operación en comparación con 4 GHz, debido a las grandes dificultades de propagación para altas frecuencias, lo que conlleva al uso de portadoras correspondiente al RF1 (Rango de Frecuencias) inferiores a 6 GHz ya que es en este rango donde se utiliza un SCS de 60 KHz con el cual se obtienen excelentes resultados.

Mediante el análisis conjunto de estos parámetros se logra la conformación adecuada de los elementos y características de la red 5G a implementar en el territorio nacional, logrando un despliegue de la red de forma óptima mediante los parámetros previamente analizados, incurriendo en los mínimos costos posibles y salvaguardando la economía.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al colectivo del Laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas de la CUJAE, por su ayuda y apoyo incondicional en la realización de la investigación y a la Universidad de Viena por su contribución con el simulador académico *Vienna 5G LS*.

## REFERENCIAS

1. Wang Y, Xu J, Jiang L (2014) Challenges of System-Level Simulations and Performance Evaluation for 5G Wireless Networks. *IEEE Access* 2:1553–1561
2. Jao C-K, Wang C-Y, Yeh T-Y, Tsai C-C, Lo L-C, Chen J-H, Pao W-C, Sheen W-H (2018) WiSE: A System-Level Simulator for 5G Mobile Networks. *IEEE Wirel Commun* 25:4–7
3. Virdis A, Nardini G, Stea G, Sabella D (2020) End-to-End Performance Evaluation of MEC Deployments in 5G Scenarios. *J Sens Actuator Netw* 9:57
4. Liu M, Ren P, Du Q, Ou W, Xiong X, Li G (2016) Design of system-level simulation platform for 5G networks. In: 2016 IEEEIC Int. Conf. Commun. China ICC. pp 1–6
5. Nardini G, Stea G, Virdis A, Sabella D (2020) Simu5G: A System-level Simulator for 5G Networks: In: Proc. 10th Int. Conf. Simul. Model. Methodol. Technol. Appl. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, Lieusaint - Paris, France, pp 68–80
6. Nikaein N, Marina MK, Manickam S, Dawson A, Knopp R, Bonnet C (2014) OpenAirInterface: A Flexible Platform for 5G Research. *ACM SIGCOMM Comput Commun Rev* 44:33–38
7. Larrañaga A, Lucas-Estañ MC, Martínez I, Gozalvez J (2022) 5G NR Configured Grant in ns-3 Network Simulator for Ultra-Reliable Low Latency Communications. *Procedia Comput Sci* 201:495–502
8. Lavacca FG, Salvo P, Costantini L, Mammi E, Pompei S, Rea L, Teodori M (2019) Studying and Simulation of a NS3 framework towards a 5G Complete Network Platform. In: 2019 Int. Workshop Fiber Opt. Access Netw. FOAN. pp 62–67
9. López IGG, Alvarez IDP, Rizo DCFM (2016) Algunas consideraciones sobre el desempeño de los sistemas LTE - Advanced. *Tono Rev Téc Empresa Telecomunicaciones Cuba SA* 13:22–31
10. Kabalcı Y, Ali M (2020) Throughput Analysis over 5G NR Physical Uplink Shared Channels. In: 2020 2nd Glob. Power Energy Commun. Conf. GPECOM. pp 345–349
11. Ramos AR, Silva BC, Lourenço MS, Teixeira EB, Velez FJ (2019) Mapping between Average SINR and Supported Throughput in 5G New Radio Small Cell Networks. In: 2019 22nd Int. Symp. Wirel. Pers. Multimed. Commun. WPMC. pp 1–6
12. Müller MK, Ademaj F, Dittrich T, Fastenbauer A, Ramos Elbal B, Nabavi A, Nagel L, Schwarz S, Rupp M (2018) Flexible multi-node simulation of cellular mobile communications: the Vienna 5G System Level Simulator. *EURASIP J Wirel Commun Netw* 2018:227
13. Vargas JC, Cruz-Carpio CA (2020) Estudio del método Monte Carlo en simulaciones para la estimación del valor de  $\pi$ . *Rev Boliv Física* 36:26–32
14. Peralta E, Levanen T, Ihalainen T, Nielsen S, Ng MH, Renfors M, Valkama M (2018) 5G New Radio Base-Station Sensitivity and Performance. In: 2018 15th Int. Symp. Wirel. Commun. Syst. ISWCS. pp 1–6
15. Ademaj F, Tarantetz M, Rupp M (2016) 3GPP 3D MIMO channel model: a holistic implementation guideline for open source simulation tools. *EURASIP J Wirel Commun Netw* 2016:55

