



# UADE

**Análisis Técnico/Económico sobre Implementación de 5G en Banda**

**Milimétrica**

**ALUMNOS:**

- Bruno Vaya – Ingeniería en Telecomunicaciones (LU: 1106975)
- Franco Colela – Ingeniería en Telecomunicaciones (LU: 1090987)

# Contenido

Abstract .....	5
Agradecimientos .....	6
Introducción .....	7
1 Marco Teórico .....	9
1.1 Aspectos generales.....	9
1.1.1 Espectro radioeléctrico.....	9
1.1.2 Canal de radio.....	10
1.1.3 Teorema de Shannon.....	10
1.1.4 Pérdidas de propagación en espacio libre .....	12
1.1.5 Interferencia .....	15
1.2 Principios básicos del 5G .....	17
1.2.1 Evolución hasta llegar al 5G.....	17
1.2.2 Características del 5G .....	20
1.3 Antenas de telefonía móvil .....	25
1.3.1 Polarización .....	25
1.3.2 Tilt vertical .....	26
1.3.3 Diagrama de Radiación .....	26
1.3.4 Ancho de Banda de Antenas.....	27
1.3.5 Portadores (Carriers) .....	28
1.3.6 Modulación.....	28
1.3.7 Multiplexación .....	28
1.4 5G en Bandas Milimétricas.....	29
1.4.1 Mejora teórica .....	29
1.4.2 Standalone y nonstandalone .....	31
1.4.3 Línea de vista .....	32
1.4.4 Digital Beamforming.....	33
1.5 Parámetros de la RED.....	35
1.5.1 Throughput.....	35
1.5.2 PDCP (Protocol Data Convergence Protocol).....	35
1.5.3 UDP (User Datagram Protocol) y TCP (Transmission Control Protocol).....	36
1.5.4 RSRP, RSRQ y SINR.....	36
1.5.5 MCS (Modulation and Coding Scheme) .....	36
1.5.6 BLER (Block Error Rate).....	37

1.5.7 Condiciones de Borde de Celda .....	37
1.5.8 Call Setup Success Rate.....	38
1.5.9 EIRP total (típico): .....	38
2 Estado del arte.....	39
2.1 Historia .....	39
2.2 Estudios y Proyectos Relevantes.....	39
2.3 Análisis de estos estudios y desarrollos.....	41
3 Desarrollo .....	43
3.1 Escenario de prueba Modelo Nokia .....	43
3.2 Escenario de prueba Modelo Huawei .....	60
3.3 Simulación técnica .....	71
3.3.1 Ubicación .....	71
3.3.2 Poblacion .....	77
3.3.3 Usuarios.....	78
4 Análisis Económico .....	80
4.1 Capex 80	
5 Resultados.....	88
6 Mejoras y nuevo escenario.....	89
6.1 Poblacion y usuarios.....	91
6.2 Problema de continuidad y esporadicidad.....	94
6.3 Planes de expansion a futuro .....	94
6.4 Calculo de implementación.....	95
6.5 Calculo económico-financiero.....	99
6.5.1 CAPEX .....	99
6.5.2 OPEX .....	100
6.6 Factibilidad economica.....	100
6.7 Analisis de resultados.....	101
6.8 Comparacion con el servicio WIFI .....	102
7 Conclusiones .....	107
8 Apendice 1 - Glosario .....	111
9 Apendice 2 – Datos de equipamiento.....	113
Bibliografía .....	121
<b>Bibliografía impresa.....</b>	<b>121</b>
<b>Bibliografía en línea.....</b>	<b>121</b>
<b>Documentación interna y no web.....</b>	<b>123</b>



## Abstract

El presente trabajo analiza la factibilidad técnico-económica de implementar una red 5G en bandas milimétricas (mmWave) en zonas densamente pobladas de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. A partir del análisis de estudios de campo realizados por Telecom Argentina en Rosario y Vicente Lopez (Zona Unicenter), se evalúan parámetros clave de desempeño como throughput, latencia y jitter. Luego, se propone un modelo de despliegue de red con foco en usuarios residenciales, analizando su viabilidad económica mediante indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Los resultados indican que el proyecto, en su forma tradicional, no es viable económicamente. Se exploran entonces mejoras al modelo y nuevas estrategias de negocio, orientadas a servicios de alta prestación para clientes corporativos y usuarios Premium. Finalmente, se concluye que si bien el 5G en mmWave presenta desafíos técnicos y económicos importantes, podrían llegar a existir escenarios alternativos donde su implementación pueda ser sustentable.

## Agradecimientos

Queremos agradecer en primer lugar a nuestras familias, por su apoyo incondicional a lo largo de toda la carrera, desafiando agendas y superposicion de proyectos personales y profesionales.

Tambien, agradecer a la Universidad Argentina de la Empresa (UADE) por brindarnos la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, una propuesta académica que no se encuentra fácilmente en otras instituciones del país. Valoramos especialmente la posibilidad y el apoyo para finalizar nuestros estudios incluso en el marco del proceso de transformación curricular que atravesó la Facultad de Ingenieria en distintas carreras.

Al Ing. Leonardo Amet, Director de la carrera, por su acompañamiento y orientación durante este tramo final, en línea con los principios y valores de la Universidad.

Nuestro reconocimiento especial al Ing. Pablo Espósito, quien además de desempeñarse como tutor de este trabajo, fue docente en numerosas materias a lo largo de nuestra formación, demostrando siempre compromiso, claridad y vocación docente.

Por ultimo, debemos dar nuestro agradecimiento a la empresa Telecom, que nos brindo sus informes de implementacion que fueron cruciales para el desarrollo de este trabajo. Ademas, siempre estuvieron a disposicion para dudas, consultas y consejos.

## Introducción

Las telecomunicaciones han experimentado un desarrollo exponencial en los últimos años, con la llegada de la quinta generación de redes móviles, conocida como 5G. Esta nueva tecnología promete avances significativos en comparación con su predecesor, el 4G LTE, ofreciendo velocidades de transmisión de datos más rápidas, menor latencia y mayor capacidad de conexión simultánea. Por ejemplo, mientras que el 4G LTE permite velocidades de descarga de hasta 1 Gbps en condiciones ideales, el 5G tiene el potencial de alcanzar hasta 20 Gbps. La latencia por su parte, que en 4G puede rondar los 20 milisegundos, podría reducirse a tan solo 1 milisegundo en 5G.

Uno de los pilares que habilita estas mejoras es el uso eficiente del espectro radioeléctrico. 5G opera en una amplia gama de bandas de frecuencia, que se agrupan en tres categorías principales: las bandas bajas (sub-1 GHz), las bandas medias (1-6 GHz) y las bandas milimétricas (por encima de 24 GHz). Las primeras dos, denominadas sub-6 GHz, ofrecen una cobertura amplia y son utilizadas para conexiones estables en áreas densamente pobladas, pero es en las bandas milimétricas donde podría radicar una de las mayores innovaciones de 5G.

Las bandas milimétricas, también conocidas como mmWave, permiten anchos de banda mucho mayores que sus predecesoras, lo que posibilita velocidades extremadamente altas y capacidades sin precedentes. Esta frecuencia es clave para aplicaciones que demandan grandes cantidades de datos en tiempo real, como la realidad aumentada, realidad virtual, transmisión de video en ultra alta definición y comunicaciones en entornos de Internet de las Cosas (IoT). Sin embargo, estas bandas también presentan desafíos técnicos significativos, como la limitada capacidad de penetración y la susceptibilidad a interferencias físicas y atmosféricas.

El objetivo de esta tesis es explorar el uso de 5G en la banda milimétrica, analizando tanto sus ventajas como sus desafíos. A través de estudios y mediciones realizadas en escenarios reales, este trabajo busca proporcionar una visión crítica sobre el rendimiento de las redes 5G mmWave, sus implicancias para la industria de telecomunicaciones y las estrategias necesarias para superar los obstáculos asociados a su despliegue. Con este análisis, se espera contribuir al entendimiento de cómo esta tecnología puede transformar el panorama de la industria y brindar soluciones innovadoras en diversos sectores.

# 1 Marco Teórico

## 1.1 Aspectos generales

En esta sección detallaremos los fundamentos teóricos que hacen que este trabajo sea posible.

Al hablar de telecomunicaciones, se hace necesario explicar los fundamentos de esta tecnología, como también la evolución que se ha desarrollado a lo largo del tiempo.

Comenzaremos con los aspectos más generales y básicos como el espectro radioeléctrico y las ondas y su propagación. Luego nos introduciremos en los aspectos básicos del 5G, como su historia y características principales. Este extenso repaso nos allanará el camino para detenernos en el objeto de estudio que nos convoca, que es el funcionamiento de 5G en banda milimétrica. Esta sección será fundamental para comprender los estudios y análisis que se volcarán en el desarrollo.

### 1.1.1 Espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es un recurso natural y escaso, que se divide en bandas de frecuencias. Para caber en la definición de recurso, debemos ser más precisos y hablar de las bandas de frecuencia utilizadas para comunicaciones u otras áreas.

Comprendido entre los 3KHz y los 300GHz, sirve como medio de propagación de tecnologías inalámbricas. Según la frecuencia de las ondas que viajen en el espacio, tendrán distintas características, y es por eso que han sido y son utilizadas en distintas áreas. Parámetros como la propagación, la sensibilidad a interferencias o el poder de traspasar obstáculos varían según aumente o disminuya la frecuencia. Vale aclarar que fuera de este rango mostrado en la figura (3KHz a 300GHz), existen también otras frecuencias empleadas en radiocomunicaciones, como por ejemplo el infrarrojo.

En la imagen, vemos los distintos usos que tiene y ha tenido el espectro según su frecuencia. También vemos cómo a medida que la frecuencia aumenta, el periodo de la onda disminuye. La magnitud de la frecuencia varía inversamente proporcional con la longitud de onda y

directamente proporcional respecto a la energía.

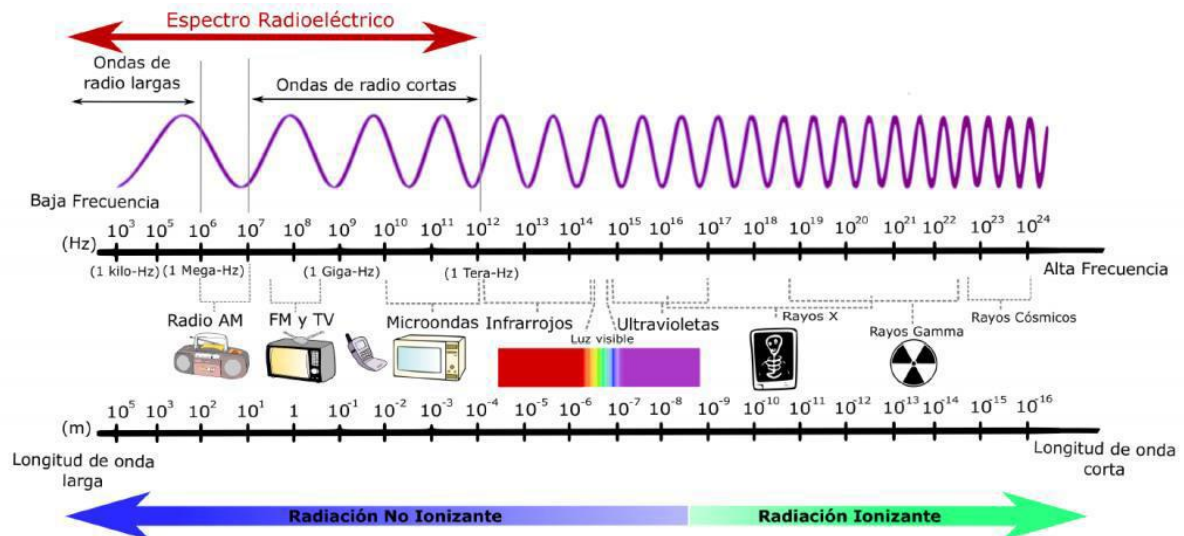


Figura 1: Espectro radioeléctrico. Fuente ANE – Agencia Nacional del Espectro, Colombia

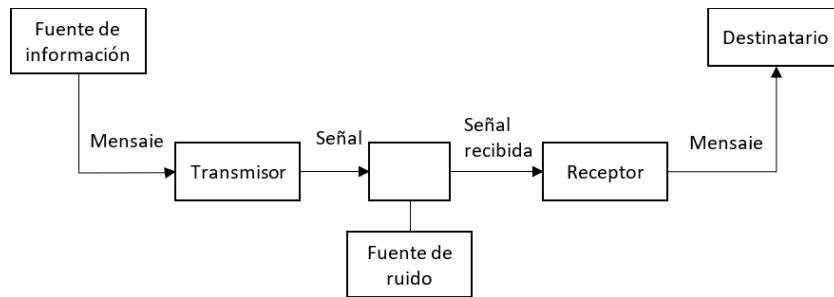
### 1.1.2 Canal de radio

El canal de radio tiene asignado una banda de frecuencias para el tipo de trabajo a emplear en una comunicación. La complejidad y la variabilidad del canal, ya sea por sus características intrínsecas o por el entorno que lo rodea, hace que sea difícil obtener un modelo de canal determinista preciso. Es por esto por lo que los modelos utilizados para predecir características de los canales suelen ser estadísticos y no determinísticos. De todos modos, existen herramientas de modelado computarizadas que pueden utilizarse en el caso que se quieran analizar entornos que no son abarcados por los modelos a base de estadística.

### 1.1.3 Teorema de Shannon

Shannon propone el caso general de un sistema de comunicación compuesto por un emisor, un receptor, un canal de transmisión y una fuente de ruido. Este teorema es fundamental en la teoría de la información y tiene implicaciones significativas para el diseño de sistemas de comunicación. Nos explica que mientras mayor es el nivel de ruido, mayor será la tasa de errores que tendrá el canal, y a un determinado nivel de ruido constante, la tasa de errores

crecerá en conjunto con la velocidad de transmisión.



**Figura 2: Sistema de comunicación de Shannon. Fuente: Adaptado de Shannon(1949)**

El teorema de Shannon nos describe la capacidad de un canal. Es la máxima tasa de información (en bits por segundo) que se puede transmitir a través de un canal de comunicación dado, con un ancho de banda específico y en presencia de ruido, sin que se incurra en errores.

Matemáticamente, se expresa como:

$$C = B \times \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n} \right)$$

- B: Ancho de banda del canal expresado en Hertz [Hz].
- C: Capacidad del canal o tasa de bits de información, expresado en bit/s.
- S: Potencia de la señal útil y puede estar expresada en Watts o MiliWatts, etc.
- N: potencia del ruido presente en el canal y puede ser expresada en miliWatts, picoWatts, etc.

La relación señal a ruido e interferencia (S/N) es la relación existente entre la potencia de la señal transmitida y la potencia del ruido que la corrompe, pero teniendo en cuenta también la interferencia. Su unidad de medida es el decibelio y su expresión matemática está dada por:

$$SINR = \frac{S}{I + N}$$

P representa la potencia de la señal recibida, expresada en decibelios (dB), y se calcula como:

- **P = Tx - PL**

donde Tx es la potencia de transmisión de la antena y PL son las pérdidas por trayectoria.

Este último ítem nos introduce en uno de los puntos más importantes a analizar en las telecomunicaciones; la pérdida de potencia desde que parte del emisor hasta llegar al receptor. En los párrafos siguientes, veremos distintas formas de pérdida de potencia. La tecnología avanza para disminuirla, pero esta nunca será nula. Veremos de qué manera podemos calcular esta pérdida, dependiendo mayormente de la distancia entre los puntos a comunicar, los materiales utilizados, y la frecuencia en la que viaje el mensaje entre el emisor y el receptor.

#### **1.1.4 Pérdidas de propagación en espacio libre**

La mayor parte de la potencia de la señal de radio se pierde en el aire, incluso en el vacío la señal pierde la energía en direcciones diferentes a la que puede capturar la antena receptora.

Matemáticamente, describimos a la pérdida de espacio libre como:

- $ESL (dB) = 20 * \log (d) + 20 * \log (f) + K$

Donde:

- d = Distancia
- f = Frecuencia
- K = constante que depende de las unidades utilizadas en d y f. Cuando la distancia está en kilómetros [km] y la frecuencia en MegaHertz [MHz], tiene el valor de 32,44 dB.

Nótese que esto no involucra características climáticas como el aire, la niebla o la lluvia. Estos aspectos los veremos luego, ya que son importantes, y más en las redes 5G de banda milimétrica.

El canal de radio inalámbrico presenta un desafío severo como medio para una comunicación confiable de alta velocidad debido al movimiento del usuario. En la figura se ilustra la relación entre la potencia recibida y transmitida en dB frente a la distancia logarítmica para los efectos combinados de pérdida de trayecto, sombreado y multitrayecto.

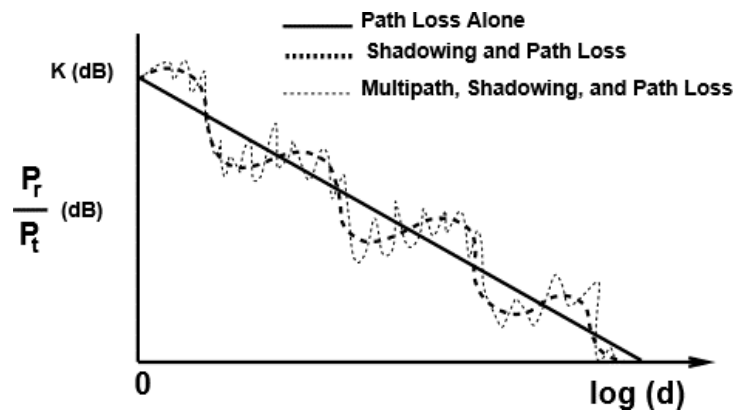
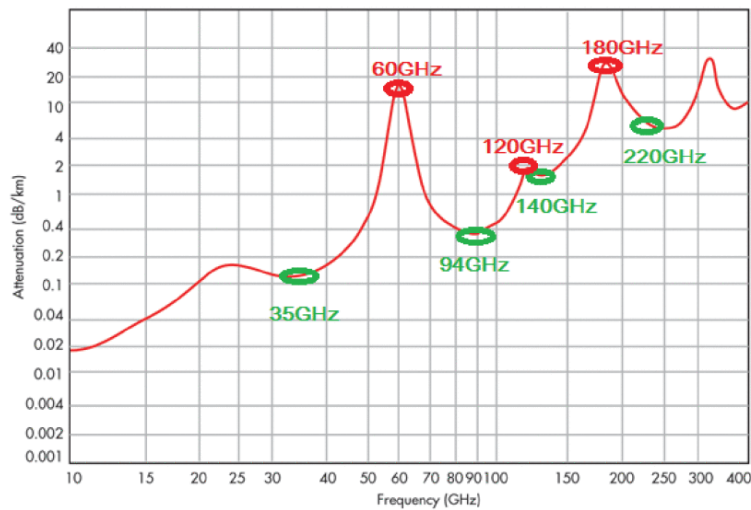


Figura 3: Atenuación respecto a la distancia. Fuente: Andrea Goldsmith (2004)

Los obstáculos que absorben energía entre transmisor y receptor causan lo que se conoce como sombra o shadowing. Cabe mencionar que es posible la recepción cuando no hay visión directa pero la señal se bloquea cuando el obstáculo absorbe toda la potencia. La variación por pérdida de trayectoria se da en distancias muy grandes (100-1000 metros), mientras que la del sombreado ocurre a distancias proporcionales a la longitud del objeto que obstruye (10-100 metros en entornos exteriores y menos en entornos interiores). Estos últimos se denominan efectos de propagación a pequeña escala o desvanecimiento por trayectos múltiples.

Durante la propagación se producen atenuaciones debidas a la temperatura, a la absorción de agua, oxígeno y dispersión causada por hidrometeoros como la lluvia, la nieve, el granizo o la niebla. Los efectos son más importantes en el caso de sistemas que operan a frecuencias milimétricas. En la figura se ilustra la atenuación en el aire a través del espectro electromagnético hasta los 400GHz. Esto muestra cómo las ondas electromagnéticas se atenúan drásticamente por absorción atmosférica causada por la

molécula de oxígeno a 60 GHz y por la molécula de agua a 180 y 320 GHz.



**Figura 4: Atenuación en base a la frecuencia. Fuente: Andrea Goldsmith (2004)**

En la grafica de la figura 4 podemos ver como crece la atenuación, de forma logarítmica, a medida que aumenta la frecuencia de transmisión. Sin embargo, este crecimiento no es lineal, sino que experimenta valles y picos. Esta información es de vital importancia para determinar que bandas de frecuencia utilizar, más allá de buscar siempre frecuencias mayores. La pérdida debida al gas atmosférico es de 0,10 dB/km a 28 GHz y 0,40 dB/km a frecuencias próximas a 70GHz.

Para las celdas pequeñas, como las urbanas, ya que se desarrollarán en los 200m, la atenuación del gas podría ser poco importante. En cuanto a los efectos por la lluvia, para radios de células pequeñas por debajo de 200 m, los efectos no parecen ser insuperables. Una portadora de 30 GHz verá una pérdida de menos de 1 dB sobre 200 m en una “lluvia intensa” (25 mm / h), mientras que una portadora de 60 GHz sufrirá menos de 2 dB.

La atenuación por lluvia también es importante al pasar la barrera de los 10 GHz. Cuando el tamaño de las gotas se aproxima a las longitudes de onda introduce un efecto de dispersión. Cuando hablamos de banda milimétrica es cuando aumenta la posibilidad de que esto suceda, por lo que el bloqueo de la transmisión por la lluvia también es un efecto importante en frecuencias por encima de los 40 GHz.

### 1.1.5 Interferencia

Comenzamos con la interferencia entre canales. Es la que puede introducirse en celdas vecinas cuando se reutilizan frecuencias en una determinada área. Esto determina las velocidades de datos y las BER correspondientes disponibles para cada usuario. Puede combatirse incrementando la potencia de un transmisor y haciendo que las celdas estén físicamente separadas por una distancia mínima que proporcione suficiente aislamiento. El control riguroso de la potencia es difícil de mantener en un entorno que se desvanece y es uno de los principales desafíos del acceso múltiple de amplio espectro. Es por ello por lo que un buen diseño utiliza la asignación dinámica de recursos en el sistema celular, donde la potencia y el ancho de banda se asignan en función de las condiciones de propagación, las demandas del usuario y el tráfico del sistema.

Por otro lado, la interferencia inter simbólica existe en cualquier tecnología que use símbolos para el transporte de información. En un sistema ideal, los símbolos transmitidos llegan al receptor sin ninguna pérdida o interferencia. Lo que sucede en la práctica es que la misma señal llega a través de múltiples rutas (Multipath) y en consecuencia con diferentes retardos (Delay Spread). En el receptor, todos estos componentes se suman y el resultado práctico es que recibimos múltiples símbolos simultáneamente. Esta es la interferencia entre símbolos (ISI) donde un factor determinante para el ISI es la duración del símbolo.

La propagación por multitrayectoria es un fenómeno común en las comunicaciones inalámbricas que se produce cuando las ondas de radio reflejadas, refractadas o difractadas llegan al receptor en diferentes momentos y desde diferentes direcciones. Este fenómeno puede tener un impacto significativo en la calidad de la señal recibida, especialmente en entornos urbanos densos o en interiores donde hay muchos obstáculos que pueden reflejar la

señal.

Una característica importante de un canal de multitrayecto es la extensión del retardo de tiempo entre la llegada de la primera y la última componente de señal asociada con un solo impulso transmitido. Si la extensión del retardo es pequeña en comparación con la inversa del ancho de banda de la señal, entonces la distorsión es mínima porque todas las componentes

$$\tau = t_n - t_1$$

de la señal se superponen en un intervalo de tiempo corto, manteniendo la coherencia de la señal. Sin embargo, cuando la propagación del retardo es relativamente grande, hay una importante propagación en el tiempo de la señal recibida que puede conducir a una distorsión de señal. Esto se conoce como ensanchamiento del canal.

Otra característica del canal multitrayecto es su naturaleza variable en el tiempo. Esta variación de tiempo se debe a que el transmisor o el receptor se están moviendo. A causa del fenómeno de reflexiones, es muy posible que el alcance de la señal transmitida hacia el receptor sea mediante múltiples rutas. Las señales de diferentes rutas llegarán ligeramente retardadas con respecto a la señal directa y provocará desvanecimiento de la señal recibida, por lo que puede degradar la calidad del funcionamiento de los sistemas radioeléctricos. Esta interferencia puede ser constructiva o destructiva, dependiendo de cómo las fases de las ondas se alineen entre ellas.

Matemáticamente, la señal recibida, como cualquier señal,  $r(t)$  puede modelarse como una suma de todas las componentes de señal que llegan por diferentes caminos, cada una con su propio retardo y cambio de fase, representado por:

$$r(t) = \sum_{i=1}^n a_i s(t - \tau_i) e^{j\phi_i}$$

donde:

- $a_i$  es la amplitud de la  $i$ -ésima trayectoria.
- $s(t)$  es la señal transmitida.
- $e^{j\phi_i}$  representa el cambio de fase debido a la  $i$ -ésima trayectoria.

## 1.2 Principios básicos del 5G

### 1.2.1 Evolución hasta llegar al 5G

Ya con los cimientos teóricos de las telecomunicaciones en general presentados, nos introduciremos en la tecnología actual. Ya sea mirando un video desde nuestro celular o en actividades industriales sofisticadas, es la red y su tecnología la que permite la realización, y le aporta calidad a la misma.

Comenzaremos con la historia de las redes 5G, y para eso tendremos que remontarnos a las generaciones anteriores, como 3G y 4G. Esto nos permitirá comprender la evolución de las telecomunicaciones, y como esta evolución lleva a aumentar la capacidad de transmitir datos.

Para ser más claro, como pasamos de enviar mensajes de texto a transmitir videos en vivo a través del streaming. Es interesante y debatible analizar de qué manera suceden las cosas. Por un lado, podemos pensar que primero nace la necesidad de transmitir mayor cantidad de datos, y eso motiva a las empresas a desarrollar avances en la tecnología. A su vez, las empresas siempre están en permanente investigación y desarrollo de mejoras, por lo que también puede suceder que obtenida la mejora y la forma de implementarla, no se encuentre esa necesidad de uso que la haga rentable. Esto es algo que también es importante cuando hablamos de bandas milimétricas. Si bien parecería que siempre el usuario requiere mayor velocidad y es real que cada más dispositivos están conectados, hay que saber hasta que costo se puede llegar a pagar por esa mejora.

### 3G (Tercera Generación)

Lanzado a comienzos de 2000, el 3G podía alcanzar la velocidad de 2Mbps en condiciones estáticas. Lo que ahora es obsoleto, fue un gran salto comparado con la generación anterior 2G. Con esta tecnología se le dio real viabilidad a la navegación web a través de los celulares, lo que les dio el impulso a las empresas de comenzar a brindar el servicio de datos móviles. También se facilitó el acceso al contenido multimedia como fotos y videos, e incentivó el desarrollo de aplicaciones móviles, lo que hoy ya está plenamente instalada en nuestra sociedad.

Las tecnologías UMTS y HSPA fueron tecnologías clave para el desarrollo de 3G. Simplemente las nombraremos, ya que seguiremos nuestro camino hacia las próximas generaciones.