16. Pratschner S, Müller MK, Ademaj F, Nabavi A, Tahir B, Schwarz S, Rupp M (2019) Verification of the Vienna 5G Link and System Level Simulators and Their Interaction. In: 2019 16th IEEE Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. CCNC. pp 1–8
17. Ganesan RS, Zirwas W, Panzner B, Pedersen KI, Valkealahti K (2016) Integrating 3D Channel Model and Grid of Beams for 5G mMIMO System Level Simulations. In: 2016 IEEE 84th Veh. Technol. Conf. VTC-Fall. pp 1–6
18. Wang D, Sattiraju RR, Weinand A, Schotten HD (2019) System-Level Simulator of LTE Sidelink C-V2X Communication for 5G. In: Mob. Commun. - Technol. Appl. 24 ITG-Symp. pp 1–5
19. Correia N, Al-Tam F, Rodriguez J (2021) Optimization of Mixed Numerology Profiles for 5G Wireless Communication Scenarios. *Sensors* 21:1494
20. Mantoro T, Ayu MA, Nugroho MR (2017) NLOS and LOS of the 28 GHz bands millimeter-wave in 5G cellular networks. In: 2017 Int. Conf. Comput. Eng. Des. ICCED. pp 1–5
21. Mumtaz T, Muhammad S, Aslam MI, Mohammad N (2020) Dual Connectivity-Based Mobility Management and Data Split Mechanism in 4G/5G Cellular Networks. *IEEE Access* 8:86495–86509
22. Havana (Cuba), Oficina del Historiador de la Ciudad de La Habana (eds) (2007) Regulaciones urbanísticas: ciudad de La Habana: El Vedado, municipio Plaza de la Revolución. Ediciones Boloña : Ediciones Unión, La Habana
23. Chergui H, Blanco L, Verikoukis C (2022) Statistical Federated Learning for Beyond 5G SLA-Constrained RAN Slicing. *IEEE Trans Wirel Commun* 21:2066–2076
24. Sun S, Rappaport TS, Shafi M, Tang P, Zhang J, Smith PJ (2018) Propagation Models and Performance Evaluation for 5G Millimeter-Wave Bands. *IEEE Trans Veh Technol* 67:8422–8439
25. Zhang Z, Chai X, Long K, Vasilakos AV, Hanzo L (2015) Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection. *IEEE Commun Mag* 53:128–137
26. Aljumaily MS, Li H (2018) Throughput Degradation Due to Mobility in Millimeter Wave Communication Systems Using Random Beamforming. In: 2018 IEEE 88th Veh. Technol. Conf. VTC-Fall. pp 1–5
27. Fan P, Zhao J, I C-L (2016) 5G high mobility wireless communications: Challenges and solutions. *China Commun* 13:1–13
28. Tikhomirov A, Omelyanchuk E, Semenova A (2018) Recommended 5G frequency bands evaluation. In: 2018 Syst. Signals Gener. Process. Field Board Commun. pp 1–5
29. Mamane A, Fattah M, El Ghazi M, El Bekkali M (2022) 5G enhanced mobile broadband multi-criteria scheduler for dense urban scenario. *Telecommun Syst* 80:33–43
30. Sivakrishna S, Yarrabothu RS (2018) Design and simulation of 5G massive MIMO kernel algorithm on SIMD vector processor. In: 2018 Conf. Signal Process. Commun. Eng. Syst. SPACES. pp 53–57

## CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún conflicto de intereses de los autores o de las instituciones a las cuales pertenecen en relación al contenido de este artículo.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Adrian Rodríguez Lau:** 45%, conceptualización, investigación, preparación, creación y desarrollo del artículo.
- **Francisco R. Marante Rizo:** 35%, organización y mejora del artículo, supervisión de cada una de las versiones del borrador del artículo y validación de la versión final a publicar.
- **Taimir Alain Morales Roche:** 20%, contribución a la idea, participación en la redacción, y contribución a la mejora del artículo.

## AUTORES

**Adrian Rodríguez Lau,** Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, graduado de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, Cuba, en el año 2020. Integrante del grupo de investigación de Comunicaciones Inalámbricas de la CUJAE. Especialista en Telemática de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A. Email: [lau95adrian@gmail.com](mailto:lau95adrian@gmail.com). ORCID: 0000-0003-3032-5837

**Francisco R. Marante Rizo,** Graduado de Ingeniero en Telecomunicaciones en el año 1974 en La Universidad de La Habana, y Doctor en Ciencias Técnicas en La Universidad Técnica de Praga en 1986. Ha sido profesor de la disciplina de Radiocomunicaciones desde 1976 hasta la actualidad. Es Profesor Titular desde 1988, y ha sido Jefe de Cátedra de Microondas y Comunicaciones Inalámbricas de la Facultad de Telecomunicaciones y Electrónica de la CUJAE desde 1990 hasta la actualidad. También es el Jefe del Grupo de Investigación de Comunicaciones Inalámbricas en la Facultad de Telecomunicaciones de la CUJAE. Email: [marante@tele.cujae.edu.cu](mailto:marante@tele.cujae.edu.cu). ORCID: 0000-0003-3277-1371

**Taimir Alain Morales Roche,** Actualmente cursando en el sexto año de la carrera de Telecomunicaciones y Electrónica. Profesor ATD de Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, La Habana, Cuba. Email: [tamorales@tele.cujae.edu.cu](mailto:tamorales@tele.cujae.edu.cu) . ORCID: 0000-0002-8365-3183



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)