### 4G (Cuarta Generación)

Como sabemos siempre hay una etapa en la que conviven dos generaciones distintas a la vez, es por eso que podemos decir que el lanzamiento de 4G se da entre finales de 2000 y principios de 2010. Ya con velocidades mucho mayores, generalmente entre los 100Mbps y 1Gbps, la experiencia de usuario se volvió más fluida y las aplicaciones móviles comenzaron su auge en el que hoy todavía siguen creciendo. Hoy en día, en Argentina conviven las redes 4G y las 5G, especialmente en Capital Federal. Ya en los 2010 se trabajaba en superar las limitaciones de capacidad y velocidad, preparando así el camino para 5G. Esto permite el streaming, el uso fluido y ya normalizado de las redes sociales en aplicaciones móviles, y no debemos olvidarnos de la conectividad masiva para dispositivos IoT.

### 5G (Quinta Generación)

Desde 2019 en adelante ya podemos hablar de 5G, que nos brinda mejoras significativas en velocidad y latencia. La transición entre principios de siglo y la actualidad marca también una evolución en la arquitectura de red. Pasamos de sistemas de hardware específicos a soluciones virtualizadas y flexibles. La quinta generación de tecnologías de telecomunicaciones móviles

representa un salto cualitativo respecto a sus predecesores. Como veremos durante el trabajo, este nuevo estándar promete velocidades de descarga significativamente superiores, que podrían alcanzar hasta 10 Gbps bajo condiciones ideales y reduce drásticamente la latencia, llegando a ser menor a 1 milisegundo. Estas mejoras abren un abanico de posibilidades que van más allá del simple aumento en la velocidad de transmisión de datos.

El 5G se construye sobre la arquitectura avanzada que utiliza técnicas como el MIMO masivo (Múltiple Input, Multiple Output) y la agregación de portadoras para aumentar la eficiencia del espectro y la capacidad de la red. Desde un punto de vista práctico, está diseñado para soportar una gama extensiva de aplicaciones y servicios. Esto incluye desde mejoras en la comunicación móvil hasta la implementación de ciudades inteligentes, pasando por la industria 4.0, vehículos autónomos, y sistemas avanzados de salud telemática. Con respecto al internet de las cosas, ya utilizado con las redes de la generación anterior, se facilitaría el despliegue masivo del mismo, interconectando millones de dispositivos de manera más eficiente.

Otro aspecto importante es la virtualización y la segmentación de la red, permitiendo personalización y flexibilidad. Mediante la creación de 'slices' de red, las redes 5G pueden configurarse dinámicamente para proporcionar la conectividad adecuada para servicios críticos, como operaciones médicas remotas. Mientras tanto, simultáneamente se atienden necesidades menos exigentes como la navegación web estándar.

El área de servicio se divide en pequeñas áreas geográficas llamadas celdas. Una estación base atiende cada celda, responsable de transmitir y recibir señales de radiofrecuencia a y desde los dispositivos móviles que están dentro de esa área. La forma y el tamaño pueden variar dependiendo de la ubicación y la densidad de población. La estación base contiene el equipo necesario para la transmisión de señales, para quien este dentro de la celda correspondiente a la misma. Esta estación está conectada a la red central de la operadora móvil.

## 1.2.2 Características del 5G

### 1.2.2.1 Velocidad

Las velocidades del 5G oscila entre los 50 Mbit/s y 1Gbit/s. El 5G más rápido que se conoce se conoce como mmWave (Nuestro caso de estudio), y el 3 de Julio de 2019 alcanzó una velocidad máxima 1.8 Gbit/s en la red 5G de AT&T. El 5G de banda media (mid-band 5G, mucho más común), entregará entre 100 y 400 Mbits/s, pero tendrá un alcance mucho mayor que el mmWave, especialmente en exteriores.

### 1.2.2.2 Latencia

Se han conseguido valores de latencia de las redes 5G en el aire de 8 a 12 milisegundos. La empresa Verizon ha realizado las primeras pruebas desplegando la primera red comercial 5G en zonas de Chicago, y se midieron latencias totales de 30 ms. Colocando servidores cercanos a las antenas se redujo esta latencia a los 15 ms.

### 1.2.2.3 Arquitectura

Posee una combinación de tecnologías avanzadas que separaremos en dos grupos: Redes de acceso y Redes Centrales.

Las redes de Acceso por Radio (RAN) son las responsables de la comunicación entre los dispositivos móviles y la red principal. Contienen lo que conocemos como Celdas Macro y Celdas pequeñas. Las Celdas Macro cubren áreas amplias, por lo que son importantes para cubrir regiones extensas, ya sean rurales o urbanas. Las Celdas Pequeñas incluyen micro, pico y femtoceldas. Estas son utilizadas para cubrir áreas específicas con alta demanda de tráfico.

La combinación de estas hace que conviva la extensión en el área de cobertura con la capacidad de la red y la cantidad de conexiones simultaneas que soporte.

Por otro lado, las Redes Centrales (Core Networks) son el corazón de la infraestructura de 5G.

Su diseño incorpora varias tecnologías avanzadas. Destacaremos en primer lugar a la

virtualización de Funciones de Red (NFV), que permite que las funciones de la red se ejecuten a través de software de servidores estándar. Esto reduce los costos, ya que quita la dependencia de hardware específico, y facilita la escalabilidad. Muy relacionado con esto, tenemos las redes definidas por software (SDN), que se enfocan en separar el plano de control del plano de datos, por lo que la gestión se vuelve más ágil y adaptativa. Por último, incluimos la computarización en el borde (Edge Computing), que refiere al acercamiento entre el procesamiento de datos y el usuario final. Lo que antes se realizaba en centros de datos, pasan a servidores en estaciones base, disminuyendo la latencia de la red.

#### 1.2.2.4 Espectro de Frecuencia

Como se comentó anteriormente, el 5G opera en una amplia gama de bandas de frecuencia, que se clasifican en tres categorías principales:

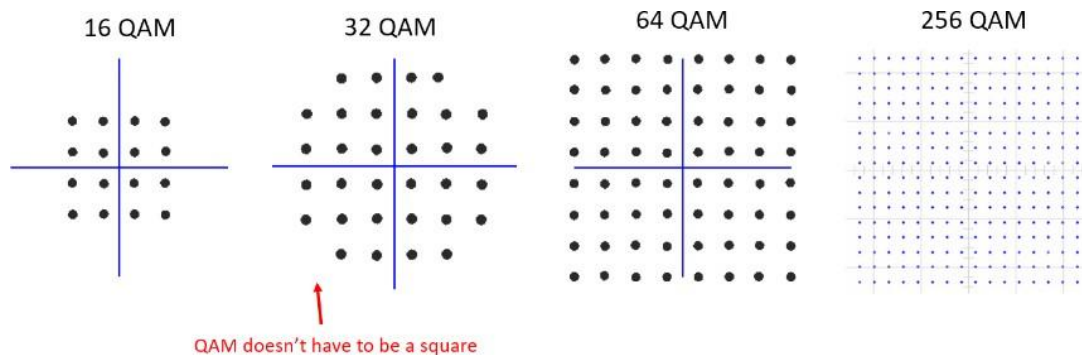
- Banda Baja (< 1 GHz): Ofrece una excelente cobertura y penetración en interiores, ideal para áreas rurales y suburbanas.
- Banda Media (1-6 GHz): Proporciona un equilibrio entre cobertura y capacidad, adecuada para áreas urbanas.
- Bandas Milimétricas (> 24 GHz): Ofrecen velocidades de datos extremadamente altas y baja latencia, aunque con una cobertura más limitada. En este punto nos detendremos, para evaluar las posibilidades de implementación, teniendo en cuenta factibilidad, costos y otras cuestiones.

#### 1.2.2.5 Modulación y Codificación

La modulación es el proceso de convertir datos digitales en señales analógicas para su transmisión. En redes móviles, se usa para convertir los bits de datos en formas de onda transmitidas por el espectro de radio. En el receptor, se ejecuta el proceso inverso, para que pueda recibir de manera fiable (lo más posible), los datos digitales que partieron desde el

emisor.

Entre los tipos de modulación encontramos el más importante para el 5G, que es QAM. QAM (Quadrature Amplitude Modulation) es un tipo de modulación que combina la modulación en amplitud (AM) y la modulación en fase (PM). En QAM, cada símbolo representa un punto en una constelación de puntos, donde cada uno tiene una amplitud y una fase específicas. Al ser de Alto Orden, refiere a que es mayor el número de puntos posibles. Mientras que 16-QAM utiliza 16 puntos, 64-QAM utiliza el cuádruple. Cuantos más puntos hay en la constelación, más bits por símbolo. En el primer caso se utilizan 4 bits por símbolo, mientras que en 64-QAM se utilizan 6 (2a la sexta). Si bien permite mayores tasas de transferencia de datos, también tiene entre sus contras ser más susceptible al ruido e interferencias, lo que requiere de una señal más fuerte y una transmisión de mayor calidad.



**Figura 5: Diagrama de constelaciones de QAM. Fuente: PySDR**

Otra técnica de modulación, que también incluye la configuración de acceso, es OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Es una técnica que divide el ancho de banda disponible en múltiples subportadoras ortogonales, cada una modulada con una señal de datos separada. OFDM es robusta frente a interferencias y desvanecimiento selectivo en frecuencia, lo que la hace ideal para las comunicaciones 5G. En la codificación, se utilizan códigos del tipo LDPC y Polar Codes. Los códigos LDPC son muy eficientes y los más utilizados, mientras que los Polar Codes se utilizan en aplicaciones específicas, ya que aumentan la

capacidad del canal casi a los límites teóricos, pero no son tan eficientes.

Reducir la tasa de errores es crucial para una conexión, ya que le da fiabilidad y finalmente aumenta la capacidad total del canal, que en consecuencia mejora la experiencia del usuario.

#### 1.2.2.6 Tecnología MIMO (Multiple Input, Multiple Output)

Tal como sus siglas lo sugieren, esta tecnología se basa en el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción (MIMO). Las configuraciones MIMO masivas permiten:

- Aumentar la Capacidad de la Red: Al permitir la transmisión simultánea de múltiples flujos de datos.
- Mejorar la Cobertura y la Fiabilidad: A través de técnicas como el beamforming, que direccionan las señales de manera más eficiente hacia los usuarios.

Massive MIMO, como extensión de la tecnología MIMO, utiliza arreglos de muchas antenas (decenas o incluso cientos) tanto en el transmisor como en el receptor para manejar múltiples señales de datos simultáneamente sobre el mismo canal de radio. Esto se logra a través de la formación de haces y la multiplexación espacial. Podríamos reducir el concepto en un único principio: una red inalámbrica que permite la transmisión y recepción de más de una señal de datos simultáneamente sobre el mismo canal de radio.

Consideremos un sistema con  $M$  antenas en el transmisor y  $N$  antenas en el receptor. El vector de señal recibida en el receptor se puede modelar como:

- $Y = H * x + n$

Donde:

- $\mathbf{x}$  es el vector de señales transmitidas.
- $\mathbf{H}$  es la matriz del canal de dimensiones  $N \times MN \times MN \times M$  que representa las ganancias del canal entre cada par de antenas transmisoras y receptoras.
- $\mathbf{n}$  es el vector de ruido en el receptor.

Cada antena en el arreglo puede emitir y recibir señales de una manera que se combinan constructivamente en direcciones específicas y destructivamente en otras. Esto se logra ajustando las fases y las amplitudes de las señales emitidas por cada antena (BeamForming). El sistema de coordenadas utilizado en antenas es normalmente el esférico. Para especificar una dirección del espacio se utilizan dos ángulos,  $\phi$  y  $\theta$ , y se definen los vectores unitarios que forman una base ortogonal. La onda electromagnética radiada se compone de un campo eléctrico  $E$  (V/m) y un campo magnético  $H$  (A/m), ambos están ligados por las ecuaciones de Maxwell, y a partir de sus valores eficaces podemos calcular la densidad de flujo por unidad de superficie.

$$S = \frac{|\mathbf{E} \times \mathbf{H}|}{2}$$

La impedancia característica del medio  $\eta$  relaciona los módulos de  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{H}$  por:

$$\eta = \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|}$$

La intensidad de radiación, que es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido, se calcula integrando la densidad de potencia sobre una superficie esférica que rodea a la antena.

El MIMO masivo aprovecha estos principios para mejorar significativamente la eficiencia espectral, la capacidad del sistema y la calidad de la señal en entornos de comunicaciones densos, lo que lo hace esencial para las redes 5G en bandas de frecuencias milimétricas. Esto permite no solo mayores velocidades de conexión sino también una mayor densidad de dispositivos conectados con una calidad de servicio mejorada.

#### 1.2.2.7 Eficiencia

Las redes 5G están diseñadas para ser más eficientes energéticamente, lo cual es crucial para soportar la gran cantidad de dispositivos conectados y el tráfico de datos. Esto se logra mediante:

- Modulación Adaptativa: Que ajusta la potencia de transmisión según la necesidad.
- Modo de Baja Potencia: Para dispositivos IoT y otros dispositivos que requieren una operación prolongada con baterías.

Estos principios básicos forman la base sobre la cual se construye el ecosistema 5G en general, permitiendo una conectividad más rápida, fiable y adaptable a las necesidades futuras de la comunicación global.

### 1.3 Antenas de telefonía móvil

En este capítulo hablaremos sobre el Hardware utilizado, y sus parámetros más importantes.

En toda medición realizada, ya sea de telecomunicaciones o de otro ámbito, siempre es importante brindar información sobre las características de los elementos que se utilizaron para llevarla a cabo. Es por esto que antes, necesitamos brindar un marco teórico sobre los tipos de antenas, sus parámetros y características principales.

#### 1.3.1 Polarización

La polarización se puede definir como la dirección de oscilación del vector de campo eléctrico. Es una propiedad de la onda que produce la antena y describe como la onda varía en el espacio con el tiempo.

Para que otra antena pueda recibir una onda transmitida con polarización determinada, la

antena receptora debe poder recibirla y estar orientada para hacerlo. Así conseguimos la multiplexación por división de polarización, que apareció con la tecnología móvil 3G. Esta técnica permite que dos canales de información se transmitan en la misma frecuencia de portadora mediante el uso de ondas con polarización lineal ortogonal.

### **1.3.2 Tilt vertical**

El tilt representa la inclinación de la antena respecto al horizonte. Hay dos maneras de hacer que el máximo de radiación de una antena no apunte al horizonte. Una es inclinando mecánicamente la antena y la otra manera es mediante RET (Remote Electrical Tilt) que consiste en modificar el tilt a distancia mediante un sistema que alimenta cada elemento radiante de la antena con una fase distinta (Beamforming). De esta manera se puede modificar el tilt de la antena sin inclinarla manualmente. El operador de la antena es encargado de controlar el tilt, aunque no es algo que se esté constantemente modificando, sino que se cambia por un tiempo prolongado, aunque indeterminado. Por ejemplo, si en una zona céntrica de una ciudad grande se amplía el número de antenas para dar servicio a un mayor número de personas, se reducirá la celda y por lo tanto habrá que inclinar el tilt para evitar interferencias entre las celdas.

### **1.3.3 Diagrama de Radiación**

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena. Como hemos dicho antes, se suele representar en coordenadas esféricas con la antena situada en el origen, pero también se puede representar en coordenadas cilíndricas. Manteniendo constante la distancia, se expresa el campo eléctrico en función de las variables angulares ( $\theta$ ,  $\phi$ ). Al observar a gran distancia una antena, su radiación parece provenir de un único punto, por lo tanto, los frentes de onda se verían esféricos. También se puede

representar en forma tridimensional utilizando cualquiera de los dos sistemas.

En muchos casos puede ser interesante y suficiente representar un corte del diagrama completo en tres dimensiones. Los cortes se pueden hacer de muchas maneras, las más habituales son fijando los valores de  $\theta$  y  $\phi$  en el punto de máxima radiación y obteniendo de esa manera los cortes horizontales y verticales del diagrama de radiación respectivamente. Esta técnica suele ser suficiente para caracterizar la radiación de la antena.

Por último, también se pueden representar en coordenadas polares y cartesianas. Las coordenadas cartesianas permiten observar los detalles de antenas muy directivas, mientras que las polares proporcionan información más clara sobre la distribución de la potencia en el espacio.

#### **1.3.4 Ancho de Banda de Antenas**

El ancho de banda de las antenas refiere al rango de frecuencias sobre el cual una antena puede operar efectivamente. En el contexto de las comunicaciones 5G, las antenas deben ser capaces de soportar anchos de banda amplios debido a la gran cantidad de datos que deben manejar. En las bandas mmWave, los anchos de banda pueden ser mucho mayores que en las bandas de frecuencia más baja, permitiendo velocidades de datos significativamente más altas.

##### **Ancho de banda instantáneo**

Es la máxima amplitud de banda que la antena puede procesar en un momento dado. Este valor es crucial para determinar cuántos datos pueden ser transmitidos simultáneamente.

Ancho de banda ocupado

Es típicamente el ancho de banda dentro del cual se encuentra la mayoría de la potencia de la señal transmitida (generalmente un porcentaje alto como el 99% de la potencia total).

Ancho de banda del portador

Se refiere al ancho de banda de cada portador de frecuencia individual dentro de la señal. En 5G, anchos de banda más grandes por portador permiten mayores tasas de datos.

### **1.3.5 Portadores (Carriers)**

Un portador es una señal sinusoidal de alta frecuencia que puede ser modulada con una señal de información para su transmisión. En las comunicaciones 5G, se utilizan múltiples portadores (multi-carrier) para aumentar la eficiencia espectral y la robustez de la transmisión. Cada portador puede ser modulado de manera independiente, lo que permite una flexibilidad significativa en la asignación de recursos y en la adaptación a las condiciones de canal.

### **1.3.6 Modulación**

Esta característica, profundizada anteriormente, es parte de los parámetros importantes que tienen estas antenas. Por excelencia, la modulación más utilizada es la QAM.

### **1.3.7 Multiplexación**

La multiplexación es el proceso de combinar múltiples señales en un solo canal de transmisión.

En las comunicaciones 5G, se utilizan varias técnicas de multiplexación, incluyendo:

- TDM (Time Division Multiplexing): Asigna diferentes tiempos de transmisión a diferentes señales en el mismo canal.
- FDM (Frequency Division Multiplexing): Asigna diferentes frecuencias a diferentes señales en el mismo canal.
- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access): Una extensión de OFDM que permite la asignación dinámica de subportadoras a diferentes usuarios, mejorando la eficiencia espectral y la capacidad de la red.

## 1.4 5G en Bandas Milimétricas

Hemos llegado al punto central de esta tesis. Las bandas milimétricas (mmWave) refieren a las frecuencias del espectro de radio que están por encima de los 24 GHz y se extienden hasta los 100 GHz. Para explicar el nombre que llevan, usaremos de ejemplo la frecuencia de 24 GHz. La longitud de onda, que es inversamente proporcional a la frecuencia, es de 12,5mm. La industria a menudo utiliza el término mmWave para definir las frecuencias entre 10 y 300GHz. Este espectro puede utilizarse para comunicaciones inalámbricas de alta velocidad como se observa con el último estándar Wi-Fi 802.11ad (operando a 60 GHz).

### 1.4.1 Mejora teórica

En las comunicaciones móviles, la frecuencia de la señal de radio y el ancho de banda disponible son factores cruciales que determinan la capacidad y el rendimiento de una red. En el contexto de 5G, la utilización de frecuencias más altas ofrece la posibilidad de manejar anchos de banda mucho mayores que en generaciones anteriores, como 4G. Las bandas de frecuencia más baja (sub-6 GHz), han ofrecido anchos de banda de hasta 20MHz por canal. En contraste, las bandas milimétricas (24 GHz y superiores) están menos congestionadas y ofrecen grandes cantidades de espectro disponible. Esto permite anchos de banda significativamente mayores, a menudo en el rango de cientos de megahercios (MHz) a varios gigahercios (GHz).

## All Bands to 5G: Sub-6G as Mainstream Investment, mmWave is Currently Limited in Coverage

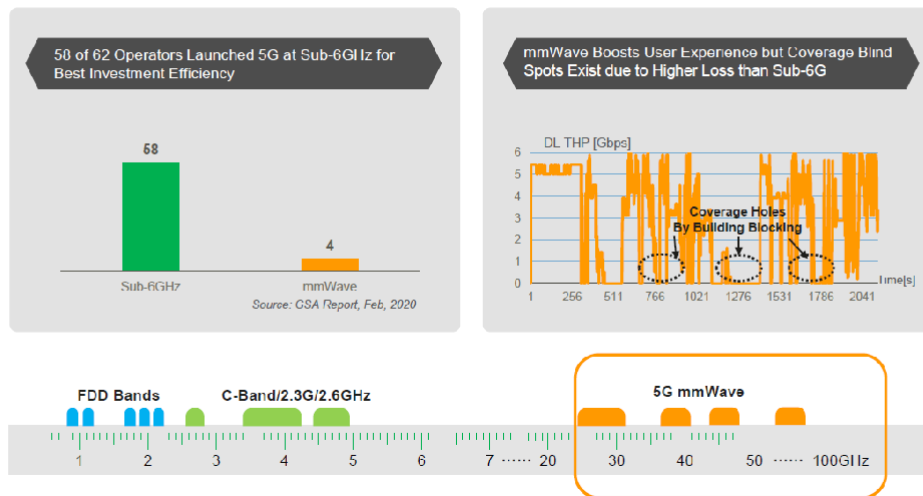


Figura 6: Figura X. Comparación entre el despliegue de 5G en bandas Sub-6 GHz y mmWave. Fuente: HUAWEI

La capacidad del canal, como vimos anteriormente con Shannon, está directamente relacionada con el ancho de banda disponible y la relación señal-ruido (SNR). Un mayor ancho de banda permite una mayor capacidad de canal.

Usaremos la fórmula de Shannon-Hartley para estimar la capacidad máxima del canal:

- $C = BW \log(1 + SNR)$

Para dar un ejemplo, suponiendo una relación señal-ruido de 30 dB, algo bastante típico en condiciones ideales, y un ancho de banda del canal de 400 MHz.

- $C = 400.000.000 \log(1 + 1000)$
- $C = 400.000000 \log(1 + 1000)$
- $C = 400,000,000 \times 9.97$
- $C \approx 3,988,000,000$  bps o 3.988 Gbps
- $C \approx 4$  Gbps

Esto nos muestra que, bajo condiciones ideales, un canal de 400 MHz a 26 GHz podría

teóricamente soportar casi 4 Gbps de tasa de datos. A medida que la frecuencia aumenta, la atenuación de la señal también aumenta. La fórmula de atenuación en espacio libre muestra que la pérdida de trayecto (L) es proporcional a la frecuencia. Las frecuencias más altas tienen una capacidad de penetración limitada y son más susceptibles a la atenuación por obstáculos físicos como paredes y árboles.

#### **1.4.2 Standalone y nonstandalone**

Para explicar estos conceptos, nos referiremos al Non-Standalone como NSA y al Standalone como SA. La fase NSA ha precedido a la etapa SA por una razón de peso: es más fácil de implementar y menos costosa. Durante la fase NSA, las redes 5G se apoyan en la infraestructura 4G existente, lo que permite una rápida adopción sin necesidad de desplegar un core 5G desde el inicio.

En NSA, los dispositivos 5G establecen el enlace radio con la estación base utilizando bandas de frecuencia propias de 5G. Esto les permite alcanzar velocidades muy superiores a las de 4G, con tasas medias por encima de los 100 Mbps y picos teóricos de hasta 20 Gbps. Sin embargo, el control de la conexión y parte de la gestión de la sesión de usuario se mantienen sobre la red 4G (EPC), lo que introduce limitaciones en cuanto a latencia y algunas funcionalidades avanzadas de 5G.

Por el contrario, en SA tanto el enlace radio como la señalización y el núcleo de red son completamente 5G. Esto habilita todas las capacidades de la nueva tecnología —como la ultra baja latencia, network slicing o comunicaciones masivas IoT—, al definirse una infraestructura independiente de la red 4G heredada.

### 1.4.3 Linea de vista

Un concepto clave en las redes 5G en banda milimétrica es el de Linea de vista. Como su nombre lo indica, refiere a la línea directa entre la antena y el dispositivo conectado, y si esta es obstruida o no.

Durante este trabajo y en general en toda la bibliografía relacionada, se divide en LOS (Line of Sight) y NLOS (Non Line of sight).

Veremos en las imágenes desplegadas, como afecta a las conexiones NLOS los distintos tipos de materiales con los que se obstruye a la línea de vista.

#### NLOS and Near LOS Cases: Penetration Scenarios under Different Materials

Glass door / wall and wooden door can be considered as 'Near LOS' for Indoor Coverage

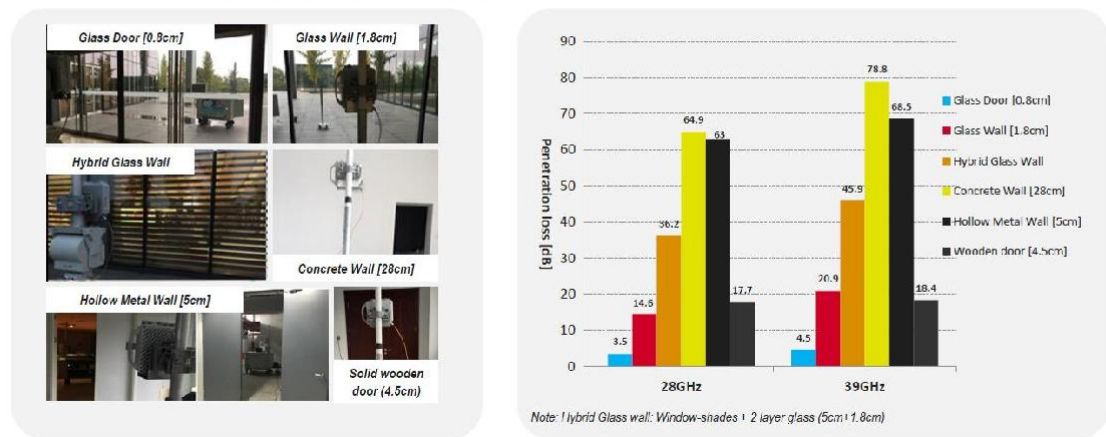


Figura 7: NLOS y LOS. Fuente: HUAWEI

#### mmWave NLOS Summary: Near LOS and Rich Reflections are Preferred

Scenarios	Material	Loss (dB)	Conclusion
Wall Penetration	Cement (28cm)	64.9	NLOS: Difficult
	Hollow metal (5cm)	63	NLOS: Difficult
	Wood (4.5cm)	17.7	NLOS: Possible
Glass Penetration	Normal glass (3~8mm)	1.9~3.8	Near LOS: OK
	2-layer reinforced glass (6~13mm)	1.6~4.1	Near LOS: OK
	Coated glass (~6mm)	11.7	Near LOS: OK
	2-layer insulating glass	16.0	NLOS: Possible
	Glass door (0.8cm)	3.5	Near LOS: OK
	Glass wall (1.8cm)	14.6	NLOS: Possible
Train Penetration		~50	NLOS: Difficult
Human Body Penetration and Reflection		9~13	Near LOS: OK
Foliage Penetration		~8 / tree	Near LOS: OK
Cement Wall Reflection		~10	Near LOS: OK
Glass Reflection		~6	Near LOS: OK
Diffraction		~18	NLOS: Possible

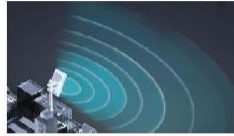
Figura 8: mmWave NLOS Summary. Fuente: HUAWEI

## mmWave Coverage Tranches: LOS and Reflections are Best Cases

### I. Best Scenarios:

1. **LOS (Line of Sight):** Ideal scenario for mmWave
2. **Rich reflections:** Using reflections to enhance the outdoor signals. Hotspot outdoor streets and squares are typical cases.

LOS (Line of Sight)



Multi-paths reflections



### II. Acceptable Scenarios (near LOS):

#### Low penetrations like:

1. **Foliage penetrations:** Averagoly 8db loss per tree, 1 or 2 trees foliage penetration is acceptable. Some times pole site is needed.
2. **Glass penetrations:** Near glass shallow O2I (outdoor to indoor) coverage is acceptable. Deep indoor needs indoor solutions.

Follage Penetrations



Glass Penetrations



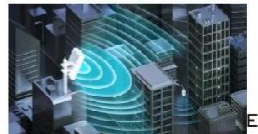
### III. Difficult Scenarios:

1. **High penetrations:** Such as concrete wall (>60dB loss), very difficult for O2I coverage. Indoor solution is needed.
2. **Diffractions:** >18dB loss. Pole site is needed for coverage compensation.

Concrete Penetrations



Diffractions



14 Huawei Confidential

Figura 9: mmWave Coverage Tranches. Fuente: HUAWEI

### 1.4.4 Digital Beamforming

El Beamforming, o conformado de haces, es una técnica de antenas utilizada para orientar la radiación electromagnética hacia una dirección específica, mejorando la cobertura y la eficiencia del uso de la potencia transmitida. Si bien versiones tempranas de beamforming ya se encontraban en tecnologías previas como 4G LTE-Advanced, es en 5G donde adquiere un rol central gracias al uso de arreglos masivos de antenas (Massive MIMO) y a la incorporación de procesamiento digital avanzado.

En generaciones anteriores (2G, 3G y primeras versiones de 4G), las antenas emitían su señal en un arco fijo, por lo que la calidad de la recepción dependía principalmente de la distancia y la posición del usuario respecto al lóbulo principal de radiación. Con la evolución hacia 4G avanzado se incorporaron primeras aplicaciones de beamforming analógico, pero es en 5G donde se despliega ampliamente el beamforming digital, que permite rastrear en tiempo real la ubicación del dispositivo y orientar dinámicamente el haz de radiación hacia él.

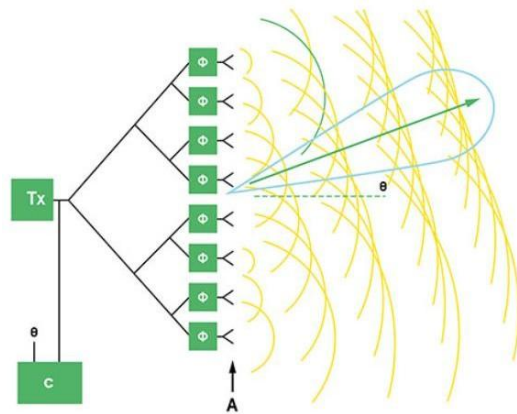
Mediante procesamiento digital de señales, las antenas 5G ajustan la fase y la amplitud de las señales transmitidas y recibidas en cada elemento del array. Esto permite seguir al usuario

incluso si se mueve, apuntar el máximo de radiación hacia él adaptando la potencia de manera inteligente para optimizar el consumo. Asimismo, pueden colocarse nulos en direcciones específicas para reducir interferencias con celdas vecinas, BTS y otros usuarios.

El beamforming se basa en la aplicación coordinada de múltiples elementos radiantes que transmiten la misma señal a la misma longitud de onda, combinándose para crear una antena lógica capaz de reforzar las ondas en una dirección determinada. Cuantos más elementos radiantes componen la antena, más estrecho resulta el haz principal y más débiles los lóbulos laterales. El cambio de fase en la alimentación de los elementos permite dirigir la señal hacia receptores específicos, y los cálculos necesarios para este ajuste se realizan mediante algoritmos complejos, frecuentemente asistidos por inteligencia artificial.

En escenarios con múltiples usuarios, el máximo de radiación conmuta rápidamente entre ellos, generando la sensación de que cada uno recibe atención exclusiva de la antena. El desfase aplicado a los elementos alineados verticalmente produce una inclinación del haz en el plano vertical, mientras que al aplicarse a las columnas se logra un ajuste en el plano horizontal.

Cabe mencionar que, además del **digital beamforming**, también existe el **beamforming analógico**, en el que el ajuste de fase y amplitud se realiza antes de la conversión digital mediante dispositivos como phase shifters y amplificadores. Esta modalidad resulta eficiente en términos de consumo de energía y costo, y tiene particular relevancia en frecuencias altas como las bandas mmWave, donde es necesario emplear múltiples antenas para contrarrestar la fuerte atenuación y los desafíos de propagación.



**Figura 10: Arreglo de fase en un sistema de antena. Fuente: Analog Device.**

Las configuraciones fundamentales del BeamForming son dos; El Service Beam, que consiste en alimentar todas las columnas con la misma amplitud, pero con desfase constante entre ellas dando lugar a conformados con mayor directividad horizontal y ganancia. La otra configuración es el Broadcast Beam, cuyo diagrama de radiación tiene una forma similar a los de antenas 4G, con menos ganancia y directividad, pero da cobertura a toda la celda.

El Service Beam se utiliza para dar servicio a los usuarios y el Broadcast Beam se utiliza para procesar el canal de transmisión, el canal de control y las señales de referencia de todos los dispositivos en una celda.

## 1.5 Parámetros de la RED

### 1.5.1 Throughput

El throughput, o rendimiento, es la cantidad de datos que se transmiten exitosamente de un punto a otro en una red en un tiempo determinado. Es una medida fundamental para evaluar la eficiencia y la capacidad de una red de comunicaciones.

### 1.5.2 PDCP (Protocol Data Convergence Protocol)

El PDCP es un protocolo en la capa de red que facilita la transferencia de datos entre el dispositivo móvil y la red, proporcionando funciones como compresión de cabeceras y seguridad (cifrado y descifrado). La eficiencia del PDCP influye directamente en el throughput, ya que una gestión eficaz de los datos puede reducir la latencia y aumentar la velocidad de transmisión.

### **1.5.3 UDP (User Datagram Protocol) y TCP (Transmission Control Protocol)**

Nos referimos a protocolos para la transmisión de datos. UDP es un protocolo simple de la capa de transporte que envía datagramas sin establecer una conexión previa, lo que lo hace rápido pero menos confiable. Por su parte, TCP está basado en conexión, lo que asegura la entrega de paquetes mediante confirmaciones y control de flujo, lo que lo hace más confiable pero potencialmente más lento debido a su sobrecarga. La elección entre UDP y TCP puede afectar significativamente el throughput observado en una red 5G, dependiendo de la aplicación y de la necesidad de fiabilidad versus velocidad.

### **1.5.4 RSRP, RSRQ y SINR**

Son Parámetros importantes los cuales explicaremos para que cuando se los nombre en el desarrollo sepamos de que estamos hablando. El RSRP (Reference Signal Received Power) refiere a la potencia de la señal de referencia recibida, que ayuda a medir la calidad de la señal y es fundamental para la planificación y diagnóstico de redes. Es fundamental para determinar la ubicación del borde de la celda, ya que éste se define en el mínimo RSRP con el cual aún se puede mantener una tasa de éxito de establecimiento de llamada (Call Setup Success Rate) aceptable.

RSRQ (Reference Signal Received Quality) es una medida de la calidad de la señal recibida que combina el RSRP con el nivel de ruido y la interferencia, proporcionando una comprensión más profunda de la calidad de la red.

SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio) es la relación señal a interferencia más ruido. Es crucial para evaluar la capacidad de una transmisión de datos para competir con el ruido y la interferencia, directamente relacionada con el throughput alcanzable.

### **1.5.5 MCS (Modulation and Coding Scheme)**

MCS es un parámetro clave en redes inalámbricas que define el esquema de modulación y codificación utilizado para transmitir los datos. Afecta directamente la velocidad y la eficiencia de la transmisión. Un MCS más alto permite transmisiones más rápidas, pero requiere una señal de mayor calidad. Es fundamental optimizar este parámetro para maximizar el throughput bajo diversas condiciones de señal.

#### 1.5.6 BLER (Block Error Rate)

La tasa de error de bloque mide la proporción de bloques de datos recibidos con errores sobre el total de bloques enviados, sirviendo como un indicador de la calidad de la transmisión. Un BLER alto puede reducir significativamente el throughput porque los datos deben ser retransmitidos, lo que consume recursos adicionales y tiempo. Como sus siglas hacen pensar, es un parámetro estrechamente relacionado con el BER (Bit Error Rate), con la diferencia que este último hace el análisis respecto a los bits enviados.

#### 1.5.7 Condiciones de Borde de Celda

Este concepto se mencionó en varios puntos y es importante aclarar su definición e importancia al analizar la calidad y el rendimiento de redes inalámbricas. El borde de celda se refiere a las áreas ubicadas en el límite de la cobertura de una estación base, donde la intensidad de la señal comienza a debilitarse. Estas zonas son críticas para la evaluación de la red, ya que representan condiciones desafiantes para mantener la calidad de servicio: los usuarios pueden experimentar degradaciones en la velocidad, mayor latencia, pérdida de paquetes y, en casos extremos, desconexiones.

En la planificación de la red es fundamental que, en estas zonas de borde, siempre exista una **portadora dominante**. Esto significa que un usuario debe percibir una celda con señal claramente superior respecto a las vecinas, evitando situaciones en las que la potencia

recibida de múltiples estaciones sea similar. La ausencia de una portadora dominante incrementa la interferencia y dificulta los procesos de traspaso (handover), lo que se traduce en caídas de llamada o conexiones inestables.

Para garantizar esta condición, los operadores aplican estrategias de planificación de clúster como el ajuste de potencia de transmisión, el tilt mecánico o eléctrico de antenas, la optimización de diagramas de radiación mediante beamforming y un diseño cuidadoso de la superposición de cobertura entre sitios. De este modo, se asegura que el borde de celda tenga un comportamiento predecible y que la experiencia del usuario se mantenga estable incluso en los escenarios más críticos.

#### **1.5.8 Call Setup Success Rate**

Es el porcentaje de intentos de establecimiento de llamadas (o sesiones de datos) que resultan exitosos. La importancia de mantener una tasa de éxito de establecimiento de llamadas del 90% o superior, incluso en el borde de la celda, como indicativo de la robustez y confiabilidad de la red.

#### **1.5.9 EIRP total (típico):**

Potencia Isotrópica Radiada Equivalente total (típica) o EIRP es una medida de la potencia de señal que sería emitida por una antena isotrópica ideal que tiene la misma intensidad de señal en su dirección mas fuerte.

## 2 Estado del arte

Al hablar de estado del arte, nos referiremos a las investigaciones, desarrollos e implementaciones que se hayan realizado hasta hoy sobre las redes 5G en banda milimétrica. Esto nos proporcionará el contexto necesario para entender el momento en el que hoy nos situamos respecto al desarrollo de las telecomunicaciones, y así reconocer más fácilmente los desafíos futuros. Al ser este un tema en permanente avance, puede que este mismo apartado merezca modificaciones durante la realización del proyecto final.

### 2.1 Historia

Desde la introducción de la primera generación de redes móviles (1G) hasta la actual quinta generación (5G), la evolución de las telecomunicaciones fue motivada por la necesidad de mayores velocidades de transmisión y menor latencia. Si focalizamos en la última transición de estas generaciones, la transición hacia 5G ha sido impulsada por las limitaciones de 4G y la demanda creciente de aplicaciones que requieren altas tasas de datos y baja latencia, sumado a la cantidad creciente de usuarios conectados.

### 2.2 Estudios y Proyectos Relevantes

#### **1. Estudio de Ericsson sobre Despliegues de 5G en mmWave (2020)**

Ericsson ha llevado a cabo varios estudios sobre el despliegue de 5G en bandas milimétricas, destacando sus ventajas y desafíos. En un estudio de 2020, se analizaron las capacidades de 5G en mmWave en entornos urbanos y suburbanos, demostrando velocidades de hasta 4 Gbps en condiciones óptimas y una latencia mínima de 1 ms. Sin embargo, se identificaron problemas significativos relacionados con la penetración de señal y la interferencia en áreas densamente edificadas

#### **2. Proyecto 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership)**

El 5G PPP es una iniciativa europea que agrupa a diversas entidades públicas y privadas para investigar y desarrollar tecnologías 5G. Uno de los subproyectos, llamado mmMAGIC

(Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications), se centró en la viabilidad del uso de bandas milimétricas para 5G. Los resultados mostraron que, aunque las bandas mmWave ofrecen enormes anchos de banda, la cobertura es limitada y requiere una infraestructura densa de pequeñas celdas para ser efectiva.

### **3. "Análisis Comparativo de 5G mmWave vs. Sub-6 GHz" (2021)**

Un análisis comparativo publicado en IEEE Transactions on Communications evaluó las diferencias de rendimiento entre 5G mmWave y sub-6 GHz. El estudio concluyó que, si bien mmWave proporciona velocidades significativamente mayores, la cobertura y penetración son mucho menores comparadas con sub-6 GHz. Esto sugiere que una combinación de ambas tecnologías es esencial para un despliegue exitoso de 5G.

### **4. Implementación de 5G mmWave en Ambientes Interiores" (2022)**

Otro estudio, realizado por la Universidad de Stanford, exploró la implementación de 5G mmWave en entornos interiores, como centros comerciales y oficinas. Los resultados mostraron que las velocidades de datos eran altamente dependientes de la línea de vista (LOS) y se reducían considerablemente en presencia de obstáculos físicos. Se destacaron soluciones como el uso de reflectores y repetidores para mejorar la cobertura en interiores

### **5. Proyecto 5G-CORAL (5G Convergent Virtualised Radio Access Infrastructure in the Service of Super Connected and Autonomous Vehicles)**

Este proyecto investiga la integración de 5G con otras tecnologías para soportar vehículos autónomos y servicios conectados. Se ha enfocado en el uso de bandas milimétricas para proporcionar la alta capacidad y baja latencia necesarias para estas aplicaciones. Los ensayos han demostrado que, con una infraestructura adecuada, las bandas mmWave pueden soportar comunicaciones vehiculares con una latencia inferior a 5 ms, crucial para la seguridad y eficiencia de los vehículos autónomos.

Basados en información de la empresa de telecomunicaciones HUAWEI, vemos las implementaciones en el mundo de esta tecnología, ya sea a modo de estudio o para el uso comercial.

## More mmWave Spectrum Identified as IMT, Global Industry due to Mature

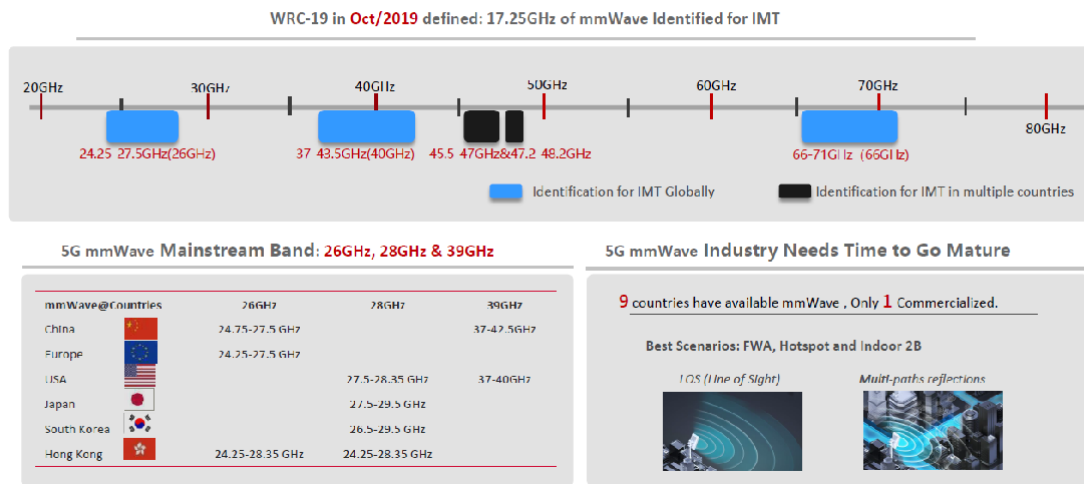


Figura 11: mmWave Spectrum as IMT. Fuente: HUAWEI

### 2.3 Análisis de estos estudios y desarrollos

En el apartado anterior, mencionamos distintos trabajos sobre las bandas milimétricas, con distintos enfoques, zonas geográficas y tecnologías. En términos generales, lo que se concluyó en la totalidad de estudios es que el uso de bandas milimétricas en 5G ofrece grandes oportunidades en términos de velocidad y capacidad, pero también presenta desafíos significativos en cuanto a cobertura y penetración. La implementación exitosa de 5G en mmWave requerirá una infraestructura densa y tecnologías complementarias para superar estos obstáculos.

Comparando con tecnologías como Wi-Fi 6, 5G en bandas milimétricas ofrece ventajas significativas en términos de velocidad y capacidad, aunque enfrenta mayores desafíos en términos de cobertura y penetración. La complementariedad de estas tecnologías en diferentes escenarios de uso es un área de interés creciente.

Así mismo, en países que van más avanzados con los despliegues de 5G, lo que respecta al

despliegue y pruebas de onda milimétrica, se está llevando a cabo en estadios, lugares abiertos con gran densidad de gente. A modo de ejemplo la empresa Verizon, en los estados unidos, está utilizando este tipo de cobertura para estadios y estaciones de trenes. En Europa, se licitaron las bandas, se están empezando a analizar los despliegues y casos de uso, y sobre esto último en España en la WMC (Mobile World Congress) Ericsson junto a Telefónica hicieron una presentación, en la cual se prestaba servicio 5GmmWave en la convención. Podemos decir que al día de la fecha existen despliegues realizados en distintas partes del mundo pero a pequeña escala, estadios deportivos, zonas de alta densidad de población conespacios abiertos. Pero en resumidas cuentas, son muy pocos los despliegues realizados por ser una tecnología en vistas de desarrollo y estudio. Es muy prometedora a largo plazo, pero al momento su aplicación no se encuentra al alcance de la mano.

### 3 Desarrollo

Aquí comenzamos con el estudio específico de las redes 5G en banda milimétrica para un posterior análisis de factibilidad. Comenzaremos detallando dos estudios realizados por la empresa Telecom sobre la cobertura de dos tipos distintos de estas antenas.

El primero de los estudios a detallar se dio en un entorno outdoor, en la ciudad de Rosario, utilizando una antena de la marca Nokia. El segundo se desarrolló con una antena marca Huawei y en un entorno indoor. Específicamente en el edificio de oficinas de Telecom en Vicente López (zona Unicenter).

Estos dos estudios no se analizarán de manera aislada, sino que en primera instancia se comparan con mediciones teóricas. Como suele suceder, la diferencia entre la teoría y la práctica fue considerable, aunque aceptable dados todos los parámetros tenidos en cuenta.

Por último, vale aclarar que el modelo de negocio analizado es el de servicio de telefonía móvil. Sabemos que los protocolos y el avance tecnológico son referidos a este, pero no es redundante diferenciarlo del servicio de internet de hogar que también suelen brindar estas empresas o grupos empresarios.

#### 3.1 Escenario de prueba Modelo Nokia

Comenzamos con las mediciones realizadas en Rosario. A continuación describimos el punto físico de la instalación de la antena. Esta fue en una altura razonable y en una zona residencial (Casas bajas y pocos edificios).

Datos Outdoor	
Altura de la AAU	20 m
Tilt mecánico	3°
Azimut (°)	325°
Longitud	-60,69083
Latitud	-32,8974

Altura de la AAU (20 m): Esta altura es fundamental para evaluar la cobertura y el rango de la

señal, ya que una mayor altura puede mejorar la línea de vista (LoS) y reducir los obstáculos. Sin embargo, al aumentar la altura también aumenta la distancia, por lo que puede influir en la atenuación si la altura es excesiva en ciertas configuraciones.

El ángulo de inclinación (Tilt mecánico) afecta la orientación del haz de la antena hacia los usuarios. Un tilt de 3° sugiere que la antena está levemente inclinada hacia abajo para enfocar la señal hacia el área objetivo, optimizando la cobertura.

El azimut indica la dirección en la que la antena está apuntando en términos de grados desde el norte geográfico. En este caso, 325° significa que la antena está orientada hacia el noroeste, lo que es relevante para entender la zona de cobertura.

Las coordenadas geográficas (-60,69083, -32,8974) corresponden a una ubicación precisa en Rosario. Esto permite ubicar la posición de la antena en mapas para análisis de cobertura y ver cómo el entorno urbano afecta la propagación de la señal.

Como acabamos de mencionar, el área en las que se realizaron las mediciones es del tipo residencial, con edificaciones de alturas máximas de 8 metros en calles laterales y una avenida con construcciones dispersas sobre ella. Dicha avenida está alineada con el azimut del sector.

El área en cuestión incluye zonas con vegetación. Los puntos seleccionados a diferentes distancias del sitio abarcan condiciones de línea de vista (LOS), puntos con diferentes densidades de vegetación y puntos NLOS (Sin línea de vista).

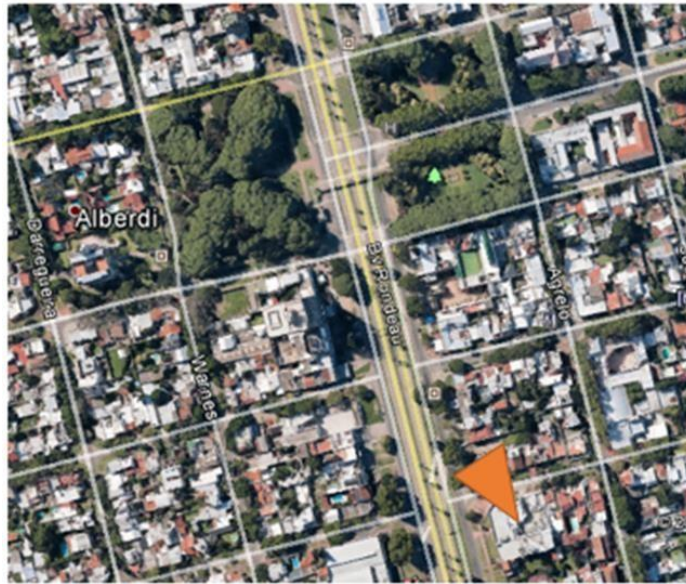


Figura 12: Ubicación de antena Outdoor. Fuente: Telecom

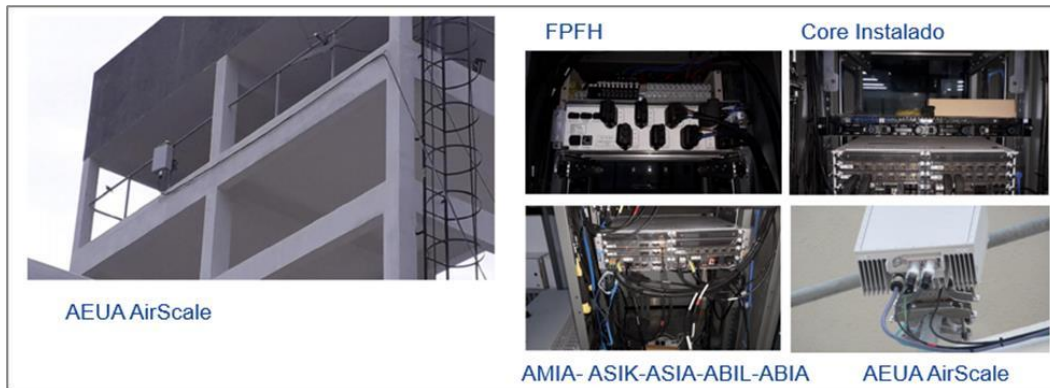
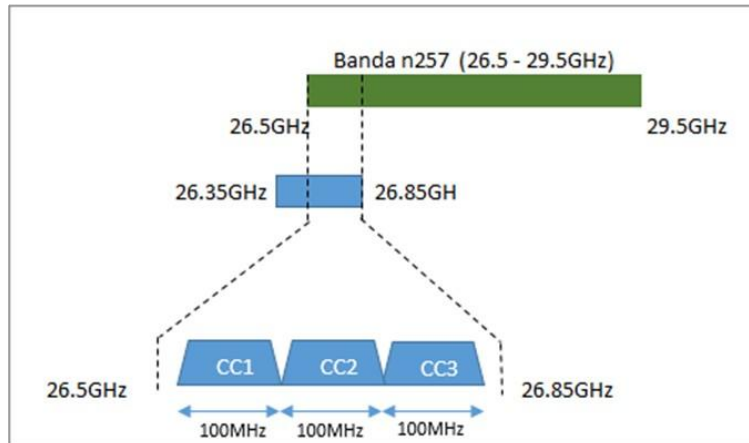


Figura 13: Componentes de antena outdoor. Fuente: Telecom

Desde el punto de vista espectral, la porción asignada es de 500MHz en total, centrados en 26.60 GHz (26.35-26.85 GHz). De esto, solamente 350MHz se solapan con la banda n257 (26.5 -29.5GHz)



**Figura 14: Bandas de uso. Fuente: Telecom**

### 3.1.2.1 Configuración de acceso

A continuación, se muestra la configuración de acceso a implementarse para las pruebas de campo para 5G NR (un único sector de 5G NR con 3CC)

Configuración 5G NR	
Opción NSA	3X
Config Data Radio Bearer (DL)	SCG-Only (solo 5G sin agregación de LTE)
Config Data Radio Bearer (UL)	MCG o SCG (Dependiendo de la prueba)
BW total	300 MHz
Banda	N257
# componet carriers	3
BW por carrier	100 MHz
CC1 NR ARFCN	2056663
CC2 NR ARFCN	2058327
CC3 NR ARFCN	2059991
CC1 Frec Central	26649.84 MHz
CC2 Frec Central	26749.68 MHz
CC3 Frec Central	26849.52 MHz
Duplex Mode	TDD
Subcarrier spacing (SCS)	120 KHz
Slot Lenght	0.125ms (14 símbolos)
Slot Configuration	4:1 (_DDDSU período 2.5ms)
Special Slot Config	SS2
5G SN Addition Type	Basado en Measurement Report
Beam Set Format	Beam Set 32A

La implementación NSA 3X es una configuración en la que el 5G se apoya parcialmente en la infraestructura de 4G LTE.

SCG-Only (solo 5G en DL): En el enlace descendente (DL), solo se usa 5G, lo que permite descargar datos a mayor velocidad sin la ayuda de LTE.

MCG o SCG en UL: En el enlace ascendente (UL), puede que se utilice LTE (MCG - Master Cell Group) o 5G (SCG - Secondary Cell Group), dependiendo del estado de la red.

El 5G trabaja junto con la red LTE en vez de operar como una red independiente. El control y la señalización de la red (es decir, el manejo de las conexiones y la administración de recursos) se gestionan mediante LTE, mientras que el data plane (el tráfico real de datos del usuario) puede manejarse a través de 5G, lo que significa que puedes tener las velocidades y capacidades mejoradas de 5G, pero aún dependiendo de LTE para la mayoría de las tareas de control.

El flujo típico en estas configuración es de la siguiente manera:

1. Inicialización de la conexión a través de LTE (B7): El dispositivo móvil se conecta inicialmente a la red LTE en la banda B7.
2. Asignación de recursos de 5G: Una vez que el dispositivo está conectado a la red LTE, la red 5G se activa y se asignan recursos adicionales (en la banda N257, por ejemplo) para la transmisión de datos en 5G, con el fin de aprovechar las altas velocidades y baja latencia.
3. El dispositivo ya puede estar simultáneamente conectado tanto a LTE como a 5G. LTE

maneja la señalización y puede gestionar el enlace ascendente (UL) en algunos casos, mientras que 5G se utiliza para la mayor parte del tráfico de datos, especialmente en el enlace descendente (DL).

#### 3.1.2.2 Configuración de Portadoras y Ancho de Banda

**BW total (300 MHz) con 3 Component Carriers (CC):** La configuración involucra 3 portadoras de 100 MHz cada una, lo que es típico para aprovechar al máximo las capacidades de transmisión en la banda N257. La agregación de portadoras permite utilizar estos 300 MHz de espectro para aumentar la capacidad y velocidad de la red.

**CC1, CC2, CC3 (ARFCN y frecuencias centrales):** Las tres portadoras tienen ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number) y frecuencias centrales específicas. Estas determinan dónde están las portadoras en el espectro. En este caso, las portadoras están separadas por aproximadamente 100 MHz, asegurando un uso eficiente del espectro.

#### 3.1.2.3 Parámetros de Acceso Radio

**Subcarrier Spacing (SCS):** El espaciamiento de subportadoras de 120 KHz.

**Slot Length (0.125 ms):** Cada slot tiene una duración de 0.125 ms, lo que equivale a 14 símbolos OFDM. Esta configuración se adapta a la alta velocidad de transmisión y a la latencia baja esperada en redes 5G.

**Slot Configuration (4:1):** La configuración de slots "DDDSU" en un período de 2.5 ms implica 4 slots de descarga (DL), 1 de subida (UL) y 1 especial. Esto sugiere que la configuración prioriza la transmisión de datos en el enlace descendente (DL), lo cual es típico en pruebas de

rendimiento de descarga de datos en 5G.

**Special Slot Config (SS2):** Esta configuración se refiere a slots especiales que se utilizan para señales de sincronización y control. SS2 es una configuración común que equilibra la transmisión de datos y las señales de control.

La configuración Beam Set 32A indica que se están utilizando múltiples haces para apuntar a diferentes usuarios o áreas, mejorando la cobertura y capacidad en entornos difíciles.

#### 3.1.2.4 Anchoring

Para el anchoring de LTE, se usa la siguiente canalización.

Configuración de frecuencia anchoring de LTE B7 (BW = 20MHz)	
EARFCN DL	3150 (2660 MHz)
EARFN UL	21150 (2540 MHz)

Veamos lo que significa esta configuración:

**Banda 7 (B7) de LTE:** Banda B7 es una de las bandas LTE que opera en el rango de 2600 MHz. Es una banda FDD (Frequency Division Duplexing), lo que significa que utiliza dos frecuencias separadas para los enlaces descendente(DL) y ascendente (UL), permitiendo la transmisión y recepción de datos al mismo tiempo.

**BW = 20 MHz:** Esto indica que el ancho de banda disponible para la transmisión de datos en la banda 7 es de 20 MHz, que es el máximo permitido en LTE para una única portadora.

- EARFCN DL (3150): Este número corresponde a una frecuencia descendente de 2660 MHz. Esta es la frecuencia que la estación base LTE usa para transmitir datos hacia los usuarios.

- EARFCN UL (21150): Este número corresponde a una frecuencia ascendente de 2540 MHz. Esta es la frecuencia que los dispositivos móviles usan para enviar datos de vuelta a la estación base LTE.

En el modo NSA, el anchoring de LTE es esencial porque LTE se encarga de la señalización y control de la conexión. Esto significa que esta configuración de anchoring LTE en B7 te permite medir cómo la red 5G NR opera cuando se soporta en una banda LTE estable.

También es relevante observar la eficiencia del handover entre LTE y 5G, así como el impacto en la latencia, ya que LTE sigue gestionando una parte de la carga, mientras que 5G ofrece las mayores velocidades de datos.

Para estas pruebas se utilizó el MNC = 02: El Mobile Network Code es un código que, junto con el MCC (Mobile Country Code), identifica de manera única a una red móvil dentro de un país. La red comercial, por su parte, utiliza un MNC = 34.

De esta manera se evitan las conexiones no deseadas y se controla el entorno ya que los usuarios comerciales que se conecten al sector LTE que actúa como anclaje, no generara interferencias. Cualquiera de estos problemas podría causar baja de rendimiento y seguridad.

### *3.1.3 Hardware:*

#### 3.1.3.1 Características generales

**AEUA AirScale MAA 2T2R 512AE n257 8W**  
5GC000515

**5G Adaptive Antenna System for optimized capacity**

- 5G RF Unit with an integrated antenna supporting analog beamforming
- Operating bandwidth: 26.5 GHz ... 29.5 GHz
- Instantaneous bandwidth: 800 MHz
- Occupied bandwidth: 800 MHz
- Carrier bandwidth: 100 MHz
- Number of carriers: up to 8
- DL/UL modulation schemes up to: 64 QAM /64 QAM
- Number of TX / RX layers/ports per carrier: 2
- Number of MIMO streams / beams: 2
- Total EIRP (typical): 54 dBm (60 dBm)\*

\* With optional AFMA AirScale Fan MAA unit (474443A)



- IP65 -40 ... 55 °C
- 22 kg (24 kg)\*
- 23 liters (25.5 l)\*
- Natural convection cooling\*
- AC power

**RFIC V-Pol TX1**

**RFIC H-Pol TX2**

2 beams (H&V) are transmitted at the same time

Sector Width:  
120° -> 8dB Power Beam Width  
90° -> for 3dB HPBW

Figura 15: Nokia AEUA Airscale. Fuente: Telecom

Pasaremos a comentar las características principales de la antena irradiante.

- Marca: Nokia
- Modelo: AirScale MAA 2T2R 512AE
- Ancho de banda instantáneo: 800 MHz
- Ancho de banda ocupado: 800 MHz
- Ancho de banda del portador: 100 MHz
- Número de portadores: hasta 8
- Esquemas de modulación DL/UL hasta: 64 QAM / 64 QAM
- Número de flujos/beams MIMO: 2
- Número de capas TX/RX por portador: 2
- EIRP total (típico): 54 dBm

Esta antena es parte de un Sistema de Antena Adaptativa (5G Adaptive Antenna System)

optimizado para maximizar la capacidad de la red 5G. La antena mencionada está diseñada para la banda milimétrica n257 (26.5 GHz - 29.5 GHz).

#### 3.1.3.2 Esquemas de modulación DL/UL

La antena soporta los esquemas de modulación de 64QAM tanto en el enlace descendente (DL) como en el ascendente (UL). El 64QAM (Quadrature Amplitude Modulation) es un esquema de modulación de alta eficiencia que ya fue descrito en el marco teórico de este trabajo.

#### 3.1.3.3 Número de capas de transmisión/recepción

2 (dos) capas TX/RX por portadora, lo que indica que la antena es 2T2R (2 transmisiones y 2 recepciones), permitiendo un mejor manejo del tráfico de datos simultáneo. Esto es lo que llamamos flujo MIMO.

#### 3.1.3.4 Potencia EIRP (Effective Isotropic Radiated Power)

54 dBm. Este es el valor típico, pudiendo alcanzar hasta 60 dBm. Este es un valor de potencia importante que indica cuánta energía efectiva radia la antena en una dirección particular. Un EIRP elevado es útil para maximizar la cobertura en frecuencias altas como las mmWave.

#### 3.1.3.5 Características físicas:

- IP65: La antena está certificada para resistir condiciones extremas de polvo y agua, lo que la hace adecuada para su instalación en exteriores.
- Rango de temperatura: Puede operar en un rango amplio de temperaturas, desde -40

°C hasta 55 °C.

- Peso: 22 kg, lo que es un peso estándar para antenas de esta categoría.
- Enfriamiento por convección natural: La antena utiliza un sistema de enfriamiento pasivo, lo que significa que no requiere ventiladores o sistemas activos de refrigeración.
- Alimentación de corriente alterna (AC).
- Para un haz con 8 dB de ancho de potencia: Tiene un ancho de sector de 120°.
- Para un haz con 3 dB de ancho de potencia: Tiene un ancho de sector de 90°.

### 3.1.3.6 Modulo adicional

Para esta prueba, se introdujo un módulo Airscale adicional que incluye varias placas importantes:

- Placa ASIA: Interfaz de radio.
- Placa ABIA: Interfaz de banda base.
- Placa ASIK: Procesamiento de señales.
- Placa ABIL: Interfaz de enlace.

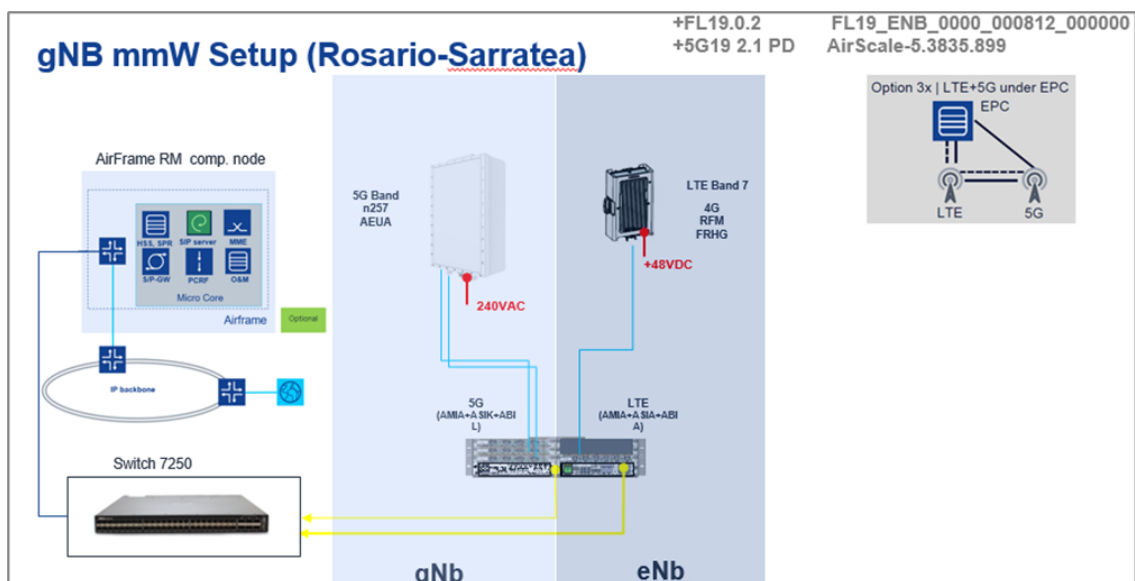


Figura 16: gNB mmW. Fuente: Telecom

El AirFrame RM Component Node es un elemento clave en la infraestructura de red 5G.

Vamos a desglosar qué significa y cuál es su papel en la configuración de redes móviles, especialmente en la arquitectura de redes 5G.

Este es el nodo de la red 5G que se encarga del procesamiento de datos y control en la arquitectura de la red. Es un elemento clave en la infraestructura de red 5G. Vamos a desglosar su funcionamiento y cuál es su papel en la configuración de la arquitectura analizada.

AirFrame está específicamente optimizado para manejar cargas de trabajo de telecomunicaciones en la nube (cloud-native) y está integrado con las últimas tecnologías de virtualización y computación en el borde (Edge computing).

El Radio Module (RM) dentro del AirFrame se refiere al componente de hardware que está encargado de la gestión de radiofrecuencia, asignando dinámicamente los recursos a los distintos usuarios. En este contexto, incluye la gestión del acceso al espectro, control de las antenas, y la configuración de recursos de radio para los usuarios conectados. Es un componente crucial para conectar la capa física (la radiofrecuencia utilizada por las antenas) con la capa de transporte y núcleo de la red, permitiendo que los dispositivos se conecten y transmitan datos en la red móvil.

Estos nodos AirFrame pueden estar ubicados más cerca de los usuarios (en las estaciones base) para procesar datos más rápidamente, reducir la latencia y mejorar el rendimiento general de la red (EdgeComputing).

#### *3.1.4 Throughput Máximo*

A continuación, veremos la ubicación geográfica del elemento irradiante, junto con la locación donde se encontraron las velocidades máximas de datos en Down Link y Up Link para un

usuario dentro del área de cobertura de la celda de 5G (RSRP > -70 dBm, MCS > 22 y el RANK y MCS más altos posibles en condiciones estables). Esta prueba se ejecutó en modo estacionario y con un único dispositivo de usuario conectado a la celda de 5G.

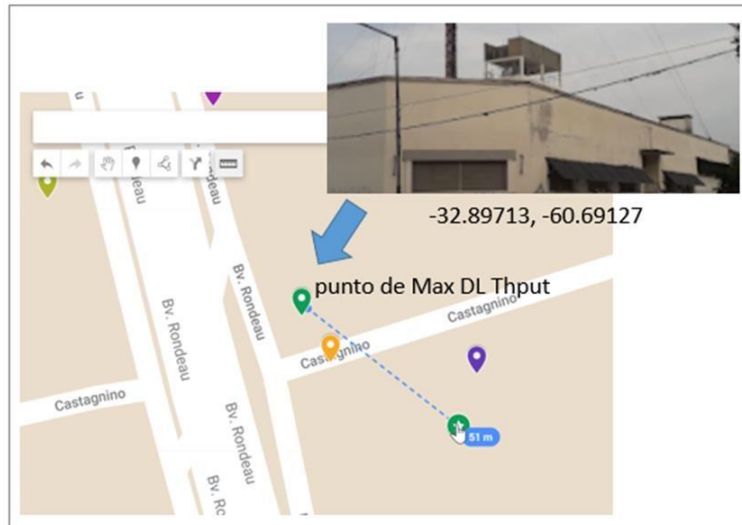
Parámetro	Valor
Throughput PDCP DL UDP NR	<b>1.53 Gbps</b>
Throughput PDCP UL UDP NR	<b>78.8 Mbps</b>
Throughput PDCP DL TCP NR	<b>1.3 Gbps</b>
Throughput PDCP UL TCP NR	<b>77 Mbps</b>
Service Beam Index NR	<b>52</b>
RSRP NR	<b>-64 dbm</b>
RSRQ NR	<b>-12 db</b>
SINR NR	<b>17 db</b>
MCS NR	<b>27</b>
Avg PRBs NR	<b>66</b>
DL BLER% NR	<b>0 DL – 7-9UL</b>
MIMO MODE NR	<b>DL 2X2</b>

Esta prueba se realizó con Iperf UDP con tamaños de paquete de 1400 Bytes con duración de upload y download de al menos dos minutos cada uno y posteriormente con Iperf utilizando TCP. A modo referencial, el Throughput máximo PDCP en el DL para 3CC de 100MHz c/u y relación DL/UL =0.67/0.17 y QAM64 debería estar en el orden de 1.8 Gbps.

Para el caso del uplink, el throughput PDCP máximo con un carrier de 100MHz (no soporta CA) y relación DL/UL=0.67/0.17 debería estar en el orden de 80Mbps. Las mediciones obtenidas son consistentes con dichos valores. En ambas mediciones se utilizó SCG\_Only (solo carrier de 5G, sin agregación con LTE).

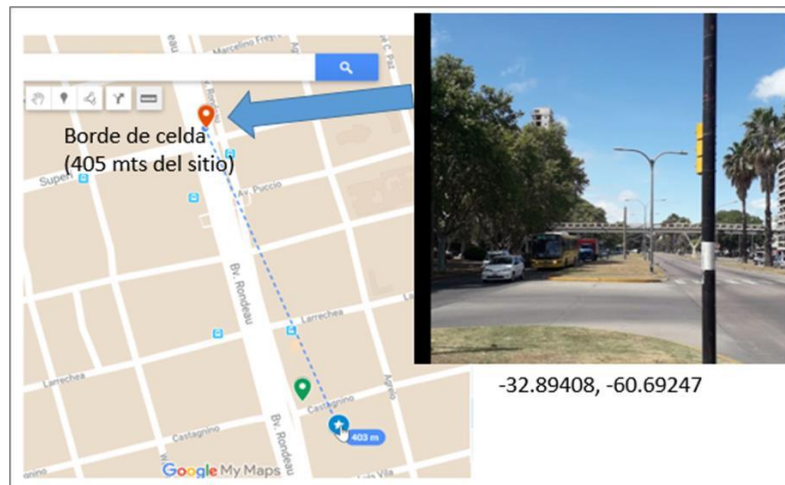
En la siguiente figura se muestra la ubicación del punto donde se obtuvo el throughput máximo

en el Down link (55 metros del sitio aproximadamente). Este punto corresponde a una condición LOS (“Line of sight”)



**Figura 17: Punto de máximo throughput DL. Fuente: Telecom**

### 3.1.5 Borde de celda



**Figura 18: Punto de Borde de Celda. Fuente: Telecom**

El propósito de esta prueba fue obtener el throughput en el DL y UL en condiciones de borde de celda en escenario de LOS. Se entiende como borde de celda a la ubicación donde se tiene el mínimo RSRP tal que se puede garantizar un Call Set up Success Rate en 5G mayor o igual al 90%.

Los valores relevados son los siguientes:

Parámetro	Valor
Thrput DL UDP NR	<b>364 Mbps</b>
Thrput UL UDP	<b>7.5Mbps NR / 50Mbps LTE</b>
Thrput DL TCP NR	<b>336 Mbps</b>
Thrput UL TCP	<b>736Kbps NR / 48Mbps LTE</b>
Service Beam Index	<b>15</b>
RSRP NR	<b>-90 ~ -97 dbm</b>
RSRQ NR	<b>-12 db</b>
SINR NR	<b>9 ~ 14 db</b>
Avg MCS NR	<b>13 (DL) – 6 (UL)</b>
PRBs NR	<b>66 (DL) – 65 (UL)</b>
DL BLER% NR	<b>9% DL – 20% UL</b>
MIMO MODE NR	<b>DL 2X2</b>

Se utilizó Iperf UDP con tamaños de paquete de 1400 Bytes y, posteriormente, Iperf TCP. Inicialmente esta prueba se realizó con el UL data radio bearer configurado en SCG\_Only. Luego se repitió la prueba cambiando a MCG\_Only en el UP (se usan las capas PHY, MAC y RLC de LTE) para que los datos sean transferidos solo por el PUSCH de LTE en lugar de 5G de forma que el uplink sea más robusto. Las mejoras se pueden apreciar en la tabla anterior.

La figura 18 muestra la ubicación del punto donde se obtuvo el throughput máximo en borde de celda (405 metros del sitio). Este punto corresponde a una condición de propagación sobre un boulevard con hileras de vegetación (altura máx. del orden de los 10mts):

### 3.1.6 Medición en distintos puntos

Se procedió a realizar esta prueba en condiciones estacionarias y su propósito consiste en medir throughput en uplink y Down link en diferentes puntos del área de cobertura de la celda de 5G NR y demás parámetros considerando distintas condiciones de cobertura. Los puntos de medición se distribuyeron uniformemente en el área entre los puntos de 3dB (+45° y -45° respecto la dirección principal) y el borde de cobertura determinado en el punto 3.

Se seleccionó un total de 22 ubicaciones para relevar los datos, las cuales consisten en puntos en condiciones LOS, puntos en condiciones LOS parcial (vegetación y follaje en el camino de propagación) y puntos en condiciones NLOS.

En lo que respecta a la medición de la latencia E2E entre el dispositivo de usuario y el servidor de aplicación (por ejemplo, el mismo que se utiliza para las mediciones de Iperf) se utiliza ICMP para el envío de pings.

Punto	Tipo	L1 Thput DL Kbps	PDCP Thput DL Mbps	L1 Thput UL Mbps	PDCP Thput UL Mbps	RSRP	RSRQ	SINR	MCS	Numero promedio de PRBs utilizados	DL BLER %	MIMO Rank	Service Beam Array Index
1	LOS	1400,9	1391,4	47,6	47,3	-66	-12	18	27	66	1	2	37
2	LOS	1536,2	1525,6	84,8	78,8	-64	-12	17	27	66	0	2	52
3	LOS	522,7	519,0	39,5	36,5	-75	-12	18	26	66	2	2	62
4	LOS	1536,9	1526,3	70,3	68,1	-74	-12	17	27	66	0	2	22
5	LOS	1540,8	1530,1	49,0	46,1	-69	-12	18	27	66	0	2	39
6	LOS	1536,3	1525,5	54,4	52,6	-77	-12	18	27	66	1	2	22
7	LOS	530,5	526,8	60,1	58,4	-67	-12	18	27	66	0	2	61
8	LOS	1525,6	1316,4	47,6	43,1	-72	-12	18	27	66	0	2	30
9	Veget.	530,4	526,2	10,3	10,2	-84	-12	17	16	66	9	2	36
10	Veget.	331,3	328,0	7,6	7,2	-94	-12	12	15	66	9	2	20
11	Veget.	453,4	449,7	10,3	9,3	-94	-12	10	16	66	9	2	20
12	Veget.	299,1	296,0	5,2	5,1	-89	-12	14	14	66	9	2	22
13	Veget.	400,6	397,7	2,2	2,2	-80	-12	16	22	66	8	2	21
14	Veget.	283,1	280,4	2,7	2,6	-90	-12	13	15	66	9	2	28
15	Veget.	835,6	829,7	43,1	41,5	-69	-12	18	24	66	8	2	52
16	Veget.	584,9	580,4	12,3	10,6	-85	-12	14	22	66	9	2	15
17	NLOS	276,2	274,5	5,7	5,4	-80	-12	17	26	66	8	2	52
18	NLOS	758,3	752,0	13,0	12,3	-82	-12	12	18	66	9	2	54
19	NLOS	1065,2	1067,2	21,7	21,0	-81	-12	17	22	66	9	2	45
20	NLOS	153,4	149,9	1,4	1,4	-97	-12	5	11	66	13	2	14
21	NLOS	120,8	118,2	0,4	0,4	-106	-13	2	9	66	9	2	6
22	NLOS	438,0	434,3	2,9	2,7	-92	-12	12	17	66	9	2	30

**Figura 19: Puntos de medición estáticos. Fuente: Telecom**

### 3.1.7 Latencia

La latencia (RTT) promedio obtenida mediante ICMP en condiciones de proximidad al sitio (Punto 2 donde se midió el máx. PDCP DL Throughput) está en el orden de 10ms. En condiciones de borde de celda la latencia obtenida utilizando solo la portadora de 5G NR escala a valores que dificultan el funcionamiento (Avg RLC RTT > 1000 ms), razón por la cual sería deseable usar la configuración de MCG (solo LTE) para el caso de transmisiones en el Uplink.

### 3.1.8 Calculo teórico

Parámetros para el Cálculo

- **Ancho de Banda Total (DL):** 300 MHz (3 CC de 100 MHz cada uno)
- **Eficiencia Espectral (SE):** 6 bits/Hz
- **Overhead:** 0%

Cálculo del Throughput DL

- Throughput (DL) = Total BW × SE
- Throughput (DL) =  $300 \times 10^6 \text{ Hz} \times 6 \text{ bits/Hz}$
- Throughput (DL) =  $1800 \times 10^6 \text{ bps}$
- Throughput (DL) = 1.8 Gbps

Parámetros para el Cálculo del Uplink (UL)

- **Ancho de Banda Total (UL):** 100 MHz
- **Eficiencia Espectral (SE):** 3.15 bits/s/Hz
- **Overhead:** 0%
- **Relación DL/UL:** 0.67/0.17

Cálculo del Throughput Teórico en Uplink (UL)

1. **Ancho de Banda Total:**
  - **Total BW (UL):** 100 MHz
2. **Eficiencia Espectral (SE):**
  - **SE = 3.15 bits/s/Hz**
3. **Overhead:**
  - Overhead = 0%

Cálculo del Throughput UL sin Ajuste:

- Throughput (UL) = Total BW × SE
- Throughput (UL) =  $100 \times 10^6 \text{ Hz} \times 3.15 \text{ bits/Hz}$
- Throughput (UL) =  $315 \times 10^6 \text{ bits/s}$
- Throughput (UL) = 315 Mbps

Ajuste según Relación DL/UL

- Throughput (UL ajustado) =  $315 \text{ Mbps} \times 0.670.17$
- Throughput (UL ajustado) =  $315 \text{ Mbps} \times 0.2537$
- Throughput (UL ajustado) = 80 Mbps

Vemos como las mediciones realizadas en campo son congruentes con las mediciones teóricas. La práctica se dio en condiciones ideales, con un solo usuario conectado y en estado estacionario.

## 3.2 Escenario de prueba Modelo Huawei

Luego de trabajar con las mediciones outdoor en la ciudad de Rosario, pasamos a una prueba que se realizó en la localidad de Martínez, en el norte del Conurbano Bonaerense, en el edificio de oficinas de la empresa Telecom, en la zona de Unicenter.


### 3.2.1 Hardware

En primer lugar, analizaremos el Hardware utilizado que consiste principalmente en la antena irradiante que trabaja en la banda milimétrica. Esta antena, al igual que la Nokia utilizada para la medición outdoor ya analizada, no está en venta todavía. Pensando en un futuro donde ambas puedan comercializarse, resulta evidente que serán competidores en el mercado.



Figura 20: NPU055. Fuente: Telecom


## HAAU5213 Macro Site AAU Specification



Frequency Band ( GHZ )	26G: 24.25-27.5 28G: 26.5-29.5	Interface	2*SFP(eCPRI)
IBW	800MHz	Power Supply	-48V DC
OBW	800MHz	Power Consumption	Typical ~465W(DL:UL=3:1)
TRX	4	Volume	~26L
EIRP	65dBm@800M	Weight	~20kg
Antenna Element	768	Sweep Range	H:120°, V:30°
Polarization	+45°, -45°	Cooling	Nature Cooling

Figura 21: HAAU 5213. Fuente: Telecom

## HAAU5323 Macro Site AAU Specification



Frequency Band ( GHZ )	26G : 24.25-27.5 28G: 26.5-29.5	Interface	2*SFP(eCPRI)
IBW	3.25GHz	Power Supply	-48V DC
OBW	800MHz	Power Consumption	Typical ~325W(DL:UL=3:1)
TRX	4T4R@800M 8T8R@400M	Volume	~20L
EIRP	*70dBm	Weight	~16kg
Antenna Element	1024	Sweep Range	H:120°, V:30°
Polarization	+45°, -45°	Cooling	Nature Cooling

Figura 22: HAAU 5213 Especificación. Fuente: Telecom

### 3.2.2 Especificaciones de la Antena

#### **Antena HAAU5323 de Huawei (28 GHz)**

- Rango de Frecuencia: 26.5 GHz – 29.5 GHz.
- Ganancia de NR TDD (Transmisión y Recepción):
  - **33.5 dBi** en configuración **8T8R**.
  - **30.5 dBi** en configuración **4T4R**.

Al referirnos a NR TDD, hablamos del acceso a la red. En este caso, y en general cuando se utilizan las bandas milimétricas, es a través de división de tiempo.

Por el contrario, en las bandas sub 6GHz, se suele usar la división por frecuencia (FDD)

Como sus nombres lo indican, en TDD se puede utilizar el mismo canal de frecuencia para transmitir y recibir, ya que se dividen por slots de tiempo. En FDD, una frecuencia se utilizará para recibir y otra para transmitir, siendo más ineficiente en el uso del espectro, pero mejorando el nivel de latencia. Por último, el TDD es más flexible, ya que puedes ajustar dinámicamente el tiempo dedicado a la transmisión y a la recepción, dependiendo de las necesidades de tráfico.

Cuanto mayor sea la ganancia, mayor será la capacidad de la antena para transmitir señales a largas distancias o superar obstáculos.

En la configuración 4T4R, la antena usa 4 transmisores y 4 receptores, lo que permite la transmisión y recepción simultánea de señales en 4 canales diferentes. Esto mejora la eficiencia y la capacidad de la red, lo que es fundamental para manejar grandes cantidades de tráfico de datos en redes 5G.

- Azimut: De  $-60^\circ$  a  $+60^\circ$

El rango de barrido horizontal de la antena es de  $-60^\circ$  a  $+60^\circ$ , lo que permite ajustar la dirección de la señal en función del área de cobertura deseada.

- Tilt (Inclinación):  $-15^\circ$  a  $+15^\circ$

El ajuste vertical tiene un rango de  $-15^\circ$  a  $+15^\circ$ . Permite enfocarse en áreas específicas o ajustar la cobertura en función del entorno (urbano, suburbano, rural).

- Polarización:  $+45^\circ$  y  $-45^\circ$

Esto es común en redes MIMO, ya que mejora la eficiencia espectral y la calidad de la señal al permitir que las señales transmitidas en dos polarizaciones diferentes no interfieran entre sí.

- Ancho de Haz a Media Potencia (Horizontal):  $6.4^\circ \pm 0.5^\circ$ .

- Ancho de Haz a Media Potencia (Vertical):  $7.3^\circ \pm 0.5^\circ$ .

- Número de Elementos de la Antena: 1024 elementos.

- EIRP (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente)

- 70 dBm en configuración 8T8R.

- 67 dBm en configuración 4T4R.

- $EIRP = P_{TX} + G_{ant} - L_{cable}$   $EIRP = P\{tx\} + G\{ant\} - L\{cable\}$

- $EIRP = P_{TX} + G_{ant} - L_{cable}$

- PTX: Potencia de salida del transmisor (en dBm).
- Gant: Ganancia de la antena (en dBi, decibelios sobre una antena isotrópica).
- Lcable: Pérdidas en el cableado y conectores (en dB, decibelios).
- Dimensiones: 585 mm (alto) x 300 mm (ancho) x 110 mm (profundidad).
- Peso: 16 kg (excluyendo kits de montaje).
- Condiciones de Operación
  - Temperatura de Operación: -40°C a +55°C.
  - Velocidad de Viento de Operación: hasta 150 km/h.
  - Velocidad de Viento de Supervivencia: hasta 200 km/h.
  - Resistencia a Carga de Viento:
    - Frente y Trasera: 275 N.
    - Lateral: 70 N.
  - Humedad Relativa: 5% - 100%.
  - Presión Atmosférica: 70 kPa a 106 kPa.

### 3.2.3 Detalles de las Pruebas

- **Ubicación:** Edificio Telecom (Optima), pruebas realizadas por piso, incluyendo la oficina del CEO en el piso 6.
- **Dispositivo:** Huawei CPE Win Model.
- **Pico de Throughput DL NR:** 2053 Mbps.
- **Pico de Throughput UL NR:** 112 Mbps.

- **Cobertura:** Diferentes puntos dentro del edificio con diferentes valores de cobertura.
- **Efecto de la Cobertura en DL:** Cuando el RSRP cae a -14 dBm, el throughput de usuario DL disminuye en un 57%.
- **Cobertura mmWave:** Algunas áreas en la parte trasera del edificio no tienen cobertura mmWave.

### 3.2.4 Análisis de Resultados

#### 1. Throughput DL NR:

- **Medido:** 2053 Mbps.
- Este valor es muy alto y sugiere un ambiente con condiciones de señal óptimas y probablemente un alto MCS y configuración de MIMO.

#### 2. Throughput UL NR:

- **Medido:** 112 Mbps.
- Este valor también es alto y sugiere buenas condiciones de señal y una eficiencia espectral adecuada para uplink.

#### 3. Efecto de la Cobertura:

- Una disminución del 57% en el throughput DL cuando el RSRP cae a -14 dBm indica una fuerte dependencia de la calidad de la señal en la eficiencia del enlace de datos.

### 3.2.5 Cálculo del Throughput Teórico en Down link (DL)

Asumiremos una eficiencia espectral alta y un ancho de banda suficiente para obtener el throughput medido.

- Throughput (DL) = Total BW × S.E
- 2053 Mbps = Total BW × SE
- Total BW × SE = 2053×106 bits/s

Si asumimos un ancho de banda de 100 MHz y una eficiencia espectral de 6 bits/Hz (sin overhead):

- Throughput (DL) =  $100 \times 10^6 \text{ Hz} \times 6 \text{ bits/Hz}$
- Throughput (DL) =  $600 \times 10^6 \text{ bits/s}$

Para alcanzar 2053 Mbps, se requiere una mayor eficiencia espectral o un mayor ancho de banda total.

$$2053 \times 106 \text{ bits/s} = \text{Total BW} \times 62053 \times 10^6 \text{ \text{bits/s}} = \text{\text{Total BW}} \times$$

$$62053 \times 106 \text{ bits/s} = \text{Total BW} \times 6$$

- Total BW =  $2053 \times 10^6$
- Total BW  $\approx 342.17 \text{ MHz}$

Esto sugiere que se podría estar utilizando una mayor cantidad de ancho de banda agregado o una mayor eficiencia espectral en condiciones óptimas.

Cálculo del Throughput Teórico en Uplink (UL)

Similarmente para UL:

- Throughput (UL) = Total BW × SE
- 112 Mbps = Total BW × SE

Si asumimos un ancho de banda de 100 MHz y una eficiencia espectral de 1.12 bits/Hz (sin overhead):

- Throughput (UL) =  $100 \times 10^6 \text{ Hz} \times 1.12 \text{ bits/Hz}$
- Throughput (UL) =  $112 \times 10^6 \text{ bits/s}$

### 3.2.5 Tipos de pruebas utilizadas en el ensayo

En las pruebas de tasa máxima de throughput se utilizaron varias metodologías y herramientas para verificar el rendimiento en diferentes escenarios. Tener en cuenta este detalle es fundamental para evaluar el rendimiento pico teórico y real de la red en las condiciones específicas de cada sitio.

**CPE (Customer Premises Equipment):** En este caso, se utilizó un equipo de usuario final que simula la conectividad de los usuarios domésticos o de oficina con tecnología 5G.

**Pruebas FTP y SpeedTest:** Estas pruebas son muy comunes para medir el rendimiento de la red, especialmente la velocidad de descarga (DL) y subida (UL). Las pruebas FTP (File Transfer Protocol) simulan la transferencia de archivos, mientras que las pruebas SpeedTest (a través de la aplicación o servidores de OKLA) miden la velocidad en tiempo real de la conexión. Estas pruebas tienen como ventaja su flexibilidad y su sencillez para medir, interpretar y repetir. Como desventaja son limitadas, ya que no permite monitorear las señales de la interfaz aérea ni los contadores clave de la red como el rendimiento de capa física.

**Pruebas con SW de Huawei + PC + CPE + Servidor FTP interno:** Monitorea información clave como señales de la interfaz aérea (air interface) y la programación de recursos en tiempo real, lo que permite una mayor visibilidad del rendimiento de la red a nivel de capa física. Esto es crucial en etapas tempranas de despliegue de la red 5G, cuando no siempre se dispone de teléfonos móviles comerciales compatibles. Por otro lado, debido al adaptador de red del CPE y a la velocidad de lectura/escritura del disco duro de la computadora, la velocidad máxima puede estar entre 300 y 1000 Mbps. Esto puede no reflejar el máximo potencial de la red.

**PHU (Protocol Handling Unit):** Es un sistema para manejar las señales de protocolo y recopilar información clave de la capa de radio, así como monitorear la programación de recursos en tiempo real. Las pruebas están limitadas a terminales inteligentes y CPE de Huawei, lo que puede no representar todos los escenarios posibles con dispositivos

comerciales.

### *3.2.5.1 Prueba de inyección de paquetes (Packet Injection Test)*

Separamos esta prueba por ser la de mas relevancia y quizás la que necesite explicarse con mayor profundidad.

La capa MAC es parte de la capa de enlace de datos en el modelo OSI, encargada de controlar el acceso al medio de transmisión en una red de comunicación. En el contexto de redes 5G, la capa MAC es responsable de asignar recursos de radio (es decir, bloques de recursos, RBs) para la transmisión de datos y de gestionar la programación de los datos que se envían desde las capas superiores (como la capa de control de radio, RLC).

La inyección de paquetes de relleno en la capa MAC es una técnica utilizada para simular el tráfico y probar el rendimiento de la red sin depender de los datos reales del usuario. Los paquetes de relleno se utilizan para llenar cualquier vacío cuando no hay suficiente tráfico real para aprovechar al máximo los recursos de transmisión programados.

El proceso de la inyección de paquetes consta de los siguientes pasos:

1. **Selección de TBS (Transport Block Size):** Según las especificaciones de 3GPP, si el tráfico de datos que recibe la capa MAC desde la capa RLC (Radio Link Control) es insuficiente, el gNodeB selecciona un tamaño de bloque de transporte (TBS, Transport Block Size) basado en el esquema de modulación y la cantidad de bloques de recursos (RBs) disponibles para la programación.
2. **Relleno de bits adicionales:** Si el volumen de tráfico real es menor que el TBS programado, los bits restantes en el TBS se rellenan con bits de padding (relleno).

Estos bits no contienen datos útiles y simplemente ocupan espacio para asegurarse de que los recursos de transmisión asignados se utilizan completamente.

3. **Descartar los bits de relleno en el UE (Equipo del Usuario):** Cuando el equipo de usuario (UE) recibe estos bits de padding, los descarta, ya que no contienen datos reales. Sin embargo, estos bits se transmiten para mantener el proceso de programación en la capa MAC y asegurar que el enlace de radio se utilice de manera eficiente.

Esta técnica permite verificar si la programación en la interfaz aérea funciona correctamente bajo condiciones ideales. Al inyectar paquetes artificiales, es posible medir el rendimiento de la interfaz de radio (capacidad de transmisión, uso de los recursos, eficiencia de la programación) sin interferencias de factores externos como el tráfico real de usuarios o la sobrecarga de las capas superiores (como IP, TCP, FTP, etc.).

Se recomienda utilizar laptops o dispositivos de prueba con características modernas (como procesadores más rápidos y mejor velocidad de lectura/escritura) para obtener resultados precisos y evitar limitaciones que no reflejen el rendimiento real de la red.

Estas metodologías ofrecen una buena combinación para evaluar el rendimiento teórico y real de la red 5G mmWave bajo diferentes condiciones y equipos, destacando la importancia de optimizar tanto el hardware del equipo de prueba como la configuración de la red.

Durante la prueba, se monitorean varias métricas importantes, como la tasa de transmisión en las capas MAC y físicas, el número de veces que se programan recursos, la cantidad de bloques de recursos (RBs) asignados, el esquema de modulación y codificación (MCS) y el Rank del UE.

Por otro lado, este tipo de prueba se realiza principalmente en la fase inicial, en celdas que aún no están en operación comercial, por lo que no refleja el rendimiento en un entorno real de uso.

### Resultados esperados y análisis de limitaciones

Una de las limitaciones a mencionar es relativa al hardware; Las características del equipo utilizado para las pruebas (por ejemplo, la CPU del PC o el puerto Ethernet del CPE) afectan el rendimiento alcanzado. Un PC con procesador Intel Core i7 y 16GB de RAM logra un mejor rendimiento en las pruebas que un PC más antiguo con procesador Intel Core i5 y 4GB de RAM.

En la prueba con un ancho de banda de 200 MHz:

- El Intel Core i5 alcanzó un throughput máximo en DL de 301 Mbps.
- El Intel Core i7 alcanzó un throughput máximo en DL de 975 Mbps.

En la prueba con un ancho de banda de 400 MHz, el Intel Core i7 alcanzó un throughput máximo de 1007 Mbps.

Para las pruebas de inyección de paquetes, donde no se consideran las limitaciones de hardware, se alcanzaron tasas pico de throughput cercanas a los máximos teóricos:

- Con 200 MHz de ancho de banda, se alcanzó un throughput máximo en DL de 1083 Mbps.
- Con 400 MHz, el throughput máximo fue de 2163 Mbps.

### 3.3 Simulación técnica

Ya vistos los dos trabajos de medición realizados, con sus características, componentes necesarios y prestaciones, los utilizamos de base para simular una nueva implementación en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Antes de comenzar con los números, hay que tener en cuenta varios factores importantes que en caso de no contemplarlos pueden dar distintos resultados tanto técnicos como económicos. La red por implementar es una red NSA donde la infraestructura y el soporte de la red LTE ya existente serán cruciales para el buen funcionamiento.

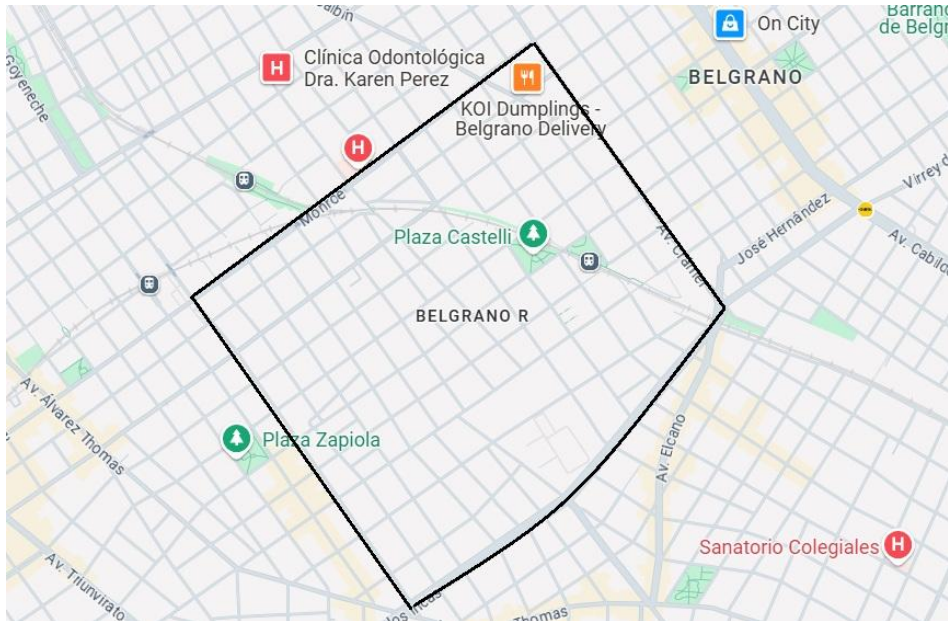
#### **3.3.1 Ubicación**

Como primera instancia, debemos seleccionar una zona de la ciudad en la que cualquier empresa proveedora de servicios quiera implementar su red 5G mmWave para sus usuarios. Esta elección no fue al azar, sino que se priorizó una zona de la ciudad donde los residentes tengan un alto poder adquisitivo. Aun sin analizar en profundidad la parte económica, podemos decir que la implementación requiere inversión, que luego se traslada al precio que paga el usuario por un mejor servicio.

En la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, existen barrios en los que el alto poder adquisitivo de quienes viven es una cuestión sabida y casi obvia a causa de los valores inmobiliarios.

Por otro lado, es importante diferenciar entre las zonas donde reside esta parte de la población, y las zonas en las que una gran cantidad de gente, cualquiera fuese su situación económica, trabaja pero no vive. Que sea de alto tránsito, y como consecuencia de gran demanda de datos es crucial para que el servicio diferenciar obtenga sentido. Por supuesto que este análisis es necesario ya que entendemos que las posibilidades de que un usuario que esta de paso pague por un servicio de mayor calidad son menores que si nos referimos a un residente.

Dada esta introducción, se decidió utilizar para nuestra simulación la zona residencial de Belgrano, conocida como Belgrano R. Es aquí donde se combina una gran cantidad de tráfico durante el día, y también residentes de alto nivel adquisitivo. La zona marcada en la imagen posterior se encierra entre las calles Cramer, Avenida de Los Incas, Holmberg y Monroe.



**Figura 23: Zona delimitada para implementación de servicio (Google Maps)**

Como mencionamos anteriormente, la red a simular cuenta con la infraestructura LTE existente como base. A través de información recolectada en el sitio web <http://cellmpaper.com> y contrastada con el equipo de Telecom, obtuvimos una representación gráfica de las instalaciones 4G en la actualidad.

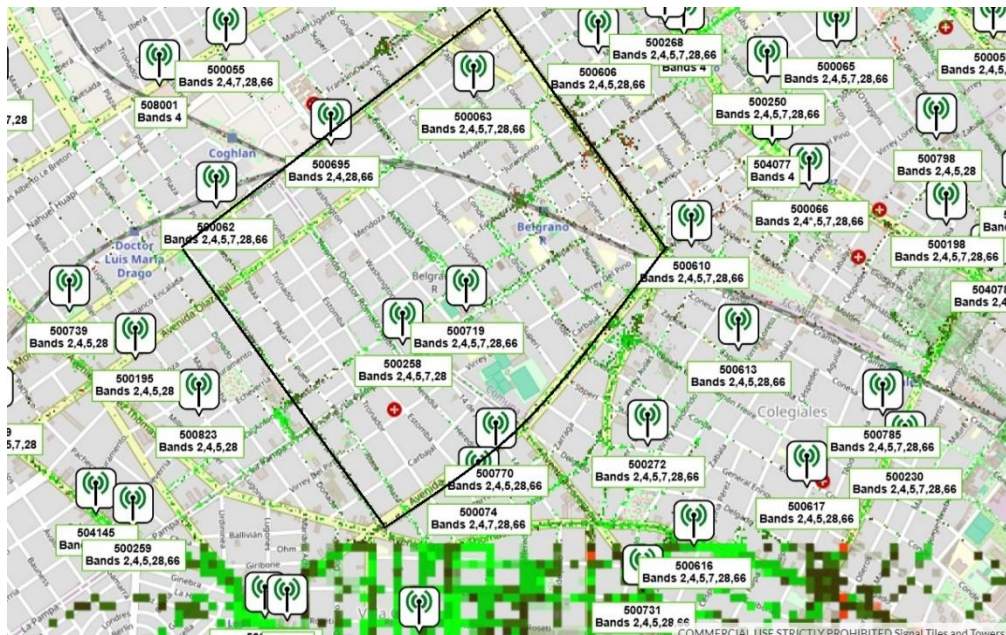


Figura 24: Antenas de la empresa Telecom. Fuente: CellMPaper

Cada nodo tiene en su etiqueta las diferentes bandas en las que trabaja y brinda servicio.

- Banda 2: 1900 MHz
- Banda 4: 1700/2100 MHz
- Banda 5: 850 MHz
- Banda 7: 2600 MHz
- Banda 28: 700 MHz
- Banda 66: 17000/2100 MHz

Algunos factores importantes a la hora de realizar la estimación de costos de operación serán abordados. En primer lugar, en el costeo no se tendrá en cuenta la adquisición del espectro radioeléctrico de frecuencias ni el backhaul, ya sea de fibra óptica o de cable coaxial. Este ultimo se da como adquirido ya que se cuenta con la estructura existente para el soporte de la red LTE.

La cantidad de nodos necesarios para cubrir la superficie a considerar fue calculada, en

primera instancia a través de cálculos respectivos a las distancias de cobertura y contrastando en segundo lugar con ingenieros de Telecom.

Al no existir datos oficiales sobre la superficie que abarca el barrio, se estimaron cálculos de la siguiente manera:

- Cramer – Holmberg: 1400 metros
- Monroe – De Los Incas 1000 metros

Si bien no es un rectángulo perfecto porque la Avenida de los Incas toma una forma de curva, puede aproximarse de esa manera sin terminar en un error grave.

- 1430 m x 1000 metros  $\approx$  1.42 km<sup>2</sup>

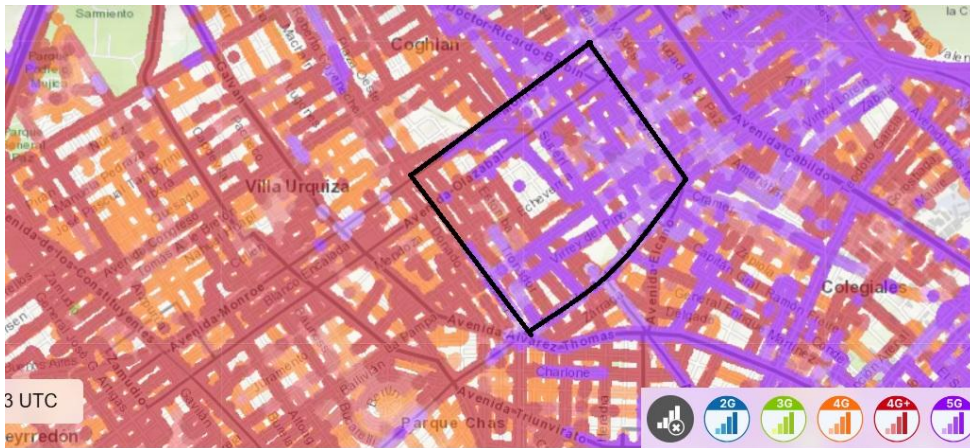
Por otro lado tenemos la capacidad de las antenas. Los nodos tendrán tres antenas cada uno generando, a nivel de una dimensión, celdas de cobertura circulares de 200 mts de radio (Se tiene en cuenta un alcance pesimista al no estar en condiciones ideales ni con LOS asegurado). Comenzamos con una aproximación matemática, en la cual dividimos la superficie total en la de alcance por un nodo.

- $1.42 \text{ km}^2 / (\pi \times r^2) = 1.42 \text{ km}^2 / 0.1256 \text{ km}^2 = 12 \text{ nodos}$

A este número, ahora debemos analizarlo según la demanda y el contexto. Tanto para aumentar la cantidad de usuarios que se puedan conectar a través de la red, como para evitar cualquier tipo de interferencia, que suele ser importante. El margen calculado es de multiplicación por 3 (tres) del resultado obtenido matemáticamente. Esto resulta en una cantidad total de 36 nodos. Con este número nos acercamos al número que en primera instancia habían propuesto los ingenieros de Telecom

- Redundancia ante bloqueos físicos
- Alta densidad de usuarios simultáneos esperados
- Mejora en la calidad de servicio (QoS) y cobertura indoor parcial
- Posibilidad de direccionar más haces (beamforming) con más antenas
- Mejor distribución sectorial

Como bien sabemos, gran parte del servicio se sostendrá gracias a la señal 4G ya existente, la cual ya existe. Vemos a partir de información obtenida del portal la cobertura al día de hoy de la tecnología 4G y 5G en bandas sub 6GHz.



**Figura 24: Cobertura servicio internet móvil. Fuente: CellMapps**

No se tendrá en cuenta una posible mejora futura; la instalación de small cells en zonas específicas, donde la señal quede muy o totalmente bloqueada.

Por ultimo, una aclaración que no afecta los cálculos y estimaciones, pero que vale la pena mencionar. Los equipos de telefonía celular de los usuarios no necesariamente cuentan con la capacidad de conectarse a estas bandas. En estos casos, el servicio que recibirá el usuario será el mismo que recibe antes de la implementación, en el mejor de los casos.

En cada nodo, tenemos dos opciones posibles de implementación. Llamaremos por sitio existente a un nodo que cuenta con la estructura ya instalada junto con las condiciones municipales y de energía cubiertas. En estos casos, lo que se requiere es la conectividad hacia la red. Los costos a considerar son menos por ser solo las antenas y placas controladoras nuevas. En caso de tener que hacer la instalación de un sitio nuevo desde cero, se requiere tener en cuenta en los gastos lo mencionado anteriormente. Tomando en cuenta la necesidad

de generar mayor cobertura para dar servicio con esta nueva tecnología, se intuye la necesidad de generar nuevos puntos de accesos o sitios. Como vimos anteriormente, los nodos ya existentes que tendremos en cuenta son los brindados por CellMPaper. Tendremos así 8 actualizaciones y 28 nodos completos (En total 36 nodos).

En la red Non Stand Alone (NSA) el 5G y 4G conviven. El núcleo de la red 5G tomara decisiones inteligentes sobre en qué red debe conectarse cada dispositivo, basado en varios factores. La red puede preferir conectar a los dispositivos que están en movimiento (como autos, personas caminando o transportes públicos) a la red LTE. Esto se debe a que la señal en las bandas de LTE (sub-6 GHz) tiene un mayor alcance y mejor capacidad para manejar la movilidad, con menos riesgo de interrupciones en la conexión.

Por otro lado, los dispositivos que están quietos (como los ubicados en oficinas, hogares o áreas públicas) pueden ser conectados a la red 5G en la banda milimétrica, que ofrece velocidades mucho más altas. Como estos dispositivos no están en movimiento, los problemas de interrupciones por cambio de celdas o por obstáculos (que son más comunes en la banda milimétrica) se reducen.

Si el dispositivo tiene una buena calidad de señal en la banda milimétrica (señal fuerte y sin bloqueos), puede permanecer conectado en 5G. Si la calidad de la señal disminuye (como en áreas densamente urbanas con muchos obstáculos), se puede derivar el tráfico a LTE.

Recordemos que en el modo NSA (Non-Standalone), es común que los dispositivos estén conectados simultáneamente tanto a 4G LTE como a 5G. El control de la señalización se maneja a través de LTE, mientras que los datos de alta velocidad (como descargas grandes o transmisión de video) se envían a través de la red 5G.

En este caso, dependerá de la tecnología con la que cuenten los usuarios, para poder utilizar

"dual connectivity" combinando los beneficios de ambas redes. Por ejemplo, un usuario en movimiento podría tener sus datos críticos gestionados por LTE, mientras que, cuando el dispositivo se detiene, la transferencia de datos más intensiva podría pasar a la red milimétrica de 5G.

El sistema puede gestionar handoffs (cambios de conexión) entre LTE y 5G de manera fluida.

Cuando un dispositivo en movimiento entra en una zona con buena cobertura de banda milimétrica, podría conectarse temporalmente a la red 5G para aprovechar su alta velocidad. Si se detecta que el dispositivo está en movimiento rápido o si la calidad de la señal 5G no es suficiente, la red podría hacer un "handover" a LTE para mantener una conexión estable.

### 3.3.2 Población

En el inicio de esta sección nos referimos a la elección de una zona de alta densidad poblacional. Es en este apartado donde abordaremos el tema con mayor profundidad.

Para estimar a cuántos usuarios hay que brindarle servicio, debemos analizar datos poblacionales y realizar cálculos según el área determinada.

Basándonos en datos obtenidos en el último Censo Nacional en 2022, en la Comuna 13 de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, que incluye los barrios de Belgrano, Núñez y Colegiales, vive una población total de 265.199 habitantes. Aunque no se dispone de datos desglosados por barrios individuales en los resultados del censo, estimamos una zona rectangular con lados de 1,4 km (Cramer y Holmberg) y de 1km (Monroe y Av. de Los Incas).

Con una densidad poblacional aproximada de 18.650 habitantes por km<sup>2</sup> para Belgrano, la población aproximada en esta zona sería:

$$1.42 \text{ km}^2 \times 18.650 \text{ habitantes/km}^2 = \mathbf{26.483 \text{ habitantes}}$$

Nuestro siguiente punto para analizar es la Población flotante. Este concepto se utiliza en

estudios urbanos y de telecomunicaciones para estimar el número de personas que, sin residir en una zona, pasan una cantidad significativa de tiempo allí durante el día. Es común en áreas con alta actividad comercial, educativa o de transporte, donde la afluencia de personas supera ampliamente a los residentes locales. En áreas urbanas densamente concurridas como Belgrano, la población flotante suele ser entre 1,5 a 2,5 veces la población residente, dependiendo de la cantidad de comercios, oficinas, y puntos de interés. Dado que Belgrano es una zona comercial y de tránsito, estimaremos un multiplicador de 1.5.

- $26483 \times 1.5 = 39.725$  usuarios

No tendremos en cuenta eventos particulares esporádicos que puedan generar una demanda superior.

### 3.3.3 Usuarios

Para evaluar las variables posibles de la implementación de una red con las características deseadas, es fundamental analizar la participación de mercado de los principales operadores de telefonía móvil y proveedores de internet fijo en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA).

Según datos publicados por *TeleSemana.com*, las principales operadoras y sus cuotas de mercado en CABA son las siguientes:

- **Claro (América Móvil):** 39,4%
- **Movistar (Telefónica):** 26,8%
- **Personal (Telecom Argentina):** 33,4%
- **Operadores Móviles Virtuales (OMV):** 0,4%

Ya habiendo realizado el análisis poblacional de potenciales usuarios y tomando como caso de ejemplo el de Personal, tendríamos 13.506 usuarios.

Por otro lado según informes de la empresa Telecom, el promedio de ingreso por mes de usuarios (ARPU) para el primer cuatrimestre de 2024 fue de \$5458.9 por cliente. A dólar actual serian u\$s 5,46.

## 4 Análisis Económico

### 4.1 Capex

Comenzaremos con el cálculo de los elementos (Hardware) necesarios para la cobertura correspondiente.

Por cada nodo donde se instalen irradiantes, se colocan tres antenas con una direccionalidad de 120 grados cada una. Si bien el bakchoul se asume como existente, ya que en la zona hay fibra y servicios al momento, no debemos confundirnos con el hecho que esté ya la estructura para la colocación de las antenas. Esta situación produce un gran ahorro en los costos de implementación, pero es en el menor de los casos donde sucede.

En los casos en los que la instalación es completa, debemos tener en cuenta:

- Antenas
- gNodeB / DU
- Fijaciones, conectores, cables
- Poste, torre o tótem
- Gabinetes
- Sistema de suministro eléctrico y refrigeración
- Mano de obra

En los casos en los que contemos con el nodo existente, se necesitará una actualización, la cual tiene un costo considerablemente menor al del nodo completo.

Las antenas utilizadas en las mediciones de Telecom no son artículos que estén en venta al público, por lo que los valores exactos no son accesibles. Mediante comunicaciones y consultas realizadas con el personal de Telecom y Huawei, haremos una aproximación que creemos, es bastante acertada. El nodo (todos los materiales excluyendo las antenas) se calcula en un costo de 70.000 USD. Cada antena costaría aproximadamente 20.000 USD. Esto

nos da un total de 130.000 USD por cada nodo instalado, ya sea de la marca Huawei o Nokia.

Para concluir con el costo de los nodos, estimaremos un descuento por cantidad que suele darse en las negociaciones para este tipo de proyectos.

Como mencionamos anteriormente, la cantidad necesaria es de treinta y seis nodos para cubrir toda la zona. De este numero, se descuentan los nodos que ya posee la empresa y en los que solo se realizara una actualización, de un costo menor. Por el lado de las antenas, que son tres en cada sitio, serán en total 108.

Finalmente, teniendo en cuenta la magnitud del proyecto total, en el que suelen aplicarse descuentos por cantidad, obtendremos un precio de 65.000 USD para los nodos y 22.500 USD para cada antena.

En cuanto a la mano de obra para la instalación, dividimos en los sitios donde ya hay un nodo instalado 4G LTE (Actualización), y uno en donde no hay nada (Instalación nueva).

Por ultimo se incluyen las licencias, calculadas en 3500 USD por nodo.

Elemento	cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Nodo Huawei / Nokia	29	\$ 65.000,00	\$ 1.885.000,00
Licencias	38	\$ 3.500,00	\$ 133.000,00
Antena Huawei / Nokia	114	\$ 22.500,00	\$ 2.565.000,00
Instalación	29	\$ 60.000,00	\$ 1.740.000,00
Actualización	9	\$ 25.000,00	\$ 225.000,00
<b>Total</b>			<b>\$ 6.548.000,00</b>

Figura 25: Calculo de CAPEX total. Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Opex

Por su parte, el Opex se basa en el soporte y mantenimiento de la red, tanto a nivel software como

hardware. Este monto no es aleatorio, sino que se calcula en base a los profesionales necesarios para el mantenimiento de los equipos. Como todo servicio de telecomunicaciones, este no puede sufrir interrupciones, por lo que se trabaja con la modalidad de guardias y visitas programadas y de urgencia.

Lo dividimos en tres tipos. En primer lugar, tenemos el mantenimiento del Hardware, estimado como el 20% de la inversión inicial anualizada. El mantenimiento del Software se estima como el 10%. Por último, los gastos generados por soporte administrativo y ventas, se desprende del valor de los ingresos por el abono. Utilizaremos el 15% del mismo.

El cálculo de los costos de mantenimiento irá decreciendo en un 10% año a año. Esta suposición está basada en el avance de la tecnología y mejora en la eficiencia de la empresa. Al día de hoy, no sabemos con exactitud cuál puede ser la injerencia de la inteligencia artificial en esta área, pero entendemos que es una gran aliada para la reducción de costos operativos en todas las empresas que la implementen. Este decrecimiento exime al costo administrativo y ventas, ya que el mismo es dependiente del ingreso por abonos que será creciente.

#### 4.3 Análisis FODA

Utilizando la herramienta de análisis FODA, podemos ver que surgen los siguientes puntos:

##### **Fortalezas (Strengths)**

- **Alta capacidad y velocidad:** La banda milimétrica permite velocidades extremadamente rápidas y un mayor ancho de banda, ideal para soportar aplicaciones de alta demanda como IoT, realidad aumentada, y transmisión de video en alta definición.

- **Densificación de redes:** Posibilita la instalación de más estaciones base, mejorando la cobertura en áreas densamente pobladas.
- **Innovación tecnológica:** Ser pioneros en la implementación de 5G en banda milimétrica otorga una ventaja competitiva en el mercado, posicionando a la empresa o país como líder en tecnología.

## Oportunidades

- **Expansión del ecosistema 5G:** Creación de nuevas aplicaciones y servicios (como ciudades inteligentes, vehículos autónomos, telemedicina) que pueden aprovechar las capacidades de 5G.
- **Crecimiento económico:** La implementación de 5G puede impulsar sectores como manufactura avanzada, salud, y transporte, contribuyendo al desarrollo económico.
- **Apoyo gubernamental:** Incentivos regulatorios y financieros para el despliegue de nuevas tecnologías de telecomunicaciones.



Figura 26: Casos de uso de 5G. Fuente: Telefónica

## Debilidades

- **Limitada cobertura:** Las ondas milimétricas tienen un alcance limitado y son vulnerables a la interferencia por obstáculos como edificios o incluso el clima, lo que exige una mayor cantidad de estaciones base.
- **Costos elevados:** El despliegue de infraestructura de 5G en banda milimétrica requiere una inversión significativa en equipos, instalación y mantenimiento, además de la densificación de la red.
- **Unidad de Negocio:** Falta de negocios a corto y mediano plazo para aprovechar la tecnología.

## Amenazas

- **Competencia tecnológica:** Otras tecnologías como el 5G en bandas más bajas o futuras mejoras en redes 4G podrían ser competidoras.
- **Retos burocráticos:** Complejidad municipal/gubernamental para avanzar con la instalación de nuevas antenas en el territorio.
- **Rechazo social:** Preocupaciones sobre el impacto de las radiaciones y la oposición comunitaria pueden dificultar el despliegue en algunas áreas.

### 4.4 Análisis Rentabilidad

Las inversiones en el rubro de las comunicaciones suelen tener una mirada de mediano y largo plazo. Es por esta razón, que los análisis que se presentaran a continuación se harán con una extensión de 13 años. Para ello, debe tenerse en cuenta la inversión inicial que se busca recuperar y la ganancia mensual o anual.

Ya habiendo realizado el análisis poblacional de potenciales usuarios y tomando como caso de

ejemplo el de Personal, tendríamos 6229 usuarios para brindarles servicio.

En nuestro caso haremos un análisis de 13 años. Este es un numero promedio para los análisis en la industria de las Telecomunicaciones.

#### 4.5 Análisis VAN y TIR

Para poder plasmar el análisis de rentabilidad de una manera objetiva y comparable, estilizaremos estas dos herramientas: VAN y TIR.

El Van por su parte, no es mas que la diferencia entre el valor presente o actual de los flujos futuros que esperamos recibir al realizar una inversión y el valor de esa misma inversión inicial.

En Telecomunicaciones, las inversiones suelen analizarse en entre 10 y 15 años. Para tomar un numero intermedio, utilizaremos 13 periodos anuales.

Para traer eso flujos de efectivo futuros (FE) a valor actual (VA) usamos una tasa de descuento del 8%, que viene a ser el rendimiento que se espera recibir por colocar nuestros recursos en esta inversión. Este valor esta estrechamente relacionado con las tasas de interés internacionales con mayor seguridad en el mundo.

Por su lado, la TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero, y que viene a indicarnos cuanto se ha ganado realmente en con la inversión. La TIR es en realidad la máxima rentabilidad que puede ganarse en un proyecto de inversión.

Comenzamos analizando y desglosando el CAPEX o inversión inicial. El numero total es de USD 6.548.000 teniendo en cuenta nodos, licencias e instalación (completa y actualización). El total de esta se amortizara durante los 13 periodos para deducir impuestos.

Calculamos los ingresos según lo descrito en el capitulo anterior. Ya hemos hecho el análisis

poblacional y de mercado de las empresas de telecomunicaciones. Vale recordar que los periodos de análisis son anuales.

- $6229 \times 5.46 \text{ USD} \times 12 = \text{USD } 408.124,08$

A partir de este numero que nos da el ingreso anual, suponemos un incremento en cada periodo del 10%, teniendo en cuenta un optimismo en cuanto al crecimiento de ventas y usuarios como consecuencia de la mejora en el servicio.

Por parte del precio que pagara el abonado individualmente, decidimos mantenerlo teniendo en cuenta el acompañamiento general de los precios a la cotización del dólar en Argentina.

Con todos estos datos calculados, realizamos el flujo de caja.

FLUJO DE CAJA														
CONCEPTO/CUENTA	PERIODO DE EVALUACION													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	\$ 6.548.000,00													
<b>+ INGRESOS</b>	\$ 408.124,00	\$ 448.936,40	\$ 493.830,04	\$ 543.213,04	\$ 597.534,35	\$ 657.287,78	\$ 723.016,56	\$ 795.318,22	\$ 874.850,04	\$ 962.335,04	#####	#####	#####	#####
Abono	\$ 408.124,00	\$ 448.936,40	\$ 493.830,04	\$ 543.213,04	\$ 597.534,35	\$ 657.287,78	\$ 723.016,56	\$ 795.318,22	\$ 874.850,04	\$ 962.335,04	#####	#####	#####	#####
<b>- EGRESOS</b>		\$ -212.326,29	\$ -203.337,38	\$ -196.471,74	\$ -191.639,46	\$ -188.771,91	\$ -187.820,75	\$ -188.757,31	\$ -191.572,07	\$ -196.274,41	\$ -202.892,47	\$ -211.473,28	\$ -222.083,01	\$ -234.807,47
OPEX 1: Mantenimiento HW (20%del costo de activos)		\$ -100.738,46	\$ -90.664,62	\$ -81.598,15	\$ -73.438,34	\$ -66.094,50	\$ -59.485,05	\$ -53.536,55	\$ -48.182,89	\$ -43.364,60	\$ -39.028,14	\$ -35.125,33	\$ -31.612,80	\$ -28.451,52
OPEX 2: Mantenimiento SW (10%del costo de activos)		\$ -50.369,23	\$ -45.332,31	\$ -40.799,08	\$ -36.719,17	\$ -33.047,25	\$ -29.742,53	\$ -26.768,27	\$ -24.091,45	\$ -21.682,30	\$ -19.514,07	\$ -17.562,66	\$ -15.806,40	\$ -14.225,76
OPEX 3: Gastos Administrativos y Ventas		\$ -61.218,60	\$ -67.340,46	\$ -74.074,51	\$ -81.481,96	\$ -89.630,15	\$ -98.593,17	\$ -108.452,48	\$ -119.297,73	\$ -131.227,51	\$ -144.350,26	\$ -158.785,28	\$ -174.663,81	\$ -192.130,19
<b>UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS</b>		\$ 195.797,71	\$ 245.599,02	\$ 297.358,30	\$ 351.573,58	\$ 408.762,44	\$ 469.467,03	\$ 534.259,25	\$ 603.746,14	\$ 678.575,63	\$ 759.442,57	\$ 847.095,27	\$ 942.342,40	#####
AMORTIZACION DEL 50% DEL CAPITAL INICIAL														
Activo 1	\$ 6.548.000,00	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31	\$ 503.692,31
<b>UTILIDAD CON AMORTIZACION</b>		\$ -307.894,60	\$ -258.093,29	\$ -206.334,00	\$ -152.118,73	\$ -94.929,87	\$ -34.225,27	\$ 30.566,95	\$ 100.053,84	\$ 174.883,32	\$ 255.750,26	\$ 343.402,96	\$ 438.650,09	\$ 542.368,17
- IMPUESTOS (IIGG 35%)		\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 10.698,43	\$ 35.018,84	\$ 61.209,16	\$ 89.512,59	\$ 120.191,04	\$ 153.527,53	\$ 189.828,86
<b>UTILIDAD FINAL</b>		\$ 195.797,71	\$ 245.599,02	\$ 297.358,30	\$ 351.573,58	\$ 408.762,44	\$ 469.467,03	\$ 523.560,82	\$ 568.727,30	\$ 617.366,47	\$ 669.929,98	\$ 726.904,23	\$ 788.814,87	\$ 856.231,62
<b>VAN</b>		\$ 181.294,17	\$ 210.561,57	\$ 236.052,61	\$ 258.417,08	\$ 278.196,85	\$ 295.843,87	\$ 305.492,71	\$ 307.265,66	\$ 308.836,94	\$ 310.307,20	\$ 311.756,77	\$ 313.249,24	\$ 314.834,59
\$ 2.915.890,75														

Figura 27: Calculo de VAN. Fuente: Elaboración propia

Una vez plasmado el flujo de caja, calculamos el VAN de la siguiente manera:

$$VAN = \sum \frac{\text{Flujo de Caja}_t}{(1+r)^t} - \text{Inversión Inicial}$$

T: periodo

R: tasa de interés. Para este caso, tomamos un 8% anual.

**VAN = -\$ 2.837.577,35**

El TIR es la tasa de interés necesaria para que el VAN sea igual a cero.

$$\text{VAN} = -I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0$$

A través de múltiples iteraciones, modificando en este caso el valor “r” en la ecuación anterior, llegamos al siguiente resultado.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) se calcula encontrando la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) de todos los flujos de efectivo de una inversión sea igual a cero. En términos más simples, la TIR es la tasa de interés a la que una inversión ni gana ni pierde dinero

- **TIR= 0,004436314**

## 5 Resultados

Una vez realizados los cálculos de VAN y TIR, pasamos a interpretarlos para poder obtener información a través de ellos.

En primera instancia calculamos el Valor Actual Neto (VAN), utilizando la inversión inicial como amortización para reducir el balance imponible. El resultado fue claramente negativo. Nos da una pérdida casi igual a la mitad de la inversión inicial. Que quiere decir esto? La primera impresión es de no conveniencia del proyecto.

Cuando complementamos el resultado con la TIR, vemos que esta es positiva, pero muy cercana a cero.

Esto significa que el dinero invertido se recupera, pero la TIR cercana a cero muestra que el flujo total resulta estar por encima, pero muy cercana, a la inversión inicial. Recordemos que el flujo total es de 13 años.

Es importante remarcar que los ingresos por abonados, se estiman crecientes en un 10% periodo tras periodo. A su vez, los costos de mantenimiento se reducen, en lo que se supone una mejora en tecnologías y eficiencia. Estas estimaciones, calculadas de manera optimista, no logran superar el obstáculo de la alta inversión inicial y el ingreso por abono insuficiente.

## 6 Mejoras y nuevo escenario

Ante los resultados obtenidos en el análisis económico del modelo inicial —en el que se proyectaba un despliegue de red 5G mmWave a pequeña escala y residencial— y considerando que el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) resultaron negativos, se propone una reformulación estratégica del enfoque, centrada en la segmentación del servicio y la optimización del retorno por usuario.

El nuevo modelo de negocio se basa en ofrecer un servicio exclusivo que incluya 5G en banda milimétrica (mmWave) para usuarios VIP dentro de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Este servicio está orientado a un público de alto valor, dispuesto a pagar por una experiencia diferencial de conectividad, incluso en situaciones de alta congestión donde las redes móviles tradicionales pierden calidad. Es decir, si bien el usuario objetivo es el residente en CABA, la red no se desplegará a lo largo y ancho de la ciudad, sino que se enfocara en los contextos donde los servicios de todas las empresas proveedoras sufren fallas.

Para este nuevo escenario mantendremos los mismos conceptos fundamentales que para el anterior. Al habernos basado en primera instancia en mediciones de la empresa Telecom, seguiremos esta misma línea. La red móvil actual en CABA ya ofrece una cobertura aceptable en condiciones normales. Sin embargo, el diferencial de este nuevo modelo reside en garantizar una calidad de servicio igual o superior en escenarios de alta demanda de tráfico —por ejemplo, en estadios y recitales.

La propuesta de implementación esta basada en un despliegue selectivo de nodos 5G mmWave en espacios críticos. Se eligen dos sitios estratégicos de la ciudad, el Estadio Monumental de River Plate (Mas Monumental) y el estadio Movistar Arena. Esta elección no

es azarosa, sino todo lo contrario. El estadio Monumental hoy en día es el de mayor capacidad en el país (Aproximadamente 84.000 personas). Por su parte, el Movistar Arena no tiene una gran capacidad, pero si es el estadio con mayor cantidad de eventos masivos en Buenos Aires. En todos los estadios de futbol tenemos eventos deportivos cada 15 días, y en River se suman los recitales musicales. En el año 2023 hubo 7 recitales, en 2024 tres y para este año hay, entre programados y ya realizados, cinco eventos. Esto, veremos después, hará que el estadio sea el entorno mas desafiante, pero no el mas rentable, ya que si bien tiene máxima densidad de personas, se dan de manera muy espaciada en el tiempo.

Por el lado del Movistar Arena, la situación es diferente. Su capacidad máxima es de 15.000 personas, pero la cantidad de eventos anuales es enormemente mayor. En 2024, se hicieron un aproximado de 60 shows. Esto se debe a que es el único estadio cerrado e insonorizado de la ciudad, por lo que cuenta con todos los permisos gubernamentales para albergar eventos en cualquier día de la semana. Además, tiene una ubicación estratégica, lo que la hace muy atractivo para todos los habitantes del Gran Buenos Aires, pero mas aun para los de la Capital Federal.

Mas allá de lo que provoque en el publico, lo importante para nosotros es que en estas dos ubicaciones, se cuenta con infraestructura de fibra y backhaul para soportar un incremento en el flujo de datos.

Este modelo permitirá mejorar la viabilidad económica del proyecto, al reducir significativamente el CAPEX requerido mediante una implementación puntual y dirigida, y al mismo tiempo incrementar el ARPU y el publico al que va dirigido mediante la oferta de un servicio diferenciado con un posicionamiento premium.

En términos de marketing, el enfoque puede sustentarse en slogans como “En ningún lugar de la ciudad perdés señal” o “Incluso donde todos se caen, vos seguís conectado”, apuntando

tanto al rendimiento técnico como al prestigio asociado a un servicio de elite.

## 6.1 Población y usuarios

La Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) tiene una población de 3.121.707 habitantes según el censo de 2022. Tomando como base el publico de la empresa Telecom, que abarca el 33.4%, debemos calcular cuantas personas estarían interesadas en contar con un servicio exclusivo. Si bien este porcentaje se tendrá en cuenta, hay que contemplar que una implementación de este tipo, al día de hoy, no contaría con competencia. Esto es muy importante ya que en primera instancia el publico apuntado es el de todas las empresas proveedoras.

- Clientes corporativos: Esta es la opción inicial y de despegue del proyecto. Una muy buena opción para empresas de medios audiovisuales que suelen cubrir eventos, shows o cualquier tipo de manifestación masiva de este tipo.
- Clientes personales Premium: Orientado a las personas de alto poder adquisitivo, que busquen tener el mejor servicio posible sin importar su precio. En esta sección poblacional, puede no ser necesario que frecuenten eventos masivos. El solo hecho de dar un servicio de mayor exclusividad hace que lo prefieran por sobre el servicio tradicional.
- Clientes habituados a eventos masivos: En esta sección nos quedaremos solamente con las personas cuyo interés sea una cobertura en eventos masivos, pero a nivel personal. Así podremos diferenciar frente a los clientes corporativos. En este tipo de personas es donde mas se dará la oportunidad de migración desde otra empresa proveedora. El desafío luego será retenerla en el servicio premium, o por lo menos

como cliente de la empresa.

Dado todos los clientes objetivo del modelo de negocio presentado, pasamos al ARPU, que en el modelo anterior se fijó en USD 5,46 basado en el informe de Telecom del último cuatrimestre de 2024. Dado que es un escenario de servicio exclusivo, el valor aumentará en un 30%, llegando así el ARPU a 7,1 USD.

También se debe calcular, en base a lo que se comentó anteriormente, cuántos usuarios serían los beneficiarios de este servicio.

Dada la falta de datos precisos respecto a los ingresos de la población, iremos calculando, de manera muy austera, con diferentes métodos.

Por el lado de la búsqueda de clientes corporativos, lo que buscamos es atraer a empresas de medios audiovisuales. Si bien éstas suelen tener lugares reservados privados, con conexión a internet, en los distintos eventos musicales como deportivos, la posibilidad de poder realizar distintas transmisiones desde adentro del campo de juego, o en medio del público, puede ser un contenido exclusivo y muy atractivo. Aquí es donde el acceso a red móvil no funciona y las redes WIFI disponibles en el establecimiento no da abasto. En este escenario aparece el 5G mmWave para seguir conectado.

Pasando a los usuarios personales, tenemos dos tipos. El primero es el que quizás menos absorción tenga, pero el espectro de población apuntada es mayor. Nos referimos al usuario personal de servicio premium. Al no tener datos precisos sobre los ingresos de la población en Buenos Aires, realizaremos cálculos estimativos con valores pesimistas para poder tener el margen de error a nuestro favor (Es decir que siendo más precisos, obtendríamos resultados mejores). Dada la población en CABA, podemos decir de forma muy austera y estimativa, que el 3% de la población tiene altos ingresos y estándares de vida. En este caso no es necesario que tengan un objetivo profesional o que sean habituales participantes de eventos masivos en estos establecimientos. Simplemente optan por el mejor servicio posible sin reparar en los

valores ni en la verdadera prestación respecto a su utilización. Aquí también entra la posibilidad de ampliación de la red, sumando plazas, estaciones terminales de transporte, o cualquier otro sitio en donde se den aglomeraciones significativas y no cuenten con obstáculos entre las antenas y los receptores.

- $5\% (3.121.707) = 124.868$  personas

Por otro lado, siguiendo a los cálculos del escenario original, un tercio de esta población sería usuario de Telecom.

- $30\% (124.868) = 41.206$  usuarios

Volvemos a mencionar que en este nuevo modelo, la competencia y la distribución de usuarios no debería mantenerse igual, ya que hasta hoy no contaría con empresas que le compitan.

Todos hemos ido alguna vez a un recital o a un evento masivo y hemos sufrido la pérdida de servicio, sea cual sea la empresa proveedora del mismo.

Este último resultado, al haber sido calculado sin demasiadas precisiones, lo contrastaremos con otros números calculados desde otro punto de origen.

El estadio Monumental cada quince días suele albergar cerca de 80.000 personas. Este público no suele tener demasiada rotación, mas si nos referimos a los que habitualmente asisten.

Por el lado del Movistar Arena, al tener una gran variedad de shows, se puede inferir fácilmente que la rotación de público es total y que la cantidad de gente que alberga a lo largo de un año será mucho mayor.

Volviendo al valor que calculamos anteriormente y redondeándolo, treinta mil usuarios son los que asistirían a dos eventos en este estadio cerrado. Teniendo en cuenta la cantidad de shows que se concretan anualmente, vemos que es un número razonable.

De todos modos, para tener un margen de error que nos permita corroborar la factibilidad del proyecto, utilizaremos el 50% del número obtenido.

- $50\% (41.206) = 20.603$  usuarios

## 6.2 Problema de continuidad y esporadicidad

En este punto se encuentra la mayor debilidad del proyecto. Para que pagar un servicio que voy a utilizar una o dos veces en el año? O cada quince días.

Por este motivo es que tenemos en cuenta al cliente corporativo como el principal objetivo para el despegue del uso de este servicio. Los clientes corporativos son los que en primer lugar podrían hacer una inversión dado que tienen asegurado el uso y por que no el usufructo.

Las empresas de radios, canales de streaming, televisión, podrían contar con transmisiones exclusivas desde los celulares de los comunicadores, y no solamente desde las cabinas de transmisión tradicionales. Esto puede provocar un gran cambio en las formas de transmitir espectáculos. Si bien estos clientes podrían acceder al servicio a través de paquetes, vamos a simplificarlo solamente teniéndolos en cuenta como usuarios comunes.

Anteriormente mencionamos la falta de competencia por parte de las empresas proveedoras, pero si existe una competitividad en cuanto a la tecnología. En estos contextos, donde el cliente accede a un servicio por un tiempo fijo determinado, ya existen soluciones de WIFI. Esta es la real competencia del 5G en mmWave en este modelo de negocio.

Aeropuertos, estaciones de trenes, lugares de gran convocatoria, suelen tener un servicio de Wifi, que a veces se puede pagar por horas o por un tiempo fijo determinado. Aun así, siguen existiendo ciertos contextos en los que ninguna tecnología da la posibilidad de conexión por saturación.

Es por esta razón que buscamos situaciones de saturación, ya que si fuese un entorno de mucha acumulación de personas, pero de manera controlada, el WIFI y su facilidad de conexión a través del pago por un tiempo limitado, seria una solución muy superior. Este es el caso de las oficinas de coworking, donde un por ejemplo una buena estructura de cableado y cobertura WIFI indoor parecería ser mas adecuado y accesible para el usuario.

## 6.3 Planes de expansión a futuro

Como ya se menciono, los dos contextos elegidos para realizar el estudio de mercado fueron elegidos por su representatividad y por ser dos puntos de gran impacto en la sociedad.

Por supuesto que este servicio podría seguir expandiéndose en plazas, estaciones de trenes u otros estadios de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, una vez comprobado que la inversión en estos primeros dos sitios dio sus frutos. Con este enfoque expansivo, es de la forma en la que se puede reducir el impacto negativo de ser un servicio esporádico.

#### 6.4 Calculo de implementación

Ahora bien, pasaremos al calculo de cuanto costaría la inversión inicial para la implementación.

La gran ventaja respecto al escenario anterior es que en este caso todos los puntos de acceso a la red son LOS. Es decir, todos los puntos son con línea de vista clara. El único punto de absorción de señal serán las mismas personas, que no se interponen en la línea de vista pero ejercen atenuación. Por otro lado, los nodos no serán de 3 antenas cada uno, ya que no será necesario cubrir los 360 grados, sino que serán mejor direccionados.

El Movistar Arena es un estadio cerrado de capacidad aproximada de 31,000 personas, con una cúpula que alcanza los 45–50 m de altura. Algunas fuentes mencionan medidas de 80 × 90 × 25 m en el envoltorio, pero las dimensiones relevantes para el despliegue de cobertura apuntan a esos valores confirmados.

Las antenas estarán direccionadas hacia abajo (tilt negativo), agrupadas de a tres por nodo en las zonas centrales del techo, y de a dos en las zonas laterales.

El diseño arquitectónico del Movistar Arena presenta un ambiente acústicamente tratado con altos niveles de insonorización, lo cual resulta favorable para la calidad del sonido en espectáculos, pero introduce un aspecto técnico relevante para el despliegue de 5G en banda milimétrica. Dado que los materiales absorbentes utilizados en las paredes y techos reducen significativamente la reflexión de las ondas mmWave, no puede aprovecharse el rebote para

extender la cobertura como ocurre en otros entornos cerrados. Por esta razón, el diseño de red debe asumir una propagación basada casi exclusivamente en línea de vista (LOS), garantizando que cada sector del público esté cubierto directamente por al menos una antena orientada con beamforming.

#### **6.4.1 Movistar Arena**

El diseño final para el despliegue de red 5G mmWave en el Movistar Arena contempla un total de 18 antenas sectoriales distribuidas estratégicamente en 10 nodos físicos dentro del recinto. El objetivo es brindar cobertura directa y de calidad a hasta 15.000 personas simultáneamente, en un entorno cerrado, sin depender de rebotes de señal.

Dado que el estadio cuenta con materiales acústicos de alta absorción para garantizar la insonorización de los eventos, las ondas milimétricas no pueden aprovechar reflexión en paredes o techo, lo que hace esencial una cobertura basada exclusivamente en línea de vista (LOS).

Los sectores de palcos y plateas VIP no se incluyen en este despliegue, ya que cuentan con infraestructura Wi-Fi exclusiva provista por el organizador del evento o el operador del recinto.

Las seis antenas del centro del techo (distribuidas en 2 nodos de 3) están orientadas hacia el campo y las plateas medias y altas, cubriendo la mayor parte del público en línea directa.

Las ocho antenas laterales (4 nodos de 2 antenas) apuntan hacia los sectores laterales del estadio, reforzando la cobertura en las plateas este y oeste.

Finalmente, cuatro antenas bajo las bandejas de plateas se instalan en zonas estratégicas para eliminar posibles sombras de señal que pudieran producirse por estructuras arquitectónicas o techos parciales.

Este esquema de despliegue se fundamenta en:

- La alta densidad de usuarios (hasta 15.000 personas conectadas simultáneamente).

- La ausencia de rebotes debido a la insonorización del recinto.
- La necesidad de ofrecer cobertura directa por sector, usando beamforming con tilt negativo.
- La eficiencia del modelo: con 18 antenas, cada una atiende 830 usuarios, manteniendo una calidad de servicio alta en throughput y latencia.

#### 6.4.2 Mas Monumental

Para el caso del estadio Monumental se propone un despliegue de red 5G en banda milimétrica orientado a brindar conectividad de alta calidad durante eventos masivos, tanto deportivos como musicales. Dado que el estadio tiene una capacidad aproximada de 84.000 personas y que se busca atender a la mayor parte del público simultáneamente —excluyendo los sectores VIP, que ya disponen de conectividad Wi-Fi propia—, el diseño se enfoca en garantizar cobertura en las zonas más críticas del recinto: plateas altas, medias, bajas y el campo de juego que albergara un gran volumen de personas durante recitales.

Las antenas mmWave no deben ubicarse con orientación de 360° ya que la ubicación perimetral impide una cobertura eficiente. Por ello, cada nodo físico ubicado en el borde del estadio se compone de 2 antenas sectoriales orientadas hacia el interior del recinto, cubriendo de forma eficiente las tribunas y el campo con tilt negativo. Esta configuración mejora el uso del haz de cobertura y reduce el desperdicio de señal hacia sectores sin público.

La distribución de nodos se organiza en función de la estructura física del estadio, priorizando la orientación de las antenas hacia el interior del recinto para maximizar la cobertura útil. En los sectores ubicados detrás de los arcos (cabeceras norte y sur), se instalarán tres nodos por cabecera, cada uno con dos antenas sectoriales, lo que da un total de seis nodos y doce antenas en esa zona. Estas antenas cubrirán de manera directa las tribunas altas, medias y

bajas detrás de los arcos.

En los laterales más largos del estadio, donde la extensión es mayor, se distribuirán cuatro nodos por lateral, también con dos antenas cada uno. Esto suma ocho nodos y dieciséis antenas destinadas a cubrir las tribunas de los laterales este y oeste. Este conjunto de nodos superiores se orientará con tilt negativo para cubrir desde el borde del estadio hacia el centro, sin dirigir señal hacia el exterior, como se haría en una instalación tradicional en calle.

Además, se replicará esta misma distribución en la bandeja baja del estadio, incorporando catorce nodos adicionales (tres detrás de cada arco y cuatro por cada lateral), nuevamente con dos antenas cada uno, totalizando veintiocho antenas más. Estas antenas apuntarán hacia el campo de juego y las primeras filas de las plateas, reforzando la cobertura en los sectores donde la señal superior podría no alcanzar por geometría o interferencia con elementos estructurales.

El total proyectado para este despliegue asciende a veinticuatro nodos físicos, cada uno compuesto por dos antenas sectoriales, alcanzando así una red de cuarenta y ocho antenas mmWave instaladas estratégicamente. Esta cantidad de antenas permite cubrir simultáneamente a unos cuarenta mil usuarios activos con buena calidad de servicio, considerando que cada antena puede sostener aproximadamente 800 usuarios concurrentes con alta demanda de datos.

Un aspecto técnico relevante que debe contemplarse en este diseño es que las antenas ubicadas en la parte superior del estadio estarán expuestas a condiciones climáticas variables. Al estar a la intemperie, las antenas quedan completamente expuestas a condiciones climáticas extremas, como vientos de alta velocidad, lluvias intensas, radiación solar directa y grandes variaciones de temperatura. En este contexto, las principales características a tener en cuenta incluyen: una carcasa con grado de protección IP66 o superior (resistente al polvo y al agua), materiales con resistencia a los rayos UV, estructura capaz de soportar ráfagas de viento de hasta 150 o 200 km/h, funcionamiento en rangos de temperatura extendidos (por ejemplo,

-40 °C a +55 °C), y sistemas de protección contra descargas eléctricas, incluyendo conexión a tierra y supresores de sobretensión.

Afortunadamente, las antenas seleccionadas para este estudio —la Huawei AAU 5213 y las unidades Nokia AirScale mmWave— ya cuentan con todas estas características incorporadas de fábrica. Ambas soluciones están diseñadas específicamente para entornos outdoor exigentes y cumplen con estándares internacionales como IEC 60529. Presentan protección IP67, apta para lluvias intensas y ambientes polvorientos; estructura robusta y aerodinámica para soportar vientos fuertes; materiales resistentes a la radiación solar y la corrosión; y sistemas integrados de descarga a tierra para prevenir daños por descargas atmosféricas. Además, operan en un amplio rango de temperaturas y han sido probadas en condiciones extremas para garantizar su confiabilidad.

Por lo tanto, desde el punto de vista ambiental y estructural, las antenas utilizadas en este proyecto están completamente preparadas para su instalación en el anillo superior del estadio, sin necesidad de incorporar protecciones adicionales más allá de un correcto montaje mecánico y eléctrico según las recomendaciones del fabricante.

## 6.5 Calculo económico-financiero

Ahora bien, debemos calcular, en base a lo calculado en el escenario residencial, cuanto costaría la inversión inicial para la implementación.

### 6.5.1 CAPEX

Elemento	Cantidad	Precio Unit	Subtotal
Nodo Nokia/Huawei	10	\$ 65.000,00	\$ 650.000,00
Licencias	10	\$ 3.500,00	\$ 35.000,00
Antena Nokia / Huawei	18	\$ 22.500,00	\$ 405.000,00
Instalación	10	\$ 60.000,00	\$ 600.000,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 1.690.000,00</b>

Figura 28: Calculo de CAPEX Movistar Arena. Fuente: Elaboración propia

ESTADIO RIVER PLATE			
Elemento	Cantidad	Precio Unit	Subtotal
Nodo Nokia/Huawei	24	\$ 65.000,00	\$ 1.560.000,00
Licencias	24	\$ 3.500,00	\$ 84.000,00
Antena Nokia / Huawei	48	\$ 22.500,00	\$ 1.080.000,00
Instalación	24	\$ 60.000,00	\$ 1.440.000,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 4.164.000,00</b>

Figura 29: Calculo de CAPEX Movistar Arena. Fuente: Elaboración propia

### 6.5.2 OPEX

Siguiendo la línea de calculo de la implementación anterior, vamos con el costo de mantención y soporte de los equipos y la red.

Al igual que en el caso residencial, lo dividimos en tres tipos.

- Mantenimiento del Hardware: 20% de inversión inicial
- Mantenimiento del Software: 10% de inversión inicial anualizada.
- Soporte administrativo y ventas: 15% de los ingresos por abono.

## 6.6 Factibilidad económica

Para poder seguir con la línea de los cálculos anteriores, realizamos un calculo de VAN y TIR, para poder hacer una comparación directa.

En este caso, las modificaciones cruciales fueron las siguientes:

- Se amplia la población potencial de clientes. Aumentamos la posibilidad enfocándonos

en toda la Ciudad de Buenos Aires. La idea es poder apalancarse del servicio que se esta brindando hoy en día, pero sumándole un buen servicio en los contextos en los que cualquier señal actual se caería.

- Aumento del ARPU. Al ser un servicio exclusivo y/o corporativo, aumentamos el ARPU para diferenciarnos del servicio actual brindado por todas las empresas.
- Disminución de la inversión inicial. Encontrando siempre espacios sin interferencias en los que la señal llegue con línea de vista, se evita la instalación de una gran cantidad de antenas y nodos. Además, el entorno esta controlado, por lo que las antenas pueden ser mejor direccionadas, mejorando la eficiencia de la red.

FLUJO DE CAJA														
CONCEPTO/ CUENTA	PERIODO DE EVALUACION													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	\$ 5.854.000,00													
<b>+ INGRESOS</b>					\$ 1.562.793,75	\$ 1.640.933,44	\$ 1.722.980,11	\$ 1.809.129,11	\$ 1.899.585,57	\$ 1.994.564,85	\$ 2.094.293,09	\$ 2.199.007,75	\$ 2.308.958,13	\$ 2.424.406,04
Abono					\$ 1.562.793,75	\$ 1.640.933,44	\$ 1.722.980,11	\$ 1.809.129,11	\$ 1.899.585,57	\$ 1.994.564,85	\$ 2.094.293,09	\$ 2.199.007,75	\$ 2.308.958,13	\$ 2.424.406,04
<b>- EGRESOS</b>														
OPEX 1: Mantenimiento HW (20%del costo de activos)														
OPEX 2: Mantenimiento SW (10%del costo de activos)														
OPEX 3: Gastos Administrativos y Ventas														
<b>UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS</b>														
<b>AMORTIZACION DEL DEL CAPITAL INICIAL</b>														
Activo 1														
<b>UTILIDAD CON AMORTIZACION</b>														
<b>-IMPUESTOS (IGG 35%)</b>														
<b>UTILIDAD FINAL</b>														

Figura 30: Calculo de VAN. Fuente: Elaboración propia

El VAN, calculado de igual manera, en este escenario nos da un panorama mucho mas positivo que el original.

**VAN = \$ 4.862.913,25**

**TIR = 0.196**

## 6.7 Análisis de resultados

En esta ocasión nos encontramos con un panorama mucho más positivo que el inicial. Entendemos que este segundo caso lo obtenemos como comparativa respecto al primero. Además, el análisis poblacional fue muy distinto y estimativo. Es por estas razones, que creemos conveniente no enfocarnos en los resultados del Valor Actual Neto, sino en la cantidad de usuarios necesarios para que el proyecto sea económicamente viable. Los resultados fueron consecuencia de realizar los cálculos correspondientes estimando una cantidad de 20.603 usuarios.

¿Esto es posible? Creemos que realmente se puede llegar a esa cantidad, teniendo en cuenta la nula competencia, y la cantidad de espectadores que anuales que tienen los eventos que el servicio estaría involucrando. Recordemos que el número utilizado no es aproximadamente la cuarta parte del aforo que tiene el estadio Mas Monumental, y que en el caso de Movistar Arena, es el público que asiste a como máximo un solo espectáculo en el lugar.

Por el lado de los clientes corporativos, no consideramos que se llegue a esta cifra solamente con este tipo de usuarios, pero si creemos que pueden ser una parte importante y los que puedan difundir la calidad y tipo de servicio exclusivo brindado. Todos hemos visto a protagonistas de los principales canales de streaming argentino en los campos de juego en los partidos de la Selección Argentina. Si bien no son muchos (En comparación con veinte mil), conectar a estos protagonistas con el departamento de marketing y publicidad para conseguir visibilidad puede ser determinante.

Por otro lado, tenemos un TIR que nos dio que la tasa de interés a utilizar para que el VAN sea igual a cero es aproximadamente de 19%. Esto también habla de la factibilidad económica del proyecto. La inversión da un retorno mucho mayor en comparación con el costo de oportunidad (Es decir, la rentabilidad que genera una inversión totalmente asegurada como plazos fijos, o bonos del tesoro de EE.UU).

## 6.8 Comparación con el servicio WIFI

En estos escenarios donde miles de usuarios se concentran por un corto período de tiempo, se plantea un desafío técnico recurrente; proveer conectividad inalámbrica de alta capacidad a un gran número de usuarios simultáneamente, durante un lapso de tiempo relativamente breve. 5G en bandas milimétricas (mmWave) y Wi-Fi (principalmente Wi-Fi 6 y Wi-Fi 6E) prometen altas velocidades, baja latencia y soporte para múltiples usuarios, pero difieren significativamente en su enfoque, arquitectura y casos de uso.

El 5G mmWave opera en frecuencias superiores a los 24 GHz, mientras que Wifi utiliza 2.4 GHz, 5 GHz y, más recientemente, 6 GHz, lo que facilita su implementación sin necesidad de espectro licenciado, pero también la expone a interferencias y a una capacidad de gestión limitada en entornos densamente poblados.

En la práctica, estas redes suelen verse rápidamente saturadas debido al número de dispositivos conectados y a la alta demanda de ancho de banda por parte de los asistentes, especialmente en momentos clave del evento. A pesar de los avances en tecnologías como OFDMA y MU-MIMO, las redes Wi-Fi continúan mostrando limitaciones para sostener una experiencia de usuario uniforme y satisfactoria en estos escenarios.

Frente a estas limitaciones, nuestro 5G mmWave representa una alternativa interesante. Al día de hoy, un desafío importante de este tipo de 5G radica en la compatibilidad de los dispositivos en uso.

Si bien el servicio específico que se pretende brindar –conectividad intensiva durante un tiempo limitado– podría parecer más alineado con el paradigma de una red Wi-Fi dedicada, en la práctica, las limitaciones de gestión, cobertura y rendimiento convierten al 5G mmWave en una opción más robusta y escalable, aunque también más costosa y dependiente de factores estructurales como la infraestructura de soporte y la cobertura 4G/5G existente.

La banda milimétrica ofrece capacidades de varios Gbps por celda, y al dividirse en sectores con antenas tipo AAU (Las utilizadas en los modelos), se logra una alta reutilización espacial y separación por haces (Beamforming).

Pero esta capacidad teórica, puede resultar limitada en el rendimiento real. En un evento con 80.000 personas (River) o 15.000 personas (Movistar Arena), aunque las antenas estén bien dimensionadas, la capacidad total puede no alcanzar si muchas conexiones coinciden en el mismo haz o sector

A veces el cuello de botella no está en el acceso, sino en el transporte o en el Core de red, especialmente si no hay una arquitectura optimizada (por ejemplo, en modo NSA dependiente del 4G).

Entonces, saturará al igual que el Wifi? La respuesta es compleja, pero a simple vista es no. El 5G mmWave resiste mejor la carga que una red Wi-Fi, por estas razones:

Está más segmentado y gestionado (por el operador).

Puede priorizar tráfico, aplicar QoS y manejar recursos de manera dinámica.

Tiene menos interferencia (por el uso de espectro licenciado y tecnología de haces).

Sin embargo, no es infalible: en los picos de demanda, puede haber degradación del servicio, aunque no una caída total como ocurre frecuentemente en Wi-Fi.

### **6.8.1 Experiencia de usuario**

Aquí tenemos la gran diferencia, que es crucial ya que a fin de cuentas el objetivo es atraer a la mayor cantidad de usuarios.

En el servicio Wifi, la experiencia de acceso es más directa y controlada por el organizador del evento. El usuario puede escanear un QR, recibir una contraseña única al comprar la entrada, o incluso usar métodos más avanzados como autenticación vía redes sociales o aplicaciones móviles del evento. Este modelo es cómodo, rápido y no requiere cambiar de hardware ni configuraciones del dispositivo.

En contraste, el acceso a redes 5G mmWave está supeditado a que el usuario tenga un dispositivo compatible y un abono activo con el operador móvil que desplegó la red. Esto genera una barrera de entrada más alta, porque:

El usuario no es cliente del operador (por ejemplo, un turista), no puede acceder al servicio.

No es práctico entregar un SIM físico en cada evento. Incluso el uso de eSIM (SIM virtual) implica un proceso de activación que no es inmediato ni transparente para usuarios masivos.

Esto contrasta con el enfoque “self-service” del Wi-Fi.

¿Existe una forma de facilitar el acceso a 5G sin chip físico? Sí, aunque aún poco

implementadas en este tipo de eventos, existen opciones como:

eSIM activadas temporalmente mediante apps o QR: algunos operadores ofrecen perfiles eSIM de corta duración, que podrían integrarse a la app del evento. Es una solución viable, pero hoy poco difundida.

Redes 5G SA privadas o neutras, donde el organizador o un proveedor neutral ofrece acceso 5G mediante acuerdos con múltiples operadores. Esta arquitectura aún está en desarrollo.

Por ahora, en términos de usabilidad y simplicidad, Wi-Fi sigue siendo más accesible y configurable para el usuario final que lo que sería un hipotético servicio de 5G mmWave para el tiempo que dure el evento específico.

¿Puede el Wi-Fi usar bandas milimétricas? Sí. De hecho, ya lo hace. El estándar Wi-Fi 802.11ad y su evolución 802.11ay operan en la banda de los 60 GHz, que es una banda milimétrica (mmWave). A diferencia del estudiado 5G mmWave, este protocolo opera en frecuencias aun mas altas, por lo que las debilidades del servicio que hemos planteado a lo largo del trabajo, son aun mayores. El alcance es extremadamente corto (menos de 10 metros), y la sensibilidad a obstáculos es extrema. Estas dos características hacen imposible su implementación en estadios y plazas. Su posible utilización se da únicamente en entornos cerrados y controlados como oficinas y salas de reuniones. También hemos visto esta posibilidad, pero hemos

concluido en la dificultad de realizar una gran inversión para un servicio que puede ser brindado por cableado y una buena planificación de una red Wifi tradicional.

## 7 Conclusiones

El presente trabajo ha abordado el análisis técnico y económico de la implementación de redes 5G en banda milimétrica, con un enfoque en la factibilidad de su despliegue en un escenario simulado en la Ciudad de Buenos Aires. A partir de las pruebas realizadas y la evaluación de estudios previos, se ha constatado que si bien las redes mmWave ofrecen velocidades de transmisión elevadas y baja latencia, también presentan desafíos significativos en cobertura y penetración de señal.

Desde el punto de vista técnico, la implementación de mmWave en 5G requiere estrategias de mitigación de atenuación y bloqueos de señal, como el uso de beamforming digital y small cells para mejorar la cobertura y capacidad. La configuración Non-Standalone (NSA), anclada a la infraestructura LTE existente, ha demostrado ser una solución viable a corto plazo, aunque la evolución hacia Standalone (SA) permitirá explotar al máximo el potencial del 5G, con menor latencia y mayor eficiencia en la asignación de recursos.

Estos métodos de transmisión y avances tecnológicos son de gran importancia, mas allá de la implementación o no de las redes en banda milimétrica en el futuro. Son técnicas que pueden servir como inspiración para nuevos avances, o también pueden ser extrapoladas para aplicarse de manera similar en otros protocolos de comunicación.

El análisis de la implementación outdoor en la zona de Belgrano reveló un resultado de pérdida económica importante. Principalmente debido al enorme costo que implica el despliegue inicial. Luego, el mantenimiento de la red, estimado dependiente de la inversión inicial, podría verse absorbido por los ingresos periodo tras periodo. La necesidad de una densificación extrema de celdas para compensar las pérdidas por propagación y absorción en el entorno urbano se traduce en un CAPEX muy elevado, que no justifica la inversión con los modelos de negocio actuales.

Nos detendremos en el último concepto mencionado anteriormente; modelos de negocio. Hoy

en día la conectividad es fundamental para cualquier persona que viva en sociedad. Temas personales, laborales, económicos y de salud se resuelven con chats, aplicaciones y entornos de internet.

A medida que han pasado los años, la tecnología avanzó para brindar más velocidad y ancho de banda a las comunicaciones, pero también los diferentes usos y aplicaciones fueron requiriendo esos avances para poder funcionar de manera óptima. Hace no muchos años ciertas actividades que requerían una mejor conexión se dejaban exclusivamente para las computadoras de escritorio o dispositivos no tan móviles, mientras que los chats y las aplicaciones livianas eran utilizadas a través de celulares. Hoy, en cambio, ya todos poseemos en el dispositivo móvil la posibilidad de realizar cualquier actividad que se requiera.

Ahora bien, estos requerimientos obligaron a la tecnología a avanzar, o fue la tecnología la que permitió nuevos usos y actividades? Que nació primero? Esta pregunta de tipo “el huevo y la gallina” sirve de disparador para entender el porqué de los resultados de factibilidad negativos.

En los cálculos de flujo anuales tuvimos en cuenta como ingresos los abonos de los usuarios. Estos, como se explicó, fluctúan entre las competencias pero siempre quedan en un rango similar. En Argentina, o más precisamente en Buenos Aires, todos conocemos a las tres grandes proveedoras de este servicio. Telecom (Personal), Claro y Movistar. Las tres empresas, unas antes que otras, decidieron dar la posibilidad de adquirir los servicios de telefonía móvil junto al servicio de Wifi y Televisión por fibra.

Ahora nos preguntamos; el usuario elige su empresa proveedora por su cobertura fuera de casa, por su servicio de internet o por lo que pueda o deje de hacer con la televisión? Por supuesto que también sigue existiendo la posibilidad de contratar los tres servicios por separado. En estos casos no habría discusión alguna y se concluiría rápidamente que quien brinde una mejor relación precio/calidad, podrá contar con más posibilidades de sumar la mayor cantidad de usuarios.

En los cálculos poblacionales referidos a la cantidad de usuarios, no se han hecho consideraciones sobre el aumento de estos gracias a la mejora del servicio dado por el 5G en nave. En el cotidiano vemos publicidad e inversión en marketing por parte de las empresas, pero siempre referidas a mejoras en el servicio del hogar (Internet + Televisión). Mientras que en la telefonía y su cobertura no se hace demasiado hincapié.

De todo esto se desprende la pregunta; quien pagaría por este servicio, si ya tiene sus necesidades de conectividad satisfechas? Con la tecnología actual, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y en el primer y segundo cordón del conurbano, podemos decir fehacientemente que en sus hogares los usuarios cuentan con una buena conectividad a internet. Esto les permite acceder a contenido en plataformas en streaming, jugar online y navegar sin problemas en cualquier red social. Por supuesto que esto tiene sus excepciones, y también las empresas que brindan el servicio cuentan con diferentes planes que brindan conectividad a distintas velocidades de transmisión y ancho de banda. Pero a lo que apuntamos con esto, es que hoy en día a la conectividad 5G en banda milimétrica le hace falta lo que se conoce como “use key”. Esa utilidad que haga del servicio una necesidad.

Supongamos que en unos años exista una forma de hacer streaming en la que la sean necesarias las velocidades alcanzadas por el 5G en nave. Si seguimos con la simulación, podemos inferir que el porcentaje de usuarios respecto al total aumentara para quien brinde este tipo de servicio. Los cálculos de factibilidad, utilizando un 50% de los usuarios totales como abonados de la empresa, nos darían un resultado completamente distinto y mucho mas esperanzador. Por supuesto que todo este escenario se sostendría siempre y cuando ningún otro competidor realice el despliegue necesario.

Por otro lado, debemos mencionar las formas que tenemos de conectarnos a Internet.

¿Cuántas veces hemos ingresado a un hogar o comercio, y luego de saludar hemos pedido la clave de Wifi? Esta situación también merece ser analizada en pos de buscar precisiones en cuanto al futuro de las comunicaciones móviles. En los experimentos realizados por Telecom

vimos las mediciones outdoor e indoor. Quizás, se puedan ver mas posibilidades de negocio en entornos indoor, o en situaciones especificas como recitales, congresos o eventos en los que la gran acumulación de usuarios pueda hacer colapsar las redes que brinden conectividad.

Si bien creemos que esta situación abre el abanico de posibilidades, es otro el modelo de negocio. Ya no estaríamos hablando de telefonía o internet móvil, sino de redes Wifi que adapten las tecnologías o los espectros de frecuencia de 5G mmWave. La experiencia en recitales, aeropuertos o estaciones de trenes de mucho transito, son evidencia suficiente para afirmar que en estos casos una mejora en el servicio seria muy bien adoptada por los usuarios, por no decir una necesidad.

Si bien al usuario puede darle lo mismo o no, las formas de conectividad son completamente distintas cuando comparamos 4G y Wifi (ambos existentes y en uso). Protocolos, tecnologías, soporte y seguridad son las variables que podemos nombrar en este trabajo, entre otras. Existe la posibilidad que el futuro de la conectividad sea un 100% a través de redes Wifi de nuevas generaciones, adoptando métodos del 5G o mismo el espectro de las mmWave.

Para cerrar este trabajo, además de ciertos interrogantes que se han podido abrir, podemos concluir realmente con que la rentabilidad de estas implementaciones dependerá de la generación de nuevos modelos de negocio basados en servicios de ultra alta velocidad y baja latencia.

## 8 Apéndice 1 - Glosario

**AAU:** Active Antenna Unit

**ASIA:** Interfaz de radio

**ABIA:** Interfaz de banda base

**ASIK:** Procesamiento de señales

**ABIL:** Interfaz de enlace

**BER:** Bit Error Rate (Tasa de Error de Bits)

**BLER:** Block Error Rate (Tasa de Error de Bloque)

**BW:** Bandwidth (Ancho de Banda)

**CA:** Carrier Aggregation (Agregación de Portadoras)

**CC:** Component Carrier (Portadora de Componente)

**CEO:** Chief Executive Officer (Director Ejecutivo)

**DL:** Downlink (Enlace Descendente)

**EIRP:** Effective Isotropic Radiated Power (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva)

**FWA:** Fixed Wireless Access (Acceso Inalámbrico Fijo)

**GHz:** Gigahertz

**ICMP:** Internet Control Message Protocol

**IoT:** Internet of Things (Internet de las Cosas)

**L1:** Layer 1 (Capa 1)

**LTE:** Long-Term Evolution (Evolución a Largo Plazo)

**LOS:** Line of Sight (Línea de Vista)

**MCS:** Modulation and Coding Scheme (Esquema de Modulación y Codificación)

**MIMO:** Multiple Input Multiple Output (Múltiple Entrada Múltiple Salida)

**MNC:** Mobile Network Code

**mmWave:** Millimeter Wave (Onda Milimétrica)

**NR:** New Radio

**NSA:** Non-Standalone (No Autónomo)

**PDCP:** Protocol Data Convergence Protocol

**PRB:** Physical Resource Block (Bloque de Recursos Físicos)

**QAM:** Quadrature Amplitude Modulation (Modulación por Amplitud en Cuadratura)

**RSRP:** Reference Signal Received Power (Potencia de Señal Recibida de Referencia)

**RSRQ:** Reference Signal Received Quality (Calidad de Señal Recibida de Referencia)

**RTT:** Round Trip Time (Tiempo de Ida y Vuelta)

**SA:** Standalone (Autónomo)

**SCG:** Secondary Cell Group (Grupo de Celdas Secundarias)

**SINR:** Signal-to-Interference plus Noise Ratio (Relación Señal a Interferencia más Ruido)

**TCP:** Transmission Control Protocol (Protocolo de Control de Transmisión)

**TDD:** Time Division Duplex (Dúplex por División de Tiempo)

**UDP:** User Datagram Protocol

**UE:** User Equipment (Equipo de Usuario)

**UL:** Uplink (Enlace Ascendente)

**VAN:** Valor Actual Neto

**TIR:** Tasa Interna de Retorno

## 9 Apéndice 2 – Datos de equipamiento

**HAAU5323** de Huawei utilizado como referencia para el diseño de la red 5G en banda milimétrica.

Características principales:

- Nombre comercial: HAAU5323
- Tipo: Unidad de Antena Activa (AAU)
- Integración: Antena + unidad de radiofrecuencia (RF)
- Tecnología soportada: 5G NR
- Frecuencias: Compatible con bandas de onda milimétrica (según versión del equipo)
- Estructura: Array de 1024 elementos, configuración 16x32x2
- Procesamiento físico (L1): Soporta eCPRI, modulación I/Q, mapeo de canales, y pesaje digital

Conectividad:

- puertos CPRI (25.78125 Gbit/s)
- Conectores de alimentación de 48 V DC
- Puerto AUX para sensor de información de antena
- Módulos ópticos: Compatibilidad con módulos SFP BIDI y dúplex, con velocidades de hasta 25G
- Alimentación: Requiere cableado DC blindado (-48 V), con una distancia máxima recomendada de 100 m
- Peso, dimensiones y condiciones ambientales: Según la documentación técnica proporcionada por el fabricante (ver documento adjunto)

Documentación de referencia:

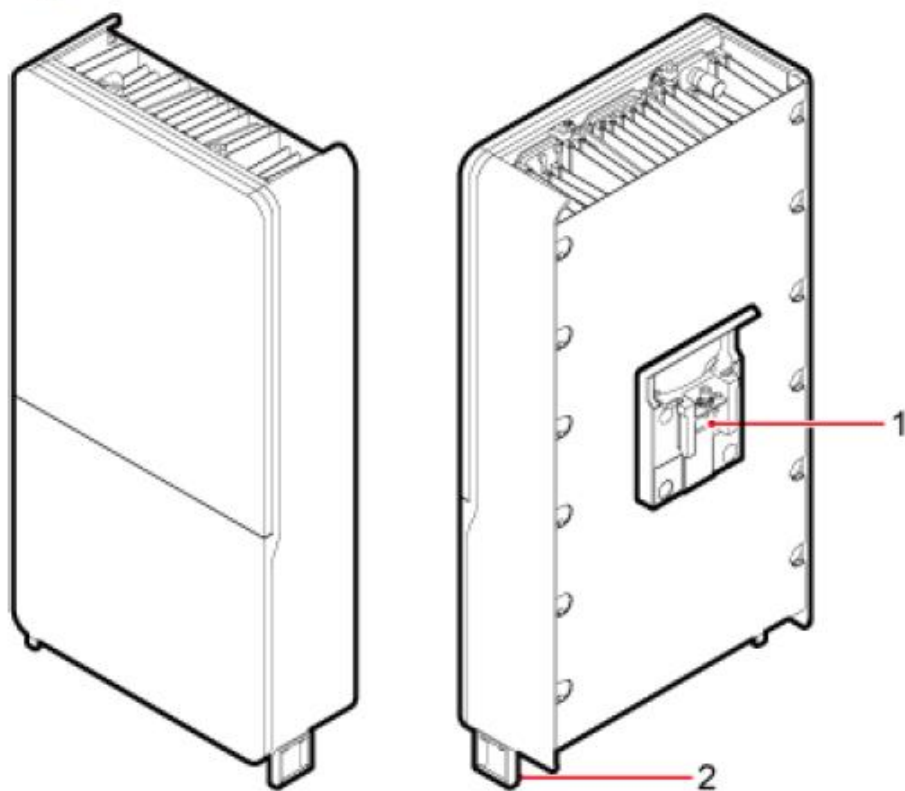
- Huawei Technologies Co., Ltd. (2024). HAAU5323 Hardware Description (Issue 06).
- Huawei Technologies Co., Ltd. (2024). HAAU5323 Technical Specifications (Draft A).

## 1.2.1 AAU Exterior

This section describes the AAU exterior.

**Figure 1-1** shows the AAU exterior.

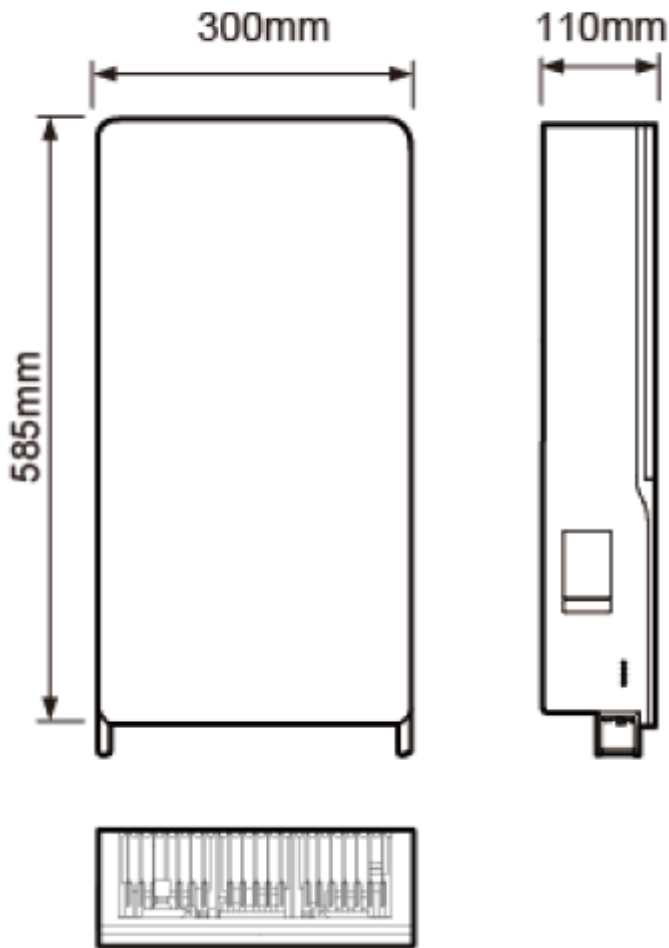
**Figure 1-1** AAU exterior



PAU45C0001

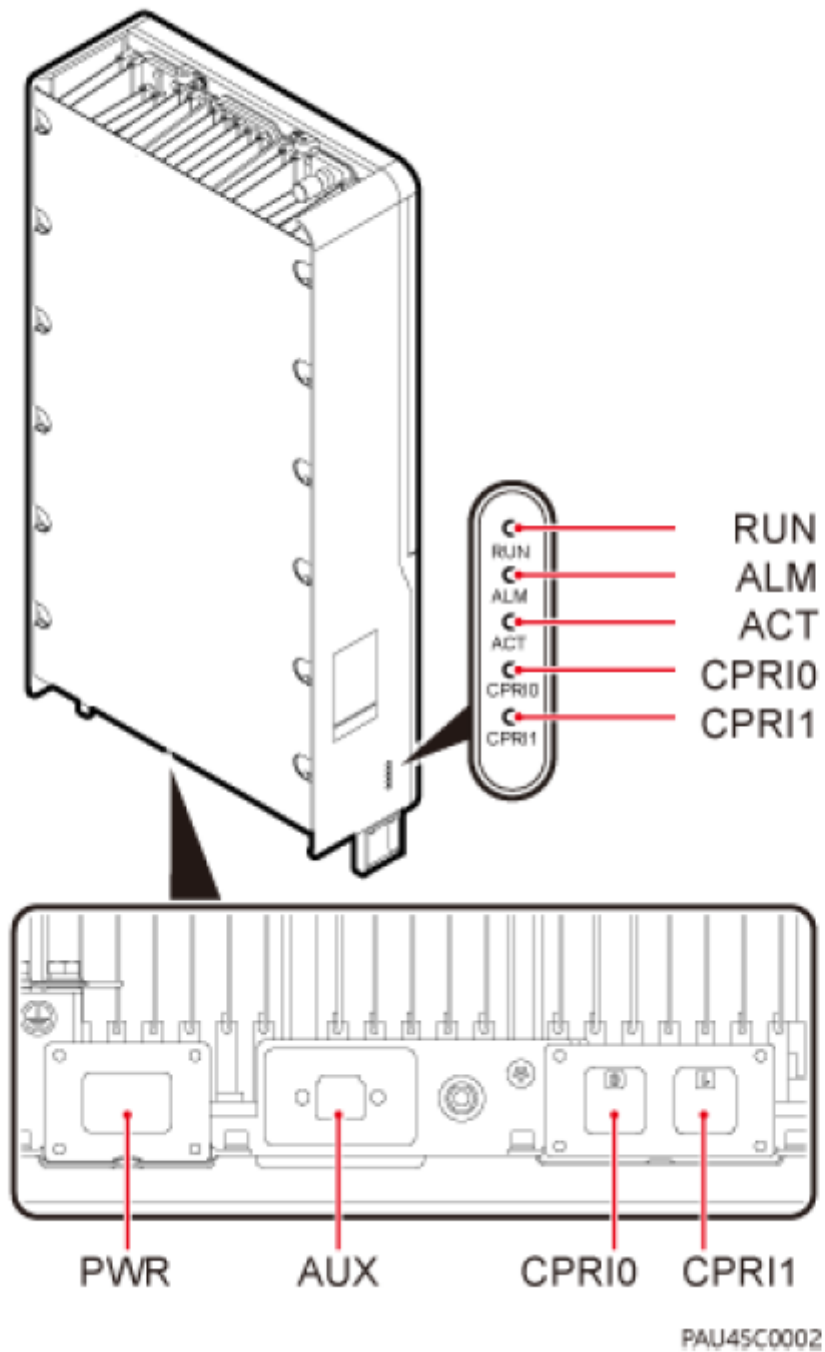
Figure 1-2 shows the AAU dimensions.

Figure 1-2 AAU dimensions



PAU45C0010

**Figure 1-4** Physical ports and indicators



### **Nokia Airscale**

Datos principales (extraídos del datasheet):

- Frecuencia: 26.5–29.5 GHz (banda n257)
- Ancho de banda instantáneo/ocupado: 800 MHz
- Portadoras: hasta 8 de 100 MHz cada una

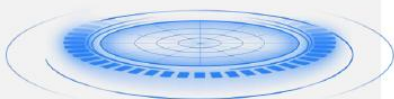
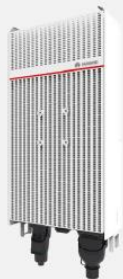
- Modulación: hasta 64 QAM en enlace descendente y ascendente
- Arquitectura: 2 transmisores y 2 receptores (2T2R)
- Haces/MIMO: 2 haces (H y V) con beamforming analógico
- Potencia irradiada (EIRP): típico 54 dBm (hasta 60 dBm con ventilador AFMA)
- Protección ambiental: IP65, con rango operativo de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+55^{\circ}\text{C}$
- Peso y volumen:  $\sim 22\text{ kg}$  y  $\sim 23\text{ litros}$  ( $\approx 24\text{ kg}/25,5\text{ l}$  con ventilador)
- Enfriamiento por convección natural, alimentación AC, y beam width: 8 dB ( $120^{\circ}$  sector), 3 dB ( $90^{\circ}$  HPBW).

## Trial Information

NPU055 | NUNITP | Unicenter

### NPU055 | NUNITP | Unicenter

Region: AMBA  
 Department: Capital Federal  
 Location: -34.5105170 -58.5275910  
 GNB Name: NUNITP\_1  
 Sector: 2  
 Band: N258 mmWave  
 Duplex Mode: TDD  
 Frequency: 26Ghz  
 Antenna Type: HAAU5323  
 Antenna Height: 46m  
 Azimuth:  $140^{\circ}$   
 Mechanical Tilt:  $0^{\circ}$   
 Electrical Tilt:  $4^{\circ}$



### Antenna Installation and Location

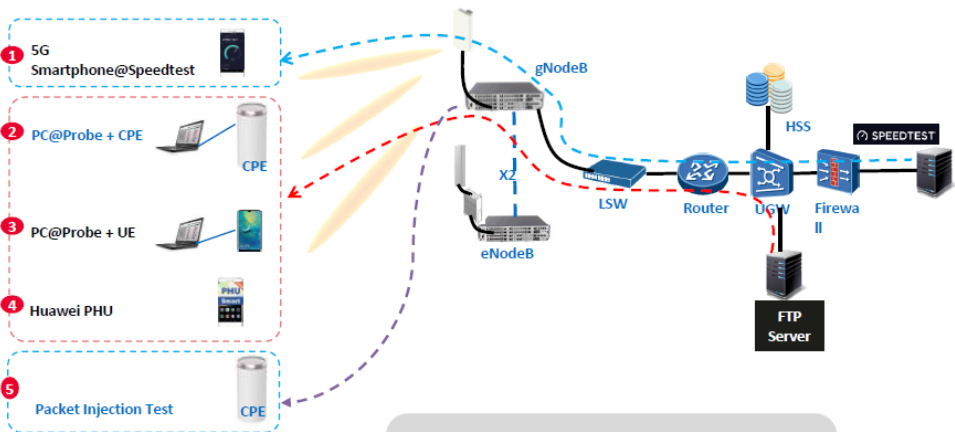


# Maximum User Throughput Calculation

Parameter	5G NR DL	5G NR UL
Frequency Band	26GHz	26GHz
Duplex mode	TDD	TDD
DL/UL Ratio	DDDSU (4:1)	DDDSU (4:1)
Special Sub-frame configuration	10:2:2	10:2:2
Channel bandwidth	200MHz	200MHz
BS antenna	4T4R	4T4R
UE antenna	2R	2R
Modulation Mode	64QAM	64QAM
SCS(Sub Carrier Space)	120KHz	120KHz
Total RB number	132	132
Slot length (ms)	0.125	0.125
Sub frame lenth(ms)	1	1
OFDM symbol number per slot	14	14
Slot number per Sub frame	8	8
Sub-carrier number per RB	12	12
Total REs Per slot (Includes overhead)	177408	177408
Coding rate	0.925	0.925
Bits for modulation order	6	6
Layers	2	2
slot ratio	DL: 74.29%	UL: 20%
Effective REs per slot	131788.8	35481.6
Bits per slot	1462855.68	393846.76
Overhead	28%	44%
UE Peak throughput(Mbit/s)	1053.26	220.55

- ✓ Overhead is related to version configuration and product implementation. In the current version, the **commercial using recommended DL Overhead value** is 28%, **UL Overhead value** is 44%.
- ✓ The maximum DL theoretical throughput with a 200Mhz mmWave cell is **1053Mbps**.
- ✓ The maximum UL theoretical throughput with a 200Mhz mmWave cell is **220Mbps**.

# 5G Peak Rate Test Solutions



**Type of Tests Used for the Trial**

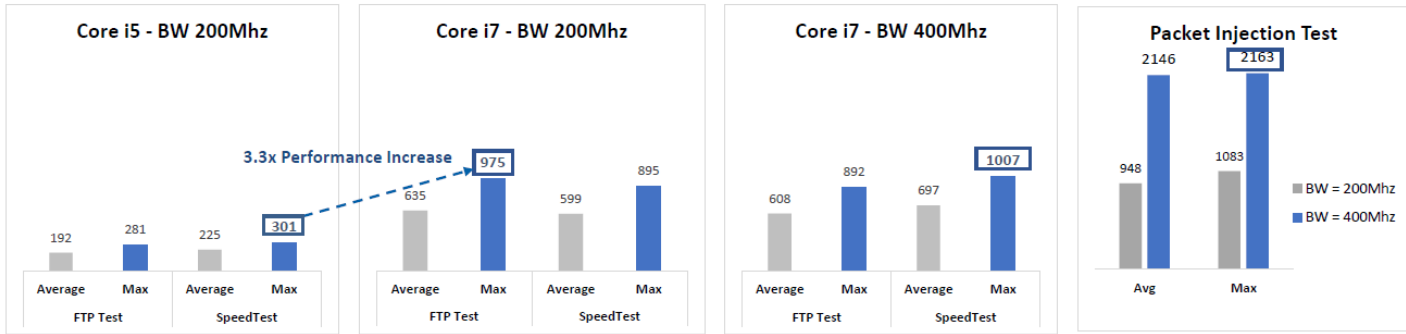
- ✓ PC@Probe + CPE ( FTP & Speed Tests)
- ✓ Packet Injection

- (1) 5G smartphone @ Speedtest App + Speedtest OKLA server**  
**Advantage**
  - Multiple terminals are available
  - The test is flexible and easy to demonstrate**Disadvantage**
  - Air interface signals and other key counters cannot be monitored
- (2&3) Huawei test software + Computer + CPE + intranet FTP server**  
**Advantage**
  - Monitors key information such as air interface signals and resource scheduling in real time.
  - In the early stage of network construction, when commercial mobile phones are unavailable, use computers and CPEs to verify the end-to-end rate.**Disadvantage**
  - Limited by the CPE network adapter rate(1Gbps) and computer hard disk read/write speed(300-1000Mbps)
- (4) Huawei PHU + intranet FTP server**  
**Advantage**
  - Monitors key information such as air interface signals and resource scheduling in real time.
  - The PHU test is also flexible and convenient.**Disadvantage**
  - Test terminals are limited to Huawei mainstream smart terminals and CPEs.
- (5) Packet Injection Test**  
**Advantage**
  - Verify that the air interface scheduling performance is normal by constructing padding packets at the MAC layer on the gNodeB side
  - Performance of the cell and UE can be evaluated**Disadvantage**
  - The test is performed only for first initial stage in no commercial cells

# mmWave | User Performance

## Different Measurement Equipment

- The expected Downlink User Throughput for 200MHz in mmWave band is **1053Mbps**. However the maximum throughput reached on tests may be limited by the laptop used and the features of its components. To analyze this point, tests were performed with two different laptop: one of them with new features as **Core i7 16GBRAM** and the other one with old features **Core i5 4GBRAM**.
- For a bandwidth of 200MHz, a maximum DL Throughput of **301Mbps** can be reached with a laptop **Core i5**, but with a laptop **Core i7** a maximum of **975Mbps** DL Throughput can be reached.
- For a bandwidth of 400MHz, a maximum DL Throughput of **1007Mbps** can be reached with a laptop **Core i7**.
- With a Packet Injection Tests, the cell capacity of the cell can be tested without taking into consideration others factor that can limit the maximum throughput. For a bandwidth of 200MHz a maximum of **1083Mbps** was reached. For a bandwidth of 400MHz a maximum of **2163Mbps** was reached.
- In conclusion, for mmWave+CPE Tests it is suggested to use a laptop with new features to avoid performance limitations. Packet Injection Tests are recommended to ensure that the peak throughput is reached at Air Interface between mmWave cell and UE, without considering upper layers like IP/TCP/FTP/APP.



## Indoor Results

### NPU055 | NUNITP | Unicenter

- On Unicenter trial, was analyzed the user experience in indoor scenarios. Not only the experience related to user throughput but also to coverage.
- A **5G mmWave** test with Huawei CPE Win Model was performed at Telecom Building (Optima). The test was performed by floor, including CEO Office at floor 6.
- A **2053Mbps** User Throughput peak was reached for NR Downlink tests (Packet Injection Test)
- For NR UL User Throughput tests, a **112Mbps** peak was reached with packet injection.
- Different points were tested into the building with different coverage values. When the RSRP drops to -114dbm the DL User Throughput decreases **57%**.
- There were some point at the back of the building with no mmWave coverage.
- In mmWave FWA commercial using scenarios, it is recommended that UEs be deployed on the LOS path and faced to AAUs.**

Near Point to the cell



Medium Point to the cell



### mmWave Summary Results

Packet Injection Downlink

Floor	Thrp (Mbps)	RSRP (dBm)	SINR (dB)	Point
Floor 1	1888	-88.9	22.19	Near Point
Floor 1	1638	-93.65	20.57	Medium Point
Floor 1	1058	-100.83	17.73	Far Point
Floor 2	1431	-95.98	22.01	
Floor 3	1235	-101.11	17.79	
Floor 3	828	-112.64	6.17	
Floor 4	1534	-100.1	20.67	
Floor 5	1954	-96.21	22.97	
Floor 6	2053	-84.56	25.13	

Packet Injection Uplink

Floor	UL Thrp (Mbps)	RSRP (dBm)	SINR (dB)	Point
Floor 1	92	-94.99	21.44	Near Point
Floor 1	99	-96	21.29	Medium Point
Floor 1	25	-100.61	17.79	Far Point
Floor 2	33	-105.06	19.88	
Floor 3	41	-102.36	21.56	
Floor 3	9	-112.26	6.06	
Floor 4	55	-102.15	20.69	
Floor 5	87	-95.35	24.18	
Floor 6	112	-83.78	29.39	



# Bibliografía

## Bibliografía impresa

- Weinschenk, S. M. (2009). Neuro Web Design: What Makes Them Click? New Riders.
- 

## Bibliografía en línea

- Ente Nacional de Comunicaciones (ENACOM). (s. f.). Postas de asignación de bandas por operador. <https://www.enacom.gob.ar/cuadro-de-atribucion-de-bandas-de-frecuencias-de-la-republica-argentina-cabfra-p1588>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
- Ericsson. (2024). 5G in stadiums – Case study. <https://www.ericsson.com/en/small-cells/stadium>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
- GSMA. (2022). The Mobile Economy Latin America 2022. [https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2022/11/GSMA\\_LATAM\\_ME2022\\_R\\_Web.pdf](https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2022/11/GSMA_LATAM_ME2022_R_Web.pdf). Recuperado el 21 de junio de 2025.
- GSMA. (2022). 5G mmWave Deployment Best Practices (White Paper). <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2022/10/GSMA-5G-mmWave-Deployment-Best-Practices-White-Paper-Nov-2022.pdf>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
- Huawei. (2022). AAU 5213 Specification Sheet. <https://carrier.huawei.com/en/products/wireless/5g/aau5213>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
- Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. (2024). *Ingresos en la Ciudad de Buenos Aires – Informe trimestral*. [https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wp-content/uploads/2024/12/ir\\_2024\\_1912.pdf](https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wp-content/uploads/2024/12/ir_2024_1912.pdf). Recuperado el 21 de junio de 2025.
- La Nación. (2022, julio 15). Telecom realiza pruebas exitosas de 5G en Rosario. <https://www.lanacion.com.ar/negocios/telecom-5g-rosario>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
- Ministerio de Economía, Argentina. (2023). Datos de PBI por actividad económica. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informededeactividadprimertrimestredelano2023.p>

- [df](#). Recuperado el 21 de junio de 2025.
- Nokia. (2022). *AirScale Massive MIMO AAU Product Description*. <https://www.nokia.com/mobile-networks/ran/macro/micro-rrh/>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
  - Omdia. (2023). *Global 5G Market Report*. <https://omdia.tech/5g-market-report-2023.pdf>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
  - OpenSignal. (2024). *5G Deployment and Experience in Argentina*. <https://www.opensignal.com/argentina>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
  - Telefónica. (2023, 1 junio). *Movistar Arena se convierte en escenario de pruebas con tecnología 5G SA y ondas milimétricas*. <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/movistar-arena-se-convierte-escenario-pruebas-tecnologia-5g-sa-ondas-milimetricas/>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
  - Telefónica. (2023). *Telefónica avanza con su red 5G en Argentina*. <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/telefonica-5g-argentina/>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
  - UADE. (s. f.). *Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones*. <https://www.uade.edu.ar/facultad-de-ingenieria-y-ciencias-exactas/ingenieria-en-telecomunicaciones>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
  - Página oficial de cobertura de Personal. (s. f.). *Mapa de cobertura LTE y 5G*. <https://www.personal.com.ar/servicio/mapa-cobertura>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
  - Telefónica. (2023, junio 1). *Movistar Arena se convierte en escenario de pruebas con tecnología 5G SA y ondas milimétricas*. <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/movistar-arena-se-convierte-escenario-pruebas-tecnologia-5g-sa-ondas-milimetricas/>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
  - Think Big. (2023, marzo 28). *¿Fútbol y 5G? El estadio del futuro ya es una realidad*. <https://blogthinkbig.com/futbol-5g-estadio-de-futbol>. Recuperado el 21 de junio de 2025.
  - Nokia Corporation. (2021). *AirScale 5G Radio Description*. Recuperado de <https://www.1com.net/wp-content/uploads/2021/05/Nokia-airscale-5G-radio-description->

[datasheet-5g.pdf](#).

- Nokia Corporation. (2024, febrero 22). Nokia launches new 5G mmWave receiver to add capacity to fixed wireless access networks [Comunicado de prensa]. Recuperado de <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2024/02/22/nokia-launches-new-5g-mmwave-receiver-to-add-capacity-to-fixed-wireless-access-networks>.
- Analog Devices. (s.f.). *Phased Array Beamforming ICs Simplify Antenna Design*. Analog Dialogue. Recuperado el 29 de junio de 2025, de <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/phased-array-beamforming-ics-simplify-antenna-design.html>.
- Clark, M. (s.f.). *Python & SDR: Digital Modulation*. PySDR. Recuperado el 29 de junio de 2025, de [https://pysdr.org/es/content-es/digital\\_modulation.html](https://pysdr.org/es/content-es/digital_modulation.html).
- CellMapper. (s.f.). *CellMapper Project*. Recuperado el 29 de junio de 2025, de <http://cellmpaper.com>.
- Nokia Corporation. (2021). *Nokia AirScale 5G Radio Description* [PDF]. Recuperado el 29 de junio de 2025, de <https://www.1com.net/wp-content/uploads/2021/05/Nokia-airscale-5G-radio-description-datasheet-5g.pdf>.
- Agencia Nacional del Espectro (ANE). (s.f.). *¿Qué es el espectro radioeléctrico?* [https://portalespectro.ane.gov.co/Style%20Library/ane\\_master/que-es-el-espectro-radioelectrico.aspx](https://portalespectro.ane.gov.co/Style%20Library/ane_master/que-es-el-espectro-radioelectrico.aspx).
- PySDR. (s.f.). *Modulación digital*. [https://pysdr.org/es/content-es/digital\\_modulation.html](https://pysdr.org/es/content-es/digital_modulation.html).
- TeleSemana. (s.f.). *Cuotas de mercado de operadores móviles en Argentina*. Recuperado el [fecha de acceso], de <https://www.telesemana.com/>

---

## Documentación interna y no web

- Telecom Argentina. (2022). Informe de pruebas de red 5G mmWave – Rosario y Unicenter. Documento interno.
- Huawei Technologies Co., Ltd. (2024). *HAAU5323 Hardware Description (Issue 06)*. Documento

interno.

- Huawei Technologies Co., Ltd. (2024). *HAAU5323 Technical Specifications (Draft A)*.  
Documento interno.